



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Daniel Alexandre Leite Costa

Projeto e Fabrico de um Protótipo para Soldadura por Ultrassons

julho de 2024



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Daniel Alexandre Leite Costa

Projeto e Fabrico de um Protótipo para Soldadura por Ultrassons

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Hélder Puga

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A realização do presente trabalho não seria possível sem o apoio de todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente no desenrolar do mesmo, assim como de todo o meu percurso académico.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, pelos meios e condições necessárias ao desenvolvimento, fabrico e validação experimental do protótipo.

Ao Professor orientador Hélder Puga, pela oportunidade conferida e pela partilha de conhecimento nas várias áreas da engenharia mecânica, em especial no que toca à aplicação dos ultrassons na indústria.

Ao Engenheiro Paulo Araújo, pela colaboração ao longo de todo o projeto e fabrico do equipamento.

À Engenheira Inês Gomes e ao Engenheiro José Grilo pelo auxílio prestado em ambiente laboratorial, quer no manuseamento de equipamentos quer pela partilha das técnicas usuais.

Por último, às pessoas que mais me são importantes e que sempre se mostraram presentes nos períodos bons e menos bons desta jornada. Aos meus pais que sempre me apoiaram em todas as decisões e me forneceram os meios para a concretização dos meus sonhos. Pela transmissão dos seus valores e por expressarem o verdadeiro significado de amor paternal. Por último, e não menos importante, por partilharem comigo o gosto pela procura de conhecimento nas mais variadas áreas, que por sua vez me encaminhou até ao final desta etapa.

Aos meus amigos Bruno, Alice e Dantas que sempre acreditaram em mim em cada atividade e desafio e me motivaram a querer ser melhor em tudo o que decidi seguir. Por tornarem cada momento que teria tudo para ser insignificante numa ocasião especial, e com razões para ser relembrado, e por me ajudarem a separar a pressão da vida académica da vida pessoal.

Ao meu amigo Miguel que esteve presente ao longo destes cinco anos, e com quem tive o prazer de partilhar todo o percurso, de superar as dificuldades e de celebrar as conquistas.

Finalmente, a TODOS os meus amigos e parceiros de treino por me entenderem e ajudarem a conciliar a parte desportiva com a académica, sem que nenhuma tivesse de ser posta de lado. Por terem sido o único apoio capaz de me erguer durante o último ano e por serem as pessoas com quem vivi muitos dos momentos mais especiais, que jamais serão esquecidos, e pelas quais me aproximei de forma eterna.

A todos os acima mencionados, um Muito Obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A forte ascensão da mobilidade elétrica resulta numa maior necessidade de fabrico de baterias e componentes associados às mesmas, assim como o aumento da eficiência dos processos industriais que lhes dão origem. A soldadura por ultrassons de materiais metálicos tem vindo a solucionar muitas dificuldades sentidas na união de materiais condutores, para além de contribuir para o cumprimento das métricas relativas à sustentabilidade, uma vez que, comparativamente aos processos de soldadura convencionais, tem um consumo energético muito inferior. Desta forma, a tecnologia em causa tem sido foco de um contínuo desenvolvimento, de modo a acompanhar as necessidades da indústria.

Este trabalho expõe o projeto de desenvolvimento e fabrico de um equipamento de soldadura por ultrassons de materiais metálicos, tendo como principal objetivo solucionar algumas das adversidades encontradas em modelos atualmente utilizados e consequentemente melhorar a eficácia do seu funcionamento, assim como comprovar a possibilidade de obtenção de um equipamento totalmente funcional e de estrutura e mecanismo relativamente simples.

O tema central do projeto foi antecedido pelo estudo teórico e analítico do processo de soldadura por ultrassons e pela caracterização do seu mecanismo de união dos materiais metálicos. O protótipo partiu do estudo de uma versão anteriormente concebida, mas não validada e com aspetos construtivos por corrigir. Após a caracterização desse equipamento, foram executados testes experimentais com vários parâmetros de soldadura, seguidos de ensaios de tração, de forma a verificar a soldadura efetiva dos materiais e avaliar a resistência da união e o mecanismo de separação. Foram também observadas por microscopia cada uma das configurações de material soldadas com as diferentes condições acima descritas, de modo a apurar a natureza da união e possíveis modificações na microestrutura ao longo da mesma.

Os testes experimentais permitiram validar o protótipo original e avançar assim com o processo iterativo de melhoria dos principais aspetos a otimizar, começando pelo apuramento e compreensão das falhas de maior impacto.

Em simultâneo com a seleção das soluções mais favoráveis para cada um desses pontos, foi realizado o projeto para o fabrico da configuração final alcançada do equipamento.

PALAVRAS-CHAVE

SOLDADURA POR ULTRASSONS; ULTRASSONS; SOLDADURA DE METAIS; SOLDADURA EM ESTADO SÓLIDO; PROJETO

MECÂNICO

ABSTRACT

The strong rise of electric mobility outcomes in a greater need to manufacture batteries and components related to them, as well as an increase in the efficiency of industrial processes from which they are produced. Ultrasonic welding of metals has been overtaking some restrictions related with the joining of highly conductive materials and has been helping to fulfill the sustainability goals and rules imposed continuously, since its energy consumption is several times lower than the conventional welding technologies. This way, ultrasonic welding has been the subject of constant development, in order to keep up with the industry demands.

This thesis presents the development and manufacturing of an ultrasonic welding equipment to joint metals, with the main goal of solving some of the flaws/obstacles found on currently used machines and thereafter to increase the efficiency and performance of those models.

The main topic of this dissertation was preceded by the theoretical and analytical study of the ultrasonic welding process and the characterization of the corresponding metal joining mechanism. The prototype began with the study and analysis of an earlier designed and semi-built equipment that has not been tested or validated and with some structural features to redesign. After the description of the later model, some welding trials have been executed, followed by tensile tests to verify the effectiveness of the joining of the materials and to evaluate its bond strength and the separation mechanism. Each of the material configurations welded under the different conditions described above was also observed by microscopy, in order to determine the nature of the bonding interface and potential modifications in the microstructure along the same.

The experimental tests allowed the validation of the original prototype and thus to proceed with the iterative process to improve the main aspects to be optimized, beginning with a review and understanding of the primary defects.

Simultaneously with the selection of the most favorable solutions for each of these points, the design for manufacturing of the final achieved configuration of the equipment was carried out.

KEYWORDS

ULTRASONIC WELDING; ULTRASOUNDS; METAL WELDING; SOLID-STATE WELDING; MECHANICAL DESIGN

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
1. Introdução	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Motivação.....	2
1.4. Estrutura	3
2. Tecnologia de ultrassons	5
2.1. Conceito e Antecedentes.....	5
2.2. Do fenómeno físico à sua aplicação efetiva.....	7
2.3. Aplicação dos ultrassons na indústria.....	10
3. Tecnologia ultrassónica para soldadura de materiais metálicos	13
3.1. Conceito.....	13
3.2. Soldadura de Metais vs Soldadura de Polímeros.....	21
3.3. Gama de Materiais e Considerações.....	23
4. Análise e proposta do protótipo existente	27
4.1. Considerações e definição de especificações do equipamento	27
4.2. Estudo e validação do protótipo existente	29
4.2.1. Mecanismo e Design	29
4.2.2. Fabrico.....	35

4.2.3.	Sistema elétrico.....	36
4.2.4.	Montagem.....	39
4.2.5.	Modo de funcionamento	41
4.2.6.	Software de controlo do equipamento	42
4.2.7.	Definição dos valores máximos de força e pressão de soldadura	43
4.2.8.	Análise de Funcionamento e Testes experimentais	47
4.2.8.1.	Testes de soldadura.....	47
4.2.8.2.	Análise da união por microscopia.....	52
4.2.8.3.	Ensaio de Avaliação da Resistência da União	60
4.2.8.4.	Análise da microestrutura e mecanismo de união.....	67
4.3.	Problemas do protótipo	70
4.4.	Soluções conceptuais para os problemas encontrados	77
4.4.1.	Flanges	77
4.4.1.1.	Tipologias de flanges e solução final.....	77
4.4.1.2.	Análise numérica do comportamento das flanges	83
4.4.2.	Parte estrutural	90
5.	Conclusão e trabalhos futuros	98
5.1.	Conclusão	98
5.2.	Trabalhos Futuros.....	99
	Anexos	101
	Anexo A: Modo de funcionamento e procedimento de utilização do protótipo inicial	103
	Anexo B: Interface Gráfica do programa de controlo do equipamento.....	105
	Anexo C: Condições de soldadura das amostras a utilizar nos ensaios de tração	106
	Anexo D: Condições de soldadura das amostras para análise de microestrutura	107
	Anexo E: Gráficos Força-Extensão dos provetes submetidos aos ensaios de tração.....	108
	Anexo E: Gráficos Força-Extensão dos provetes submetidos aos ensaios de tração.....	109
	Anexo F: Atravancamento e Dimensões gerais da Configuração final do equipamento.....	110
	Referências Bibliográficas	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Espetro de frequências sonoras.	5
Figura 2 – Representação do efeito piezoelétrico a) direto e b) inverso.....	6
Figura 3 – Exemplos de <i>boosters</i> de diferentes relações de transmissão para soldadura por ultrassons, do fornecedor Branson..	8
Figura 4 – Representação da variação da amplitude ao longo do comprimento do booster (1HWL) para uma razão de transmissão superior a 1.	9
Figura 5 – Representação da conversão de corrente elétrica em oscilações acústicas num sistema de soldadura por ultrassons.	10
Figura 6 – Vários mecanismos de união visíveis numa interface de duas ligas de alumínio soldadas por ultrassons, em diferentes condições: zonas de deslizamento e microunião, deformação plástica severa e existência de “swirls”.	14
Figura 7 – Evolução do processo de soldadura por ultrassons de um par de folhas de liga Al6111 com 1 mm de espessura.....	16
Figura 8 – Representação da zona de maior concentração de tensões nas chapas, causada pela aresta da ferramenta: a) vista de frente e b) vista de topo.	18
Figura 9 – Diferentes tipos de variação induzida da amplitude de soldadura ao longo do tempo de ciclo: (i) linear;(ii) exponencial;(iii) escalonada.	19
Figura 10 – Exemplos de componentes metálicos (a) e poliméricos (b) soldados por ultrassons.	21
Figura 11 – Principais diferenças entre os processos de soldadura por ultrassons de polímeros e metais	23
Figura 12 – Exemplos de materiais e componentes metálicos soldados por ultrassons: a) barramento elétrico de fios e olhal, b) folhas de cobre/alumínio e c) tubagens.	24
Figura 13 – Sistemas de fixação de fios elétricos em equipamentos de soldadura por ultrassons.	25
Figura 14 – Exemplos de equipamentos de soldadura por ultrassons de metais presentes na indústria	27
Figura 15 – Modelo CAD do Protótipo alvo de estudo.	30
Figura 16 – Servo motor WECON WD60M-04030S-A1G.	31
Figura 17 – Fins de curso: a) físico e b) e c) indutivos.	31
Figura 18 – a) Junta de rotação GMT FACCS46 e b) chumaceira com flange quadrada HIWIN FK17.	32
Figura 19 – Estrutura Móvel do protótipo inicial.	32

Figura 20 – Detalhes geométricos tidos em conta para a montagem da estrutura do equipamento. ...	33
Figura 21 – Radiador acústico/ <i>Sonotrode</i>	33
Figura 22 – a) célula de carga e b) batente de soldadura em aço AISI 316L, com reentrâncias piramidais.	34
Figura 23 – Geometria das flanges do protótipo inicial.	34
Figura 24 – Componentes fabricados por corte a laser.	35
Figura 25 – a) carcaça do equipamento e b) flange maquinada.	36
Figura 26 – a) Gerador de ultrassons Sonoweld 2000. e b) Drive do servo motor, marca WECON, modelo VD2-010SA1G.	37
Figura 27 – Parte da interface gráfica de controlo do equipamento.	37
Figura 28 – a) Painel Frontal, b) <i>Branchboard</i> e c) Microcontrolador do equipamento.	38
Figura 29 – Esquema de ligação e comunicação da parte elétrica do equipamento.	39
Figura 30 – Vista explodida e respetiva legenda do protótipo inicial.	40
Figura 31 – Protótipo inicial após montagem.	41
Figura 32 – Dimensões das diferentes superfícies de soldadura da ferramenta.	44
Figura 33 – Interface gráfica do software de monitorização do servomotor.	46
Figura 34 – Relação entre os valores medidos pela célula de carga e pelo servomotor e os respetivos níveis de carga.	46
Figura 35 – Folha de cobre com rompimento total nas zonas de contacto com as reentrâncias do batente inicial.	48
Figura 36 – Setup utilizado para os ensaios iniciais.	49
Figura 37 – Testes de soldadura executados para o par alumínio/cobre.	49
Figura 38 – Fases do ciclo de soldadura.	50
Figura 39 – Diferentes configurações de folhas de cobre, soldadas com várias forças de atuação.	52
Figura 40 – Corte de uma amostra para posterior observação da secção soldada.	52
Figura 41 – Setup de preparação da resina acrílica para fixação de amostras.	53
Figura 42 – Posicionamento de amostras no molde de resina.	53
Figura 43 – Amostras após serem removidas do molde.	53
Figura 44 – a) equipamento de polimento PRESI MINITECH 250 SP1 e b) superfície de duas amostras após polimento.	54
Figura 45 – Vista seccionada da folha de cobre utilizada para análise, ampliação de 10x.	55

Figura 46 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 4 de força de soldadura, ampliação de 5x.	56
Figura 47 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 5x.	56
Figura 48 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 10x e 20x.	56
Figura 49 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x.	57
Figura 50 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 10x e 20x.	57
Figura 51 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x.	57
Figura 52 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 10x e 20x.	57
Figura 53 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 3 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.	58
Figura 54 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 3 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x e 20x.	58
Figura 55 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 3 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x e 20x.	58
Figura 56 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 4 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.	59
Figura 57 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 4 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.	59
Figura 58 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 4 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.	59
Figura 59 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 5 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.	59
Figura 60 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 5 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.	60
Figura 61 – Representação dos ensaios a) <i>T-peel</i> e b) <i>Lap-Shear</i>	60
Figura 62 – Dimensões finais dos provetes para os ensaios <i>Lap-Shear</i>	61

Figura 63 - Configuração de soldadura das amostras de a) 2 <i>Layers</i> , b) 3 <i>Layers</i> e c) 4 <i>Layers</i>	62
Figura 64 – Suporte de posicionamento e soldadura das amostras, fabricado por manufatura aditiva.	63
Figura 65 – <i>Setup</i> utilizado para os ensaios de tração.	64
Figura 66 – Diferentes mecanismos de falha dos provetes: a) descolagem, b) rotura pelo limite da área de soldadura, c) rotura irregular, i) fissura lateral.	64
Figura 67 – Curvas Força-Deslocamento de 3 provetes representativas dos 3 mecanismos de rotura da figura 64.	65
Figura 68 – Curvas Tensão-Deformação dos provetes com melhores propriedades para cada condição de soldadura (Nº de <i>layers</i> e nível de carga de soldadura).	67
Figura 69 – 2 diferentes zonas da secção da configuração de 2 <i>layers</i> de cobre, soldadas com o nível 2 de carga, após tratamento de “ <i>etching</i> ”. Ampliação de 10 e 20x.	69
Figura 70 – 2 diferentes zonas da secção da configuração de 3 <i>layers</i> de cobre, soldadas com o nível 4 de carga, após tratamento de “ <i>etching</i> ”. Ampliação de 10 e 20x.	69
Figura 71 - Diferentes zonas da secção da configuração de 4 <i>layers</i> de cobre, soldadas com o nível 8 de carga, após tratamento de “ <i>etching</i> ”. Ampliação de 20x.	69
Figura 72 – Secção da configuração de 4 <i>layers</i> de cobre, soldadas com o nível 10 de carga, após tratamento de “ <i>etching</i> ”. Ampliação de 10,20 e 50x, evidenciando zonas de aparente fusão e deformação plástica.	69
Figura 73 – Vista de topo do equipamento, evidenciando o baixo rigor geométrico do perfil da carcaça.	70
Figura 74 – Guias lineares e patins de difícil acesso.	71
Figura 75 – Furos a) frontais na carcaça, para possibilitar o aperto da flange posterior e b) laterais, de acesso aos parafusos de afinação das chapas de fixação das flanges.	72
Figura 76 – Diagrama representativo da amplitude de vibração sentida ao longo do sistema de transmissão de ultrassons.	73
Figura 77 – Exemplo de uma soldadura mal conseguida devido à posição incorreta da ferramenta....	74
Figura 78 – Flexão das flanges e o seu efeito na qualidade da soldadura.	74
Figura 79 – Limitações geométricas da ferramenta/ <i>sonotrode</i> utilizada em ambas as posições de soldadura.	75
Figura 80 – Exemplos de flanges com camada polimérica utilizadas em equipamentos de ultrassons.	78
Figura 81 – Flange rígida Cunningham, composta por 2 anéis metálicos. Patente norte americana 5590866.	79

Figura 82 – Tipologia de flange rígida previamente utilizada em alguns equipamentos.	79
Figura 83 – Flanges de mola: a) comuns e b) com extensão da geometria para o caso atual.	80
Figura 84 – Primeira configuração idealizada para as flanges finais.	81
Figura 85 – Configuração final das flanges: a) vista explodida e b) integração na estrutura.	82
Figura 86 – Disposição dos parafusos de fixação das flanges a) frontal e b) traseira.	83
Figura 87 – Opções de posicionamento do conjunto para posterior análise numérica	84
Figura 88 - Constrangimentos aplicados ao sistema: a) face limitada apenas ao movimento vertical e b) movimento da aresta reservado à direção de vibração da ferramenta.	85
Figura 89 - Configuração da carga aplicada à flange no estudo numérico.	85
Figura 90 – Configuração da malha utilizada na análise linear estática no Fusion 360, com refinamento local na aresta da flange.	86
Figura 91 – Análise linear estática da flange original, realizada em Fusion 360: a) Tensão de von Mises, b) Deformação segundo o eixo vertical e c) vista de corte do conjunto.	87
Figura 92 – Resultados da análise linear estática replicada em Solidworks à flange original: a) Tensão máxima de von Mises e b) Deformação segundo o eixo vertical.	88
Figura 93 – Resultados da análise linear estática realizada no Fusion 360 para a nova configuração da flange: a) Tensão máxima de von Mises e b) Deformação segundo o eixo vertical.	89
Figura 94 – Principais dimensões finais das novas flanges projetadas: a) flange traseira; b) flange frontal.	89
Figura 95 – Fases de modificação da geometria base da carcaça: a) semelhante à original e b) com aproveitamento do volume inferior para disposição da parte elétrica.	90
Figura 96 – Chapas de aço para fixação dos guias lineares à carcaça.	91
Figura 97 – Aberturas laterais para acesso às principais zonas de afinação.	91
Figura 98 – Rebaixamentos nas placas laterais da carcaça para facilitar o posicionamento e montagem/desmontagem do sistema móvel.	92
Figura 99 – a) Furos de ajuste vertical dos sensores magnéticos e b) suportes metálicos com ajuste horizontal dos sensores e parafusos de acionamento.	93
Figura 100 – Possibilidades de adaptação da chapa de topo ao servomotor de dimensão superior através: a) de uma chapa suplementar e b) da fresagem de um rebaixamento.	93
Figura 101 – Sistema de ajuste da posição da célula de carga.	94
Figura 102 – a) Botões laterais para comando bimanual (1), botão de emergência (2) e módulo LCD; b) Ecrã HDMI de 4 polegadas na para controlo do equipamento.	94

Figura 103 - Evolução da configuração da carcaça exterior de chapa do novo protótipo.	95
Figura 104 - Configuração do modelo final do equipamento a fabricar.	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações dos servomotores WD60M com e sem travão.	43
Tabela 2 - Correspondência entre os níveis de carga definidos no programa e a sua intensidade, em N.	47
Tabela 3 – Parâmetros de soldadura mantidos constantes na primeira fase de testes.....	50
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do material utilizado nos ensaios de soldadura.	51
Tabela 5 – Número de camadas e respetivas cargas de soldadura das amostras a utilizar nos ensaios de tração e análise da microestrutura	62
Tabela 6 - Composição química do aço DC03 na ferramenta de soldadura.	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DfM	Design for Manufacturing
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
DfX	Design for Excellence
EBSD	Electron Backscatter Diffraction
EDS	Energy-dispersive X-ray Spectroscopy
FEA	Finite Element Analysis
FSW	Friction Stir Welding
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode
LFW	Linear Friction Welding
PCB	Printed Circuit Board
RFW	Rotary Friction Welding
SONAR	Sound Navigation and Ranging
SSW	Solid-State Welding
UMW	Ultrasonic Metal Welding
US	Ultrasounds

Nomenclatura

Símbolo	Denominação	Unidade
$\dot{\gamma}_p$	Taxa de deformação plástica causada pela penetração da ferramenta	s^{-1}
$\dot{\gamma}_s$	Taxa de deformação plástica causada pelo atrito da ferramenta	s^{-1}
$A_{m\acute{a}x}$	Área da face maior da ferramenta de soldadura	mm^2
$A_{m\acute{i}n}$	Área da face menor da ferramenta de soldadura	mm^2
E_{ce}	Intensidade de campo elétrico	V/m
F_N	Força de soldadura imposta pelo protótipo	N
F_i	Força de corte	N
F_s	Força de atrito entre a ferramenta e o material	N
I_{us}	Intensidade das vibrações ultrassónicas	-
$P_{A_{m\acute{a}x}}$	Pressão de soldadura para a área maior da ferramenta e binário máximo nominal do servo motor	MPa
$P_{A_{m\acute{i}n}}$	Pressão de soldadura para a área menor da ferramenta e binário máximo nominal do servo motor	MPa
$P_{m\acute{a}x}$	Pressão de soldadura para a área menor da ferramenta e binário de pico do servo motor	MPa
$P_{m\acute{i}n}$	Pressão de soldadura para a área maior da ferramenta e binário de pico do servo motor	MPa
T_{pe}	Tensão a que o material piezoelétrico está sujeito	N/m^2
r_a	Rugosidade superficial da face de ataque da ferramenta	μm
α_{us}	Amaciamento do material pela ação dos ultrassons	-

η_f	Eficiência do fuso de esferas	-
σ_E	Tensão de engenharia	MPa
σ_T	Tensão de cedência à temperatura T	MPa
σ_{ced}	Tensão de cedência	MPa
σ_{rot}	Tensão de rotura	MPa
A	Área	mm ²
D	Densidade de fluxo elétrico	C/m ²
E	Energia	J
F	Força	N
I	Corrente elétrica	A
L	Passo do fuso de esferas	mm
P	Potência elétrica	W
S	Componente da deformação	%
T	Binário do servomotor	N·m
U	Tensão elétrica	V
a	Aceleração da ferramenta de soldadura	m/s ²
d	Coeficiente piezoelétrico	m/V
f	Frequência	Hz
h	Espessura da região soldada	mm
l	Espessura da camada de material	mm
m	Massa	kg

p	Pressão	MPa
s	Complacência mecânica do material	m ² /N
t	Tempo de soldadura	s
v	Velocidade de deslocamento da ferramenta	m/s
x	Deslocamento	mm
ε	Permissividade elétrica	F/m
μ	Coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material a soldar	-
ξ	Amplitude final de vibração do sistema	μm
ρ	Massa volúmica do material	kg/m ³
σ	Tensão	MPa

1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo será feita uma inclusão do tema na situação tecnológica atual e o seu estabelecimento como interesse geral para a contínua evolução. Seguidamente serão indicados os objetivos idealizados e a ser cumpridos com o desenvolvimento da dissertação, as razões e particularidades que motivaram a seleção do respetivo tema e por último será apresentada a estruturação do documento.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Com a constante evolução tecnológica, os requisitos a satisfazer aquando do fabrico de componentes e equipamentos são cada vez mais exigentes e o seu cumprimento surge como uma necessidade cada vez mais crucial e impreterível. Os processos têm-se tornado gradualmente mais complexos, assim como os equipamentos que os executam, aumentando a probabilidade de falhas e requerendo manutenção mais frequente. Assim, o papel de um engenheiro deverá focar na simplificação e aumento de eficiência dos produtos e/ou processos, de modo a contribuir tanto em termos económicos como ambientais, uma vez que a sustentabilidade é um tópico bastante presente nos dias que correm.

Sobre este tema tão atual, o exemplo que melhor retrata esta crescente preocupação com o ambiente é a mobilidade elétrica e desuso dos combustíveis fósseis. O aumento exponencial das vendas de veículos elétricos implica um aumento similar na cadência de produção por parte das marcas de componentes, principalmente sobre as que produzem o que mais diferencia os novos veículos dos antecessores, isto é, o sistema elétrico e a forma de armazenamento de energia – baterias. Estas são compostas por vários módulos/células construídos e interligados por materiais condutores, tais como o cobre e o alumínio, que necessitam de ser unidos de tal forma que o desempenho elétrico dos componentes e de todo o sistema não seja afetado (Zwicker et al., 2020). É neste aspeto que entra a soldadura por ultrassons, que vem solucionar a falta de flexibilidade que os métodos convencionais de soldadura têm perante materiais com elevada condutividade térmica e/ou elétrica (Das et al., 2018; Schimanek et al., 2023; Stacy, 2020). Contudo, ao longo dos anos, o processo em causa e muitos dos equipamentos que o realizam não atingiram o nível de otimização desejado pela indústria de modo a permitir uma automatização eficiente. Isto acontece pela complexidade do mecanismo de união dos materiais presente no processo de soldadura por ultrassons, que tem sido alvo de contínua investigação e não se apresenta totalmente definido e caracterizado.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho vem ilustrar uma situação de desenvolvimento e otimização de um equipamento a nível construtivo e operacional, em simultâneo com o estudo e compreensão do mecanismo de soldadura por ultrassons, com a finalidade de identificar e tentar resolver dificuldades encontradas atualmente na indústria, relativas à vertente desta tecnologia inerente aos materiais metálicos. Ao longo do processo de idealização, recorrer-se-á a metodologias correntes de desenvolvimento de produto, como é o caso do DfM, DfMA, DfX, entre outros, com o objetivo de aproximar o trabalho em causa ao método comum de projeto utilizado pela indústria nos dias que correm. Determinadas etapas não puderam ser cumpridas exatamente de acordo com os métodos idealizados, tendo sido seguidas alternativas com base nos meios disponibilizados e de forma a respeitar os prazos impostos.

O desenvolvimento partirá de um protótipo existente e incompleto, projetado e fabricado durante e para a unidade curricular de introdução à dissertação de mestrado, que será alvo de análise e feita a descrição de toda a parte estrutural/funcional do mesmo, assim como dos processos de fabrico e montagem que deram origem a essa versão.

Este passará por testes experimentais de funcionamento e de posterior análise de falhas. Seguir-se-á a geração de soluções conceptuais dos pontos a melhorar, auxiliada pelo uso de ferramentas computacionais e ensaios laboratoriais. Após convergir para a solução final de cada um desses aspetos, será feito o projeto detalhado da configuração alcançada e remetida a informação técnica necessária para o fabrico dos vários componentes do protótipo. É de notar que também o sistema elétrico e o programa de controlo da máquina serão alvo análise e otimização.

No término do projeto pretende-se alcançar um instrumento economicamente mais viável do que as soluções existentes no mercado e capaz de soldar diferentes configurações de materiais com eficiência e repetibilidade.

1.3. MOTIVAÇÃO

O trabalho em questão foi realizado totalmente em regime académico e vem ao encontro do conceito dos ultrassons, que se encontra cada vez mais presente na indústria, sendo o foco desta dissertação a soldadura por ultrassons de metais, que tem tido um forte impacto no setor da mobilidade elétrica. Em termos pessoais, vem permitir a integração do conhecimento adquirido ao longo do ciclo de estudos nas várias áreas da engenharia mecânica, maioritariamente no projeto mecânico e projeto para o fabrico, na vertente acústica e na dinâmica de máquinas e vibrações.

É ainda de referir as seguintes valências aprofundadas durante a realização do projeto, nomeadamente na modelação CAD e noções e aplicação das ferramentas CAE presentes nos *softwares* Autodesk Fusion 360® e Solidworks®, nas áreas da metalurgia mecânica, automação industrial e órgãos de máquinas e no trabalho em laboratório, que implica o manuseamento de equipamentos e desenvolvimento e aplicação de técnicas de preparação de amostras metalúrgicas, assim como a execução de ensaios mecânicos.

1.4. ESTRUTURA

No capítulo 2 é abordado o estado da arte do tema dos ultrassons, começando por uma breve introdução ao conceito, seguido pelos antecedentes históricos e a evolução do conhecimento nesse domínio, assim como os princípios físicos por detrás do mesmo. Posteriormente é enunciado o método de transição do conceito para o contexto real e algumas considerações acerca do funcionamento de sistemas de geração e propagação de oscilações ultrassónicas. Finalmente é feita referência aos vários campos de aplicação dos ultrassons na indústria e as tecnologias atuais onde os mesmos podem ser empregues.

O capítulo 3 faz referência às temáticas e aspetos mais importantes que precedem o desenvolvimento do protótipo e que devem ser tidos em conta para a correta compreensão e justificação das metodologias empregues e das decisões tomadas, enunciadas ao longo do documento. O mesmo converge em específico para a soldadura por ultrassons, as diferenças e vantagens desta tecnologia relativamente aos restantes processos de união de materiais metálicos e o mecanismo e natureza da união criada. Seguidamente faz-se alusão ao desenvolvimento e evolução da tecnologia, o princípio funcional da mesma e as variáveis mais cruciais no desempenho do processo. Faz-se ainda a sua comparação com a vertente associada aos polímeros e termina-se com a gama de materiais metálicos passíveis de ser soldados, assim como a limitações associadas aos mesmos.

No capítulo 4 reintroduz-se a necessidade que promove a execução do presente trabalho, começando por apresentar algumas das diferentes soluções de equipamentos para soldadura por ultrassons e a caracterização dos seus principais atributos. Segue-se para a definição de especificações que se pretende alcançar aquando do projeto do equipamento e procede-se para a apresentação e caracterização extensiva do protótipo a partir do qual parte o projeto da solução final. Após a análise dos resultados obtidos através dos testes experimentais de verificação da soldadura, que se traduzem na microscopia e ensaios de tração uniaxial, faz-se um apuramento dos problemas conceptuais do protótipo caracterizado. Termina-se esta secção com a procura e desenvolvimento de soluções conceptuais para as falácias encontradas e é feito o projeto para o fabrico do equipamento na sua forma final.

Finalmente, no capítulo 5 são tecidas as conclusões resultantes da elaboração deste projeto e as reflexões sobre trabalhos futuros.

2. TECNOLOGIA DE ULTRASSONS

No presente capítulo será introduzido o tema dos ultrassons, desde a sua designação, caracterização, princípio físico e antecedentes históricos, até à elucidação acerca sua utilização efetiva em situações e tecnologias atuais. Nesta última secção serão enunciadas as vantagens dos ultrassons relativamente aos métodos alternativos, de modo a explicar o seu importante papel no desenvolvimento tecnológico.

2.1. CONCEITO E ANTECEDENTES

Os ultrassons baseiam-se em sinais sonoros de frequência superior a 20 kHz, valor que corresponde aproximadamente ao limite superior de sensibilidade do ouvido humano, subindo além da faixa dos MHz, sendo que a partir de valores superiores a 1 GHz se entra na região convencionalmente denominada de regime hipersónico ou microssons (Berg, 2023; Bychkov et al., 2016), como ilustrado na Figura 1. As vantagens dos ultrassons relativamente a outros tipos de radiação e que motivaram a investigação e desenvolvimento assentam-se em dois principais aspetos: (i) as ondas ultrassónicas deslocam-se de forma relativamente lenta, cerca de 100000 vezes mais devagar do que as ondas eletromagnéticas, permitindo um maior controlo e exposição da informação em função do tempo; (ii) a possibilidade de penetração de materiais opacos, ao contrário de outros tipos de radiação, conseguindo extrair informação acerca do interior dos mesmos, com sensibilidade, fiabilidade e com custos reduzidos (Cheeke, 2002).

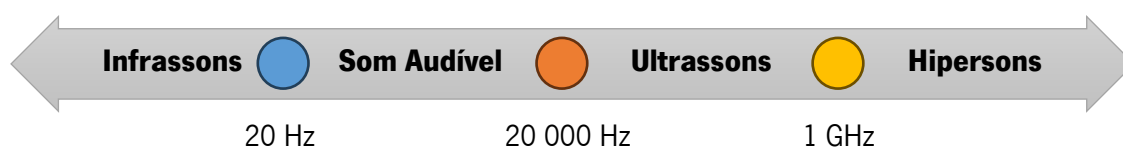


Figura 1 – Espectro de frequências sonoras.

Atualmente, os ultrassons são utilizados num variado leque de aplicações, como a medicina, aceleração de processos químicos, processos industriais, comunicação, navegação, etc., sendo o intervalo de frequência variável em função da área de aplicação.

O principal antecedente a esta tecnologia foi a descoberta da propriedade piezoelétrica de alguns materiais, em 1880, por parte de dois físicos franceses, Pierre Curie e Paul-Jacques Curie (efeito direto), e por Gabriel Lippmann um ano mais tarde (efeito inverso) (Cheeke, 2002). Esta particularidade resume-se na capacidade de um material em converter energia mecânica em energia elétrica – efeito direto; e

vice-versa – efeito inverso. Desta forma, quando sujeitos a uma determinada corrente elétrica, a sua geometria sofre uma ligeira variação, normalmente abaixo de 4% (Yang et al., 2015), ou, por outro lado, a sua resistividade elétrica altera-se (e consequentemente a corrente que por eles percorre) quando submetidos a situações de stress mecânico ou carregamento. A Figura 2 ilustra este comportamento por parte dos materiais mencionados.

Por sua vez, as expressões abaixo resultam nas equações constitutivas que definem os efeitos piezoelétricos direto (equação 1) e inverso (equação 2) dos materiais (Sezer & Koç, 2021).

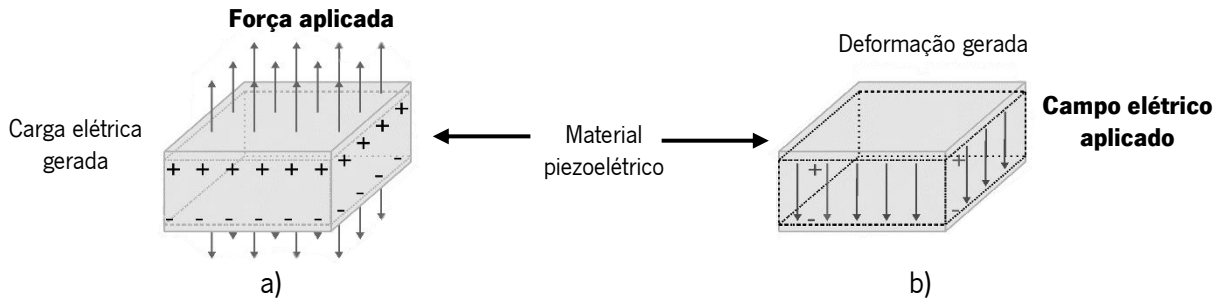


Figura 2 – Representação do efeito piezoelétrico a) direto e b) inverso. Adaptado de (*Basics of Piezoelectricity*, n.d.)

$$D = dT_{pe} + \varepsilon E_{ce} \quad (1)$$

$$S = sT_{pe} + dE_{ce} \quad (2)$$

onde D é densidade de fluxo elétrico, presente nas equações de Maxwell, d é o coeficiente piezoelétrico, T_{pe} a tensão a que sujeita determinado material, ε a permissividade do mesmo, E_{ce} o campo elétrico, S a deformação e s a complacência mecânica do material, ou seja, o inverso da sua rigidez.

Seguiram-se algumas décadas de estudo, desenvolvimento e otimização de materiais com essa propriedade, tendo os estudos incidido inicialmente sobre os cristais de quartzo, seguido pelo sal de Rochelle (tartarato de sódio e potássio), que eram os únicos materiais piezoelétricos conhecidos e disponíveis no século XIX. Mais tarde foi descoberto esse mesmo efeito em materiais como o titanato zirconato de chumbo (PZT), titanato de bário (BaTiO_3) e outros cerâmicos. Atualmente são também utilizados materiais compósitos para esse propósito, e a investigação tem recaído principalmente sobre os mesmos (Uchino, 2010).

A primeira aplicação em grande escala do efeito piezoelétrico desses materiais foi precisamente no desenvolvimento da tecnologia dos ultrassons para uso militar, durante a Primeira Guerra Mundial. O

trabalho pioneiro de Langevin relativamente à implementação dos materiais piezoelétricos nas primeiras tecnologias que recorriam a ondas ultrassónicas contribuiu para que fosse considerado por muitos como o “pai” da área dos ultrassons (Cheeke, 2002).

2.2. DO FENÓMENO FÍSICO À SUA APLICAÇÃO EFETIVA

Desde a propriedade piezoelétrica dos materiais até à sua aplicação na geração de vibração ultrassónica teria de haver um mecanismo intermédio responsável por essa transformação. Esta necessidade resultou no desenvolvimento de um dispositivo designado de transdutor, empregando materiais cerâmicos piezoelétricos ou materiais magnetostritivos na sua estrutura, distribuídos de forma específica. Destas duas diferentes naturezas de materiais utilizados derivam assim as duas principais variantes de transdutores de ultrassons: piezoelétricos ou de Langevin e transdutores magnetostritivos. Este possuem mecanismos distintos de conversão do sinal, que lhes atribui características específicas e mais indicadas para determinadas utilizações. A primeira tipologia consiste numa configuração de várias camadas de um material piezoelétrico, alternadas com camadas de um material metálico e que formam assim o chamado eletrodo. Quando as camadas piezoelétricas recebem um sinal sinusoidal de uma determinada frequência, o estado elétrico desse material muda e é criada uma deformação proporcional ao campo elétrico em causa, originando a vibração na direção axial. Já os transdutores magnetostritivos assentam num íman fixo, uma bobina e um componente constituído no material magnetostritivo. Um campo magnético é gerado na direção do eixo do transdutor e o material magnetostritivo gera vibrações ultrassónicas em função desse campo magnético quando a corrente alternada de frequência ultrassónica é aplicada à bobina de excitação (Cheng et al., 2022).

Apesar das vantagens que esta tipologia apresenta relativamente à vertente piezoelétrica no que toca à resistência ao impacto, maior amplitude de deformação e consequente oscilação acústica e baixa interferência da temperatura na eficiência do mecanismo, o elevado custo e complexidade do mesmo, em simultâneo com a baixa eficiência do sistema, resulta no desuso deste tipo de tecnologia e na prevalência dos transdutores piezoelétricos na maioria das aplicações de baixa potência. É de notar que, geralmente, os materiais piezocerâmicos têm propriedades superiores relativamente aos magnetostritivos no que toca à dimensão e eficiência, uma vez que geram menos calor para um mesmo desempenho (Uchino, 2017).

Convergingo então para este tipo, que é mais comum nos processos industriais de média/baixa potência em que as temperaturas não excedam metade da temperatura de Curie¹ dos materiais piezoelétricos usados, e que altera a polaridade dos mesmos, a escolha do material piezoelétrico tem uma importante influência na estabilidade das vibrações, assim como na amplitude das mesmas. Dos materiais abordados no subcapítulo 2.1 e de outros existentes, o mais comum no fabrico de transdutores é o PZT, pelo seu elevado coeficiente de acoplamento eletromecânico e baixa perda da propriedade dielétrica.

Os transdutores, auxiliados da respetiva fonte/gerador que transformam a frequência da corrente elétrica, geralmente de 50/60 Hz, na frequência desejada, são capazes de efetuar a conversão do sinal elétrico da fonte em oscilações mecânicas, pela contração e alongamento cíclico dos materiais que os constituem.

Dado que o valor da amplitude dessas oscilações é limitado pelas propriedades físicas dos materiais, em certas situações este não se encontra dentro do intervalo desejado para a finalidade pretendida. Assim, de forma a ajustar o valor da amplitude, os transdutores são acoplados a componentes designados de *boosters* ou amplificadores que, em função da sua geometria e material em que são constituídos, fazem variar o deslocamento induzido para os valores de amplitude desejados. A transformação da intensidade das oscilações é conseguida projetando o *booster* de forma a haver diferentes massas por unidade de comprimento entre as duas extremidades, isto é, secções transversais de diferentes áreas. Uma extremidade de saída (*output*) de secção menor do que a de entrada (*input*) resulta num aumento da amplitude, devido a uma menor massa para a mesma energia induzida pelo transdutor e percorrida ao longo do material. Normalmente, *boosters* de diâmetros de entrada e saída

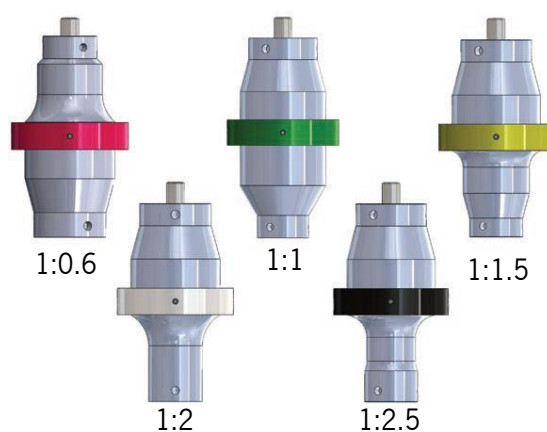


Figura 3 – Exemplos de *boosters* de diferentes relações de transmissão para soldadura por ultrassons, do fornecedor Branson. Retirado de (Horn Catalog Ultrasonic Horn Catalog 2, 2014).

¹ Temperatura à qual determinados materiais sofrem uma mudança brusca nas suas propriedades magnéticas (*Curie Point / Temperature, Magnetism & Ferromagnetism / Britannica*, 2016).

iguais transmitem às ferramentas a si acopladas oscilações de amplitude aproximadamente igual à que lhe foi dada, ou seja, a razão de transmissão é 1:1 (*Boosters*, n.d.).

Quando os *boosters* vibram à sua frequência de ressonância, as duas extremidades deslocam-se em direções opostas, aumentando e diminuindo o comprimento dos componentes, e existe uma zona central dos mesmos (ponto ou área nodal) onde teoricamente não ocorre deslocamento (Figura 4), mas onde a concentração de tensões é máxima (Horn Catalog Ultrasonic Horn Catalog 2, 2014). Atualmente, é frequente utilizar-se as ferramentas computacionais existentes para analisar o comportamento destes componentes perante um determinado intervalo de frequências e, assim, otimizar a sua geometria e material pelos métodos de simulação numérica, como é o caso da investigação de Yazdian & Karafi (2022).

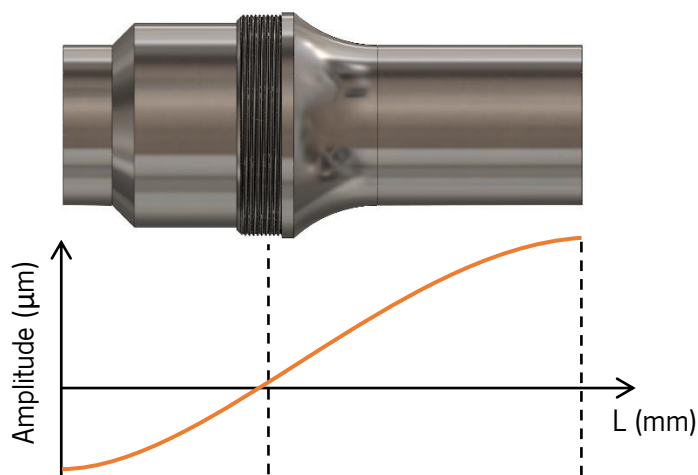


Figura 4 – Representação da variação da amplitude ao longo do comprimento do booster (1HWL) para uma razão de transmissão superior a 1.

É comum os *boosters* serem fabricados recorrendo a materiais que apresentem uma boa combinação de propriedades mecânicas e acústicas, sendo as ligas de titânio grau 5 a principal opção no meio das ligas de elevada resistência mecânica, uma vez que possui uma resistência à fadiga que permite a sua utilização a frequências de solicitação elevadas em simultâneo com altas amplitudes (Horn Catalog Ultrasonic Horn Catalog 2, 2014). As ligas de alumínio, nomeadamente as da série 7XXX, podem, também, ser utilizadas, porém, estas apenas são empregues em aplicações em que não é necessário amplificar acentuadamente a transmissão das oscilações.

No momento de seleção do *booster* a utilizar, é recomendado recorrer à razão mínima de amplificação capaz de proporcionar os resultados esperados para a aplicação em causa. Desta forma

garante-se uma redução dos níveis de fadiga aos quais o *booster* estará sujeito e aumenta-se a vida útil destes componentes (*Ultrasonic Booster - Sonic-Power*, 2016).

Uma vez que em determinadas situações ou processos tecnológicos pode não ser tecnicamente possível projetar *boosters* que tenham em simultâneo a função de ferramenta, para uma determinada amplitude, devido às restrições geométricas, os *boosters* são acoplados entre o transdutor e a mesma (*Ultrasonic Booster - Sonic-Power*, 2016).

Dependendo da finalidade, a amplitude de vibração pode ser mais ou menos crucial e a utilização de *boosters* poderá ser desnecessária, ficando a ferramenta diretamente conectada ao transdutor.

As vertentes associadas a processos industriais diferem dos sistemas de ultrassons para aquisição de imagem, não fazendo uso de meios recetores das ondas transmitidas e consistem num sistema menos complexo, como enunciado acima e esquematizado na Figura 5.

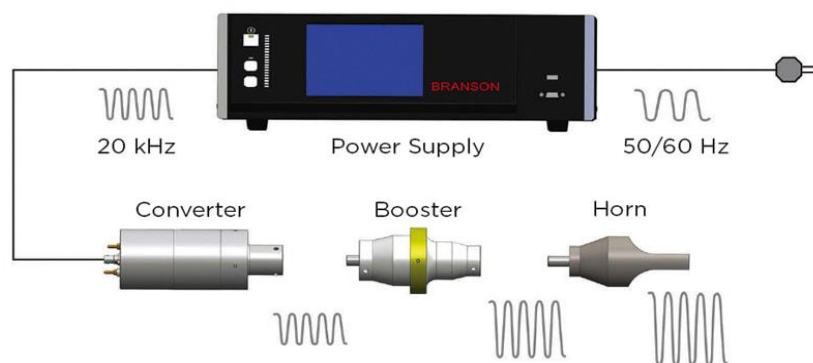


Figura 5 – Representação da conversão de corrente elétrica em oscilações acústicas num sistema de soldadura por ultrassons. Retirado de (*Ultrasonic Metal Welding / Emerson GB*, n.d.)

2.3. APLICAÇÃO DOS ULTRASSONS NA INDÚSTRIA

Conhecendo a grande abrangência dos ultrassons nas mais diversas áreas científicas e tecnológicas, pode afirmar-se que a lista se estende por um vasto leque de aplicações quando se converge para a utilização dos ultrassons na medicina e na área industrial. No que toca ao setor da manufatura, têm-se implementando cada vez mais os ultrassons como forma de otimizar as técnicas e processos já utilizados.

Como mencionado em capítulos anteriores, a capacidade das ondas ultrassónicas se propagarem em qualquer tipo de meio (líquido, gasoso e sólido), à exceção do vácuo, atribui-lhes uma grande vantagem perante as tecnologias de ondas eletromagnéticas. Esta característica dos ultrassons permitiu um grande avanço na medicina ao serem implementados em inúmeros instrumentos, como mecanismo de observação, análise e caracterização de meios, de forma mais segura e menos dispendiosa do que as tecnologias alternativas. Este mecanismo assenta-se, tanto para os ultrassons como para as ondas

eletromagnéticas, na descoberta/definição precedente do efeito Doppler², que veio a permitir a correlação entre o deslocamento das ondas sonoras e magnéticas e as distâncias, densidades e materiais percorridos pelas mesmas. Algumas das suas utilizações neste setor são a ecografia, tomografia, biometria oftálmica, imagem intravascular, microscopia ultrassónica, entre outras (Opieli, 2023).

Assim, tal como acontece na área da medicina, os ultrassons têm um papel importante na navegação e comunicação já desde os primórdios da sua aplicação. Após o desastroso acidente do Titanic, surgiu uma necessidade de um método de localização e melhor caracterização de obstáculos submersos, inicialmente criado por Paul Langevin durante a segunda Guerra Mundial para deteção de submarinos e comunicação e que convergiu no desenvolvimento dos atualmente conhecidos equipamentos de SONAR. Em acréscimo, os ultrassons são ainda utilizados em sistemas micro mecânicos, motores e outros tipos de sensores.

Na indústria, este mecanismo é utilizado de forma semelhante para analisar componentes, detetar defeitos na sua estrutura de forma não destrutiva e, assim, otimizar os processos de fabrico que dão origem aos mesmos. São empregues também em mecânica dos fluidos para caracterizar e medir fluxos de líquidos e gases.

Por outro lado, as ondas ultrassónicas permitem transmitir uma quantidade significativa de energia mecânica, sendo assim utilizadas para inúmeras tecnologias de processamento de materiais em vários domínios. Retornando à área da medicina, estas são empregues na cirurgia e terapia, mais especificamente no corte de tecidos, ossos ou dentes, remoção de tártaro, tratamento de células de gordura e pedras nos rins, redução e tratamento de tumores termicamente, entre outros.

Nas décadas de 50 e 60, Blaha & Langenecker (1955) e Langenecker (1966) verificaram que os metais passam por um fenómeno de amaciamento, em simultâneo com uma redução da resistência perante vibrações de frequência ultrassónica, designado de efeito Blaha (Z. Li et al., 2020a). Conhecendo este comportamento, vários processos de conformação plástica de materiais metálicos começaram a integrar sistemas de aplicação de ultrassons. Da mesma forma, esta tecnologia mostrou resultados benéficos na otimização de ligas metálicas utilizadas em fundição, ao alterarem as propriedades físicas do metal líquido, que afeta por sua vez a sua solidificação e leva a mudanças na sua microestrutura e ao refinamento de grão. O crescimento tem sido notório no que toca à literatura a abordar este último tema e a verificar a utilidade das ondas de frequência ultrassónica na melhoria de algumas das suas propriedades (Balasubramani et al., 2022; Wang et al., 2017), uma vez que o seu impacto na indústria

² Diferença aparente entre a frequência a que as ondas sonoras ou magnéticas partem da origem e a frequência a que chegam ao recetor, por ação do movimento relativo entre ambos (*Doppler Effect / Definition, Example, & Facts / Britannica*, n.d.) .

poderá ser crucial. Os processos de corte e maquinagem por ultrassons têm sido outros dos principais focos de investigação, pela utilidade que demonstram em relação a alguns materiais difíceis de trabalhar pelas tecnologias comuns, tais como os cerâmicos, compósitos e poliméricos, pela reduzida fricção entre a ferramenta e a matéria-prima, e consequentes baixas temperaturas que se atingem. Além disso são processos mais eficientes em termos energéticos, relativamente à maquinagem e ao corte convencionais, permitem alcançar a melhor qualidade superficial entre as diferentes variantes conhecidas, omitindo em algumas situações a necessidade de etapas posteriores de acabamento e os equipamentos são mais silenciosos e seguros, devido à natureza do movimento entre a ferramenta e o material. Em geral, as propriedades dos componentes trabalhados por estes processos tendem a ser superiores e mais estáveis/regulares, pela remoção de material ser menos agressiva e por não se atingir temperaturas tão elevadas, não chegando a haver, normalmente, uma alteração da microestrutura dos mesmos.

Para componentes já fabricados, tem sido também estudado e verificado o fenómeno de redução das tensões residuais quando sujeitos a oscilações ultrassónicas, em substituição dos tratamentos térmicos, que têm efeitos secundários que se pretendem evitar em várias situações. Isto é normalmente conseguido pela indução de tensões de corte oscilantes que exercem esforços mecânicos nos defeitos na estrutura cristalina (principalmente nas deslocações) dos metais, e que têm demonstrado resultados interessantes e benéficos na reorganização da mesma.

Adicionalmente, os ultrassons são empregues em processos de limpeza, pintura, criação de emulsões e aceleração de reações químicas em vários setores industriais e químicos.

Incluídos na lista de processos de fabrico nos quais os ultrassons têm vindo a solucionar várias dificuldades atuais, estão algumas variantes de união de componentes metálicos e poliméricos, que têm sido alvo de constante desenvolvimento. As suas vantagens têm proporcionado um avanço significativo no desenvolvimento dos setores da mobilidade e medicina e é sobre uma destas tecnologias que incidirão os capítulos seguintes.

3. TECNOLOGIA ULTRASSÓNICA PARA SOLDADURA DE MATERIAIS

METÁLICOS

No seguinte capítulo será estabelecida a interiorização do tema dos ultrassons no processo de soldadura, as vantagens relativamente aos restantes métodos existentes e a natureza e formação da união de materiais por este meio. Estes últimos tópicos serão apresentados a partir de aspetos teóricos definidos até ao momento, assim como analiticamente e pela observação de casos práticos enunciados em vários trabalhos de investigação. Por fim, apresentar-se-ão as diferenças entre os processos de soldadura por ultrassons de materiais metálicos e poliméricos, a gama de materiais passível de ser unida pela primeira vertente e exemplos de componentes comumente unidos na indústria.

3.1. CONCEITO

A soldadura por ultrassons é uma técnica de soldadura aplicada a polímeros e metais, principalmente não ferrosos, bastante eficiente e que não necessita de atmosferas inertes nem recorre a materiais auxiliares tais como solventes, gases raros ou elétrodos, reduzindo assim os custos associados a matéria-prima e algumas exigências do processo. Além disso, permite unir materiais num curto espaço de tempo e requer menor consumo de energia do que os processos tradicionais. No caso da vertente associada aos metais, a soldadura considera-se geralmente feita sem qualquer fusão ou sem fusão significativa dos materiais, criando uma união sólida entre os componentes por ação da fricção induzida pela vibração.

Desde o início do desenvolvimento desta tecnologia, os trabalhos de investigação têm-se focado na natureza e mecanismo da união entre os materiais, contudo as conclusões tiradas ainda não foram totalmente exploradas e há várias contradições. Um aspeto em concordância em grande parte da literatura é o facto de a temperatura na interface dos componentes envolvidos alcançar a temperatura de recristalização dos materiais e que para combinações de materiais puros, como o Al, Cu, Zn, Ti, Be, Ag e Ni, não foram inicialmente observados compostos intermetálicos ou outras fases presentes na interface. Porém, o conceito de difusão inter-atómica como principal mecanismo de união não se verifica em todos os trabalhos encontrados na bibliografia, sendo que Daniels (1965) corroborou a não existência de fusão ou difusão na ligação de Cu e Ni, observada anteriormente por Okada et al. (1963), nesse mesmo par de materiais. O grau de difusão tende a aumentar à medida que a temperatura na interface aumenta (J. Li et al., 2023), sendo que só a partir de uma certa temperatura (dependente do par de materiais em questão) é que este fenómeno é observado. As observações de Hazlett & Ambekar (1970)

feitas através de microscopia eletrónica de varrimento apoiaram em parte as afirmações de Daniels. Por outro lado H. Kreye (1977), aquando da investigação da união de folhas de cobre e de alumínio através de soldadura por ultrassons e 2 outros métodos de soldadura em estado sólido, testemunhou alterações na microestrutura durante o processo e a formação de novos grãos ao longo da interface. No mesmo estudo observou que a ligação foi feita predominantemente pela fusão de uma camada de reduzida espessura ($<1\ \mu\text{m}$), ocorrência também apoiada por Chen et al. (2012) e Bakavos & Prangnell (2010). Um outro aspeto que se contemplou foi a penetração de parte do volume de um dos materiais no material oposto em forma de espiral/remoinho, normalmente designado na literatura como “*swirls*”, como ilustrado nas Figura 6 c) e e) e que é mais visível para valores superiores de energia empregues no processo.

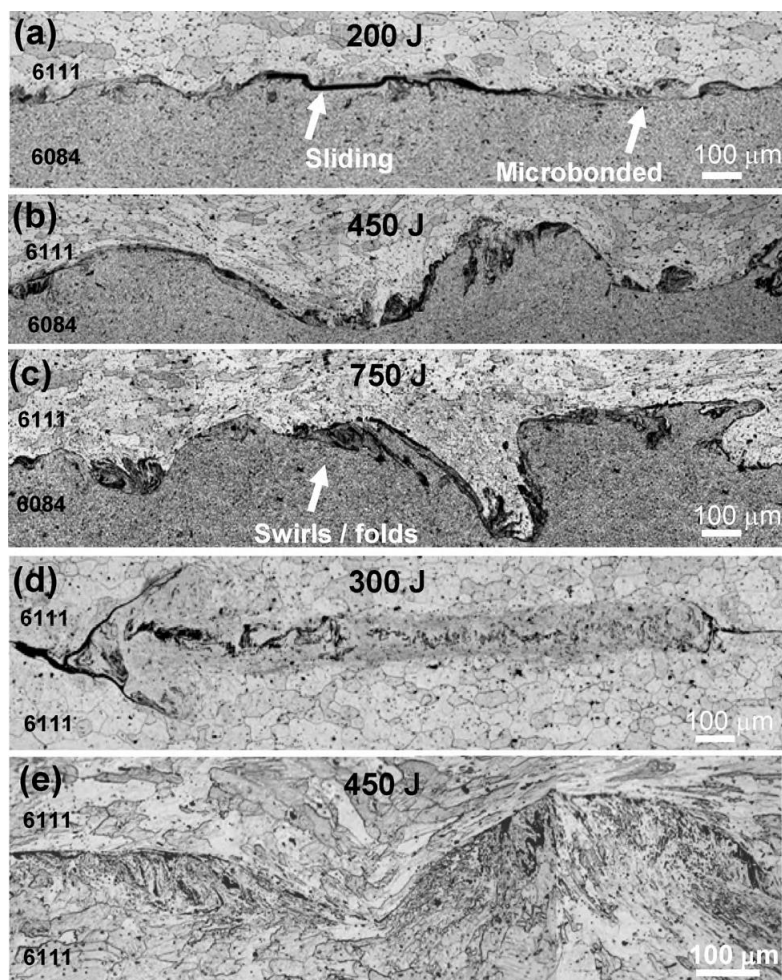


Figura 6 – Vários mecanismos de união visíveis numa interface de duas ligas de alumínio soldadas por ultrassons, em diferentes condições: zonas de deslizamento e microunião, deformação plástica severa e existência de “swirls” (Bakavos & Prangnell, 2010).

Tal como é referido por Sanga et al. (2018), *“há muitos mecanismos por detrás da formação da união ultrassónica, sendo que em alguns casos esta é feita por dois ou mais em simultâneo. Em segundo lugar, diferentes configurações de materiais mostram diferentes possibilidades destes mecanismos. (...) Um tipo específico de difusão causado pelo deslocamento acelerado mostrou ser a principal causa da deformação severa que acontece na interface durante o processo de soldadura por ultrassons. Este fenómeno reduz a temperatura de fusão dos materiais e promove uma soldadura por fusão, que contradiz o princípio associado à soldadura em estado sólido, a que é associado este tipo de processo.”*

Assim, convergindo para um caso geral, pode dizer-se que a temperatura máxima do processo atinge, normalmente, apenas entre um terço e metade da temperatura base de fusão dos materiais, não havendo, desta forma, alterações químicas dos mesmos (Das et al., 2019; Nong et al., 2018), nem a criação de partículas ou reações que promovam corrosão (Dhara & Das, 2020), para além de não haver a ocorrência de porosidades ou defeitos outrora promovidos pelo arrefecimento e solidificação. Estas particularidades permitem assegurar de forma mais significativa as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais. Nos casos da união de materiais dissimilares, em que pode surgir a formação de compostos intermetálicos, e que tende a aumentar com o aumento da temperatura, a fragilidade destes compostos pode levar a uma redução das propriedades mecânicas da união (Dhara & Das, 2020; Haddadi & Abu-Farha, 2015; Sanga et al., 2018). Uma outra vantagem das baixas temperaturas do processo é a reduzida contração ou dilatação do material. Há a acrescentar que a temperatura alcançada é apenas resultado do movimento entre os materiais e não de fontes exteriores e que a natureza da união deve-se ao amaciamento dos materiais, como mencionado anteriormente, que é causado pelo facto de as vibrações induzidas serem exercidas a elevada frequência, normalmente no intervalo dos 20 aos 40 kHz, podendo ser ligeiramente inferior.

Convergindo novamente para a soldadura por ultrassons, é possível sustentar que o processo foi desenvolvido por volta da década de 1950, tendo apenas sido patenteado e implementado na indústria na década seguinte, com a finalidade de unir cabos elétricos e vedar tubagens (Cai et al., 2019; Sanga et al., 2018). Atualmente é maioritariamente utilizado no setor automóvel, no que diz respeito à mobilidade elétrica, assim como noutras áreas da eletrónica e equipamentos médicos, sobretudo quando se pretende unir materiais condutores. Nos últimos 25 anos a soldadura por ultrassons tem tido um papel crucial no desenvolvimento de baterias, ao permitir superar algumas das barreiras existentes aquando do seu projeto, e conferiu à indústria uma capacidade de unir materiais dissimilares, frágeis e com propriedades térmicas e/ou elétricas particulares que se tornam impraticáveis aquando dos processos de soldadura comuns, sem afetar o seu desempenho e fiabilidade.

A diminuição da rigidez dos materiais causada pelas vibrações de frequência ultrassónica e um consequente aumento da sua maleabilidade contribui para um aumento da área de contacto entre as várias camadas a unir, quando são aplicadas em simultâneo forças de compressão e fricção entre as mesmas (Nong et al., 2018). A Figura 7 ilustra um caso de soldadura por ultrassons de duas chapas/ *layers* do mesmo material, evidenciando as várias etapas pelas quais o mesmo atravessa, assim como a formação da união entre ambas as camadas em função do tempo e com a compressão por parte da ferramenta.

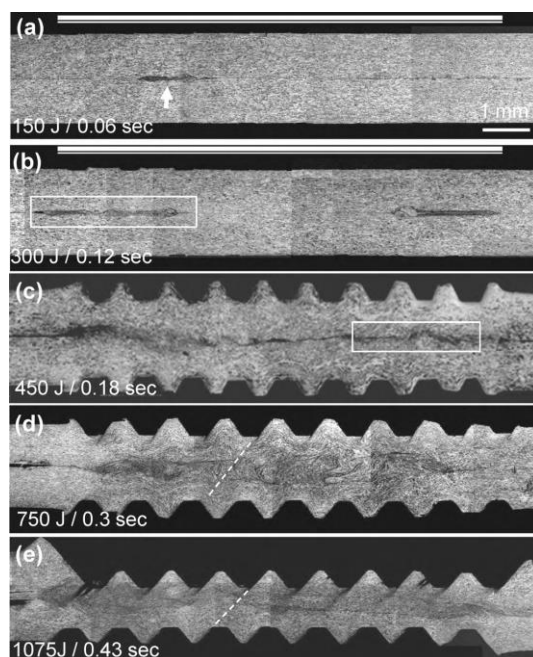


Figura 7 – Evolução do processo de soldadura por ultrassons de um par de folhas de liga Al6111 com 1 mm de espessura. Retirado de (Bakavos & Prangnell, 2010)

Para além da frequência de vibração, alguns dos parâmetros mais importantes na eficácia do processo são: a amplitude de vibração, a pressão de contacto (*welding pressure*) e o tempo de atuação ou soldadura (*welding time*), assim como a potência do gerador/transdutor que resulta numa maior ou menor capacidade em exercer vibração em toda a sua extensão de soldadura. Cada uma destas variáveis tem valores considerados ótimos em função do material, características geométricas dos componentes a unir e outras condições do processo em questão.

O tempo de soldadura apresenta-se como um parâmetro importante na qualidade da união, uma vez que, em simultâneo com a compressão dada entre os vários materiais, permite à interface formar ligações mais ou menos íntegras. Intervalos demasiado curtos não proporcionam a fricção necessária para formar uma ligação, e valores excessivos comprometem a união já formada. É de notar que o

intervalo de tempo é um fator determinante na energia induzida ao material, tendo assim influência na temperatura máxima alcançada na interface e consequentemente na natureza da união e na sua resistência. A cada par de materiais e respetiva configuração está associado um valor ótimo de duração do ciclo de soldadura, pelo que a sua definição não é totalmente linear nem conhecida. Normalmente este valor vai de algumas décimas de segundo até poucos segundos, pelo que terá de haver um controlo quase instantâneo dos parâmetros utilizados.

Em termos práticos, processo de soldadura por ultrassons de materiais metálicos resume-se em 3 etapas fundamentais:

1 - Um atuador aplica a força de compressão aos componentes a unir, permanecendo estes entre a ferramenta, acoplada ao *booster*, e um batente/apoio localizado no lado oposto;

2 - O controlador/gerador gera o sinal elétrico com a frequência ultrassónica, que é convertido em oscilações mecânicas pelo transdutor, sendo estas transferidas pelo *booster* até à ferramenta, causando o movimento alternado de fricção no material;

3 - Após o tempo de atuação definido, a ferramenta afasta-se dos componentes soldados e termina o ciclo.

De modo a que a área efetiva de contacto entre metais seja significativa, é necessário remover os óxidos e a contaminação das superfícies assim como eliminar as asperidades das mesmas. Enquanto alguns fatores, como o desgaste da ferramenta de soldadura, têm pouca influência na qualidade da união e podem ser corrigidos facilmente, a contaminação das superfícies por parte de óleo geram grandes variações entre soldaduras sucessivas e o seu efeito não consegue ser previamente contabilizado de forma precisa (Nong et al., 2018). Forças de atuação elevadas e movimento repetitivo de fricção por parte da ferramenta contribuem para a eliminação desses óxidos e contaminantes superficiais, o que manifesta a ideia de que o processo de soldadura por ultrassons tende a omitir a necessidade de limpeza das superfícies que seria necessária em alguns processos de soldadura convencionais, podendo ser facilmente automatizado caso o processo em si esteja bem compreendido e otimizado.

É de notar que forças excessivas nos componentes podem levar à fissuração dos materiais na fronteira da zona de soldadura, como ilustrado na Figura 8, que sucede devido à concentração de tensões na zona das chapas em contacto com a aresta da ferramenta, para as geometrias do *sonotrode* mais comumente utilizadas. Por outro lado, a diminuição da pressão de atuação abaixo de um determinado valor provoca uma redução da área efetiva de união, sendo o acontecimento apelidado de “*cold weld*”.

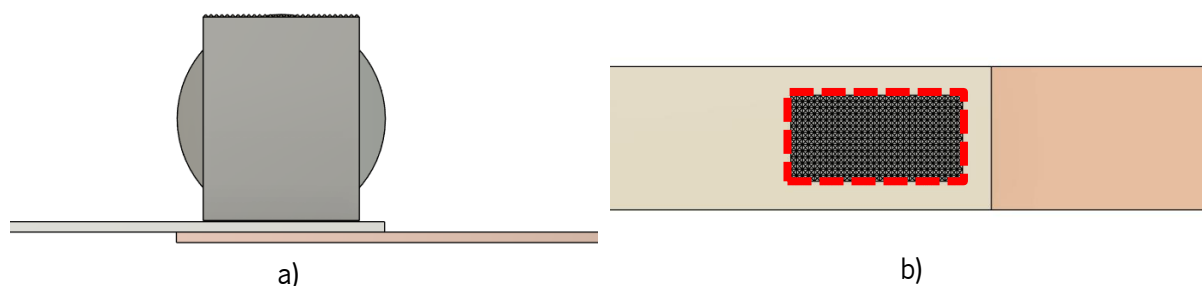


Figura 8 – Representação da zona de maior concentração de tensões nas chapas, causada pela aresta da ferramenta: a) vista de frente e b) vista de topo.

Sasaki et al. (2014) e Watanabe et al. (2009) investigaram o efeito da geometria de ataque da ferramenta, mostrando que uma superfície curva pode favorecer a união, ao evitar a zona de concentrações de tensões mencionada acima e aumentando a resistência da interface. Komiyama et al. (2016), Du et al. (2020) e D. Lee & Cai (2017) referem também o efeito da geometria das reentrâncias da ferramenta, comparando as formas piramidais e trapezoidais e as dimensões das indentações, no aumento do atrito, geração de calor e deformação dos materiais.

De forma resumida, para que a soldadura por ultrassons ocorra, é necessário eliminar tanto os óxidos como os contaminantes das superfícies e haver uma área de contacto de metal exposto (sem películas) entre cada camada material. Ambas as ocorrências só poderão suceder caso haja atrito suficiente, uma vez que, abaixo desse valor, haverá escorregamento entre a ferramenta e o material, assim como entre as várias chapas a soldar. Esta necessidade de aderência da ferramenta e batente com as camadas superior e inferior do material/componentes a unir, respetivamente, justifica a utilização de superfícies de soldadura texturadas na generalidade dos casos.

É de notar que, pela análise de ensaios de soldadura, a amplitude do movimento oscilatório tende a diminuir, relativamente ao valor imposto pelo sistema, a partir de um certo valor de força de soldadura, (devido ao aumento da pressão de contacto), resultante do aumento do atrito entre os componentes e da maior área de contacto entre as saliências da ferramenta e o metal (H. Li & Cao, 2019). O estudo da influência do valor amplitude no processo de soldadura por ultrassons é comum em muitos trabalhos de

investigação relativos a esta tecnologia e são vários os autores que se referem a este parâmetro como sendo um dos com maior influência na qualidade da união, como é o caso de Nunes et al. (2022).

De acordo com Al-Sarraf & Lucas (2012), uma variação descendente da amplitude ao longo do tempo de soldadura (Figura 9), começando com um valor que permita fricção suficiente para criar a união sólida e reduzindo progressivamente o mesmo de modo a limitar o calor do contacto e consequentemente a maleabilidade da amostra, reduz o deslizamento das várias camadas à medida que se forma a união e minimiza o dano induzido na mesma, mantendo-se assim a integridade da ligação.

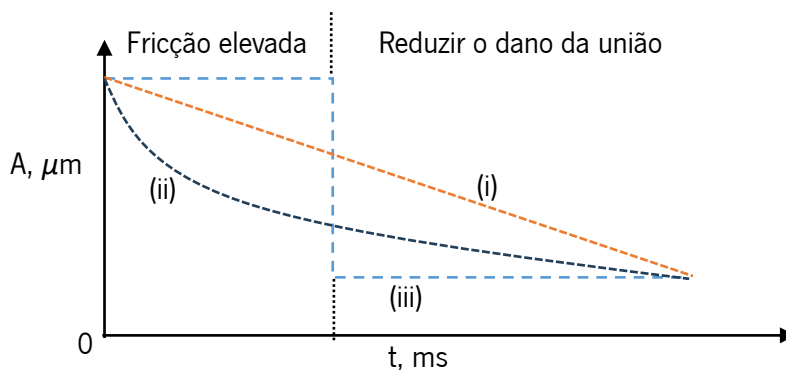


Figura 9 – Diferentes tipos de variação induzida da amplitude de soldadura ao longo do tempo de ciclo: (i) linear; (ii) exponencial; (iii) escalonada.

O trabalho de investigação de Cai et al. (2013) mostra a influência do estado superficial de materiais quando postos em movimento de deslizamento entre si, avaliando o seu efeito na temperatura que se faz sentir na interface e a evolução do coeficiente de atrito com o tempo mencionando, assim como o impacto da força normal de compressão e da frequência de fricção nas variáveis anteriores. Com isso concluiu que, para os 3 estados superficiais estudados, de valores de rugosidade mensurados, o coeficiente de atrito final alcança, para todos eles, valores semelhantes (para o mesmo material ou pares de materiais), sendo que a frequência e força aplicada apenas têm influência no intervalo de tempo necessário para chegar a esse estado final.

Convergindo para a caracterização analítica do processo de soldadura, é possível tecer as seguintes considerações:

Devido à força de compressão exercida, o *sonotrode* e a camada de material com a qual está em contacto movem-se em simultâneo e de acordo com a expressão:

$$x(t) = \xi \times \sin(2\pi \times f \times t) \quad (3)$$

em que $x(t)$ é o deslocamento da extremidade da ferramenta no instante t do ciclo de soldadura, ξ a amplitude final do sistema e f a frequência de vibração.

Da mesma forma, a velocidade e aceleração desses 2 elementos podem ser expressas de acordo com as equações 4 e 5, respetivamente:

$$v(t) = 2\pi \times \xi \times f \times \cos(2\pi \times f \times t) \quad (4)$$

$$a(t) = -(2\pi \times f)^2 \times \xi \times \sin(2\pi \times f \times t) \quad (5)$$

Uma vez que existe uma força de cisalhamento F_i entre ambas as camadas de material em simultâneo com uma força de atrito F_s entre a ferramenta e a *layer* superior, a equação do movimento desta última pode ser descrita como:

$$F_s(t) + F_i(t) = m \times a(t) \quad (6)$$

onde m é a massa da camada de material superior. Decompondo F_s e m , a equação 6 pode ser reescrita como:

$$\mu \times F_N + F_i(t) = -(2\pi \times f \times t)^2 \times A \times l \times \rho \times x(t) \quad (7)$$

em que μ é o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material superior, F_N é a força de soldadura imposta ao conjunto, A a área de contacto com o *sonotrode*, l a espessura da camada de material e ρ a massa volúmica do metal que a constitui.

Fujii et al. (2017) e Bates et al. (2005) estudaram as taxas de deformação plástica $\dot{\gamma}_s$ e $\dot{\gamma}_p$ causadas pelo atrito da ferramenta e pela sua penetração no material, respetivamente, que resultaram nas expressões seguintes:

$$\dot{\gamma}_s = \left[\left(\frac{d(t)}{2 \times r_a} \right)^2 + 1 \right]^{-1} \times \frac{d(t)}{2 \times r_a} \quad (8)$$

$$\dot{\gamma}_p = \frac{2 \times f \times \xi}{h} \quad (9)$$

onde r_a corresponde à rugosidade superficial da ferramenta e h à espessura da região soldada.

Como é referido no presente capítulo, o processo de união é maioritariamente devido à redução da rigidez dos materiais por ação dos ultrassons, que contribuem para um aumento do grau de deformação dos mesmos. Assim, este amaciamento estudado por vários autores, nomeadamente por H. Li & Cao (2019)

e Siddiq & Sayed (2011), pode ser enunciado como α_{us} e expresso em função da intensidade das oscilações ultrassónicas I_{us} , da forma seguinte:

$$\alpha_{us} = (1 - k \times I_{us})^n \quad (10)$$

sendo k e n coeficientes não definidos e onde I_{us} pode ser calculado de acordo com a equação 11:

$$I_{us} = \frac{\rho}{2} \times v \times (2\pi \times f \times \xi)^2 \quad (11)$$

Finalmente, considerando as equações 10 e 11, é possível convergir para a expressão de quantificação da redução da rigidez dos materiais pelo processo de soldadura por ultrassons, como apresentado na equação 12:

$$\sigma = \alpha_{us} \times \sigma_T = \sigma_T \times (1 - k \times I_{us})^n \quad (12)$$

em que σ_T é a tensão de cedência do material base à temperatura T .

Para além da formulação enunciada, os trabalhos de investigação têm também recaído sobre a relação entre a ação da ferramenta/fricção entre materiais e o aumento da temperatura, assim como a relação destes 3 parâmetros com a formação de compostos intermetálicos. Vários métodos numéricos têm sido criados com este intuito, como forma de estudar e prever o processo para cada combinação de materiais e condições de soldadura.

3.2. SOLDADURA DE METAIS VS SOLDADURA DE POLÍMEROS

Os processos de soldadura por ultrassons de metais e polímeros (Figura 10) foram criados por volta da mesma década, embora o processo tenha tido uma evolução mais notória no ramo dos materiais poliméricos termoplásticos pela facilidade que apresenta relativamente à sua aplicação em metais.

As principais diferenças entre as duas vertentes baseiam-se na definição dos parâmetros do processo, na direção em que a vibração atua nos componentes a unir e na natureza da união. Ao

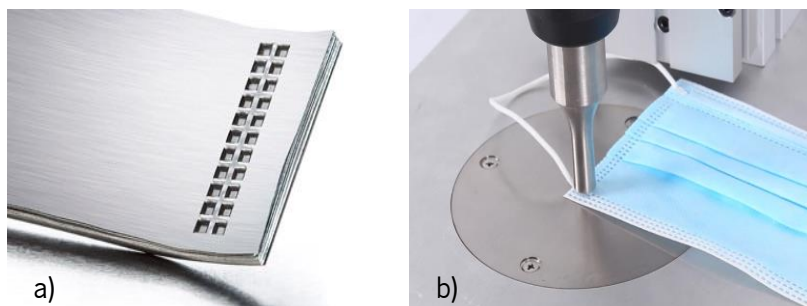


Figura 10 – Exemplos de componentes metálicos (a) e poliméricos (b) soldados por ultrassons (Retirado de (*Battery - Foil, Sheet and Cylinder Welding* / TELSONIC Ultrasonics, n.d.) e (*Automatic Mask Ear Loop Welding*, n.d.)).

contrário do mencionado anteriormente para a vertente metálica, na soldadura de plásticos há uma fusão do material, contudo a temperaturas inferiores às dos processos comuns de soldadura de metais. A existência da referida fusão implica a necessidade de manter os componentes sob pressão mesmo após a paragem da atuação dos ultrassons com a finalidade de confirmar que solidificam enquanto permanecem coesos. Como referência, este período é, geralmente, de cerca de metade do tempo de soldadura.

A nível construtivo, os equipamentos são semelhantes e podem partilhar uma grande parte dos componentes. Contudo, direções diferentes das oscilações resultam também em orientações diferentes do transdutor e dos componentes ligados ao mesmo. Enquanto que na soldadura de metais este elemento é orientado na horizontal (Figura 11 a)), provocando vibrações nessa mesma direção e induzindo fricção entre os componentes, tal como referido anteriormente, no caso dos polímeros, este encontra-se na vertical, exercendo apenas compressão entre os materiais a soldar (Figura 11 b)). Assim, é comum as superfícies dos radiadores acústicos para soldadura de polímeros omitirem as reentrâncias existentes na vertente para metais, que têm a finalidade de criar a fricção longitudinal. No lugar destas podem ser utilizadas superfícies planas ou geometrias específicas de acordo com a área e tipo de forma que se pretende obter na zona de união dos componentes. Todas estas considerações têm em conta a generalidade das aplicações e posição dos componentes a unir, havendo variantes desta tecnologia com as suas especificidades.

Considerando as diferentes propriedades mecânicas entre os metais e os polímeros, pode-se afirmar que, de forma geral, a rigidez dos equipamentos de soldadura de metais terá de ser significativamente superior e as especificações dos atuadores responsáveis por exercer a pressão nos componentes são mais elevadas para a vertente metálica.

Uma vez que na tecnologia associada à união de polímeros a ferramenta comprime o material na verticalmente e sempre na mesma direção das oscilações induzidas, não é necessário desenhar e preparar os radiadores acústicos e os componentes onde são apoiados para situações críticas de flexão, que é um dos principais cuidados a ter aquando do projeto de um equipamento de soldadura de metais.

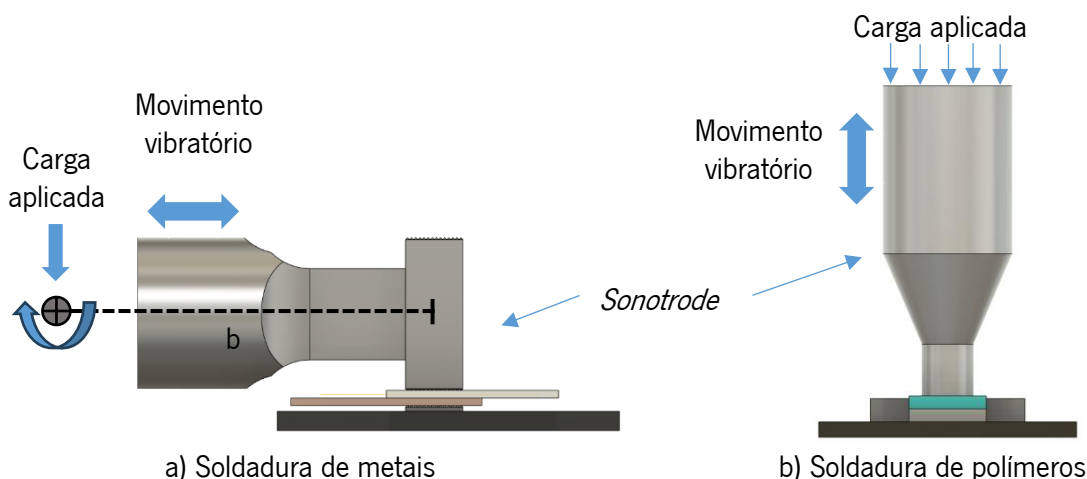


Figura 11 – Principais diferenças entre os processos de soldadura por ultrassons de polímeros e metais (Adaptado de (Z. Li et al., 2020))

3.3. GAMA DE MATERIAIS E CONSIDERAÇÕES

Como foi abordado, algumas das vantagens face aos processos de soldadura mais comuns de materiais metálicos dizem respeito ao facto de não se necessitar de condições ambiente controladas nem a materiais auxiliares. No entanto, a soldadura por ultrassons de metais tem como principal objetivo solucionar algumas dificuldades existentes nos processos alternativos, nomeadamente a união de materiais com elevada condutividade térmica e/ou elétrica.

Assim, os principais metais empregues neste processo são ligas de alumínio, cobre, níquel e magnésio uma vez que, pelas suas propriedades térmicas e/ou elétricas, são muito dificilmente unidos quer pelos processos convencionais, quer pela soldadura por ponto (devido à elevada condutividade elétrica). Além disso, existe o risco de algumas das suas propriedades físicas serem alteradas quando sujeitos a esses métodos, pela elevada temperatura a que impõe o material e pela modificação do mesmo ao nível da microestrutura.

De forma mais específica, é comum recorrer aos ultrassons para soldar componentes elétricos, tais como cablagem, barramentos de baterias e terminais das suas células, maioritariamente no setor automóvel, e tem sido cada vez mais empregue no setor aeroespacial.

Dentro deste grupo de materiais, há uma vasta investigação e confirmação dos resultados positivos acerca da soldadura de ligas alumínio das séries 1000, 2000, 5000, 6000, e 8000 (Sri Yeswanth et al., 2023) e da união destas com cobre (Das et al., 2019; Dhara & Das, 2020; H. Li & Cao, 2019) e magnésio (Rajiv Kumar et al., 2023). Apesar de os metais macios se mostrarem mais adequados ao processo, também é possível soldar ligas de titânio e ligas de alumínio de elevada resistência e/ou tratadas termicamente, normalmente não passíveis de serem soldadas, nomeadamente ligas da série 2000 e 7000 (Shibo et al., 2020), com algumas alterações dos parâmetros de soldadura e do material da ferramenta (Liesegang et al., 2021). A literatura expõe também os trabalhos de investigação que têm vindo a ser realizados acerca da possibilidade de soldar materiais compósitos a materiais metálicos e os resultados mostram que apesar de a resistência da união não ser tão elevada como a das interfaces metal/metal, há efetivamente uma transformação e agregação das superfícies destes pares de materiais (Liu et al., 2023). A união de ligas de alumínio, cobre, magnésio e níquel a aços tem sido estudada e mostra que é também possível a adesão de pares de materiais com propriedades mecânicas e durezas significativamente diferentes. Normalmente o material mais macio tende a sofrer de forma mais elevada com o aumento da maleabilidade, criando-se uma camada aderente ao material oposto e uma maior tendência a formar compostos intermetálicos (Lin et al., 2019), (Nambu et al., 2018), (Haddadi & Abu-Farha, 2015), (Haddadi & Abu-Farha, 2016). Alguns dos compostos intermetálicos que se podem formar na união dos pares mais comuns de materiais abordados acima são FeAl , Fe_3Al , Fe_2Al_5 , para o par alumínio-aço, CuAl_2 , Cu_2Al entre cobre e alumínio, Al_3Mg_2 , $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ entre alumínio e magnésio e FeTi para o par aço-titânio.

O principal requisito dentro da gama de materiais passíveis de ser soldados é serem empregues sob a forma de chapas ou fios com uma espessura reduzida, normalmente abaixo de 3 mm (S. S. Lee et al., 2010), sendo mais indicado para espessuras de apenas algumas décimas de milímetro. Dimensões superiores levam a perdas de energia acústica devido ao efeito de absorção do material

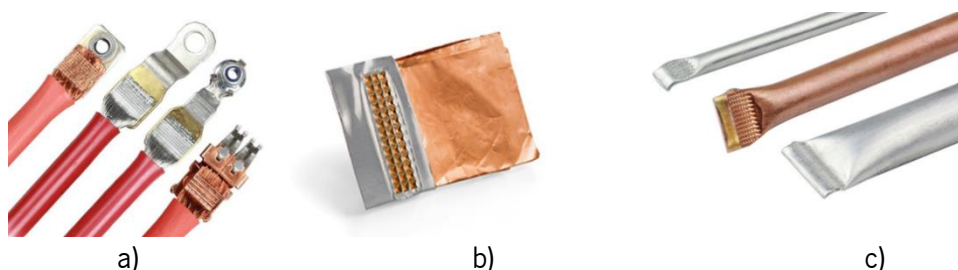


Figura 12 – Exemplos de materiais e componentes metálicos soldados por ultrassons: a) barramento elétrico de fios e olhal, b) folhas de cobre/alumínio e c) tubagens. Retirado de (*Ultrasonic Welding of Battery Cells* / TELSONIC Ultrasonics, n.d.) e (*Ultrasonic Copper Tube Sealer* - BONNE Ultrasonic Welder, n.d.)

(Müller et al., 2022) e, por isso, requerem mais energia a ser transmitida por parte do equipamento, o que se torna uma limitação em muitos casos, devido às especificações necessárias (Cai et al., 2019).

Divergindo da gama de materiais envolvidos no processo de soldadura e direcionando para a constituição das ferramentas que o executam, há também algumas considerações relevantes a ter em conta. Tal como acontece para os *boosters*, os materiais mais utilizados no fabrico das ferramentas em questão são ligas de titânio, e ligas alumínio tratadas termicamente, sendo especialmente selecionados para minimizar as perdas de energia, conferir elevada resistência à fadiga e aumentar o tempo de vida dos componentes. Ferramentas em alumínio não são utilizadas quando se pretende soldar materiais mais duros nem quando as cargas são muito elevadas. É de notar que as faces das ferramentas que entram em contacto com os materiais podem ser sujeitas a tratamentos de anodização, entre outros, para evitar a transferência de óxidos para os componentes a unir. É ainda importante verificar se para cada material alvo de união, não existe afinidade química com o material na ferramenta, uma vez que poderá resultar numa adesão excessiva entre ambos e dificultar a subsequente separação, no final do ciclo de soldadura. Além dos materiais mencionados, e em oposição ao que se observa para os *boosters*, também se empregam aços no fabrico das ferramentas, apesar de estes apresentarem menor eficiência acústica.

A necessidade de boas propriedades acústicas dos materiais das ferramentas é de igual importância mesmo quando existe efetivamente um *booster* acoplado e a ferramenta funciona maioritariamente como órgão de contacto com as chapas a soldar.

Relativamente à natureza e geometria dos componentes a unir, a sua configuração implicará diferentes técnicas de posicionamento antes e durante o processo de soldadura. No caso de se soldar chapas/folhas metálicas (Figura 12 b)), o sistema de aperto pode basear-se em grampas ou pinças, enquanto que quando se pretende fazer a ligação de um conjunto de fios entre si ou entre os mesmos e um outro componente (Figura 12 a)), como por exemplo uma placa ou olhal de alumínio, para formar

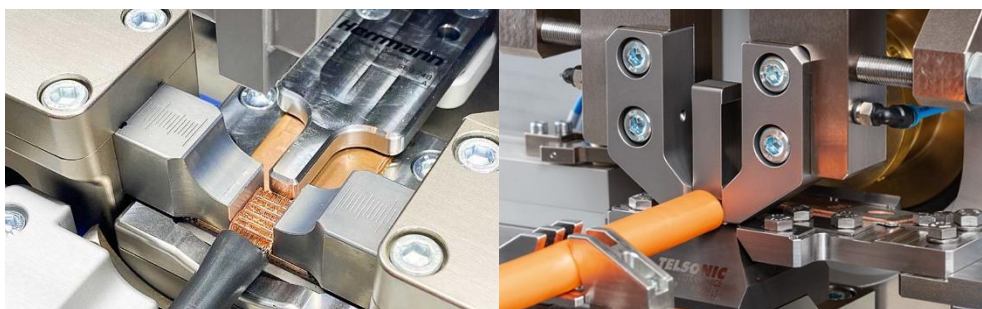


Figura 13 – Sistemas de fixação de fios elétricos em equipamentos de soldadura por ultrassons. Retirado de (*Ultrasonic Welding of Wire to Metal* / ASSEMBLY, 2020) e (*MPX Ultrasonics Welding System* / TELSONIC Ultrasonics, n.d.)

um determinado barramento elétrico, o procedimento é mais complexo. Neste último caso é crucial que o equipamento disponha de um sistema de fixação, como ilustrado na Figura 13, que mantenha os fios agregados na sua configuração desejada, de modo a não permitir a separação dos mesmos, nem uma variação da posição em relação ao componente a que vão ser acoplados, caso exista.

Para automatizar o processo, o sistema pode ser também dotado de um mecanismo de dobragem/quinagem que atua em simultâneo ou após a soldadura, com o objetivo de completar o conjunto a soldar, caso faça sentido para a geometria em causa.

4. ANÁLISE E PROPOSTA DO PROTÓTIPO EXISTENTE

No presente capítulo abordar-se-á o projeto do protótipo final, iniciando pela análise do mercado atual de equipamentos de soldadura da mesma tipologia e a definição de uma lista de especificações a ter em conta no desenvolvimento do projeto. Seguidamente partir-se-á para a análise e caracterização do protótipo existente, bem como parte do seu desenvolvimento e fabrico, e enunciam-se os testes experimentais realizados e determinação de falhas desta versão. O capítulo termina com as respetivas soluções conceptuais e por último com a configuração final do novo protótipo.

4.1. CONSIDERAÇÕES E DEFINIÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES DO EQUIPAMENTO

Retornando ao objetivo principal – o projeto e fabrico de um protótipo de soldadura por ultrassons de metais – o desenvolvimento iniciou com a observação e análise de vários equipamentos já existentes no mercado, alguns dos quais apresentados na Figura 14, e posterior compreensão das dificuldades/incongruências que alguns apresentam relativamente à eficácia no processo de soldadura. Estes problemas explicarão a necessidade de desenvolvimento de um novo equipamento.

Apesar de já terem sido concebidos equipamentos de soldadura contínua, em que o material se desloca numa determinada direção enquanto é realizada a solda, com uma ferramenta rotativa que permite a movimentação das chapas, neste trabalho apenas vai ser tido em consideração a variante mais comum do processo de soldadura por ultrassons.

Os equipamentos de soldadura têm, na sua maioria, o seu mecanismo resumido num atuador, responsável por aplicar pressão no material, um batente onde o mesmo é constrangido paralelamente à direção de aplicação da carga, e o subconjunto principal constituído pelo transdutor, *booster* e radiador

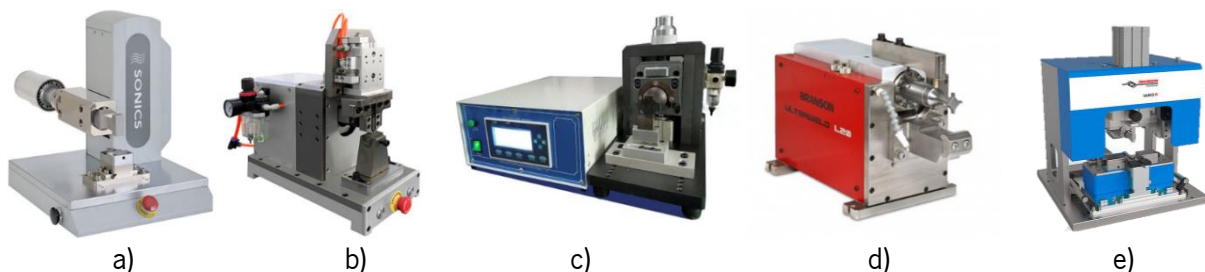


Figura 14 – Exemplos de equipamentos de soldadura por ultrassons de metais presentes na indústria: a) (*15 KHz Spot Welders / Sonics & Materials, Inc., n.d.*), b) (*3000W-20-KHz-Ultrasonic-Metal-Welding-Machine-in-Factory-Price.Webp, n.d.*), c) (*Quality Ultrasonic Metal Welder Battery Spot Welding Machines for Tab - Vplcorp, n.d.*), d) (<https://www.emerson.com/en-us/catalog/branson-l20-spot-welder>, n.d.), e) (*Herrmann Ultraschall, n.d.*)

acústico/ferramenta. Este último é muito semelhante entre os vários tipos de modelos existentes, uma vez que a tipologia do transdutor é comum à maioria dos processos que envolvem ultrassons.

Grande parte dos equipamentos deste tipo têm o seu funcionamento assente em sistemas pneumáticos e a ideia de recorrer a um sistema elétrico é haver uma resposta mais instantânea da máquina a variações das condições do processo (redução da espessura do material em função da carga aplicada, por exemplo) e, assim, adaptar os parâmetros em função do comportamento do material a soldar.

Tal como foi mencionado no capítulo anterior, não é possível conhecer previamente, e de forma precisa, o comportamento do processo de soldadura de chapas contaminadas superficialmente. Assim, de forma a alcançar as mesmas propriedades de união entre pares de chapas não contaminadas e contaminadas é primordial que os parâmetros de *input* variem no decorrer do processo.

Ou seja, o objetivo será alcançar um sistema capaz de se ajustar em tempo real às especificidades de cada utilização, contribuindo para um aumento da eficiência. Em simultâneo, a existência da célula de carga presente na base de apoio inferior às chapas a soldar informará o sistema acerca do estado atual do processo e este fará variar o *output* do atuador.

Estruturalmente também se pretende que o equipamento seja robusto e fiável perante as cargas aplicadas ao material. Isto significa anular ao máximo a flexão do conjunto *booster*/radiador acústico quando é exercida a pressão de soldadura necessária, que pode resultar numa união inconsistente ao longo da zona de ligação ou até mesmo na redução da área efetiva de soldadura. Tal consegue-se pela transferência do movimento/carga para o radiador acústico através de uma estrutura mais rígida que o apoia em pelo menos duas zonas, através de flanges metálicas, sendo estes componentes um ponto crucial para o correto funcionamento do equipamento.

O método de contabilização da carga aplicada pelo sistema aos materiais alvo da soldadura varia de equipamento para equipamento. Alguns utilizam um servo motor como meio indireto da medição da carga, outros recorrem a outro tipo de sensores auxiliares ou células de carga, sendo também comum utilizarem ambos os métodos em simultâneo de forma a aumentar a fiabilidade dos resultados e proteger os seus componentes de possíveis falhas por parte de um dos sensores.

Os batentes inferiores onde o material a soldar é constrangido verticalmente e onde são, normalmente, colocadas as células de carga, podem encontrar-se fixos na base de trabalho (Figura 14 a), b), c) e e)) ou numa estrutura fixa à parte frontal da estrutura (Figura 14 d)), não havendo nenhuma vantagem particular de cada uma das vertentes, à exceção da maior flexibilidade de colocação da célula.

Numa fase seguinte, e tendo em conta o leque de características dos modelos observados, foram discutidos os principais atributos que o protótipo a desenvolver deverá apresentar. A diversidade de materiais a soldar e a espessura máxima admissível não serão características alvo de melhoria relativamente aos vários modelos existentes, uma vez que essas limitações dependem, principalmente, da natureza do transdutor e do princípio físico por detrás dos ultrassons e da soldadura. Posto isto, a tentativa de aumento da flexibilidade da tecnologia de soldadura por ultrassons seria um tema para um trabalho futuro.

A análise referida contribuiu para a definição das seguintes especificações:

- Frequência do transdutor: 20 kHz; limitado pelo transdutor e respetiva fonte;
- Amplitude de vibração: dependente do material e geometria a soldar (20-60 μm);
- Carga/pressão máxima de soldadura: até 2000 N;
- Espessura máxima admissível das chapas: 0,1-1,5 mm por chapa; total = 3 mm
- Gama de materiais: essencialmente cobre e alumínio;
- Potência: gerador até 2000 W e 400 W do servomotor.

É de notar que ao longo do projeto e ensaios de soldadura alguns atributos ambicionados poderão variar em relação às especificações, uma vez que dependerá da forma como o protótipo inicial atua perante as condições a que será sujeito e da disponibilidade de aquisição dos vários componentes que constituirão a versão final do equipamento. Dito isto, entende-se que este último poderá mesmo superar as expectativas em causa.

4.2. ESTUDO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO EXISTENTE

4.2.1. MECANISMO E DESIGN

O protótipo do qual parte este desenvolvimento (Figura 15) segue os traços principais de grande parte dos equipamentos existentes, pelo facto de a natureza do processo de soldadura se refletir num mecanismo relativamente simples, em que os movimentos e etapas são executados de forma muito idêntica. No entanto, cada modelo tem as suas especificidades, que por muito subtis que possam aparentar, podem resolver problemas existentes em modelos da concorrência.

Tal como foi abordado, o equipamento em causa resultou do trabalho desenvolvido ao longo da unidade curricular Projeto integrador em Engenharia Mecânica do semestre transato do mesmo ciclo de estudos. Assim, os prazos impostos resultaram num protótipo com vários aspetos funcionais por confirmar e numa escolha dos materiais e componentes apoiada no orçamento definido e na disponibilidade da indústria no momento do seu fabrico.

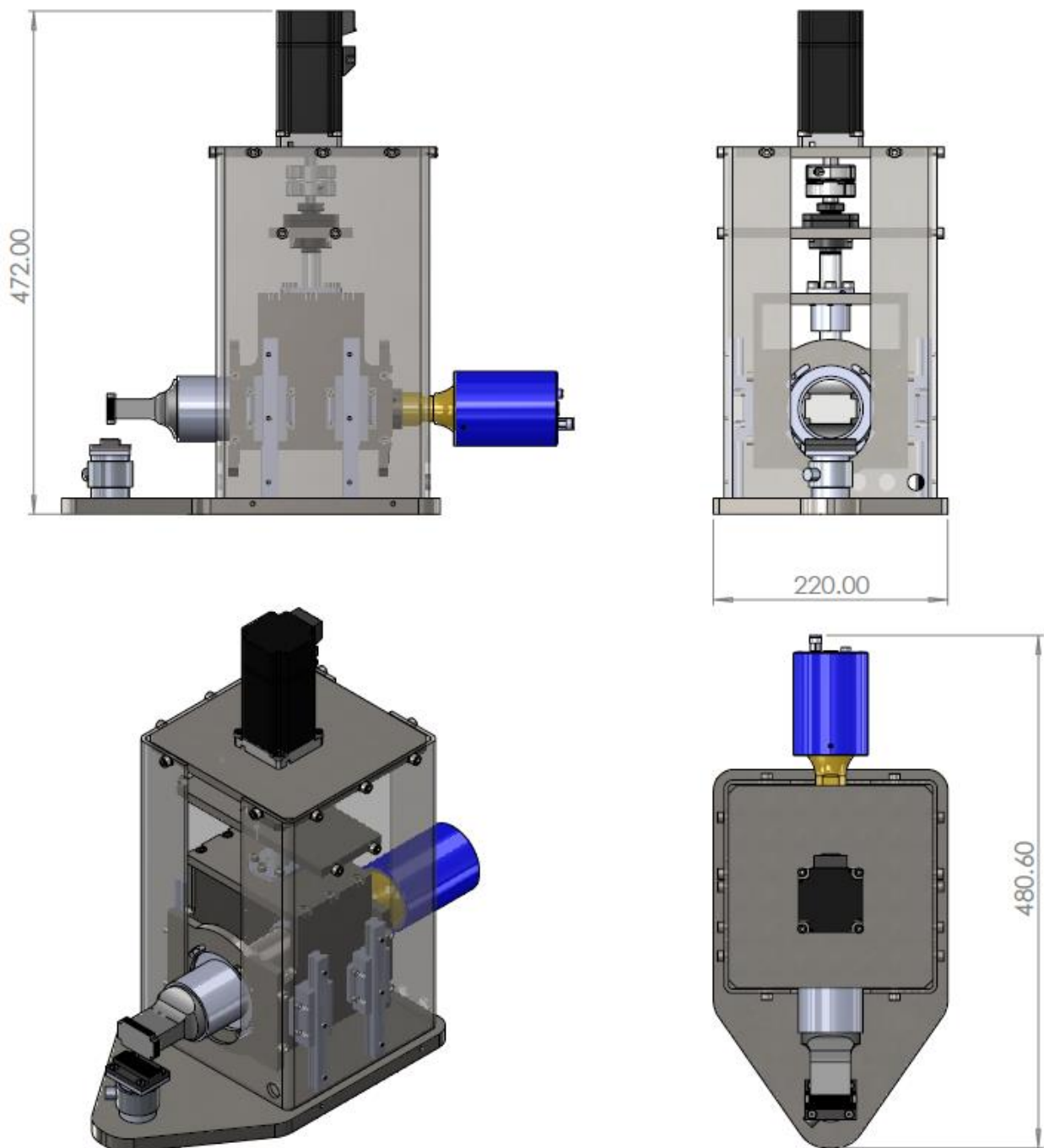


Figura 15 – Modelo CAD do Protótipo alvo de estudo.

Em termos estruturais, este é constituído por uma carcaça em aço de perfil quadrangular com 200 mm de lado e 4 mm de espessura e chapas de aço de 10 e 15 mm de espessura. Na zona superior localiza-se um servo motor que atua sobre um fuso de esferas, que por sua vez faz movimentar verticalmente a estrutura móvel que acondiciona o sistema composto pelo transdutor, *booster* e radiador acústico, sendo este movimento auxiliado por 4 guias lineares, fixos à carcaça. A base do equipamento resume-se a uma chapa de aço de 15 mm de espessura, onde é fixo o batente dos componentes a soldar, composto por uma bloco de aço de face texturada aparafusado a uma célula de carga.

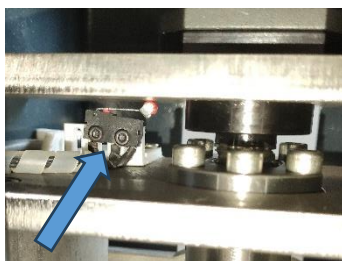
Tanto o fuso de esferas como os guias lineares e respetivos patins são do fabricante HIWIN, sendo os modelos R25-05K4-FSCDIN, HGR15R0220C e HGW15CCC, respetivamente.

O referido servo motor (Figura 16), por sua vez, consiste no modelo WD60M do fabricante WECON, com potência nominal de 400 W, velocidade de rotação máxima de 3000 rpm e dispõe de travão.

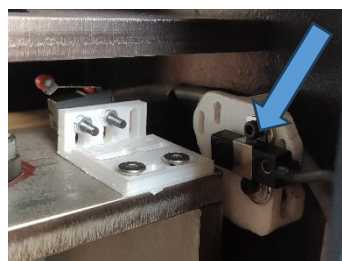


Figura 16 – Servo motor WECON WD60M-04030S-A1G. (WECON PORTUGAL - TECTOMA, n.d.)

O movimento vertical é delimitado por fins de curso físicos (Figura 17 a)) e indutivos (Figura 17 b) e c)) montados em componentes poliméricos, obtidos por manufatura aditiva, que foram aparafusados em vários locais do equipamento.



a)



b)



c)

Figura 17 – Fins de curso: a) físico e b) e c) indutivos.

A transmissão do movimento entre o atuador elétrico e o fuso de esferas é feito através de uma junta de rotação GMT FACCS46 (Figura 18 a)) e o fuso é constrangido verticalmente por uma chumaceira com flange quadrada HIWIN FK17 (Figura 18 b)), por sua vez fixa numa chapa intermédia que se encontra entre a placa superior do equipamento e o sistema móvel.



Figura 18 – a) Junta de rotação GMT FACCS46 e b) chumaceira com flange quadrada HIWIN FK17.

Uma vez que o objetivo aquando do projeto do protótipo antecedente consistia apenas em fabricar um protótipo funcional, não houve a necessidade de projetar a carcaça exterior de modo a ocultar os parafusos visíveis nem implementar o sistema elétrico no próprio equipamento. Desta forma, as soluções apresentadas para a fixação dos componentes apenas foram pensadas com o objetivo de manter toda a estrutura constrangida.

A estrutura interna (Figura 19), que se desloca verticalmente e é responsável por assegurar a fixação do sistema de ultrassons, consiste em 5 chapas de 10 mm de espessura que foram desenhadas tendo em conta a necessidade de possíveis ajustes na montagem, ou seja, no lugar de alguns furos de ligação aparafusada foram colocados furos oblongos, prevendo possíveis desvios resultantes da fase de fabrico (Figura 20 a)). O mesmo foi aplicado aos furos de ligação da tampa superior à carcaça lateral (Figura 20 b)).

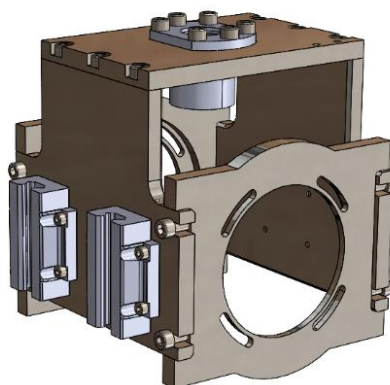


Figura 19 – Estrutura Móvel do protótipo inicial.

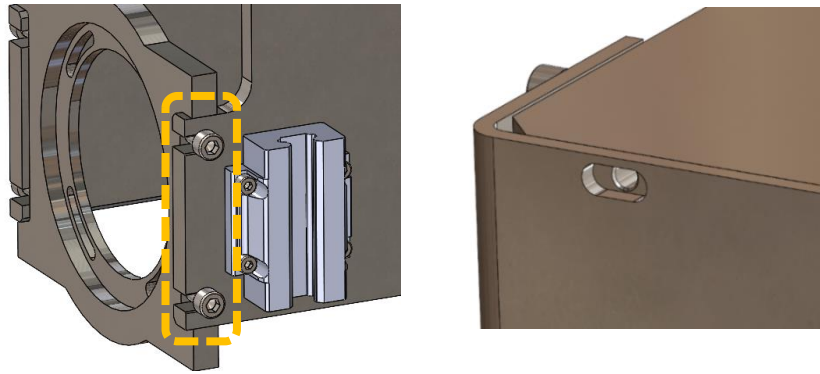


Figura 20 – Detalhes geométricos tidos em conta para a montagem da estrutura do equipamento.

O órgão responsável pela transformação do sinal elétrico em movimento, isto é, o transdutor, está projetado para atuar a uma frequência 20 kHz, e gera oscilações de amplitude $20\ \mu\text{m}$, de acordo com o especificado na ficha técnica.

O radiador acústico utilizado (Figura 21) consiste num componente não normalizado, fabricado em aço DC03 tratado termicamente para atingir uma dureza de 60-62 HRC, é fixo através de uma zona roscada M53 e tem uma área de soldadura mínima de $7 \times 18\ \text{mm}$ em 2 das faces e máxima de $7 \times 38\ \text{mm}$ nas duas restantes faces. A largura da base das reentrâncias piramidais presentes nessas faces é de aproximadamente 1 mm e o vértice das mesmas destaca-se cerca de 0,5 mm relativamente ao plano da base. O *booster*, também não sendo um componente *standard*, é fabricado na liga Ti6Al4V e tem uma relação de transmissão de 1:1.5, que resulta numa amplitude teórica de $30\ \mu\text{m}$ a ser conduzida à ferramenta.

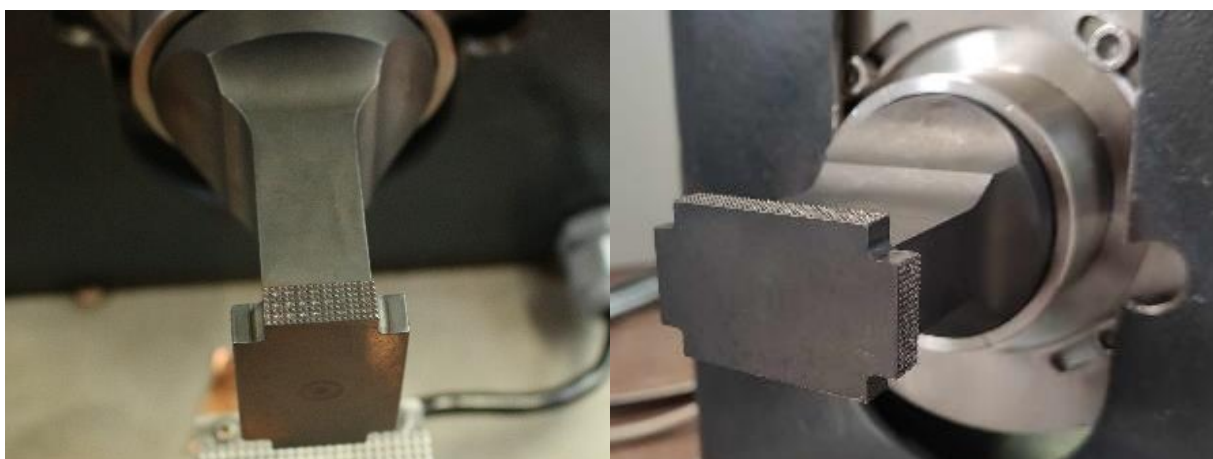


Figura 21 – Radiador acústico/ *Sonotrode*.

A célula de carga de compressão (Figura 22 a)), que é da tipologia “*strain gauge*”, ou seja, mede a partir da deformação elástica imposta aos elementos no seu interior, e tem uma capacidade máxima de 200 kg, um erro percentual teórico de 0,5% e sensibilidade de 1.0-1.5 mV/V. Acima desta encontra-se fixo, por ligação aparafusada, o batente em aço AISI 316L, com uma área funcional de 17,2x48 mm, apresentando uma superfície de reentrâncias piramidais de 2 mm de largura da base e 0,8 mm de profundidade (Figura 22 b)).

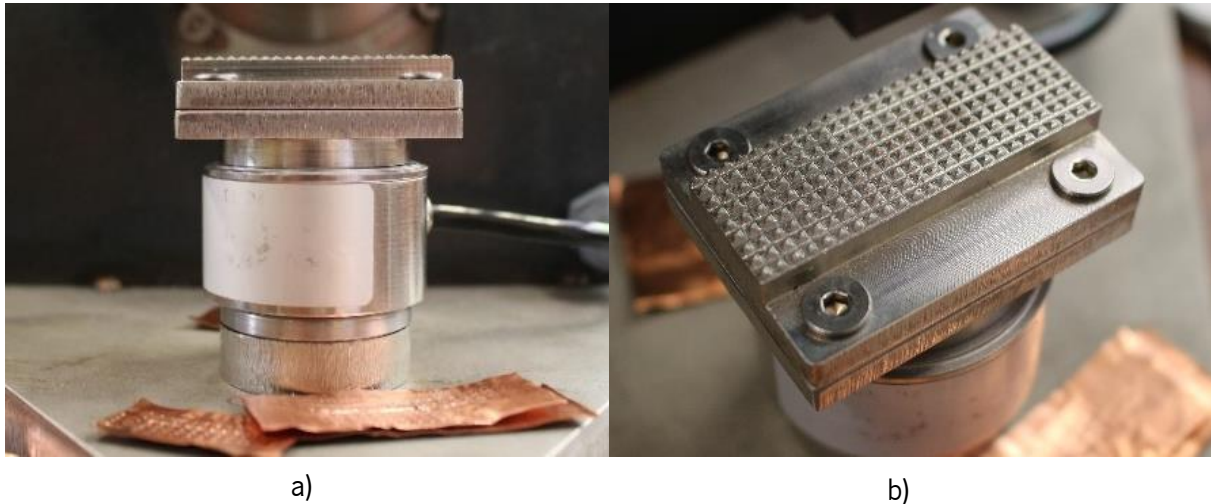


Figura 22 – a) célula de carga e b) batente de soldadura em aço AISI 316L, com reentrâncias piramidais.

As flanges, que fazem a ligação entre a estrutura do equipamento e o sistema de transmissão dos ultrassons, foram inicialmente projetadas com uma geometria tubular que permitisse distanciar a extremidade da ferramenta ao exterior da carcaça do equipamento, como ilustrado na Figura 23, e que admitisse a aplicação da carga máxima do atuador sem apresentar flexão significativa.

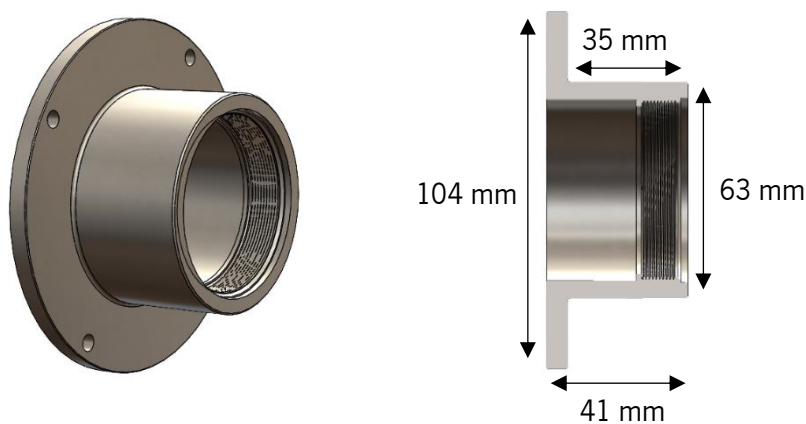


Figura 23 – Geometria das flanges do protótipo inicial.

Tinha sido já posto em causa a elevada rigidez que estes componentes iriam apresentar na direção de vibração durante o funcionamento do protótipo, contudo optou-se por manter a geometria apresentada de entre várias outras opções por facilitar o fabrico e para servir como objeto de estudo nas restantes fases do projeto.

4.2.2. FABRICO

Os componentes derivados de chapas metálicas, isto é, a base, a estrutura móvel e a placa superior, foram todos eles obtidos por corte a laser de chapa de 10 e 15 mm de aço inoxidável AISI 304, tendo alguns sido posteriormente maquinados de forma a executar rebaixamentos, furos roscados e outras geometrias. Aquando da escolha do material apenas se teve em conta a possibilidade de ser passível de corte a laser e a capacidade de conferir a rigidez necessária ao equipamento, para além de apresentar boa resistência à corrosão.

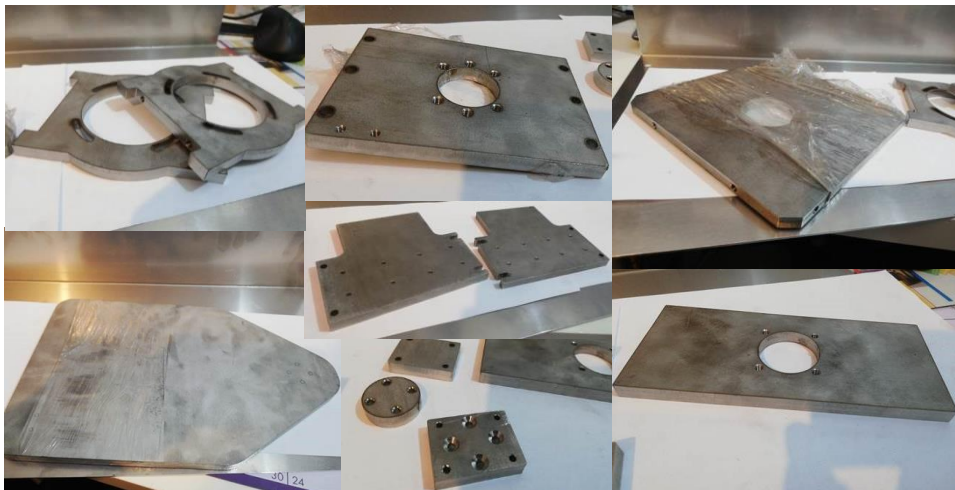


Figura 24 – Componentes fabricados por corte a laser.

As flanges inicialmente utilizadas (Figura 25 b)) resultaram do torneamento de perfil redondo em aço AISI 304 e furação e roscagem dos 4 furos de fixação ao sistema, tendo sido posteriormente adicionados outros 4 desfasados 45 graus em relação aos anteriores para aumentar a flexibilidade no posicionamento destes componentes.



Figura 25 – a) carcaça do equipamento e b) flange maquinada.

Se possível, seria uma vantagem o novo protótipo reutilizar os guias lineares e patins, o servo motor, fuso de esferas e juntas de rotação entre veios presentes no modelo anterior. É de notar que o sistema responsável pela geração dos ultrassons e transferência dos mesmos para a soldadura, isto é, o transdutor, *booster* e radiador acústico será também reutilizado no protótipo final, por motivos técnicos e também económicos, uma vez que uma percentagem significativa do custo total do equipamento se fundamenta nesses componentes.

4.2.3. SISTEMA ELÉTRICO

Para que o equipamento seja funcional, teve de ser idealizado um sistema elétrico capaz de interligar e controlar todas as partes do protótipo. Sendo que o desenvolvimento e definição deste mesmo sistema não faz parte dos objetivos principais do tema em questão, maioritariamente por não se enquadrar totalmente na área de estudo do percurso curricular, não será feita uma caracterização e elucidação tão pormenorizadas do mesmo. Seguidamente será representada a constituição, assim como uma breve explicação da função de cada um dos principais elementos que integra o sistema elétrico.

Gerador de ultrassons (Figura 26 a)): Converte a frequência de 50/60 Hz da corrente elétrica na frequência ultrassónica e fornece o sinal ao transdutor;

- Marca/Modelo: MPI Sonoweld 2000;
- Potência: 2000 W;
- Frequência nominal: 20 kHz;

Drive do Servo Motor (Figura 26 b)): tem a função de alimentar o respetivo atuador e de avaliar e regular a diferença entre os dados enviados ao mesmo e o estado atual de funcionamento, adaptando os valores de corrente ou tensão em função dessa diferença.

O modelo utilizado é compatível com os servomotores de 400 W e 750 W, tendo em conta uma possível substituição do atuador pela versão de potência superior, numa fase seguinte do projeto.



Figura 26 – a) Gerador de ultrassons Sonoweld 2000. (*SONOWELD Generators / MPI Ultrasonics - Sonic and Ultrasonic Processing Technology*, n.d.) e b) Drive do servo motor, marca WECON, modelo VD2-010SA1G. (WECON PORTUGAL - TECTOMA, n.d.)

Programa em *software* Labview (Figura 27): Baseado num programa já existente e modificado para ler e controlar as variáveis do equipamento. Engloba a definição dos parâmetros do ultrassom e da soldadura e serve também de interface gráfica, tendo sido alvo de algumas modificações de modo a ajustar-se mais eficazmente ao sistema desenvolvido. A sua estrutura final encontra-se elucidada no subcapítulo 4.2.6;

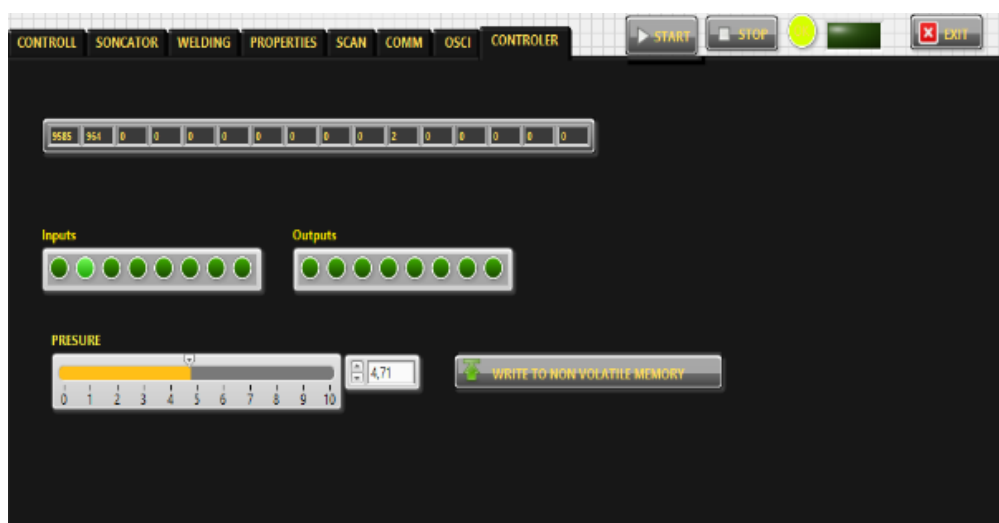


Figura 27 – Parte da interface gráfica de controlo do equipamento.

Branchboard (Figura 28 b)): componente de interligação de todas as restantes partes do sistema. Permite a comunicação entre o gerador, microcontrolador e o programa *Labview* presente no computador, permitindo a entrada e saída de informação de/para o equipamento. Este elemento será também ligado ao driver do atuador;

Microcontrolador (Figura 28 c)): *PCB* com a função fundamental de interpretar os dados provenientes do equipamento e *software*.

Transmite:

- Dados do programa Labview ao equipamento
- Sinais físicos (*Start*, *Stop*) ao programa;
- Informação de/para o gerador de ultrassons;
- Sinais para os periféricos físicos, isto é, *LEDs*;
- Informações da célula de carga;
- Informações do programa para o driver do atuador e vice-versa.



Figura 28 – a) Painel Frontal, b) *Branchboard* e c) Microcontrolador do equipamento.

O sistema elétrico na sua totalidade, à exceção do gerador, foi integrado numa caixa elétrica idêntica às utilizadas em equipamentos industriais e dispõe de um painel de comando, como é apresentado na Figura 28 a).

A interligação e comunicação entre os principais elementos do sistema elétrico e os órgãos do equipamento é feita de acordo com o esquema da Figura 29.

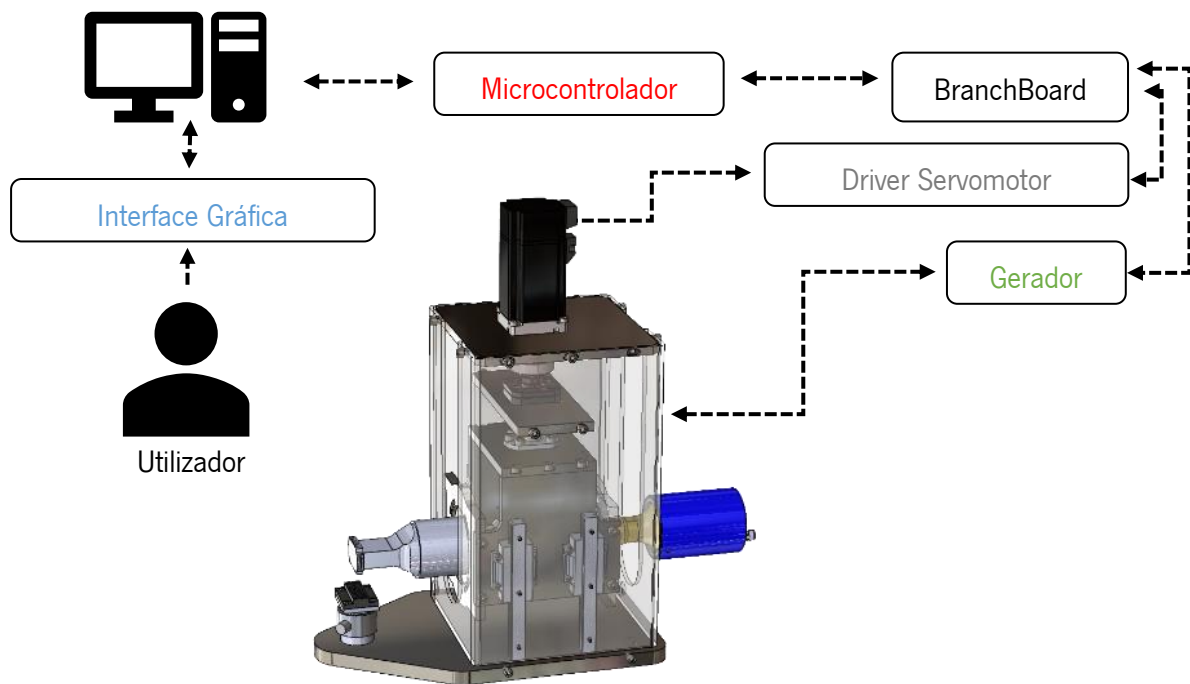
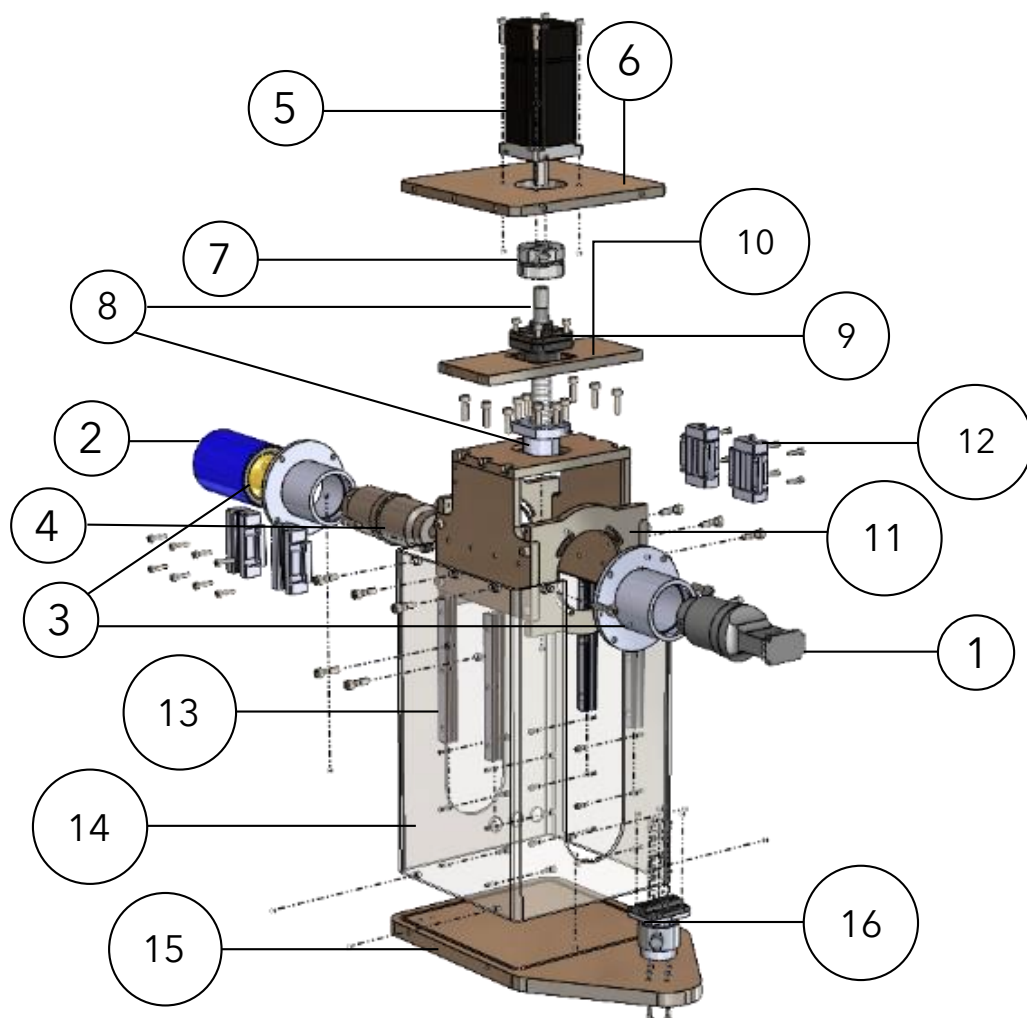


Figura 29 – Esquema de ligação e comunicação da parte elétrica do equipamento.

4.2.4. MONTAGEM

Uma dúvida que surgiu quanto à montagem do equipamento, e que poderia originar alterações em alguns componentes do mesmo, foi a ordem pela qual se deveria fazer a ligação do mecanismo à carcaça exterior. De forma mais concreta, a questão recaiu sobre se deveria ser feito o encaixe dos guias lineares nos respetivos patins já aparafusados ao sistema móvel ou se os mesmos guias seriam fixos na carcaça e posteriormente feita a conexão da estrutura móvel. Apesar de a primeira opção demonstrar, inicialmente, mais simplicidade no que toca à entrada dos patins nos guias, por haver mais liberdade no ajuste e por ser menos propício à saída das esferas dos patins, este método não seria possível de aplicar por não haver espaço para o posterior aperto dos guias ao equipamento. Isto porque os parafusos teriam de ser colocados a partir do interior da carcaça. Durante o procedimento foram apontadas várias outras dificuldades de montagem e afinação, que serão enunciadas em pormenor no subcapítulo 4.3.

Omitindo os fins de curso e respetivos suportes, a versão apresentada resultou em 30 componentes individuais e cerca de 88 elementos de ligação, dispostos como pode ser observado na Figura 30.



- | | | |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1 - Radiador acústico | 7 - Junta/União de veios | 13 - Guias lineares |
| 2 - Transdutor | 8 - Fuso de esferas | 14 - Carcaça exterior |
| 3 - Flanges | 9 - Chumaceira com flange quadrada | 15 - Base |
| 4 - <i>Booster</i> | 10 - Chapa intermédia | 16 - Batente com célula de carga |
| 5 - Servomotor | 11 - Estrutura móvel | |
| 6 - Tampa superior | 12 - Patins | |

Figura 30 – Vista explodida e respetiva legenda do protótipo inicial.

Depois de montado, o equipamento resultou no conjunto exibido na Figura 31, já em condições de ser colocado em operação.



Figura 31 – Protótipo inicial após montagem.

4.2.5. MODO DE FUNCIONAMENTO

Durante o movimento de descida, o sistema atua em “modo binário”, ou seja, a sua paragem é dada quando o atuador atinge o valor de binário predefinido. Por outro lado, na subida, o equipamento trabalha por posição e interrompe o movimento com o acionamento do fim de curso magnético superior.

De modo a evitar danos nos componentes quer por má contabilização do esforço por parte do servo motor ou da célula de carga quer por falhas dos sensores de proximidade magnéticos, existe 1 interruptor de fim de curso físico a limitar as posições mínima e outro ainda a colocar para a posição máxima do sistema.

Antes de prosseguir com o ciclo de soldadura, pressiona-se o botão *Start* localizado no painel frontal da caixa elétrica de modo a deslocar o sistema móvel para a posição superior (*home*). Verificada a posição, após o posicionamento das chapas no batente inferior, pressiona-se novamente o mesmo botão para fazer atuar o servo motor e descer o sistema até que este exerça no material a pressão predefinida. Atingido este valor, o gerador de ultrassons estimula o transdutor com o sinal elétrico de frequência desejada que, por sua vez, é convertido em vibrações acústicas que são aplicadas ao material.

Uma vez que a frequência varia ligeiramente ao longo do processo de soldadura, a curva de impedância acústica foi afinada para que essa variação estivesse num intervalo entre 19,8 e 20,0 kHz. Se o valor sair deste intervalo, o gerador dá sinal de paragem, o ciclo é interrompido e a ferramenta retorna à sua posição inicial.

Estas condições são empregues durante o tempo de soldadura definido no programa e, após esta duração, o gerador deixa de atuar e o sistema sobe até à posição inicial. O ciclo repete-se sempre que o operador der início ao processo.

4.2.6. SOFTWARE DE CONTROLO DO EQUIPAMENTO

O controlo e definição das condições em que o sistema opera, assim como a interface entre o operador e o mesmo, são feitos a partir do software disponibilizado pelo fabricante do gerador de ultrassons e modificado para contemplar a comunicação com o atuador elétrico, célula de carga e fins de curso que compõe o protótipo. Este é assente em ambiente/plataforma *Labview* e a sua estrutura divide-se em várias secções de acordo com a sua função, baseadas nos seguintes separadores da interface gráfica:

CONTROL: controlo de parâmetros associados ao gerador e transdutor, i.e., frequência, potência, fase e amplitude, dentro de um determinado intervalo.

SONCATOR: definição de parâmetros adicionais que se encontram desativados para o equipamento em questão.

WELDING: controlo dos valores de potência, energia e tempo *set-point* do ciclo de soldadura;

PROPERTIES: regulação de outras propriedades relativas ao gerador e listagem dos tempos de soldadura de ciclos anteriores.

SCAN: frequência de ressonância e o seu ajuste com base na resposta dada pelo comportamento da estrutura;

COMM: opções de comunicação do programa com o gerador e verificação da mesma;

OSCI: painel gráfico da variação da frequência, amplitude, potência, fase e corrente elétrica em função do tempo e opções de regulação da transição destes parâmetros;

CONTROLLER: ajuste da força de atuação do servomotor e apresentação dos valores de tensão/corrente medidos pelo mesmo e a sua intensidade, em N, quantificada pela célula de carga.

No Anexo B: Interface Gráfica do programa de controlo do equipamento estão ilustradas cada uma das secções acima referidas, que compõe assim a estrutura do programa.

4.2.7. DEFINIÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE FORÇA E PRESSÃO DE SOLDADURA

De modo a verificar a capacidade do equipamento em exercer a pressão mínima necessária ao processo de soldadura de vários tipos de chapas e respetivas configurações, foi feito o cálculo da carga máxima admissível de ser exercida pelo atuador elétrico, a partir das suas especificações.

Através da equação 13, é possível fazê-lo substituindo as variáveis T , L e η_f pelos valores do binário nominal do motor, em N·m, passo do fuso de esferas, em mm, e eficiência do mesmo, respetivamente.

$$T = \frac{F \times L/1000}{2\pi\eta_f} \Leftrightarrow F = T \times 2000\pi \times \frac{\eta_f}{L} \quad (13)$$

O mesmo foi feito para o binário de pico do motor, que faz sentido de ter em conta, uma vez que a aplicação da carga é quase instantânea para curtos intervalos de tempo de soldadura.

Considerando que os guias lineares apenas permitem que o sistema *booster/sonotrode* desça perpendicularmente, e que estes dois últimos componentes foram projetados de forma a não admitirem uma flexão significativa do sistema para a capacidade de carga do atuador em questão, a distância da zona de aplicação da força até ao batente de soldadura não deveria dar origem a grandes perdas na carga exercida pelo motor no material.

Tabela 1 – Especificações dos servomotores WD60M com e sem travão.

Motor model	WD60M-04030S-A1F	WD60M-04030S-A1G
Rated power (kW)	0.4	
Rated current (A)	2.5	
Rated torque (N·m)	1.27	
Max. torque (N·m)	3.81	
Rated speed (r/min)	3000	
Rotor Inertia (Kg·m ²)	0.52×10^{-4}	0.62×10^{-4}
Brake	N/A	YES
Dimension (L)	92mm	121.5mm

Assim sendo, a carga máxima aplicada nos materiais a soldar é aproximadamente igual à carga exercida pelo motor. Posto isto, para um passo de 5 mm e eficiência do fuso de 90%, a força vertical F

efetuada pelo mesmo, considerando o valor de torque nominal presente na Tabela 1, é dada pela seguinte expressão:

$$F = T \times 2000\pi \times \frac{\eta_f}{L} = 1,27 \times 2000\pi \times \frac{0,9}{5} = 1436,3 \text{ N}$$

Uma vez que a força aplicada não é suficiente para aferir a compressão necessária nos materiais e consequentemente a obtenção de uniões bem conseguidas, é importante ter em conta a área de contacto entre a ferramenta e as chapas/fios a soldar. No caso do radiador acústico em questão existem duas superfícies de soldadura com áreas distintas, pelo que será conveniente contabilizar ambas de modo a definir corretamente os parâmetros do processo para cada caso. Na Figura 32 é possível comparar as diferentes superfícies de atuação da ferramenta e as respetivas dimensões.

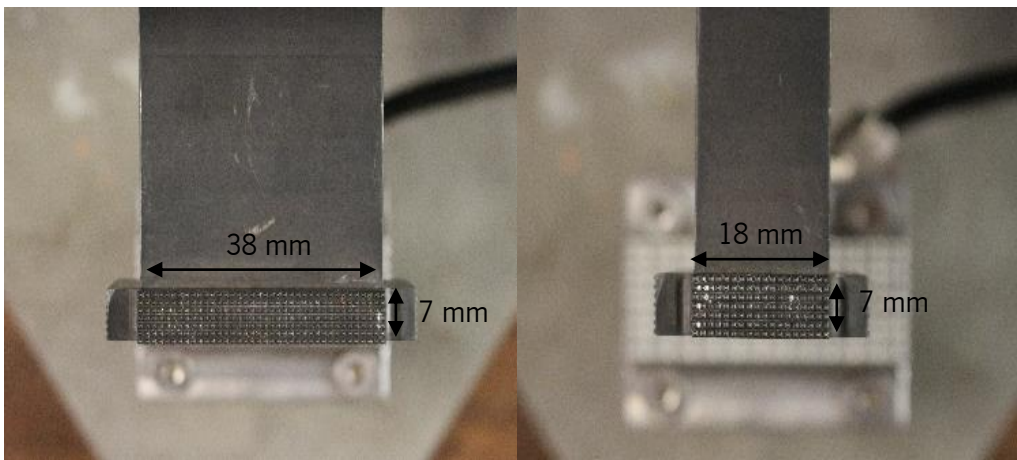


Figura 32 – Dimensões das diferentes superfícies de soldadura da ferramenta.

Assim,

$$\text{Área menor da ferramenta} = 7 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} = 126 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área maior da ferramenta} = 7 \text{ mm} \times 38 \text{ mm} = 266 \text{ mm}^2$$

Desta forma, para o valor de força obtido acima, as pressões resultantes para as áreas mínimas e máximas da ferramenta foram calculadas da seguinte forma:

$$P_{A_{min}} = F/A_{min} = 1436,3/126 \approx 11,40 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 11,4 \text{ MPa}$$

$$P_{A_{máx}} = F/A_{máx} = \frac{1436,3}{266} \approx 5,40 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 5,4 \text{ MPa}$$

Repetindo o processo, desta vez considerando o torque máximo de pico do atuador – 3,81 N·m – foram novamente calculadas a força teórica máxima exercida pela ferramenta e as pressões resultantes, substituindo os valores nas expressões acima.

$$F_{máx} = 3,81 \times 2000 \times \pi \times 0,9/5 \approx 4309 \text{ N}$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{F}{A_{min}} 4309/126 \approx 34,20 \frac{N}{mm^2} = 34,20 MPa$$

$$P_{min} = \frac{F}{A_{m\acute{a}x}} = 4309/266 \approx 16,20 \frac{N}{mm^2} = 16,20 MPa$$

Uma análise da literatura relativa a ensaios de soldadura por ultrassons de várias configurações de chapas de cobre e alumínio permitiu concluir que os valores máximos de pressão no material e carga vertical conseguidos com o atuador elétrico empregue no equipamento estão no intervalo admissível para que seja possível soldar corretamente com qualquer uma das faces da ferramenta. Al-Sarraf & Lucas (2012) evidenciaram ensaios de soldadura com intervalos de força de soldadura de 50 a 800 N para chapas de 0,1 e 0,5 mm de alumínio e cobre, respetivamente, apresentando resistência máxima à tração para as amostras Cu-Cu soldadas a aproximadamente a 800 N e para as Al-Al a cerca de 600 N. Para o par Al-Cu, a resistência máxima revelou-se para uma força de soldadura de 450 N. Komiyama et al. (2016) enunciaram o processo de soldadura de chapas de alumínio AA1050 de 3 mm de espessura com 3 diferentes cargas, 294 N, 588 N e 882 N, com diferentes geometrias superficiais da face da ferramenta, com um equipamento de 2400 W de potência máxima, a uma frequência de 15 kHz e 3 segundos de tempo total de soldadura. H. Li & Cao (2019) procederam ao estudo da união de chapas de cobre puro e liga de alumínio 6061-T6, ambas com 0,8 mm de espessura, aplicando cargas de soldadura no intervalo de 1375 a 2175 N, para um tempo de soldadura de 0,5 segundos e uma amplitude de 24 μm . Ainda, Cheng et al. (2022) compilaram não só os valores de carga e pressão de soldadura como também os restantes parâmetros utilizados por vários autores para a soldadura de diferentes pares de materiais.

Uma vez que à célula de carga está associado um determinado erro e que o limite de carga é de aproximadamente 200 kg, é importante definir um intervalo de funcionamento do atuador, de modo que qualquer valor de carregamento atribuído pelo operador não exceda o valor máximo admissível pela célula. Através das curvas de funcionamento do motor é possível retirar os valores de binário a que o mesmo opera e perceber em que situações excede a capacidade nominal e se aproxima do valor de pico de 3,81 N·m.

De forma a comparar os valores calculados analiticamente com os valores medidos pela célula de carga, foram feitos múltiplos ensaios para cada nível de carga definido no programa de controlo do equipamento, com o gerador de ultrassons desligado, e estabeleceu-se a curva que relaciona a última variável com os níveis definidos. Em simultâneo, recorreu-se ao *software* de monitorização do servomotor (Figura 33) para registar o valor percentual de binário para cada nível de ensaio, em relação ao seu valor nominal, isto é, 1,27 N·m, e deduziu-se a segunda curva, pela substituição desses valores na equação 13. Através do gráfico da Figura 34, comprova-se a relação linear entre os níveis de carga tanto com os

valores da célula como com o binário exercido pelo atuador, contudo os declives diferentes refletem uma discordância na medição dos 2 últimos parâmetros, tendo ambos o ponto inicial com coordenadas semelhantes e uma maior discrepância com o aumento da carga. Esta ocorrência sugere a presença de perdas desde o ponto de atuação do servomotor até à zona de contacto da ferramenta com o material, relacionadas também com a distância do ponto de aplicação da força até à zona de soldadura, uma falta de exatidão/sensibilidade de medição da célula, ou consideração de valores diferentes dos reais no cálculo da força exercida pelo atuador na equação 13.

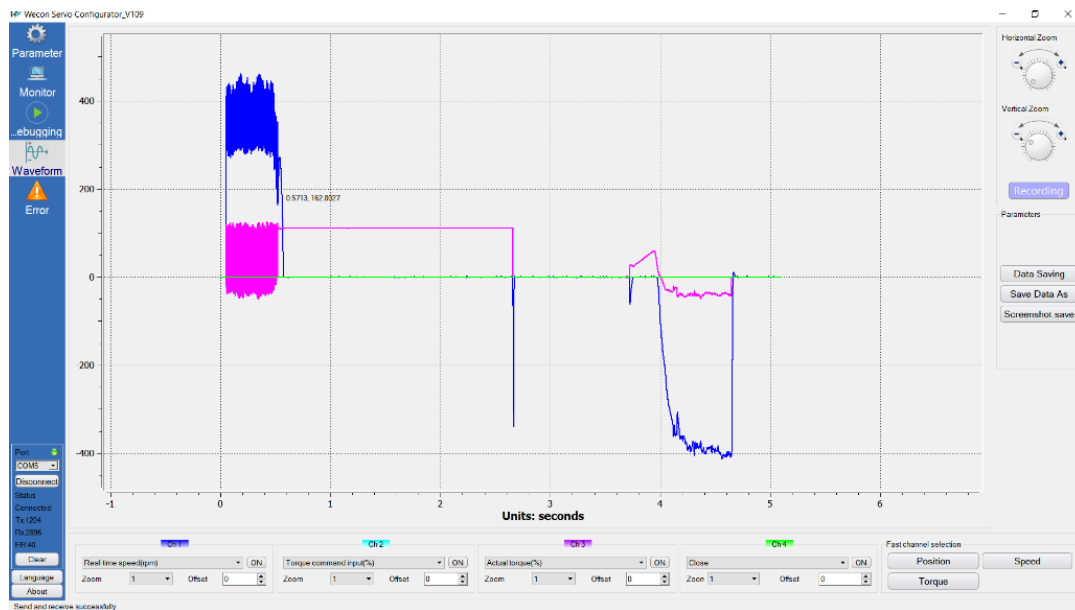


Figura 33 – Interface gráfica do software de monitorização do servomotor.

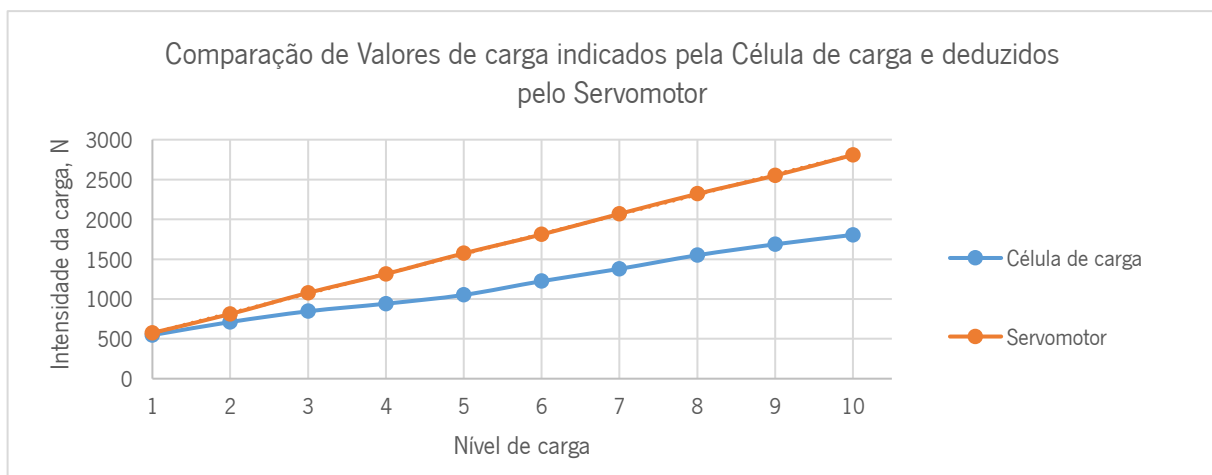


Figura 34 – Relação entre os valores medidos pela célula de carga e pelo servomotor e os respetivos níveis de carga.

Os valores considerados como referência para especificar as condições de soldadura de amostras devem seguir preferencialmente os resultados experimentais, isto é, os medidos pela célula de carga, mesmo que não sejam próximos dos valores predefinidos no programa de controlo. Assim, a correspondência entre os vários níveis de atuação do servomotor, de 1 a 10, e a sua intensidade em N, aproximando os valores à dezena, foi feita de acordo com o apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Correspondência entre os níveis de carga definidos no programa e a sua intensidade, em N.

Nível de carga	Intensidade (N)
1	550
2	710
3	850
4	940
5	1050
6	1220
7	1380
8	1550
9	1690
10	1810

4.2.8. ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO E TESTES EXPERIMENTAIS

Após a observação e análise estrutural do protótipo enunciado, os testes experimentais foram a segunda etapa propriamente dita do presente trabalho, podendo esta ser dividida em duas fases. A primeira resulta na verificação do equipamento em funcionamento, com vários conjuntos de materiais a ser unidos e variando os parâmetros do processo, nomeadamente a pressão de contacto exercida nos materiais e o tempo de atuação.

A segunda resume-se na observação das uniões efetuadas através de microscopia, de várias secções dos materiais soldados, assim como na execução de testes de tração, de forma a verificar o grau de eficácia do processo e perceber o efeito da variação dos parâmetros de funcionamento e das características construtivas do equipamento na qualidade na união. Os procedimentos empregues seguiram a metodologia utilizada em alguns trabalhos de investigação, sofrendo algumas variações em função das especificidades do caso em estudo.

4.2.8.1. TESTES DE SOLDADURA

O equipamento e o sistema elétrico do qual partirá o novo protótipo foram apenas testados de forma a verificar a execução dos movimentos e a correta ligação dos componentes. Contudo não foi alvo de

validação em termos de repetibilidade e união efetiva dos materiais. Assim, antes de avançar com uma escolha bem definida do procedimento a seguir, foi necessário ganhar sensibilidade em relação ao processo de soldadura e verificar se o mesmo era executado com sucesso.

Fazendo múltiplos ensaios com diferentes cargas e configurações de materiais, foi possível concluir que, para o batente inicialmente montado no protótipo (Figura 22 a)), a soldadura não era efetuada devido à interferência provocada pelas reentrâncias de dimensão muito superior às presentes na ferramenta. O resultado foi o rompimento das chapas na zona de contacto com as saliências inferiores (Figura 35).

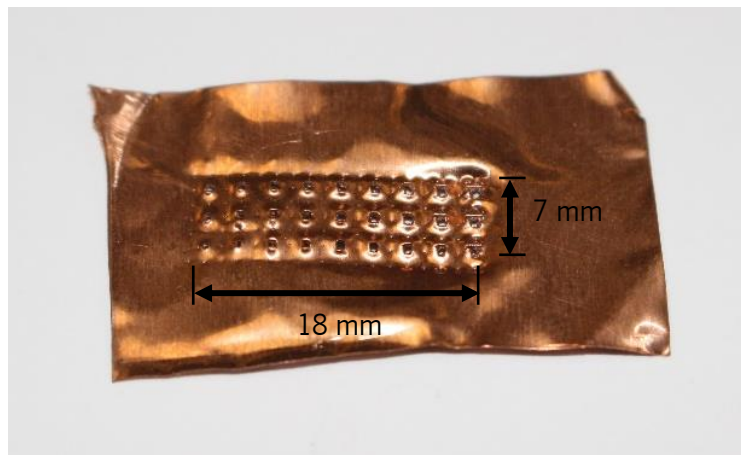


Figura 35 – Folha de cobre com rompimento total nas zonas de contacto com as reentrâncias do batente inicial.

No subcapítulo 3.1 são mencionados estudos sobre o efeito da geometria das ferramentas na qualidade da união (e na influência dos vários parâmetros de soldadura), recaindo principalmente nas dimensões das reentrâncias e na sua morfologia. Contudo, seria preferível se as superfícies do *sonotrode* não tivessem qualquer efeito danoso na integridade do material e consequentemente levar à redução da eficiência elétrica/térmica na interface de união, que é geralmente o atributo funcional crítico dos componentes soldados por ultrassons.

Assim, até um novo batente ser fabricado, substitui-se o componente por uma chapa de aço de 8 mm de espessura (Figura 36), sem nenhum tratamento de superfície nem rugosidade definida. Este método, apesar de não ser o mais adequado, além de permitir o seguimento dos ensaios, serviu como análise do efeito do atrito das ferramentas na consequente fricção entre os materiais a unir.

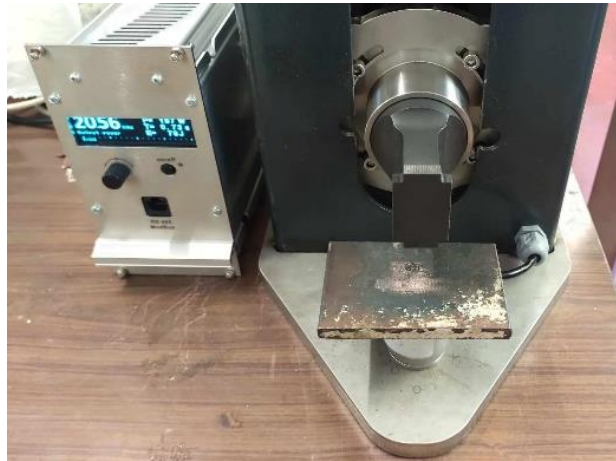


Figura 36 – Setup utilizado para os ensaios iniciais.

Para além da folha de cobre de 0,1 mm de espessura foram também implementados outros pares de materiais, nomeadamente 2 *layers* de folha de alumínio de 0,3 mm de espessura, este mesmo material com o anterior e também uma chapa de 1,5 mm de espessura de alumínio com a folha de cobre (Figura 37).

Estes testes apenas serviram para analisar, visualmente e sem quantificar, a viabilidade de soldar diferentes espessuras e materiais dissimilares com o equipamento inalterado e respetivos parâmetros de soldadura não definidos. Após a verificação e compreensão do estado de funcionamento atual do equipamento, o procedimento para executar os testes de soldadura consistiu numa escolha prévia dos conjuntos e combinações de valores a atribuir aos parâmetros de input do equipamento, assim como a escolha e preparação dos materiais a soldar.



Figura 37 – Testes de soldadura executados para o par alumínio/cobre.

Os parâmetros tidos como constantes foram a frequência e amplitude de vibração da ferramenta, resultantes das especificações do gerador e transdutor assim como da relação de transmissão do

booster, sendo a variação da pressão exercida nos materiais e do tempo de soldadura o foco do estudo. Contudo, este último parâmetro não foi alterado durante a soldadura das amostras analisadas, de modo a não ser necessário reprogramar o gerador e afinar o sinal em função do mesmo. Na Tabela 3 encontram-se definidos os valores finais das variáveis referidas acima.

Tabela 3 – Parâmetros de soldadura mantidos constantes na primeira fase de testes.

Frequência (kHz)	Amplitude (μm)	Tempo de Atuação (s)	
		Total	Efetivo de soldadura
20,56	30	0.73	0.5

O tempo de ciclo desta fase de ensaios foi considerada como sendo igual a 0,73 segundos, sendo 0,23 segundos para atingir e ajustar a carga ao valor estabelecido e 0,5 segundos de atuação efetiva dos ultrassons, como é representado a Figura 38.

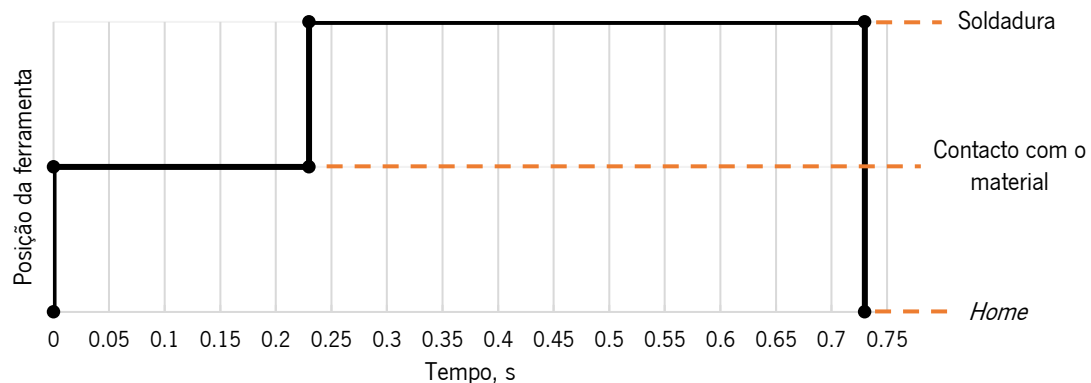


Figura 38 – Fases do ciclo de soldadura.

Sendo que o processo de soldadura por ultrassons tem-se focado no fabrico de baterias para veículos elétricos, mais especificamente no barramento elétrico das mesmas, foi considerado que, entre toda a gama de pares de materiais passíveis de ser unidos por esta tecnologia, as principais configurações assentam em ligações cobre/cobre, alumínio/cobre e alumínio/alumínio (Aptiv, 2021; *Busbar Welding of EV Batteries / Ultrasonic Welding Technology*, n.d.; Sampaio et al., 2022). Apesar das propriedades elétricas superiores do cobre relativamente ao alumínio, o primeiro material tem sido substituído por ligas de alumínio, normalmente da série 1000, considerado como alumínio comercialmente puro, pelo seu custo inferior e rácio condutividade elétrica/massa distinto.

Segundo (Das et al., 2019), uma configuração utilizada por vários fabricantes de baterias baseia-se em 3 “folhas” de alumínio e uma placa de cobre, com espessuras de 0,3 mm e 1 mm,

respetivamente. No entanto, e de acordo com a matéria-prima disponível, também foi estipulado que seria vantajoso avaliar a possibilidade de soldar 2, 3, 4 e 5 folhas de cobre e definir os parâmetros ótimos para cada uma destas configurações. Este processo teve também como foco a análise da fiabilidade dos valores de carga medidos pela célula e correlacioná-los com as características da união, para condições idênticas. No trabalho de investigação de Nunes et al. (2022), as amostras de cobre soldadas que evidenciaram maior resistência à tração foram obtidas apenas com o uso de acetona como meio de limpeza das superfícies a soldar, não sendo necessário outro tipo de preparação dos materiais. Com a finalidade de se averiguar a remoção de óxidos e outros contaminantes por ação dos ultrassons, não se procedeu à limpeza das amostras nos testes preliminares, começando por ensaios em condições “não ideais”.

É de notar que na presente fase de testes apenas foi utilizado o *sonotrode* na posição em que a área de soldadura é menor, de modo a compensar uma possível falta de potência/torque do atuador e manter valores de pressão no material superiores.

Assim, foram definidos 4 níveis de força de soldadura, dentro do intervalo de 0 a 10 exibido no controlador (ver Tabela 2), relativos ao torque nominal do atuador e com limite abaixo do valor máximo de medição da célula de carga, tendo como início o nível 4 e aumentando de 2 em 2 níveis até à carga máxima disponível. O material utilizado nesta fase de testes consistiu em folha de cobre C110 ($\text{Cu} \geq 99.9\%$) de 0,1 mm de espessura, cujas propriedades mecânicas estão definidas na Tabela 4, e para cada diferente nível de carga foram unidas as seguintes configurações:

- Nível 4: 2 camadas;
- Nível 6: 2, 3 e 4 camadas;
- Nível 8: 2, 3, 4 e 5 camadas;
- Nível 10: 2, 3, 4 e 5 camadas.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do material utilizado nos ensaios de soldadura (*Eagle Brass 110 EPT COPPER, Annealed*, n.d.).

Material	Massa volúmica (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)
Cu C110 (>99.9%)	8.89	117	0.33	41.4-89.6	179-262

Para cada ensaio, além da contabilização da força de atuação, foram retirados os parâmetros da potência debitada pelo gerador, a energia do processo e o valor manifestado pela célula de carga.

4.2.8.2. ANÁLISE DA UNIÃO POR MICROSCOPIA

Depois de concluídos os vários ensaios de soldadura, procedeu-se à observação e análise dos provetes representados na Figura 39. Para a concretização do estudo recorrendo ao microscópio ótico, cada uma das configurações de chapas foi sujeita a um processo de preparação de modo a dar acesso a uma vista seccionada da região soldada, que consistiu nas seguintes etapas:



Figura 39 – Diferentes configurações de folhas de cobre, soldadas com várias forças de atuação.

1 - Corte das chapas paralelamente à aresta limite da zona soldada (aresta da ferramenta) de modo a analisar uma secção equivalente entre todas as amostras e tentar realçar os sulcos provocados pela superfície do *sonotrode*. Para a validação do método, numa primeira fase as amostras foram cortadas de acordo com a Figura 40, no entanto para as amostras finais optou-se por cortar ao longo da direção perpendicular.



Figura 40 – Corte de uma amostra para posterior observação da secção soldada.

2 - Preparação da resina (Figura 41) de acordo com o procedimento enunciado:

Juntar uma medida de catalisador líquido para duas de resina acrílica KM-U em pó e misturar lentamente durante cerca de 1 minuto até atingir a consistência desejada para não criar bolhas de ar.

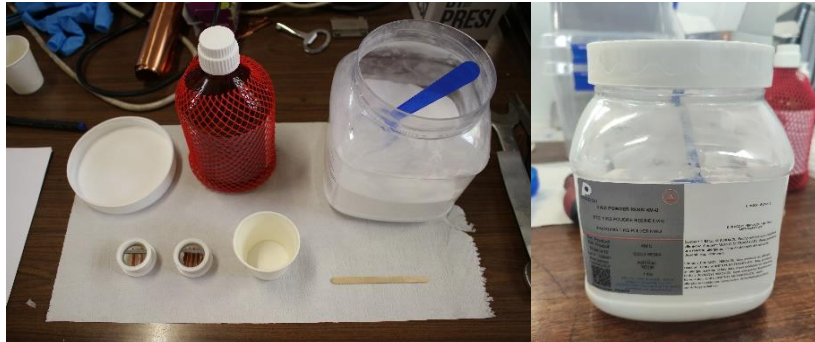


Figura 41 – Setup de preparação da resina acrílica para fixação de amostras.

3 - Fixação de várias amostras na base do molde, com auxílio de suportes modelados e fabricados por manufatura aditiva (Figura 42), previamente lubrificado com vaselina, enquanto se transfere a resina para o mesmo até envolver totalmente as chapas e o respetivo suporte.



Figura 42 – Posicionamento de amostras no molde de resina.

4 - Esperar cerca de 30 minutos pela cura da resina. Este é um processo exotérmico, isto é, liberta calor, e, uma vez terminado, a temperatura estabilizará. Após esta duração procede-se à remoção das amostras do molde (Figura 43).



Figura 43 – Amostras após serem removidas do molde.

De modo a remover resina em excesso na face a ser observada e dar acesso à zona de material soldado, utilizou-se uma lixa de granulometria mais grosseira para remover a espessura necessária. Seguiu-se o processo de desbaste/pré-polimento com o uso de 5 lixas de carboneto de silício de diferentes granulometrias (P320, P800, P1200, P2400 e P4000) rodando a amostra 90 graus entre cada uma, de modo a reduzir as estrias resultantes do uso da lixa antecedente. Todas as etapas foram realizadas recorrendo a um equipamento de polimento disponível no laboratório (Figura 44 a)), a uma velocidade de rotação de 150 rpm e com fluxo constante de água.

Após o término do processo, dever-se-á verificar ao microscópio que apenas se observam riscos numa única direção, resultantes da utilização da última lixa. A etapa final de preparação da superfície – polimento – que segue a mesma técnica de remoção de material utilizada na etapa anterior, divide-se em duas fases, desta vez recorrendo a dois panos de polir, impregnados com suspensão de diamante de 2 granulometrias diferentes (1 e $\frac{1}{4} \mu\text{m}$), dispersas com um lubrificante à base de álcool.

O procedimento termina após verificar, através da observação ao microscópio, da omissão das ranhuras provocadas nas etapas precedentes. Finalmente faz-se a limpeza das amostras com água destilada e álcool (uma vez que o lubrificante é à base de álcool) e seca-se a superfície com ar quente.



a)



b)

Figura 44 – a) equipamento de polimento PRESI MINITECH 250 SP1 e
b) superfície de duas amostras após polimento.

Como forma de analisar e quantificar a variação da espessura ao longo do material para cada ensaio efetuado, foi preparada uma amostra de folha de cobre não soldada seguindo o mesmo procedimento realizado para as restantes, e que serviu como referência do valor de espessura inicial. Desta forma, poder-se-á também observar a uma possível transformação da microestrutura das zonas soldadas por efeito dos ultrassons e da fricção induzida. Desta vez, a observação foi feita recorrendo a um

outro microscópio, auxiliado da capacidade de exportação de imagens, extraídas com diferentes ampliações e ao longo das zonas de maior interesse para análise.

O critério de avaliação e escolha das amostras para definição dos parâmetros ótimos para cada configuração de materiais consistiu na quantificação da área efetiva de soldadura através das imagens retiradas a cada secção. Este método partiu do princípio de que as zonas soldadas observadas em cada conjunto de chapas se prolongam da mesma forma ao longo de toda a largura das amostras e considerou que o corte das chapas foi executado em zonas semelhantes para todos os conjuntos. Através do *software* ImageJ e da escala das imagens exportadas do microscópio, quantificou-se, de forma aproximada, o comprimento das zonas que demonstram uma união efetiva dos materiais e, a partir da comparação desses valores entre as várias amostras, selecionaram-se aquelas que apresentaram melhor resultado para cada configuração, registando o nível de força de atuação exercida em cada caso. É de notar que, pela natureza do procedimento e pelas diferentes variáveis que podem não ser constantes de amostra para amostra, este critério de seleção baseia-se também num método qualitativo, uma vez que depende principalmente da observação das mesmas.

A observação da secção da amostra de folha de cobre não soldada (Figura 45) permitiu verificar que a espessura inicial do material antes de se sujeitar ao processo de soldadura é de aproximadamente 0,096 mm, servindo este valor como referência para as restantes amostras soldadas.

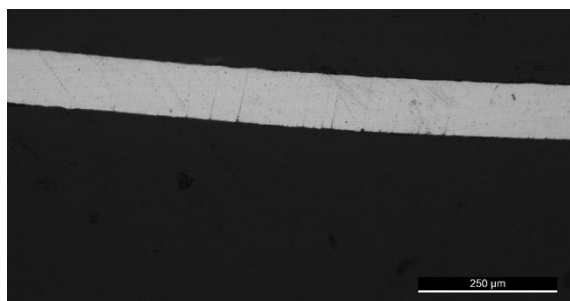


Figura 45 – Vista seccionada da folha de cobre utilizada para análise, ampliação de 10x.

As amostras de 2 camadas de folha de cobre soldadas com o nível 4 de carga não mostraram resultados positivos quanto à eficácia do processo. Na Figura 46, é possível de verificar uma separação total das chapas ao longo de todo o comprimento que sofreu compressão pela ferramenta. Alguns locais onde aparenta ter havido uma união entre ambas as superfícies é, no entanto, material de polimento que se introduziu entre as mesmas.

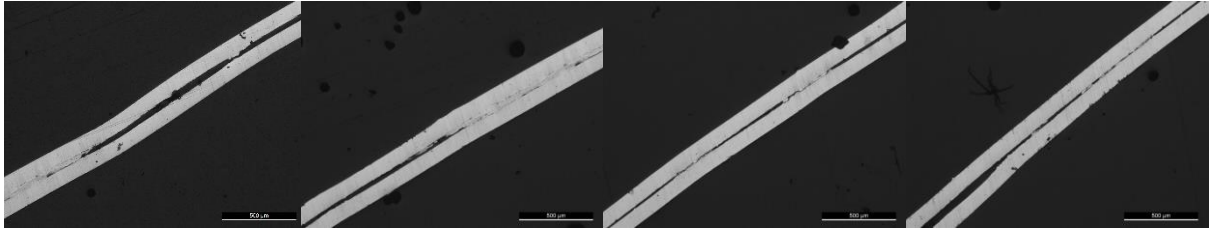


Figura 46 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 4 de força de soldadura, ampliação de 5x.

A partir do nível de carga 6, as Figura 47 e Figura 48 revelam que a amostra já apresenta zonas de interface quase impercetíveis, apenas possíveis de obter pela correta atuação dos ultrassons. As deformações impostas pelas reentrâncias da ferramenta não são visíveis em todas as secções estudadas, no entanto são mais evidentes para os níveis superiores de carga e para um maior número de camadas de material e confirma-se que mesmo em alguns desses locais onde não está verificada a atuação do *sonotrode*, existem efetivamente zonas de soldadas.

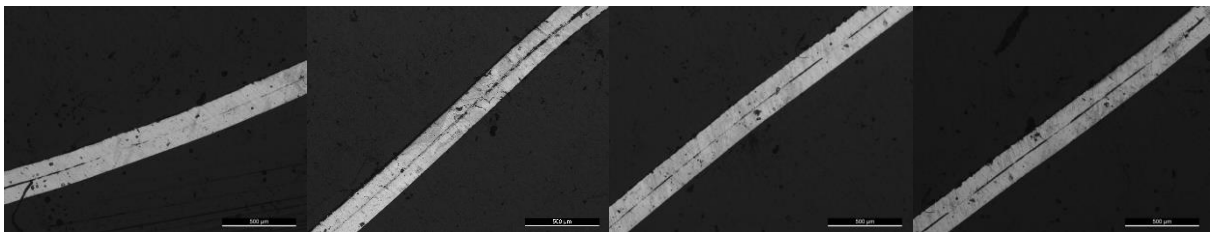


Figura 47 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 5x.

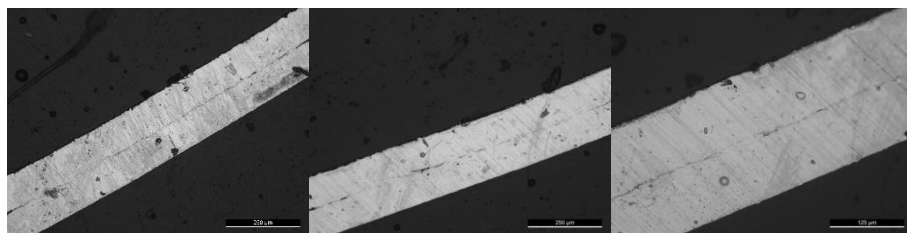


Figura 48 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 10x e 20x.

Da mesma forma, para o nível 8 e 10 de força de atuação do servomotor, as amostras (Figura 49 a Figura 52) mostraram uma interface com zonas de soldadura efetiva e já evidenciaram os sulcos provocados pelo contacto com a ferramenta, o que verifica que nestes casos a secção estudada foi corretamente delimitada na fase de preparação.

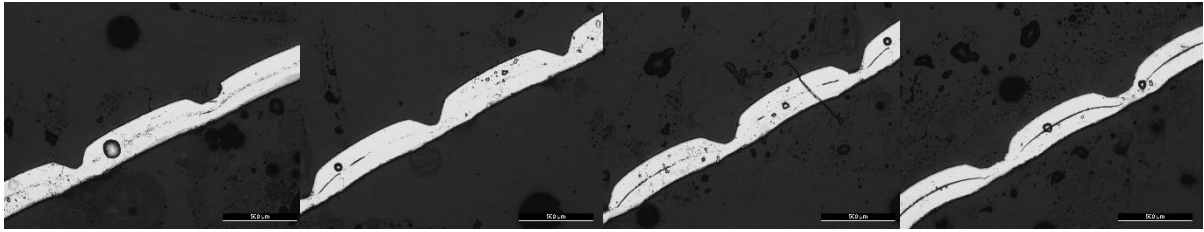


Figura 49 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x.

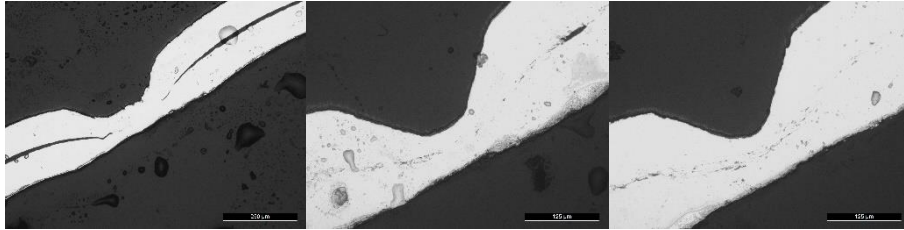


Figura 50 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 10x e 20x.

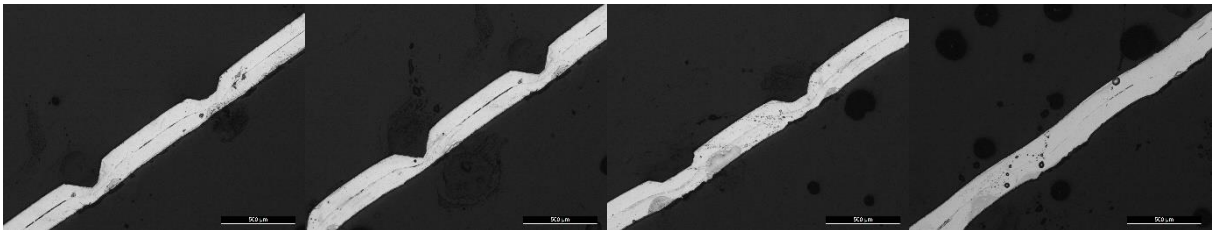


Figura 51 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x.

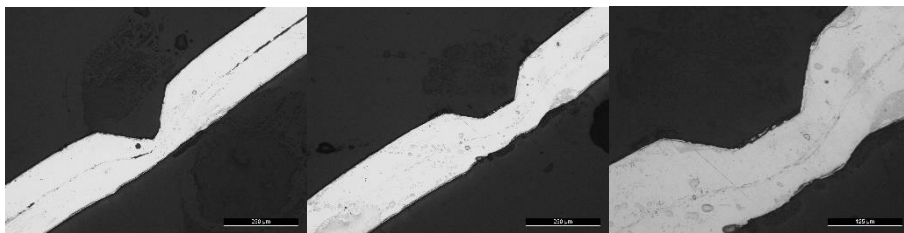


Figura 52 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 2 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 10x e 20x.

No entanto, este efeito de esmagamento que se pronuncia nos locais afetados pelos sulcos, provoca um afastamento das zonas imediatamente antes e depois dos mesmos, o que dificulta fricção entre os materiais e resulta em áreas não soldadas.

A redução da espessura do material teve um valor máximo de aproximadamente 62% para nível 10 de atuação e 56% para o nível 8, sendo que estes valores têm em conta apenas as secções analisadas, pelo que é provável que o pico desta variável difira ligeiramente do valor medido. Nas amostras soldadas com os níveis 4 e 6, essa redução não foi considerada como admissível uma vez que não foi contabilizada

nas reentrâncias provocadas pela ferramenta, mas estima-se que a variação seja linear com a força aplicada.

As imagens retiradas às amostras compostas por 3 camadas de material (Figura 53 a Figura 55) concluíram que com o nível de carga 6 ainda é possível obter uma percentagem considerável de zonas soldadas, contudo, para os níveis acima, observou-se uma maior área das camadas que se encontra separada, mesmo que apenas por menos de uma centésima de milímetro.

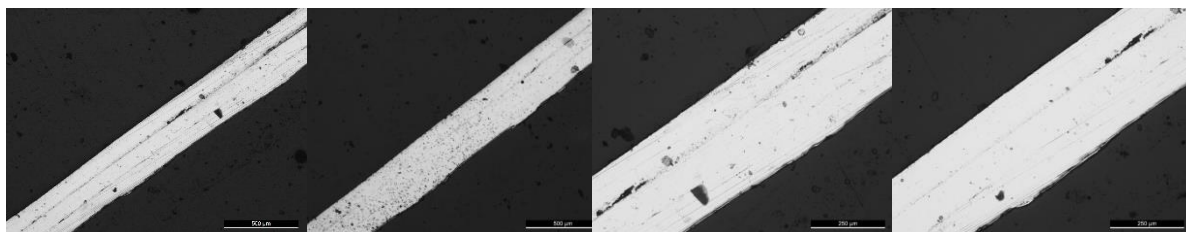


Figura 53 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 3 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.

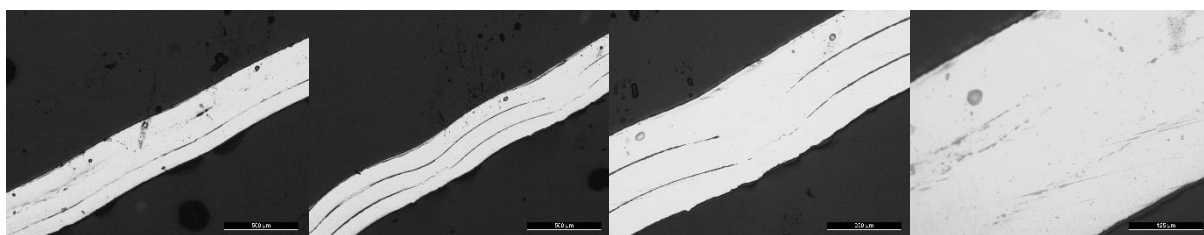


Figura 54 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 3 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x e 20x.

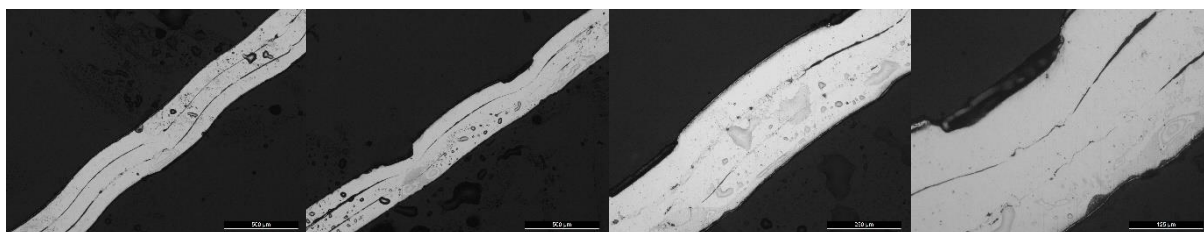


Figura 55 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 3 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x e 20x.

As configurações de 4 camadas de material para o nível de carga 6 (Figura 56) evidenciaram uma separação do material em praticamente todo o comprimento da amostra e resíduos do polimento nas zonas de maior afastamento. Os níveis 8 e 10 de pressão de atuação mostraram resultados mais

constantes para ambas as cargas e positivos no que toca ao comprimento da interface efetivamente soldada (Figura 57 e Figura 58).

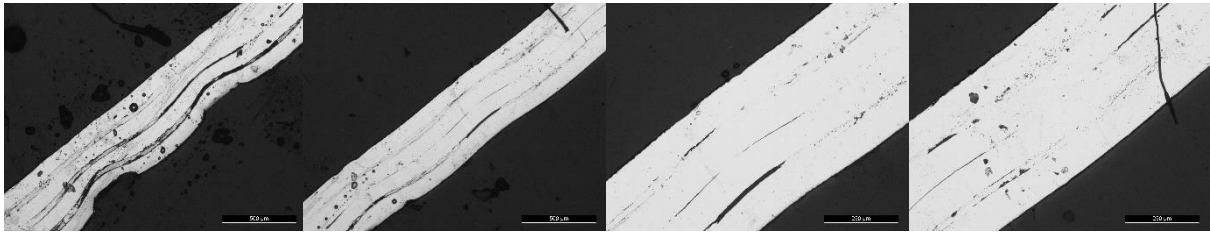


Figura 56 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 4 camadas de cobre para o nível 6 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.

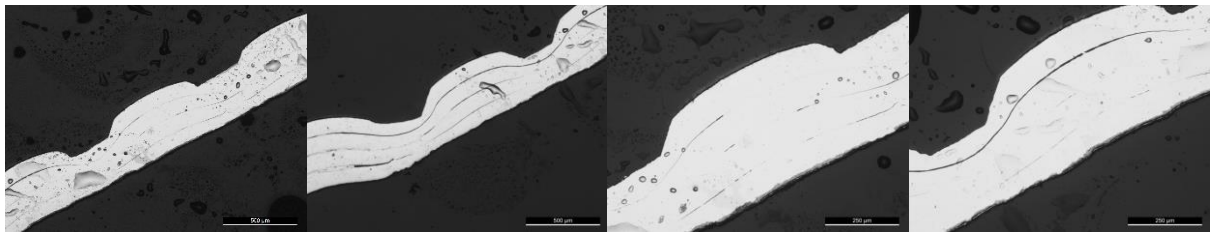


Figura 57 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 4 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.

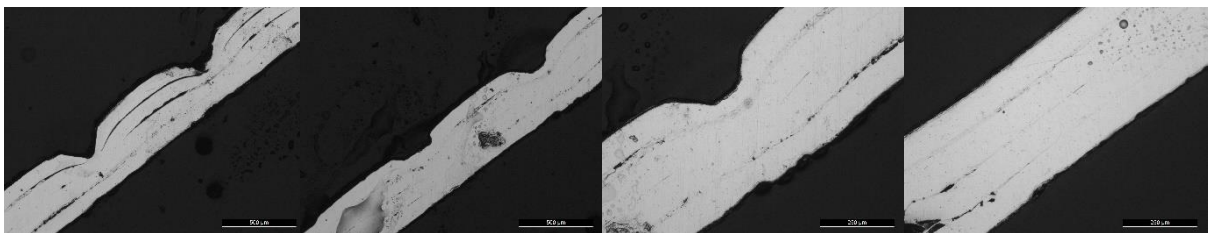


Figura 58 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 4 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.

Finalmente, as amostras de maior espessura, isto é, recorrendo a 5 *layers* de material, apresentaram uma separação ao longo de grande parte do comprimento observado para o nível de carga 8 (Figura 59), sendo que os resultados se mostraram mais favoráveis para o nível 10, apresentando uma união mais constante, mas não em toda a espessura da amostra (Figura 60).

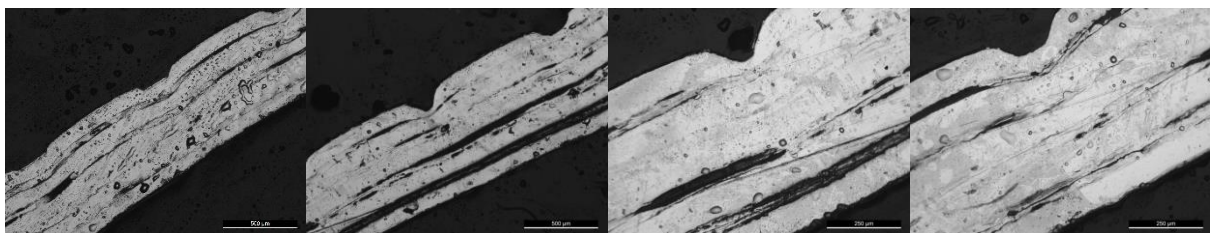


Figura 59 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 5 camadas de cobre para o nível 8 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.

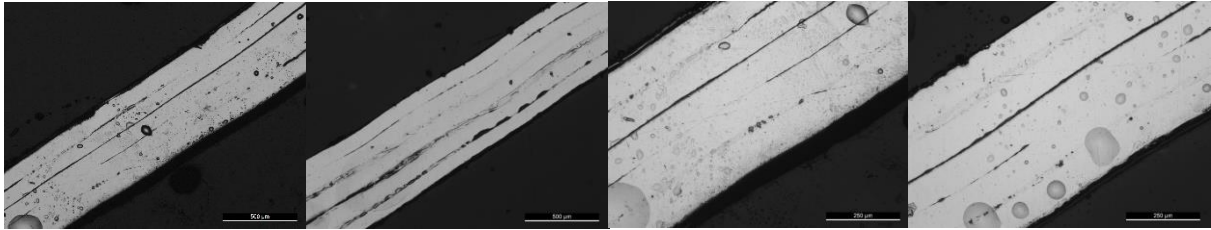


Figura 60 – Vista seccionada de várias zonas da amostra de 5 camadas de cobre para o nível 10 de força de soldadura, ampliação de 5x e 10x.

Os resultados obtidos não permitiram concluir de forma precisa as forças de atuação a partir das quais há uma mudança repentina na capacidade de unir cada uma das configurações, porém foi possível confirmar que o fenómeno da soldadura por ultrassons realmente aconteceu na grande maioria das condições apresentadas e observou-se um rearranjo do material na interface das zonas soldadas, sendo difícil, em alguns casos, localizar a divisão entre as várias *layers*. A falta de repetibilidade sugere que as condições do processo variam ligeiramente de ensaio para ensaio, por motivos ligados principalmente a variações da posição da ferramenta relativamente ao material. No entanto, perante as condições e metodologia utilizadas, considerou-se os resultados como sendo bastante positivos no que toca à validação do processo de soldadura. Com isto, o desenvolvimento do novo protótipo partirá do pressuposto que as principais alterações recairão sobre o sistema transdutor/ *booster*/ferramenta e a sua fixação ao restante mecanismo.

4.2.8.3. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA UNIÃO

Assim como acontece aquando da caracterização experimental de materiais através de ensaios de tração, o mesmo é necessário para avaliação da resistência de interfaces, sejam elas obtidas por soldadura,

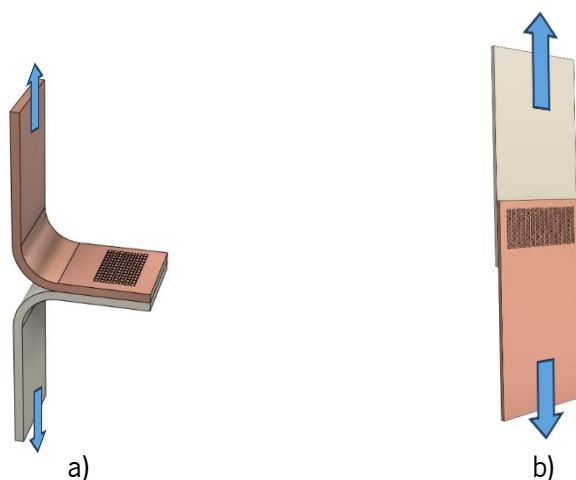


Figura 61 – Representação dos ensaios a) *T-peel* e b) *Lap-Shear*.

colagem ou outra técnica. Os testes de avaliação da resistência de soldadura, frequentemente designados de “*T-peel*” (Figura 61 a)), (normas ISO 11339 e ISO 14270) assim como os ensaios “*Lap-Shear*” (Figura 61 b)) são os métodos mais comuns para qualificar a adesão entre materiais. Após alguma reflexão e avaliação das vantagens e inconvenientes de ambas as configurações apresentadas, convergiu-se para a segunda técnica.

Para avaliar a resistência da união de materiais metálicos soldados por fusão, a geometria dos provetes imposta pelas normas ISO 6892-1 e ISO 6892-2 é normalmente aplicável. No entanto, como na soldadura por ultrassons os componentes estão sobrepostos, é comum seguir o procedimento enunciado pela norma ISO 4587, que formula a técnica de avaliação da resistência a esforços de cisalhamento da interface de dois provetes sobrepostos numa determinada área e sujeitos a tração em direções opostas (*Lap-Shear*). Contudo, dois dos parâmetros geométricos explícitos na norma, nomeadamente a espessura e a área de adesão, muitas das vezes não podem ser replicados devido às características do material usado e à área de atuação da ferramenta, respetivamente. Na literatura onde recorrem a testes de tração de folhas soldadas por ultrassons, o procedimento e as dimensões do material não revelam ser sempre os mesmos, no entanto seguir-se-á o enunciado de forma semelhante nos artigos Butt et al., 2016; Das et al., 2019; Dhara & Das, 2020; Shakil et al., 2014 e que mais se aproxima da norma abordada acima. Nestes casos foram utilizados provetes retangulares com 100 mm de comprimento e 25 mm de largura e sobrepostos também 25 mm.

Na situação atual, as geometrias consideradas para os provetes sujeitos aos ensaios de tração tiveram em conta as dimensões da ferramenta, a distância da zona de atuação da mesma até à carcaça do equipamento, o material disponível (de modo a preparar o número máximo de amostras e analisar todas as diferentes condições consideradas anteriormente) e o comprimento mínimo de modo a se poder fixar os provetes às amarras do equipamento de tração. Assim, as dimensões finais das amostras convergiram para as ilustradas na Figura 62.

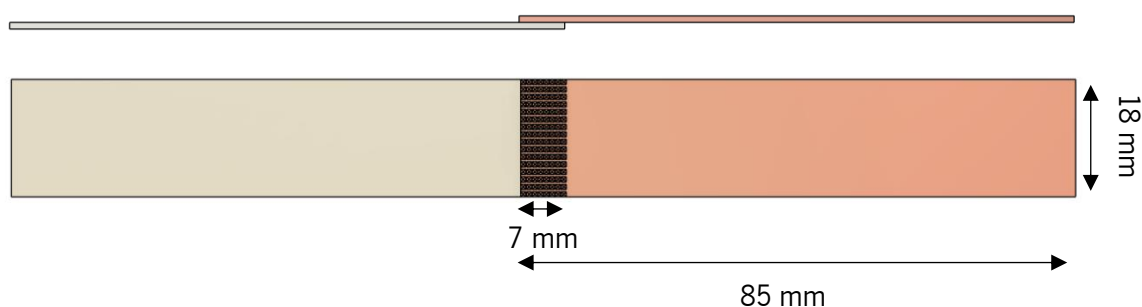


Figura 62 – Dimensões finais dos provetes para os ensaios *Lap-Shear*.

Tendo em consideração matéria-prima disponível para a preparação de amostras e os resultados observados por microscopia, foi estipulado que a nova análise destrutiva convergiria apenas para a avaliação da interface das configurações de 2, 3 e 4 *layers*, com forças de atuação diferentes das utilizadas na obtenção das primeiras uniões. A seguinte atribuição dos níveis de carga e as respetivas camadas de material tiveram como objetivo reduzir as falhas do gerador durante o processo de aquisição dos provetes. Isto porque o aumento do atrito entre a ferramenta e o material a ser comprimido, e consequentemente o batente, aumenta com o aumento da intensidade da força realizada pelo atuador que, em simultâneo com a rigidez excessiva da estrutura no sentido das vibrações, resulta numa sobrecarga do gerador e no término do ciclo de soldadura antes do tempo predefinido ser atingido. Desta forma, e tendo em conta o valor elevado da força mínima definida para o atuador, apresentado no gráfico da Figura 34, concluiu-se que fazia sentido estudar a eficácia de soldadura dos níveis de carga mais baixos. As novas combinações entre cargas e número de camadas a ser submetidas aos ensaios estão apresentadas na Tabela 5 e as respetivas configurações podem ser consultadas na Figura 63.

Tabela 5 – Número de camadas e respetivas cargas de soldadura das amostras a utilizar nos ensaios de tração e análise da microestrutura

Nº de Layers	Força de atuação	Nº de Amostras
2	1	3
	2	3
	3	3
	4	3
3	4	3
	6	3
	8	3
4	6	3
	8	3
	10	3

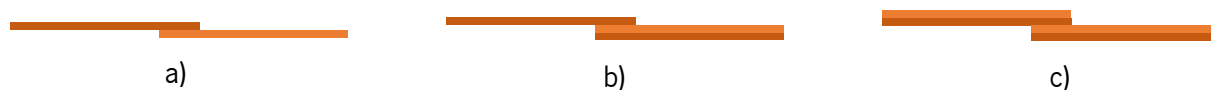


Figura 63 - Configuração de soldadura das amostras de a) 2 *Layers*, b) 3 *Layers* e c) 4 *Layers*.

De modo a manter constante a posição das várias camadas de material ao longo da preparação de todas as amostras, foi projetado e fabricado por manufatura aditiva um suporte para alinhamento do material (Figura 64). Este componente foi desenhado para se posicionar na célula de carga a fim de se

confirmar o paralelismo do material com a ferramenta e o alinhamento do mesmo com a face de atuação, uma vez que a largura dos provetes é aproximadamente igual à largura da ferramenta e um possível desvio implicaria a redução da área de soldadura. Este passo levou a substituir a chapa de 8 mm de espessura anteriormente utilizada por uma nova chapa de aço de 3 mm de espessura com as mesmas dimensões do batente ilustrado na Figura 22 b) e uma superfície mais rugosa, resultante do processo de fabrico, com a finalidade de aumentar o atrito com a camada inferior de material.

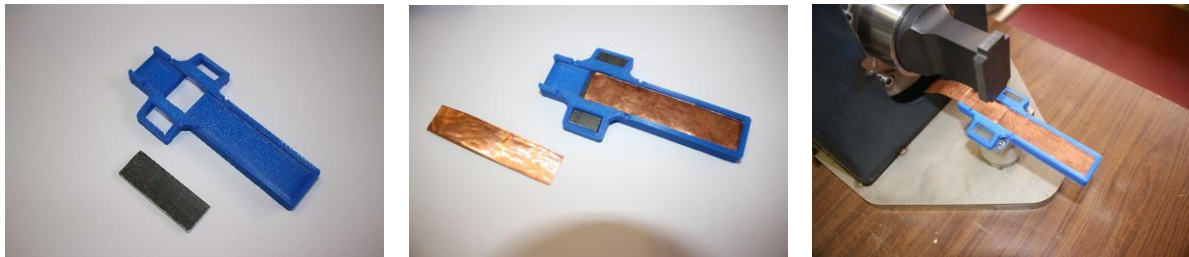


Figura 64 – Suporte de posicionamento e soldadura das amostras, fabricado por manufatura aditiva.

Os ensaios mecânicos foram realizados num equipamento de tração LLOYD LT50K com limite de carga de 50 kN, a uma velocidade de afastamento de 1 mm/min e utilizando 50 mm de ambas as extremidades dos provetes para fixação nos mordentes das pinças. O processo foi realizado também para as configurações de 3 e 4 *layers*, dispostas de acordo com a Figura 63, seguindo a metodologia abordada por (Dhara & Das, 2020). Kim et al. (2019) seguiram uma configuração com chapas dispostas de forma alternada, que indica uma forma alternativa de agregar as várias *layers* e de as tracionar.

É de notar que uma soldadura ideal consiste numa interface com propriedades mecânicas iguais ou superiores às do material menos resistente envolvido na união, contudo é de esperar que essa condição ótima não seja atingida devido à eficiência atual do equipamento e do processo em si.

Uma vez que para os provetes manipulados a utilização de extensómetros não tem a mesma importância que nos casos de provetes contínuos e que a sua colocação seria dificultada pela configuração das amostras, o valor considerado para a deformação do material foi a variação da distância entre os mordentes no decurso dos ensaios. Antes de submeter os provetes aos testes de tração, definiu-se uma zona para posterior medição e comparação da largura final de uma das *layers* a uma determinada distância do local de união e o *setup* utilizado ao longo dos ensaios consistiu no apresentado na Figura 65.

Durante a aplicação da carga, na maioria dos casos verificou-se uma estricção do material que resultou numa redução máxima da largura dos provetes nessa região de cerca de 3% evidenciando atingir-se a tensão de cedência do cobre antes da rotura da união. Foi também possível observar o aparecimento de fissuras nas laterais dos provetes com o aumento do esforço de tração (Figura 66 i)).

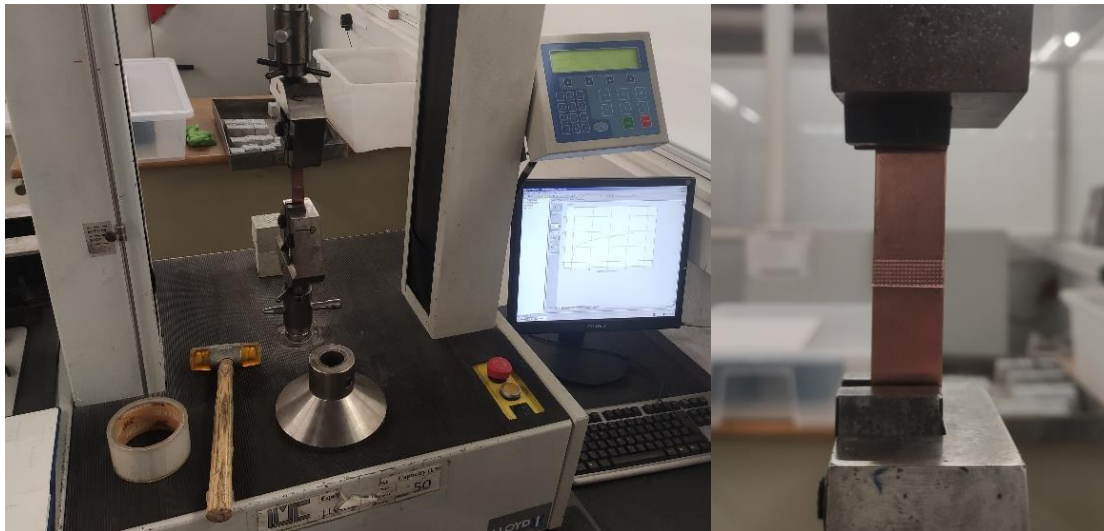


Figura 65 – Setup utilizado para os ensaios de tração.

Os mecanismos de rotura das amostras foram divididos em 3 tipos: descolagem na interface (Figura 66 a)), rotura total segundo o limite da área de soldadura (Figura 66 b)) e rotura segundo uma linha irregular diferente da anterior (Figura 66 c)) e as curvas força-deslocamento representativas de cada um desses mecanismos estão representadas na Figura 67.

O primeiro tipo indica uma união débil, não havendo adesão efetiva dos 2 materiais. O segundo mecanismo resulta da concentração de tensões provocada pela aresta da ferramenta, que provoca uma rotura prematura antes de se alcançar a tensão de rotura do material. A última tipologia acontece quando parte de uma camada permanece soldada à oposta, havendo um rompimento que começa na extremidade da área delimitada pela compressão precedente da ferramenta e segue para o interior desta por uma linha também afetada pelas reentrâncias do *sonotrode*. Os 2 últimos mecanismos tendem a

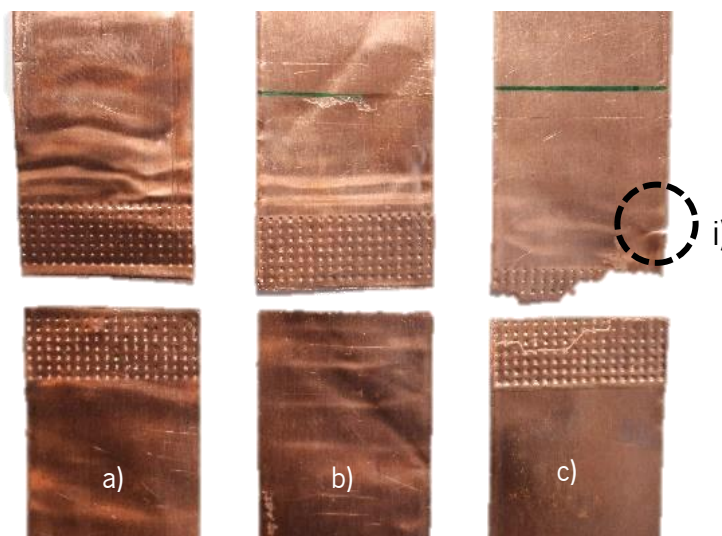


Figura 66 – Diferentes mecanismos de falha dos provetes: a) descolagem, b) rotura pelo limite da área de soldadura, c) rotura irregular, i) fissura lateral.

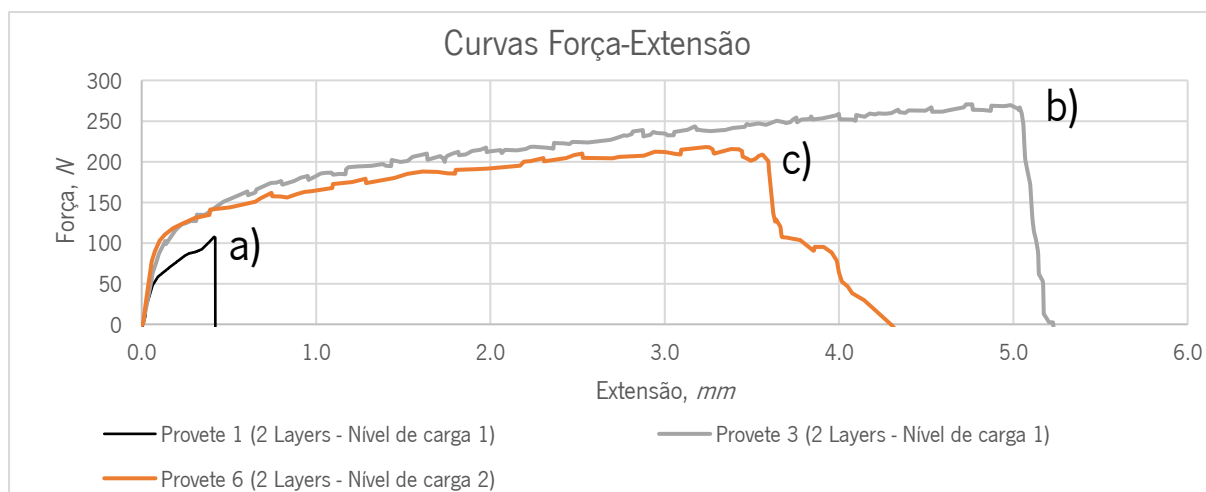


Figura 67 – Curvas Força-Deslocamento de 3 provetes representativas dos 3 mecanismos de rotura da figura 64.

desaparecer para provetes de maior espessura, considerando a mesma resistência da união, uma vez que não haverá uma redução de espessura tão severa em relação à espessura inicial do material.

Uma percentagem significativa das configurações 2 e 3 *layers* apresentaram um rompimento não por descolagem, mas por rotura total na zona imediatamente a seguir à área aplicação da ferramenta, segundo um segmento perpendicular à direção de tração e que verifica a importância do fenómeno de concentração de tensões originada no material pelo *sonotrode*, abordado acima. Por outro lado, o mecanismo de falha das configurações de 4 *layers* foi a perda de adesão da interface das *layers* centrais.

A evolução dos valores da carga desde o momento de início da tração até à rotura da união estão apresentados nos gráficos do Anexo E: Gráficos Força-Extensão dos provetes submetidos aos ensaios de tração, para cada uma das configurações de materiais sujeitos aos parâmetros de soldadura da Tabela 3 e Tabela 5.

Para as configurações de 2 *layers* de cobre, o aumento da pressão induzida pela ferramenta não se refletiu num aumento da resistência da união, sendo que para os níveis 1 e 4 a resistência máxima obtida entre as 3 amostras efetuadas foi aproximadamente a mesma, dando-se a rotura do material a cerca de 270 N. Para os níveis 2 e 3 os valores foram 30 a 50 N inferiores. O mesmo aconteceu para as amostras de 3 *layers*, para os níveis 4, 6 e 8, e as uniões apresentaram o rompimento a valores de força de tração semelhantes.

Por outro lado, para os ensaios com 4 *layers*, houve uma grande disparidade não só entre os valores máximos para cada carga como também entre as amostras soldadas perante as mesmas condições. Isto demonstrou-se pelo próprio mecanismo de falha, que indicou um maior número de interfaces descoladas, que perderam a adesão de forma prematura durante a tração. Contudo, 2 das 3 amostras soldadas para o nível de compressão máximo do atuador apresentaram a resistência de

soldadura mais elevada do total dos 30 ensaios realizados, com a rotura a ocorrer a cerca de 400 e 450 N, respetivamente. Considera-se que para esta configuração de material, o aumento da força de soldadura, dentro do intervalo estudado, resulta num aumento da qualidade da união.

Além da relação força-deslocamento, foi analisada a variação do valor da tensão cada um dos provetes com o intuito de comparar com os valores tabulados da tensão de cedência e rotura do material utilizado. É de notar que apenas a tensão de engenharia foi calculada, uma vez que não foi possível analisar a variação da área de secção ao longo dos ensaios. Assim, através da equação 14, estimou-se a variação e valor máximo desta variável

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0} \quad (14)$$

, onde F é o valor da força exercida pelo equipamento de tração e A_0 é a área transversal da zona de união dos materiais, obtida através da multiplicação da largura dos provetes pela espessura total de todas as camadas intervenientes na ligação. Com este procedimento deduz-se que a interface é toda ela íntegra e que a resistência à tração é feita ao longo de toda a espessura e largura, o que não acontece efetivamente. Apesar de haver compressão por parte da ferramenta, considerou-se que o escoamento do material nas zonas dos sulcos ocorre para as depressões/vales localizados entre estes, e que há uma conservação da massa da secção transversal antes e depois de se efetuar a soldadura, sendo por isso a espessura considerada equivalente à espessura da folha de cobre medida inicialmente multiplicada pelo número de *layers*. De acordo com o gráfico da Figura 68, o valor máximo da tensão de engenharia atingido para as configurações de 2, 3 e 4 camadas foi de aproximadamente 75 MPa, 50 MPa e 62 MPa, respetivamente, no caso de se considerar a espessura da secção soldada (desprezando a rotura do cobre).

Quando o mecanismo de rotura se baseia no rompimento do material (Figura 66 b) e c)), este acontece apenas numa das extremidades que está a ser tracionada e a área de secção considerada no cálculo da tensão poderá empregar a espessura de material dessa extremidade, ou seja, aproximadamente 0,1 mm no caso das configurações de 2 e 3 *layers* e 0,2 mm no caso de 4 *layers*. Desta forma, o valor da tensão evoluirá para uma aproximação do valor da tensão de cedência e rotura do cobre utilizado. Corrigindo o valor da espessura a considerar aquando dos provetes rompidos, ou seja, para todas as amostras de 2 e 3 *layers*, a tensão efetiva será aproximadamente 2 e 3 vezes superior aos valores referidos, respetivamente, aproximando-se assim da tensão de rotura tabulada.

Conforme referido anteriormente, apesar da conservação de material na secção das amostras, a redução da espessura na zona de compressão da ferramenta, nomeadamente nas reentrâncias da mesma, implica um fator de concentração de tensões que poderia ser calculado numa fase posterior e

que convergiria para verificar o comportamento de rotura prematura do material. Também é de apontar que, uma vez que a área de suposta adesão dos materiais é muito superior à área da secção transversal, a tensão axial mostrou-se muito superior à de corte, justificando-se assim a rotura de grande parte dos provetes.

Assim sendo, seria de esperar um maior valor da força de tração até à falha para as amostras de 2 e 3 *layers* caso se utilizasse uma ferramenta com uma superfície de reentrâncias menos salientes e que danificassem o material de forma menos severa. Já para as amostras de espessura superior, esta interpretação não entra em conta, uma vez que a descolagem acontece antes da cedência e consequente rotura do cobre.

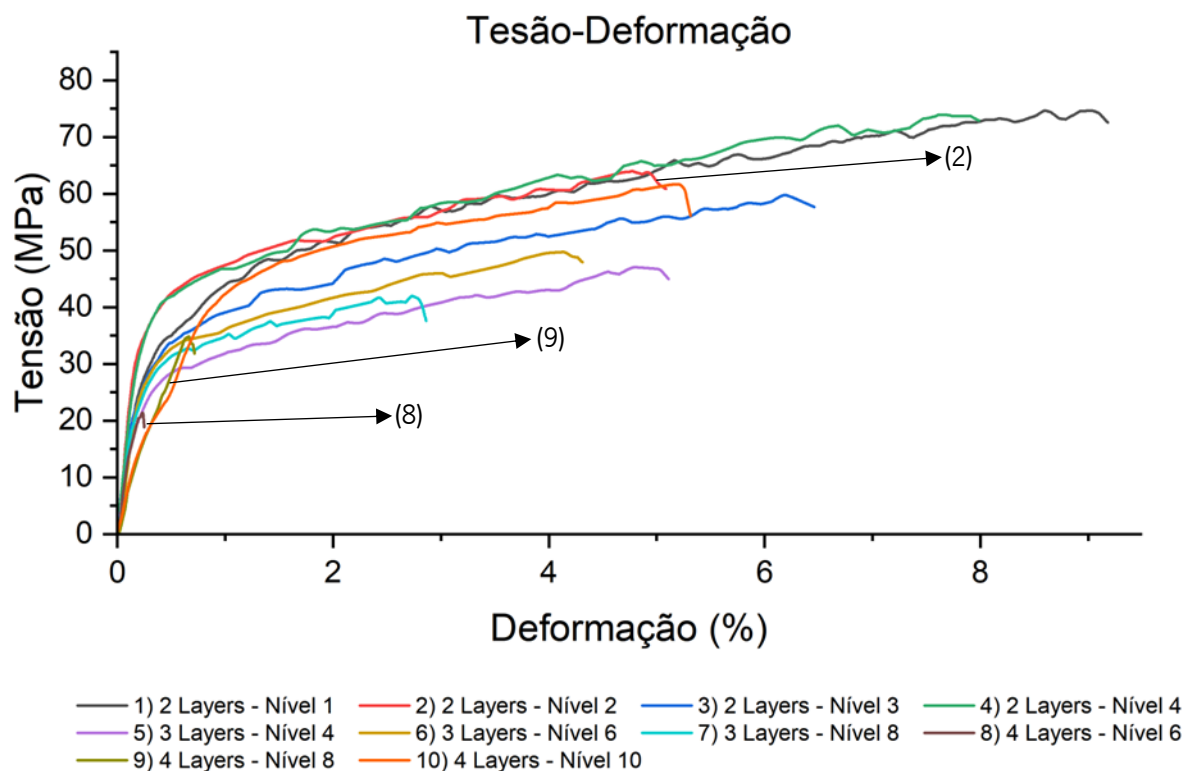


Figura 68 – Curvas Tensão-Deformação dos provetes com melhores propriedades para cada condição de soldadura (Nº de *layers* e nível de carga de soldadura).

4.2.8.4. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E MECANISMO DE UNIÃO

Para analisar as alterações a nível da microestrutura das interfaces entre as várias *layers* das configurações tracionadas, foram novamente preparadas amostras de cobre soldadas de acordo com o novo conjunto de cargas de soldadura apresentadas na Tabela 5. Para isto, após o procedimento de soldadura, repetiu-se o conjunto de etapas de preparação da análise inicial, enunciada no subcapítulo 4.2.8.2, ou seja, fez-se cortes em zonas semelhantes das várias amostras e posicionou-se as mesmas

nos moldes de resina de tal forma a analisar secções idênticas (e com a presença da deformação por parte dos sulcos da ferramenta) e realizou-se o polimento. A etapa que difere do que foi feito inicialmente foi a aplicação de um ataque às superfícies do material com um reagente à base de álcool etílico (96 ml), cloreto férrico (5 g) e ácido clorídrico (5 ml). Esta solução permitiu um aumento do contraste das diferentes fases do cobre e potencia a observação da formação de novas fases, e crescimento de novos grãos na interface.

Este novo ciclo de preparação de amostras demonstrou uma maior homogeneidade quanto à efetividade da soldadura de todas as secções estudadas, à exceção de duas que não evidenciaram as indentações imposta pelas reentrâncias da ferramenta, o que permite uma análise e comparação mais consistente das várias amostras e respetivas condições com que foram obtidas.

Tal como tem vindo a ser observado em vários trabalhos de investigação, e que contradiz conceito inicialmente idealizado acerca do processo de soldadura por ultrassons ser feito em estado sólido, as imagens retiradas exibem zonas com sinais que indicam total fusão, sem ser possível indicar a separação das várias camadas de cobre.

Ao longo de grande parte da interface entre as várias camadas de cobre é possível ver uma camada de espessura reduzida e que se distingue do resto do material, que pode sugerir a existência de óxidos ou, mais provável, a separação entre as *layers*. De modo a analisar a composição da mesma e relacioná-la com formação de compostos intermetálicos, seria útil recorrer a técnicas ou métodos tais como a microscopia eletrónica de varrimento, difração de eletrões de retrodifusão (EBSD), espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS ou EDX), entre outros. Uma vez que neste estudo o material utilizado é cobre comercialmente puro, a formação de compostos intermetálicos não será o fenómeno mais presente. Caso a união fosse entre diferentes materiais e ligas, seria de esperar a observação de produtos da reação entre os mesmos e as técnicas abordadas acima permitiriam definir a composição química desses compostos e assim procurar estabelecer o seu possível efeito na resistência da união.

Nas Figura 69 a Figura 72 evidencia-se uma penetração parcial entre *layers*, com zonas de deformação plástica severa, cujo fenómeno é comumente designado de “*interlocking*” (Sanga et al., 2018). Na Figura 70 o detalhe indicado pode sugerir também a separação de parcelas de material, devido ao atrito, que ficaram envolvidas na interface durante o processo de soldadura.

Tal como constatado na primeira fase de microscopia enunciada no subcapítulo 4.2.8.2, as configurações de 2 *layers* de material tiveram uma redução abrupta na sua espessura na zona das reentrâncias e que resultou no aparecimento de fendas, coincidentes com os locais de maior agregação das camadas.

De uma forma geral, conclui-se que os locais comprimidos pelas reentrâncias da ferramenta resultam nos pontos mais afetados térmica e mecanicamente e é neles que se estabelece uma maior adesão dos materiais.

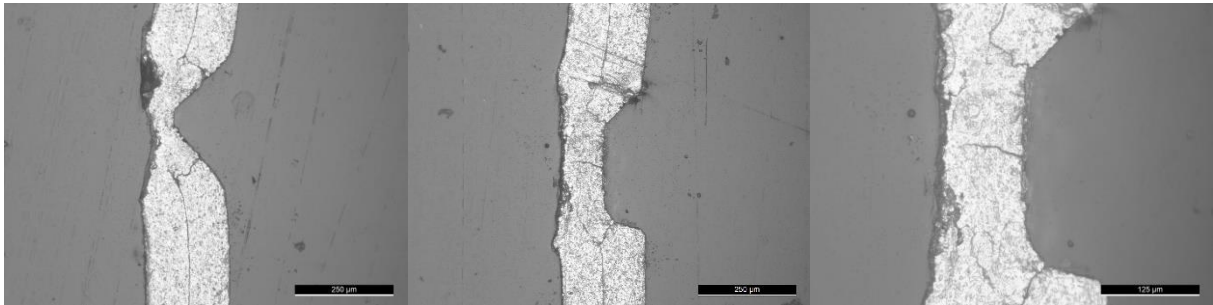


Figura 69 – 2 diferentes zonas da secção da configuração de 2 layers de cobre, soldadas com o nível 2 de carga, após tratamento de “etching”. Ampliação de 10 e 20x.

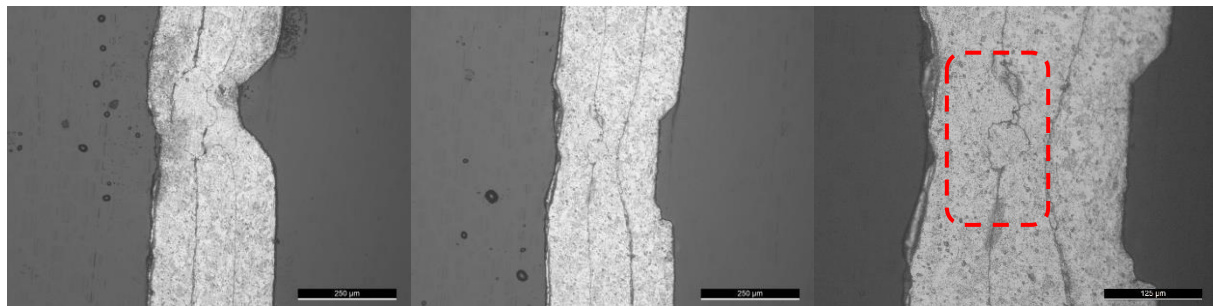


Figura 70 – 2 diferentes zonas da secção da configuração de 3 layers de cobre, soldadas com o nível 4 de carga, após tratamento de “etching”. Ampliação de 10 e 20x.

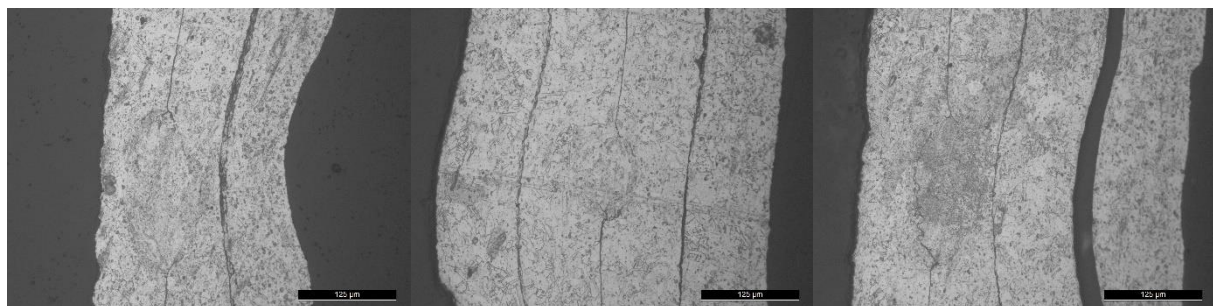


Figura 71 - Diferentes zonas da secção da configuração de 4 layers de cobre, soldadas com o nível 8 de carga, após tratamento de “etching”. Ampliação de 20x.

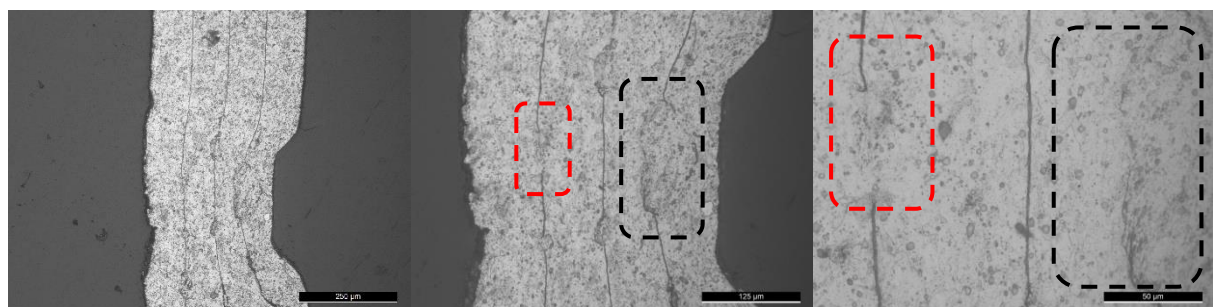


Figura 72 – Secção da configuração de 4 layers de cobre, soldadas com o nível 10 de carga, após tratamento de “etching”. Ampliação de 10,20 e 50x, evidenciando zonas de aparente fusão e deformação plástica.

4.3. PROBLEMAS DO PROTÓTIPO

Aquando do término do projeto do protótipo do qual partiu o estudo em causa foram já tidos em conta possíveis aspetos negativos quer a nível construtivo, quer funcional, que não puderam ser corrigidos de forma a cumprir com o prazo imposto. Posteriormente, ao longo do processo de montagem do equipamento, foram verificados alguns desses aspetos e surgiram novos problemas que teriam de ser repensados.

A primeira particularidade que surgiu refletiu-se no facto de o perfil de aço da carcaça exterior apresentar uma geometria com pouco rigor dimensional, dificultando a montagem, posicionamento e respetivo movimento dos elementos que promovem a cinemática do mecanismo, isto é, os patins e guias lineares. Esta deformação do perfil é mais pronunciada no topo do equipamento, na ligação à chapa superior (Figura 73), mas está presente ao longo de toda a geometria.

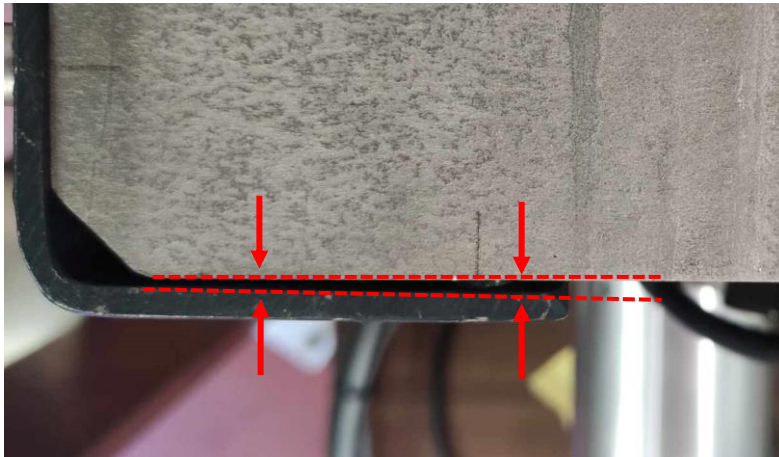


Figura 73 – Vista de topo do equipamento, evidenciando o baixo rigor geométrico do perfil da carcaça.

Uma outra dificuldade sentida aquando da montagem e desmontagem do equipamento foi o posicionamento dos guias lineares na carcaça e o posterior encaixe do restante sistema sobre os mesmos. Além disso, surgindo a necessidade de remoção do mecanismo do interior da carcaça, seria necessário proceder à desmontagem de grande parte do equipamento, incluindo a separação dos guias dos respetivos patins, havendo a possibilidade de saída de esferas dos mesmos. Caso se pretendesse manter estes pares de componentes unidos e evitar o último ponto em questão, seria difícil fazê-lo, uma vez que os parafusos de ligação dos guias à carcaça são praticamente inacessíveis, pelo facto de terem sido colocados a partir do interior, num dos primeiros passos da montagem.

Já relativamente ao fuso de esferas, este foi maquinado na zona de apoio na chumaceira quadrada de modo a adaptar-se a este componente, resultando numa alteração do comprimento relativamente ao

inicialmente projetado e levando a numa distância mínima ao batente 2 mm superior ao estabelecido, tendo sido necessário elevar a célula de carga para se poder soldar com as faces de maior área do *sonotrode*, sem alterar a posição dos sensores de fim de curso. Adicionalmente, a rosca existente na extremidade superior do fuso não foi totalmente maquinada e a união de veios apenas contacta com esta superfície nas saliências da mesma, que contribui para um maior deslizamento entre os dois componentes para os valores de binário mais elevados do atuador e um consequente desgaste e redução do diâmetro da superfície superior do fuso. Nos últimos ensaios de soldadura realizados deixou mesmo de haver uma transmissão do movimento de rotação e não se alcançou a carga predefinida para os níveis mais elevados, tendo sido, por isso, necessário voltar a apertar várias vezes a união de veios.



Figura 74 – Guias lineares e patins de difícil acesso.

Retornando à montagem e afinação do equipamento, apesar da existência de aberturas frontais e traseiras no perfil exterior, o diâmetro/largura das mesmas não é suficiente para que se possa ter acesso aos parafusos que fixam as flanges. Assim, de forma a ajustar a posição destes componentes, retirou-se material ao perfil, como apresentado na Figura 75 a), continuando a ser necessário deslocar verticalmente o sistema para se ter acesso aos 4 parafusos.

Foram também adicionados furos nas faces laterais do perfil exterior do equipamento (Figura 75 b)) a fim de possibilitar o acesso aos parafusos que permitem desmontar ou afinar a posição relativa das várias placas de aço que compõe o sistema móvel ilustrado na Figura 19.

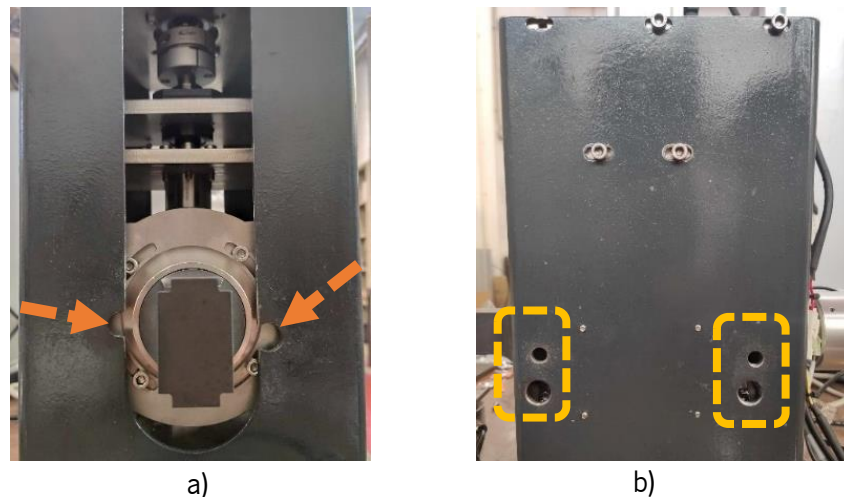


Figura 75 – Furos a) frontais na carcaça, para possibilitar o aperto da flange posterior e b) laterais, de acesso aos parafusos de afinação das chapas de fixação das flanges.

Tal como foi dito anteriormente, as reentrâncias do *sonotrode* diferem com as do batente da célula de carga, sendo a profundidade e largura das últimas quase duas vezes superiores às das primeiras. Após alguns ensaios de soldadura, com variação dos parâmetros do processo, verificou-se que a profundidade das reentrâncias da célula de carga se mostrou demasiado elevada para permitir a união das chapas, rasgando o material e fazendo interferência com as reentrâncias do *sonotrode*. Tal como é mencionado na secção 4.2.8.1, de modo a confirmar essa causa, substituiu-se o batente inferior por uma chapa de aço com uma superfície plana (sem a geometria piramidal) e repetiram-se os testes. Os resultados obtidos mostraram-se evidentes quanto à origem da não união observada inicialmente. A partir da Figura 35 pôde ser observado o efeito da geometria da superfície em contacto com as camadas de cobre, tendo como foco o rompimento das chapas nos pontos de contacto com a célula de carga. Além disso, uma maior distância entre os vértices dos “dentes” da superfície, para o mesmo ângulo das saliências piramidais, resulta numa maior liberdade de o material da camada inferior a soldar escoar para esse volume entre reentrâncias, resultando numa maior probabilidade de formação de zonas não soldadas (Du et al., 2020).

Convergingo especificamente para o sistema da transmissão dos ultrassons até à matéria-prima a soldar, considerou-se que a geometria atual das flanges não permite a oscilação do radiador acústico na direção das vibrações, gerando um “curto-circuito” mecânico no sistema. Quando devidamente fixadas à estrutura, as flanges geram um constrangimento à movimentação do *booster* e *sonotrode*, levando o gerador a dar sinal de erro e a interromper o ciclo de soldadura. Além disso, nestes casos, a potência debitada pelo mesmo é substancialmente superior ao que seria necessário se existisse uma

maior liberdade por parte das flanges no sentido das vibrações, e o gerador é levado às suas condições de funcionamento limite com mais frequência.

Em teoria, a geometria do *booster* e radiador acústico são tais que na zona de fixação às flanges a amplitude de vibração é aproximadamente nula, como ilustrado na Figura 76. Isto significa que não haveria a necessidade de utilização de uma geometria flexível das flanges. No entanto, de modo a compensar possíveis desfasamentos dos pontos nodais e permitir o afastamento e aproximação dessas zonas durante a aplicação da vibração, é uma boa prática dar importância ao grau de liberdade segundo a direção longitudinal aquando do projeto das flanges.

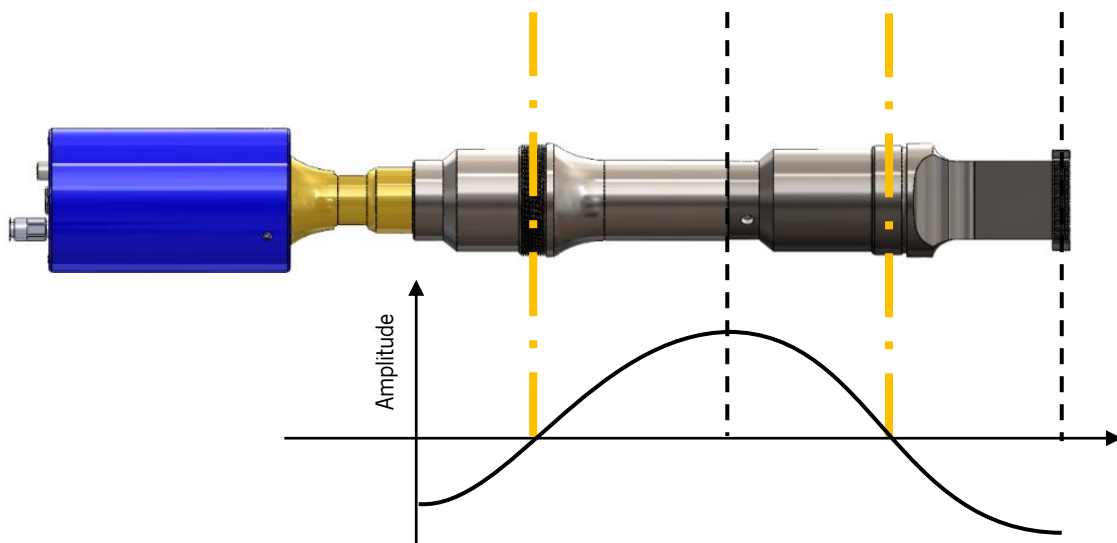


Figura 76 – Diagrama representativo da amplitude de vibração sentida ao longo do sistema de transmissão de ultrassons.

Em simultâneo, é necessário que a geometria destes componentes suporte um número muito elevado de ciclos, correspondendo a uma utilização industrial marcada pela soldadura contínua de componentes, pelo que a sua resistência à fadiga é um dos pontos cruciais. As mesmas flanges não podem deformar em excesso na direção de aplicação da carga, uma vez que a pressão desejada deixa de ser totalmente aplicada no material e, além disso, apenas se obtém uma união consistente se a superfície da ferramenta permanecer paralela à superfície a soldar (Figura 78).

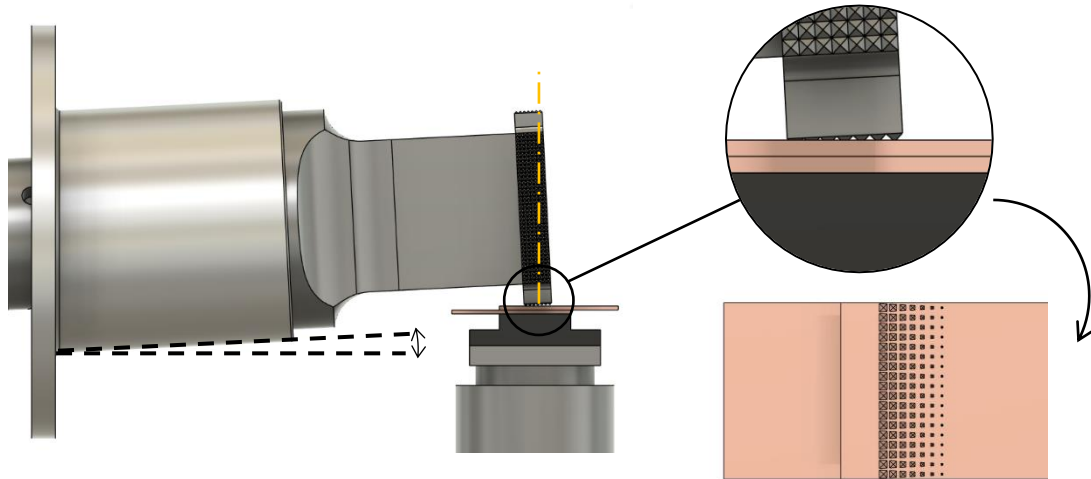


Figura 78 – Flexão das flanges e o seu efeito na qualidade da soldadura.

Uma vez que as flanges não permitem a oscilação do sistema quando devidamente apertadas, foi necessário dar uma ligeira folga nas mesmas. Isto implicou um ajuste da posição do *sonotrode* a cada ensaio realizado, uma vez que a vibração do transdutor é suficiente para a rotação indesejada do sistema, quando este não se encontra devidamente enroscado nas flanges, resultando em áreas de soldadura irregulares, como é visível na Figura 77. Demonstra-se mais uma vez a necessidade de projetar as flanges de modo a que seja apenas necessário fixar as mesmas uma única vez e que mantenham a posição da ferramenta sem afetar a liberdade de movimento longitudinal.

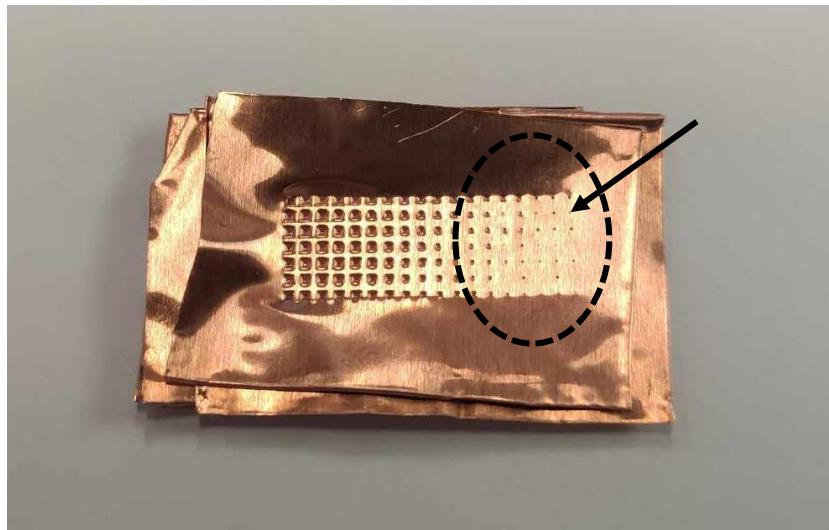


Figura 77 – Exemplo de uma soldadura mal conseguida devido à posição incorreta da ferramenta.

Inicialmente, a geometria adotada para as flanges já teve em conta a possibilidade de soldar não só as extremidades de chapas como também zonas mais centrais das mesmas, isto é, permitir também a soldadura de componentes em que a área de união não esteja localizada nos limites das superfícies dos mesmos. Posto isto, será necessário que a extremidade do radiador acústico se mantenha o mais afastada possível do exterior da carcaça do equipamento. No entanto, é também importante verificar que a dimensão dos componentes a soldar é limitada pela própria geometria do radiador acústico atual, que resulta do facto de a zona de maior diâmetro da ferramenta não ser na extremidade de soldadura, como ilustrado na Figura 79. Como haverá a possibilidade de alteração posterior da ferramenta por uma mais versátil no aspeto mencionado, manter-se-á a utilidade de as flanges apresentarem a geometria alongada a que se faz menção.

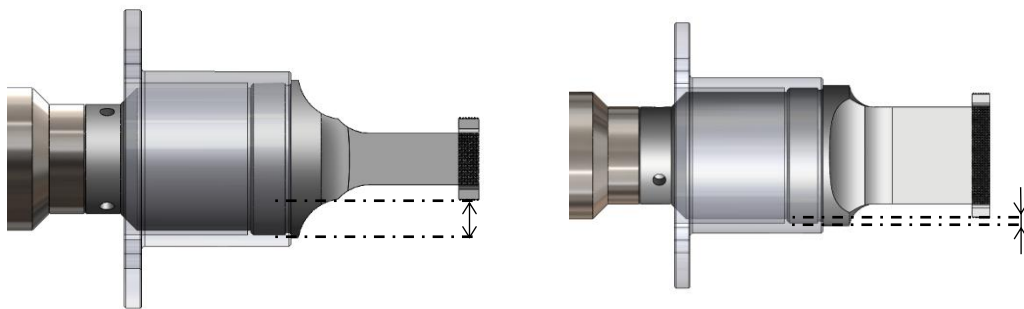


Figura 79 – Limitações geométricas da ferramenta/ *sonotrode* utilizada em ambas as posições de soldadura.

Geralmente, os equipamentos industriais não têm de respeitar requisitos específicos em relação a limites máximos de massa, para além de, em muitos casos, se obter melhor rendimento quanto maior for o valor deste parâmetro, devido à maior estabilidade e melhor resposta às vibrações que se façam sentir. No caso de processos em que se utiliza ultrassons, as vibrações induzidas deverão ser dissipadas para não afetar o restante mecanismo. Com a aplicação da carga nos materiais a soldar, e com a deslocação do sistema móvel, o protótipo deverá respeitar um valor mínimo de rigidez, que por sua vez também irá resultar num aumento da massa. É de acrescentar que a massa do equipamento analisado está abaixo desse valor, uma vez que, por motivos relacionados com os custos de fabrico, a carcaça é composta apenas pelo perfil quadrangular de aço de 4 mm de espessura, mencionado e ilustrado anteriormente. Numa fase posterior, espera-se que o protótipo tenha uma estrutura com maior massa e rigidez, e que solucionará também o primeiro ponto abordado neste subcapítulo, isto é, uma carcaça com maior rigor dimensional.

De acordo com (Das et al., 2019) e com a generalidade dos documentos que abordam o efeito dos parâmetros de soldadura, o valor ótimo da amplitude está compreendido no intervalo de 45 a 60 μm . O valor de 30 μm conferido pelo *booster* atual, assente no material em que é constituído e na sua geometria, limita a movimento relativo entre as chapas a soldar e a respetiva fricção entre as mesmas, afetando as propriedades da união. Posto isto, a alteração do *booster* seria um ponto a considerar numa fase posterior do projeto.

Como foi enunciado, a quantificação da carga exercida pela ferramenta nos materiais teve em conta a intensidade medida tanto pelo servomotor como pela célula de carga. No entanto, a disparidade entre ambas as curvas ao longo do intervalo estudado questiona a precisão dos valores considerados para os vários ensaios de soldadura e remete para a necessidade de alterar o mecanismo ou dispositivo de medição a utilizar, assim como a sua localização, de modo a ser possível definir os mesmos com maior fiabilidade.

A fixação do *sonotrode* e *booster* às flanges por meio de rosca cria dificuldades na montagem e correção da posição do sistema. Ao rodar, estes componentes deixam de ficar totalmente apertados, a menos que se rode as 2 flanges de igual forma. Uma vez tanto o *booster* como a ferramenta serão mantidos num segundo protótipo, terá de se adaptar a restante estrutura às características destes.

Para que o fim de curso inferior da ferramenta seja ativado para ambas as posições de montagem da mesma, é necessário modificar a fixação dos sensores de proximidade de modo a facilitar a alteração da sua posição quando se roda o *sonotrode* 90 graus e impedir que este colida com outros componentes ou que haja o desengate da porca de esferas relativamente ao respetivo fuso.

Durante o manuseamento e afinação do protótipo, foi posta em causa a necessidade de se manter um travão do servo motor quando este é desligado, uma vez que sem o mesmo há possibilidade de se rodar manualmente o elemento de ligação com o fuso de esferas, o que facilita a afinação do sistema. No entanto, a existência de uma função que faz rodar o motor um determinado ângulo pode ser mais eficiente e promove a segurança da manutenção, uma vez que não implica o acesso manual aos elementos móveis.

Em relação aos parâmetros de funcionamento do equipamento, concluiu-se que o intervalo de intensidade da força de soldadura tem início a valores demasiado elevados para soldar materiais de baixa dureza e de espessuras reduzidas, como chapas de cobre de 0,1 mm, por exemplo. Assim sendo, de modo a tornar o equipamento mais versátil, é crucial redefinir os valores mínimos de binário do atuador e reassociar o novo intervalo de valores aos níveis presentes na interface gráfica.

No desenvolvimento do primeiro protótipo apenas se procurou obter um sistema elétrico funcional e capaz de exercer todas as funções necessárias ao processo de soldadura. Contudo, este apresenta-se bastante volumoso e com componentes relativamente simples que poderão ser substituídos por uma configuração mais otimizada e de manutenção mais facilitada numa fase posterior do projeto. Em acréscimo, poder-se-á refletir sobre a melhor estratégia de disposição da parte elétrica no equipamento, avaliando as vantagens e desvantagens de ser integrada na carcaça principal ou de a manter num módulo externo.

Por último, e crucial à futura adaptação do protótipo a um ambiente fabril, a inexistência de um comando bimanual impede o cumprimento de normas de equipamentos industriais, nomeadamente a EN ISO 13851, e aumenta o risco de acidentes, ainda para mais com o facto de o movimento descendente da ferramenta só ser interrompido quando os valores de pressão ou binário são atingidos na célula de carga ou no driver do servomotor, respetivamente. Este problema será corrigido obrigando o operador a utilizar ambas as mãos para iniciar o ciclo.

4.4. SOLUÇÕES CONCEPTUAIS PARA OS PROBLEMAS ENCONTRADOS

4.4.1. FLANGES

A primeira preocupação tida em conta em relação ao protótipo analisado recaiu sobre a geometria das flanges, uma vez que se considera que a eficácia do processo de soldadura está limitada em grande parte pelas características destes componentes. Assim sendo, recuou-se até à análise dos equipamentos existentes e fez-se uma reflexão sobre as vantagens e limitações de alguns tipos de flanges.

4.4.1.1. TIPOLOGIAS DE FLANGES E SOLUÇÃO FINAL

Tendo em vista que a função principal destes componentes de ligação entre o *booster*/radiador acústico e o resto do mecanismo é permitir a vibração longitudinal, enquanto se aplica a carga vertical, será necessário optar por uma geometria moderadamente flexível na direção horizontal e com a rigidez necessária radialmente. Encarregar a rigidez de um único material de permitir uma deformação igual à amplitude desejada enquanto se mantém a flange com uma geometria simples, de secção transversal contínua e rígida como a utilizada mostrou não ser a solução mais eficaz.

O mais lógico do ponto de vista económico, e também mais conveniente, seria priorizar a escolha de uma flange já existente na indústria. Contudo, mantendo o interesse inicial de aumentar a distância

entre a zona de soldadura e a carcaça do equipamento vem a necessidade de modificar algumas geometrias correntes.

Fazendo uma pesquisa acerca das várias possibilidades existentes, contemplam-se 2 tipologias de flanges, que refletem a natureza dos componentes/materiais que as integram (*Isolation Mounts / Ultrasonic Resonators*, n.d.):

- Elastómericas/Flexíveis: Utilizam um ou mais componentes poliméricos elastómeros, normalmente sob a forma de “*o-rings*”, para criar a liberdade de movimento segundo a direção de vibração imposta pelo transdutor;
- Rígidas: Geralmente construídas totalmente por componentes metálicos e normalmente mais utilizadas para situações de maior precisão e necessidade de rigidez superior perante cargas estáticas.

A primeira vertente destes componentes consiste, normalmente, em 2 anéis metálicos separados por uma ou várias camadas poliméricas, em que um é fixo na estrutura do equipamento e o outro move-se com o sistema *booster/sonotrode*.

Dentro desta tipologia de flanges, existem várias classes, com particularidades assentes no tipo e número de componente poliméricos, assim como na forma de fixação de ambos os anéis que o envolvem, muitas delas patenteadas há várias décadas. Alguns dos polímeros utilizados no fabrico da camada mencionada acima são os elastómeros de poliuretano, nitrilo, silicone, nylon, entre outros, sendo que a escolha dos mesmos e a sua espessura varia com o tipo de utilização do sistema e intensidades da carga. Alguns exemplos destes conjuntos podem ser observados na Figura 80.

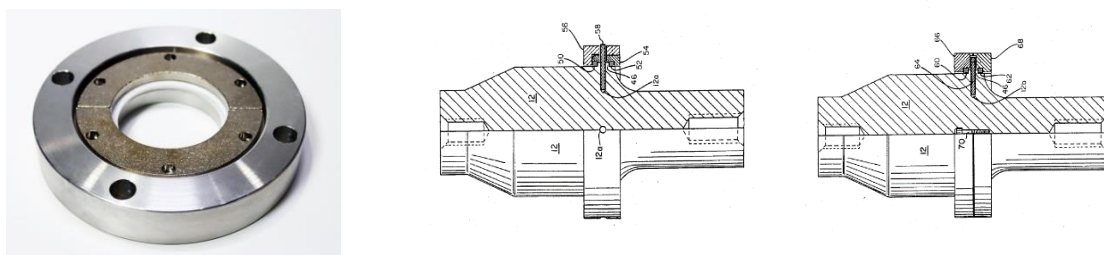


Figura 80 – Exemplos de flanges com camada polimérica utilizadas em equipamentos de ultrassons (15K-Ultrasonic-Welding-Generator-Transducer-Flange-for-The-Mask-Welding-Machine, n.d.) (https://www.Ultrasonic-Resonators.Org/Design/Isolation_mounts/Isolation_mounts.Html, n.d.).

Já as flanges rígidas podem assumir várias geometrias muito distintas, desde soluções semelhantes às abordadas acima, com vários anéis metálicos, omitindo apenas a(s) camada(s) polimérica(s), como apresentado na Figura 81, até componentes únicos com rigidez inferior na direção de vibração, possibilitada pela sua configuração geométrica.

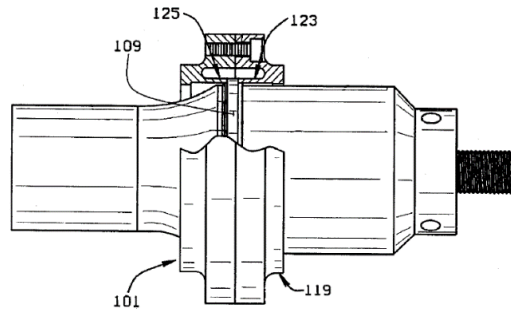


Figura 81 – Flange rígida Cunningham, composta por 2 anéis metálicos. Patente norte americana 5590866 (https://www.Ultrasonic-Resonators.Org/Design/Isolation_mounts/Isolation_mounts.Html, n.d.)

Contudo, para a geometria da ferramenta adquirida, as soluções apresentadas nas figuras acima, resultariam numa redução da distância entre a extremidade da mesma e a carcaça exterior do protótipo. A existência de um anel polimérico entre as flanges atuais e a chapas de aço onde estas estão assentes poderia reduzir o número de componentes, ao considerar que as próprias placas de suporte substituem os anéis de fixação mencionados acima. Deste modo, reunir-se-iam as vantagens de ambas as tipologias de flange, a utilizada e as disponíveis no mercado, e simplificar-se-ia o fabrico.

Outra geometria já utilizada por um dos principais fabricantes de equipamentos assenta num disco metálico de espessura reduzida com recortes radiais, que têm o propósito de aumentar a flexibilidade do componente segundo o eixo do sistema vibratório, e que era colocado nas zonas de ligação do transdutor/*booster* e do *booster/sonotrode*, semelhante ao apresentado na Figura 82. Os

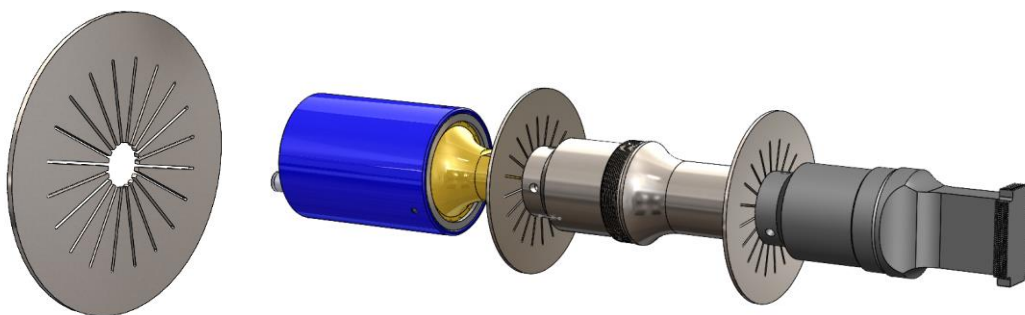


Figura 82 – Tipologia de flange rígida previamente utilizada em alguns equipamentos.

principais problemas desta solução eram o posicionamento das flanges numa zona desfasada do ponto nodal e que não era facilmente alterado devido à tipologia geométrica dos componentes e difícil modificação da forma como poderiam ser acoplados ao *booster* e ferramenta, o modo como eram acoplados ao sistema de deslocamento vertical, a baixa resistência à fadiga e o facto de deslocar todo o

sistema para a frente e aumentar a distância da zona de atuação da ferramenta até ao ponto de suporte mais próximo.

Uma vez que, tal como mencionado anteriormente, é suposto reutilizar o *booster* e o *sonotrode* no projeto do novo protótipo, o desenho das novas flanges deverá ter em conta o encaixe roscado presente em ambos os componentes. Isto leva à rejeição de algumas tipologias de flanges e resulta numa necessidade de modificação de pelo menos um dos anéis das flanges disponíveis para aquisição, o que anula parte da vantagem da utilização de modelos encontrados no mercado.

As flanges com geometria de “mola” (*zig-zag*) utilizadas em algumas tecnologias de ultrassons, semelhantes à apresentada na Figura 83 a), para uma determinada espessura das espiras, permitiriam um maior deslocamento do sistema no eixo em que o mesmo oscila, mas tenderia a ser menos rígida na direção radial. Esta característica propicia, por um lado, o amortecimento das vibrações transmitidas à restante estrutura do equipamento, mas implica que, a partir de um certo valor de deformação radial, a ferramenta não atue paralelamente ao material a soldar, como mencionado previamente. A vantagem de isolar o restante sistema das vibrações poderá também ter como consequência a não transmissão total da carga para a ferramenta. Conferindo a rigidez necessária radialmente enquanto se mantém a possibilidade de amortecer longitudinalmente o movimento do sistema, este tipo de geometria remete ainda para uma menor resistência à fadiga do que as restantes soluções, devido à descontinuidade da sua secção transversal. Além disso, e da mesma forma que foi dito para as soluções anteriores, as flanges desta tipologia comumente encontradas na indústria não permitem o deslocamento de todo o sistema para a frente do equipamento de maneira a aumentar a distância da ferramenta ao exterior da carcaça. Assim, para ultrapassar esta dificuldade, teria de ser fabricada uma geometria idêntica, mas com uma extensão da última espira da flange, como ilustrado na Figura 83 b) em que a zona roscada de ligação à ferramenta e *booster* se encontraria desfasada do plano de ligação à estrutura.

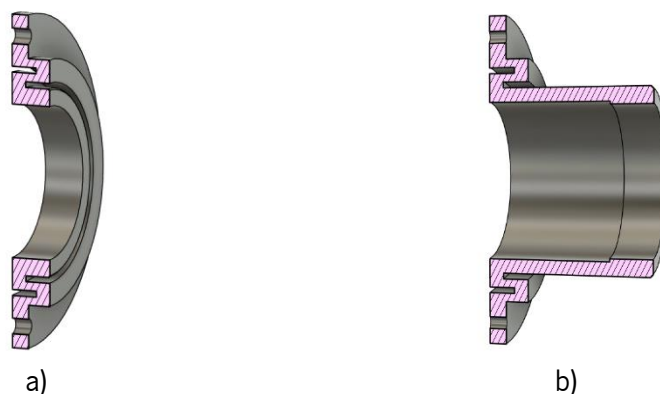


Figura 83 – Flanges de mola: a) comuns e b) com extensão da geometria para o caso atual.

Contudo, esta extensão da geometria implica uma dificuldade acrescida no torneamento das cavidades das “espiras”, pela necessidade de ferramentas específicas ou necessidade de alterar ligeiramente as dimensões e configuração dessa geometria.

Assim, tendo em conta as várias tipologias existentes e as particularidades do equipamento em questão, a possibilidade mais vantajosa, quer em termos de fabrico, quer pela efetiva liberdade de oscilação do sistema, convergiu para a tipologia flexível, que recorre a uma ou mais camadas poliméricas, e a primeira geometria considerada ilustra-se na Figura 84. Esta tem em atenção a conservação do posicionamento de todo o sistema, de modo a permitir o afastamento da ferramenta relativamente à carcaça do equipamento, assim como a rigidez necessária para impedir a flexão do conjunto e a existência de uma *layer* de material polimérico que atribuiu a liberdade apenas na direção longitudinal.

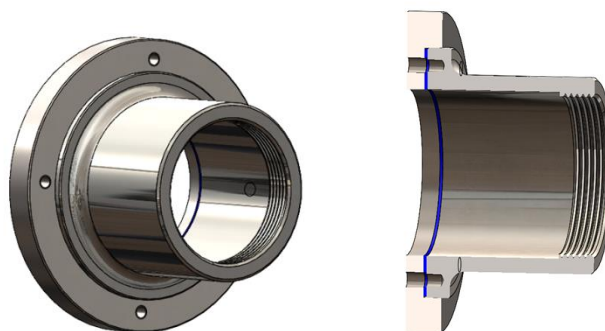


Figura 84 – Primeira configuração idealizada para as flanges finais.

Na grande maioria dos casos, as flanges que recorrem a materiais poliméricos têm na sua configuração 2 camadas destes mesmos polímeros, uma em cada superfície de fixação do *booster* ou da ferramenta, para confirmar que estes componentes contraem e alongam. No caso em questão a fixação do sistema é feita por união roscada e parte da flange terá de oscilar com o *booster* e ferramenta, sendo que apenas uma camada polimérica não permitirá o movimento na sua totalidade. Como forma de compensar este problema poder-se-ia recorrer a anilhas de mola para permitir que a cabeça dos parafusos se desloque ligeiramente segundo o eixo de vibração, em vez de permanecerem totalmente estrangidas contra o anel traseiro das flanges. No entanto, esta solução não pareceu ser a mais eficaz por ser difícil de quantificar o deslocamento permitido pelo aperto dos componentes. A geometria ilustrada acima também resulta num componente de maior volume, pela forma como ambos os componentes são ligados, para além de dificultar a desmontagem e extração da restante estrutura.

Assim, modificando a geometria dos componentes tendo em conta o aspeto mencionado e a disposição atual da estrutura onde são fixos, a configuração resultou na ilustrada na Figura 85. Assim, as flanges seriam compostas por 4 componentes: corpo, anel de bloqueio e 2 anéis poliméricos.

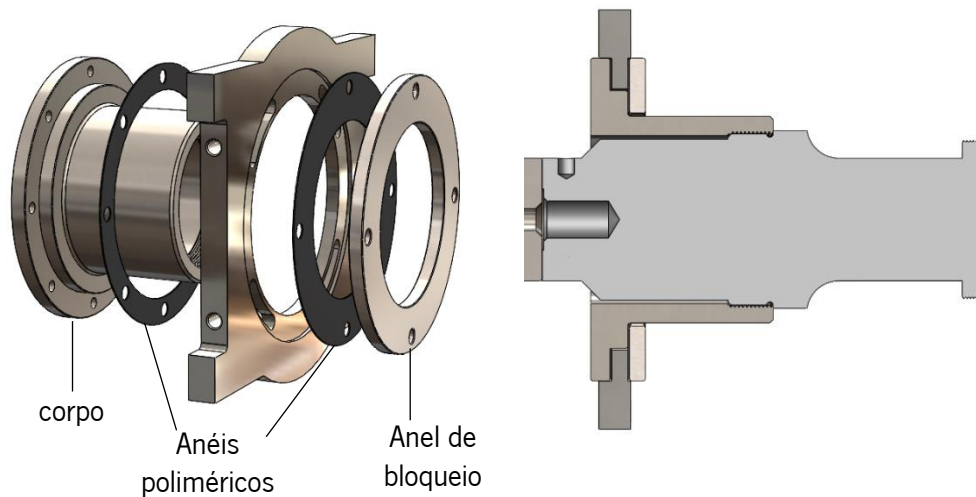


Figura 85 – Configuração final das flanges: a) vista explodida e b) integração na estrutura.

Para facilitar a desmontagem do sistema, é importante que as flanges sejam dispostas de forma a que possam ser removidas em direção à parte traseira do equipamento, caso contrário não será possível remover o conjunto transdutor/*booster*/ferramenta agregado.

Apesar de se ter mencionado as vantagens em termos de fabrico de ambas as flanges apresentarem a mesma geometria e dimensões, os constrangimentos que esse aspeto originam relativamente à montagem e acesso dos componentes resultam nas seguintes diferenças no projeto das duas flanges: comprimento e localização dos furos roscados. A substituição da carcaça de perfil quadrangular de 4 mm de espessura por placas de aço de 15 mm de espessura, em simultâneo com a adição do anel de bloqueio às flanges, implica um aumento do comprimento da flange frontal para não se reduzir significativamente a distância ao exterior do equipamento proporcionada pelas flanges atuais. Desta forma, o comprimento da zona tubular da flange posterior passou de 35 mm para 45 mm e aumentou-se a sua espessura de 4,5 para 6 mm, de modo a manter a rigidez face à flexão, e sem aumentar o diâmetro exterior do componente. Este último aspeto tem como objetivo não prejudicar a limitação previamente ilustrada na Figura 79 e para isto procedeu-se à redução da folga entre o diâmetro interior da flange e a zona não roscada do radiador acústico. Para validar o comportamento da nova geometria perante as condições consideradas, repetiu-se o estudo numérico que se efetuou para as flanges inicialmente fabricadas, enunciado no subcapítulo seguinte. Para se corrigir uma das falhas do projeto inicial, isto é, a dificuldade de acesso aos parafusos de fixação da flange traseira, optou-se por

adicionar os furos roscados ao anel de bloqueio para esta flange. Desta forma o corpo da flange poderá ser removido pela retaguarda do equipamento e, em simultâneo, o acesso aos parafusos será pelo mesmo lado, como representado na Figura 86. A espessura necessária das camadas poliméricas dependerá do material utilizado, mas será a menor possível (e advém do leque disponível no mercado), de modo a não aumentar exageradamente a rigidez/estabilidade do sistema. Uma escolha razoável seria o nylon, uma vez que não é excessivamente maleável, facilita a montagem e contribui para o mencionado previamente. A natureza da estrutura móvel inicial foi tida como referência para a montagem destes novos componentes uma vez que se concluiu apresentar como a solução mais simples e eficiente quer no fabrico dos seus elementos, quer na montagem e manutenção. Porém, algumas dimensões e detalhes geométricos sofrerão alterações em concordância com as versões finais de cada componente das flanges e da restante estrutura.

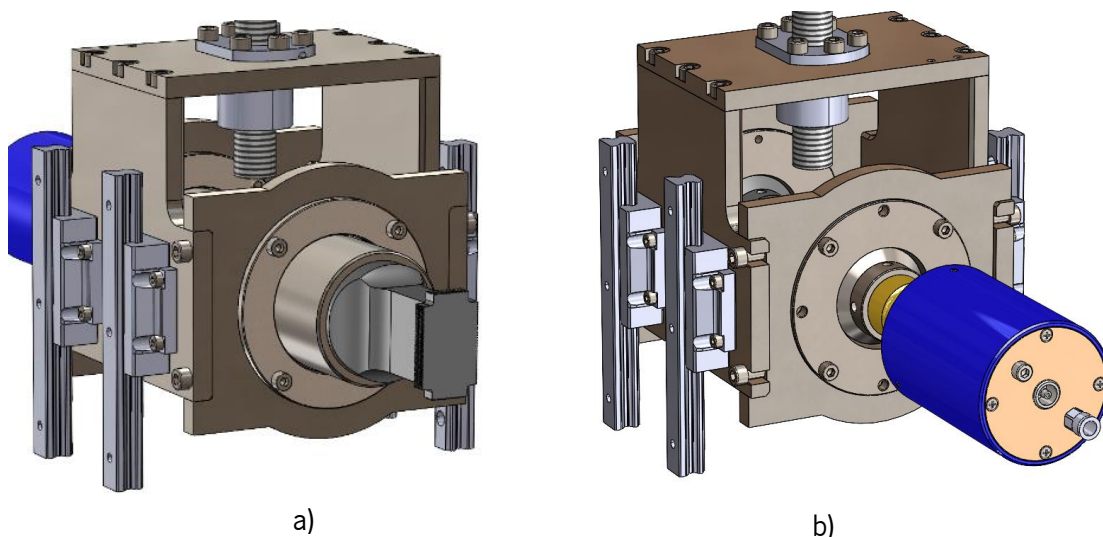


Figura 86 – Disposição dos parafusos de fixação das flanges a) frontal e b) traseira.

4.4.1.2. ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DAS FLANGES

De modo a poder analisar e caracterizar com mais detalhe o comportamento das flanges inicialmente projetadas perante o carregamento imposto durante a compressão do material alvo de soldadura, fez-se uso das ferramentas computacionais de simulação disponíveis. Desta forma recorreu-se aos softwares Fusion 360 e Solidworks para realizar, por elementos finitos, análises lineares estáticas e de fadiga como forma de determinar se a geometria atual das flanges seria capaz de ser submetida às situações de carregamento mais severas e a um número elevado de ciclos. Esta solução é especialmente útil para o ensaio de fadiga, uma vez que não é possível executar num curto espaço de tempo o número de ciclos de soldadura que se faria na vida útil da máquina.

Interpretação/contexto e Simplificação da análise:

O sistema primário do equipamento é composto pelos 3 componentes que transmitem os ultrassons (*transdutor*, *booster* e *sonotrode*) e está interligado ao restante mecanismo por duas flanges. Quando a ferramenta entra em contacto com o material, estes últimos componentes têm a função de manter o transdutor, *booster* e *sonotrode* alinhados segundo um eixo horizontal, paralelo à superfície de soldadura. Para retratar numericamente o sistema na sua totalidade, haveria uma maior exigência computacional e o processo seria consequentemente mais demorado, tendo sido, por isso, considerado apenas o radiador acústico e a flange frontal no decorrer da análise. O procedimento torna-se mais conservativo pois permite uma maior flexão/desfasamento do *sonotrode*, resultante na omissão dos restantes componentes que contribuem para o manter no eixo horizontal esperado.

Também de modo a reduzir a complexidade computacional da análise, os detalhes geométricos considerados desnecessários e sem efeito útil nos valores finais das simulações foram suprimidos dos componentes, nomeadamente as reentrâncias das faces de ataque da ferramenta e a zona roscada de ambos.

Apesar de o foco principal ser a verificação do comportamento das flanges frente aos esforços impostos, posicionou-se a ferramenta com a face de menor área paralela ao plano de soldadura (Figura 87), de acordo com o que se fez ao longo dos ensaios experimentais, de modo a que o momento de inércia seja maior na direção do carregamento e assim induzir uma menor flexão neste componente. Deste modo não se induzirá uma deformação tão elevada na ferramenta (que na realidade está preparada para cargas muito superiores às utilizadas), o que tenderia a atenuar a deformação e possível cedência da flange.

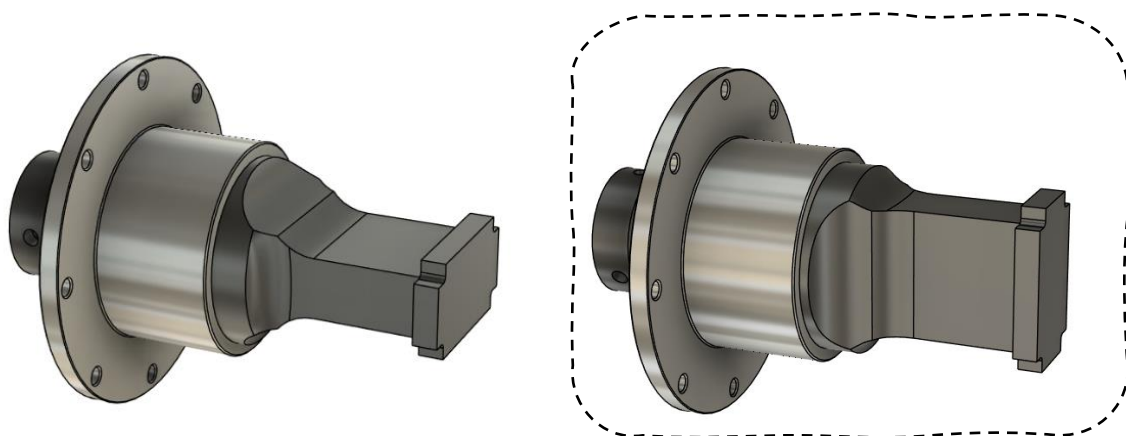


Figura 87 – Opções de posicionamento do conjunto para posterior análise numérica

Condições fronteira:

1- Constrangimentos: Considerando os guias lineares a limitar a cinemática do sistema apenas ao movimento vertical do sistema, supôs-se que a face de contacto da flange com a chapa de suporte (Figura 88 a)) permaneceria sempre na vertical durante o seu movimento. (*Frictionless*);

Fixação da aresta (Figura 88 b))) da face de ataque da ferramenta mais próxima do equipamento em dois dos eixos, excluindo a direção longitudinal, de modo a permitir a flexão dos componentes e aproximando a uma situação real de atuação da ferramenta no material a soldar. Assim permite-se a deslocação deste componente na direção das oscilações impostas pelo transdutor que, apesar de reduzida, existe e é somada à compensação da posição horizontal provocada pela flexão.

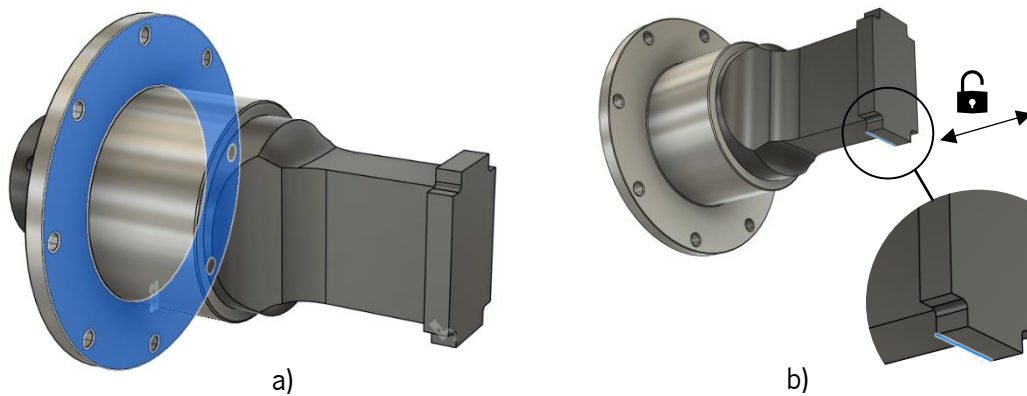


Figura 88 - Constrangimentos aplicados ao sistema: a) face limitada apenas ao movimento vertical e b) movimento da aresta reservado à direção de vibração da ferramenta.

2- Carregamento: Carga de 2000 N dividida pelos 4 furos de fixação da flange, com direção vertical e sentido descendente (Figura 89), simulando a reação que se faria sentir por parte do batente e do

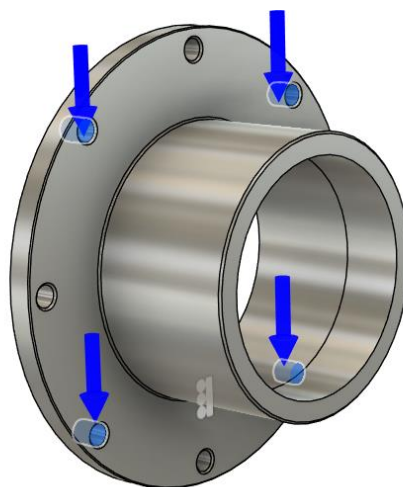


Figura 89 - Configuração da carga aplicada à flange no estudo numérico.

material quando se aplica a carga máxima admissível pela célula de carga (aproximadamente 200 kg).

3 - Materiais:

- Flange: AISI 304;
- Radiador acústico: Aço de baixo teor de carbono DC03 ou 1.0347, comumente utilizado para ferramentas de conformação. A composição do material segundo a norma DIN EN 10 130 é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química do aço DC03 na ferramenta de soldadura.

Elemento	C	P	S	Mn	Ti
% mássica máx.	0,10	0,035	0,035	0,45	-

Propriedades mecânicas do aço DC03:

- Tensão de cedência/tensão limite de proporcionalidade a 0,2%: 240 MPa;
- Tensão de rotura: 270-370 MPa;
- Módulo de elasticidade: considerado como sendo 210 GPa.

4 - Contactos: *Bonded* na zona roscada, considerando não haver qualquer movimento relativo entre ambos os componentes;

5 - Malha: Refinamento local na aresta de transição de diâmetros da flange (Figura 90), e malha mais grosseira no radiador acústico, uma vez que não é o componente alvo de estudo.

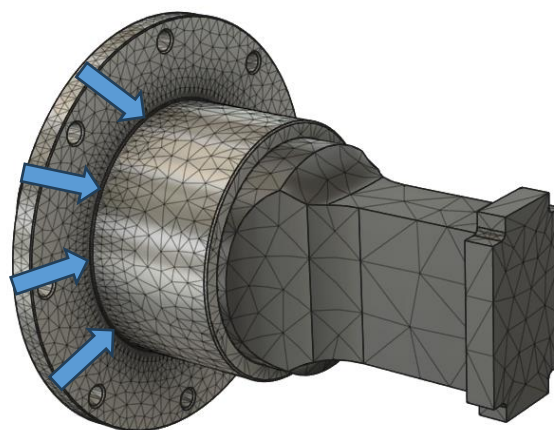


Figura 90 – Configuração da malha utilizada na análise linear estática no Fusion 360, com refinamento local na aresta da flange.

Pós Processamento e análise de resultados

Os resultados obtidos para a análise linear estática (Figura 91) revelaram que a geometria das flanges fabricadas suportam a carga máxima admissível pela célula de carga, com um coeficiente de segurança superior a 2, e a deformação elástica induzida no conjunto flange/ *sonotrode* resulta num afastamento máximo entre parte da superfície da ferramenta e o material muito inferior à espessura do mesmo. Tendo em conta a metodologia conservadora de considerar o *sonotrode* livre na sua face de fixação ao *booster*, assim como a omissão da flange traseira, é de esperar que estes valores sejam menos significativos no cenário real.

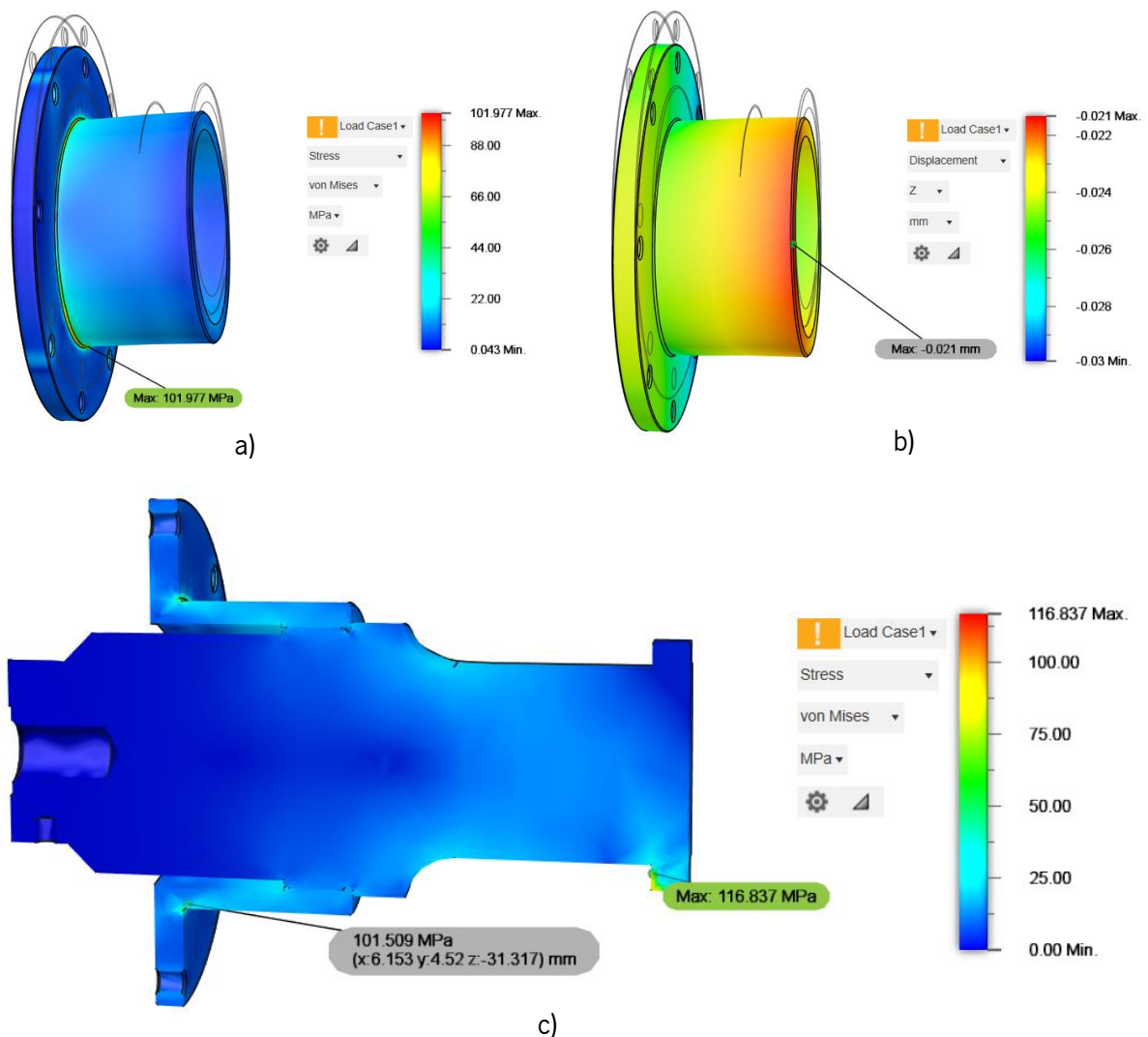


Figura 91 – Análise linear estática da flange original, realizada em Fusion 360: a) Tensão de von Mises, b) Deformação segundo o eixo vertical e c) vista de corte do conjunto.

Foi replicada a análise linear estática no software Solidworks (Figura 92) de forma a avançar com uma análise de fadiga, recorrendo à curva S-N do aço AISI 304. O valor da tensão máxima que se fez sentir no componente não ultrapassou o valor de tensão a partir do qual o material apresenta uma resistência a um número infinito de ciclos, o que corroborou a resistência das flanges ao número de ciclos imposto (1000000).

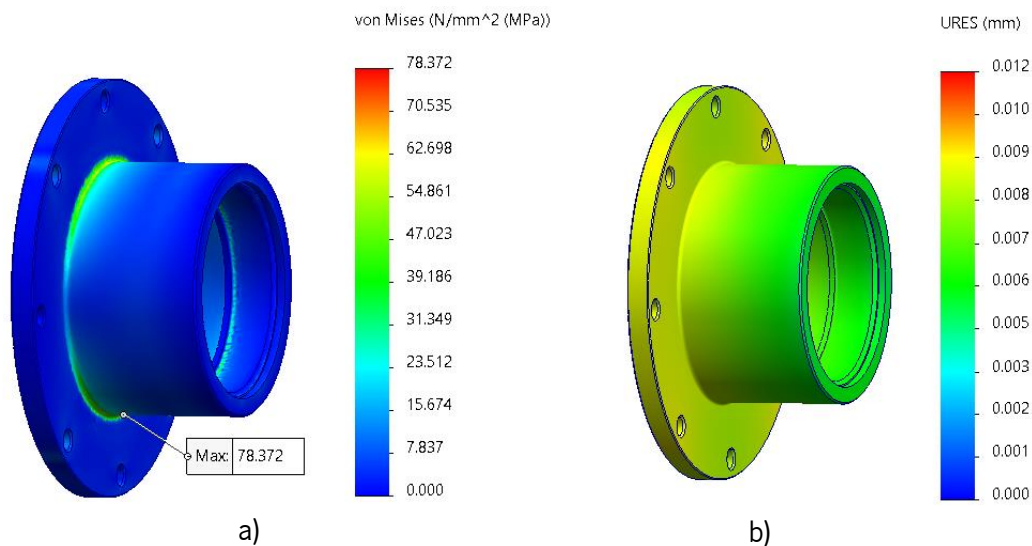


Figura 92 – Resultados da análise linear estática replicada em Solidworks à flange original: a) Tensão máxima de von Mises e b) Deformação segundo o eixo vertical.

Uma vez que o pré processamento teve em conta alguns aspetos mais conservadores e severos do que as condições de funcionamento reais, nomeadamente a consideração da utilização da carga máxima do atuador ao longo de todos os ciclos e a omissão dos restantes componentes que impedem o desfasamento da ferramenta, i.e., o *booster* e a flange traseira, consideraram-se os resultados fiáveis.

Após chegar à configuração final das flanges, o mesmo processo de simulação foi executado para este componente, tendo como objetivo contribuir para o dimensionamento de alguns dos seus aspetos geométricos e comprovar a conservação da rigidez ou mesmo o seu aumento relativamente às flanges inicialmente fabricadas. As camadas poliméricas foram omitidas da simulação uma vez que as propriedades mecânicas dos possíveis materiais tornariam o estudo não linear e o foco principal é verificar a rigidez do corpo principal em aço destes componentes.

Após várias iterações da geometria, tendo em conta as limitações da restante estrutura e o próprio fabrico, fez-se a análise dos resultados e convergiu-se para as dimensões finais destes componentes.

A partir da Figura 93 e dos valores apresentados, considerou-se que a geometria do corpo da nova versão das flanges preserva a resistência aos esforços impostos, sendo notável um aumento da rigidez deste componente, tal como se pretendia com o incremento na espessura da parte tubular.

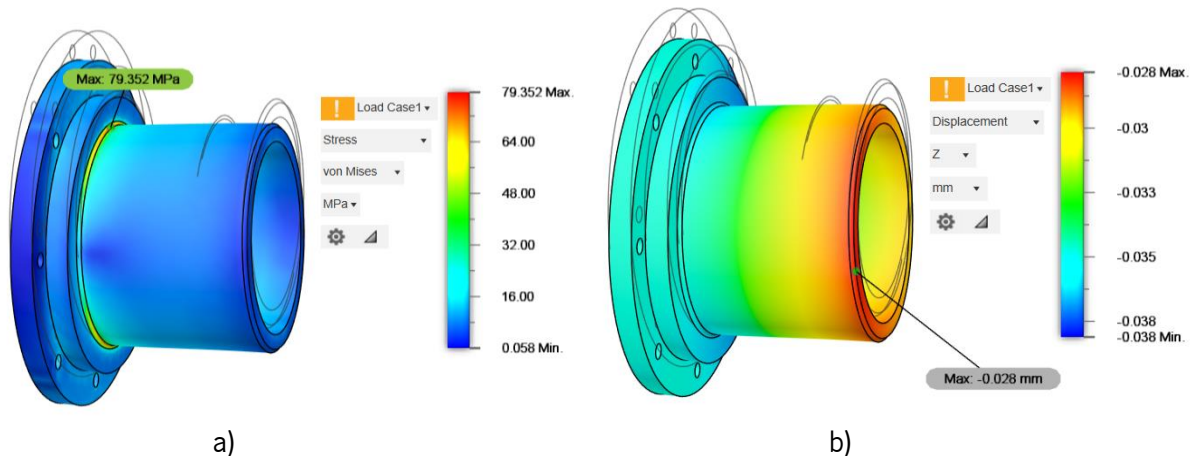


Figura 93 – Resultados da análise linear estática realizada no Fusion 360 para a nova configuração da flange: a) Tensão máxima de von Mises e b) Deformação segundo o eixo vertical.

Finalizado o processo de dimensionamento e análise computacional e feitos os ajustes necessários à geometria de ambas as flanges, as principais dimensões finais destes componentes convergiram para as apresentadas na Figura 94, sendo que apenas diferem no comprimento do corpo e na localização dos furos roscados.

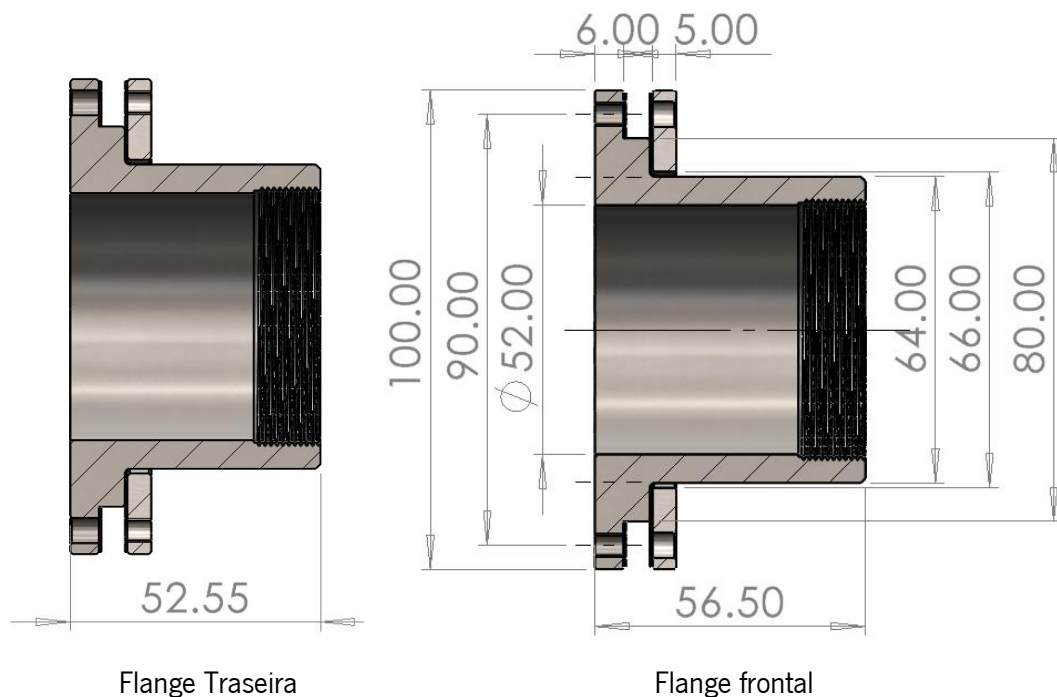


Figura 94 – Principais dimensões finais das novas flanges projetadas: a) flange traseira; b) flange frontal.

4.4.2. PARTE ESTRUTURAL

Relativamente à carcaça exterior do equipamento, após verificar que o perfil quadrangular proveniente de extrusão não permite as tolerâncias dimensionais exigidas para a correta montagem dos guias lineares, convergiu-se para a sua substituição por chapas de aço de 15 mm de espessura (Figura 95 a)), que também contribuem para o aumento da estabilidade dimensional e da rigidez do equipamento. Uma outra vantagem da utilização desta solução é a facilidade de aceder ao interior do equipamento, uma vez que se poderá remover apenas a parte frontal ou traseira do mesmo. Uma primeira iteração passou por manter a base do equipamento e apenas substituir o perfil por 4 chapas de aço com a espessura mencionada, mas posteriormente concluiu-se que poderia ser útil utilizar a parte inferior para incluir parte do sistema elétrico, assim como um painel de controlo, acessível e preferível no caso de o sistema informático central se encontrar afastado do equipamento.

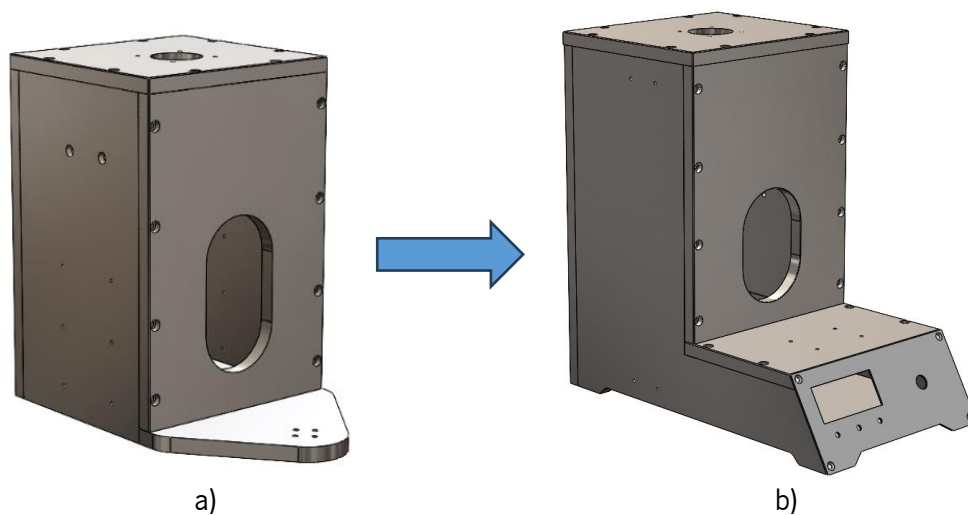


Figura 95 – Fases de modificação da geometria base da carcaça: a) semelhante à original e b) com aproveitamento do volume inferior para disposição da parte elétrica.

Para facilitar a montagem e desmontagem do protótipo assim como a sua manutenção (pensando já numa utilização industrial), refletiu-se sobre a possibilidade de não fixar diretamente os guias lineares na carcaça, mas sim em chapas intermédias que farão a ligação à mesma (Figura 96). Desta forma, uma vez montado o equipamento na sua totalidade, não haverá necessidade de reajuste da posição dos guias nem de separação entre os mesmos e os patins de esferas. Com essa configuração, quando se pretender fazer alterações no interior do equipamento, tal como substituir o *booster*,

ferramenta, ou ajustar a posição do sistema móvel, é suficiente desacoplar o motor superior, a chapa traseira e 6 parafusos em cada lateral do equipamento.

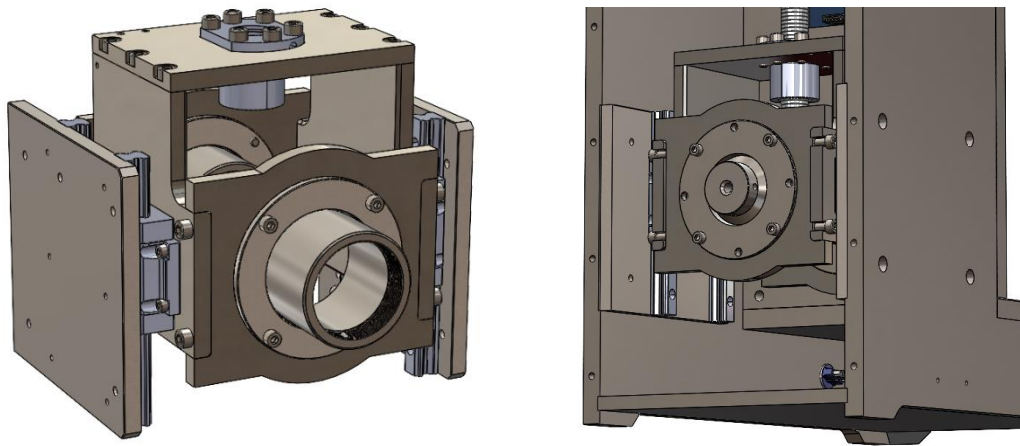


Figura 96 – Chapas de aço para fixação dos guias lineares à carcaça.

De modo a ser possível aceder aos furos de desaperto do *booster* e aos parafusos de afinação da placa de suporte da flange traseira sem se reduzir exageradamente a profundidade do equipamento e tornar toda a sua estrutura menos rígida e de difícil acesso e disposição dos seus componentes, procedeu-se ao recorte de ambas as chapas laterais da carcaça, como ilustrado na Figura 97, tendo em conta que estas e outras aberturas serão ocultas por um revestimento final.

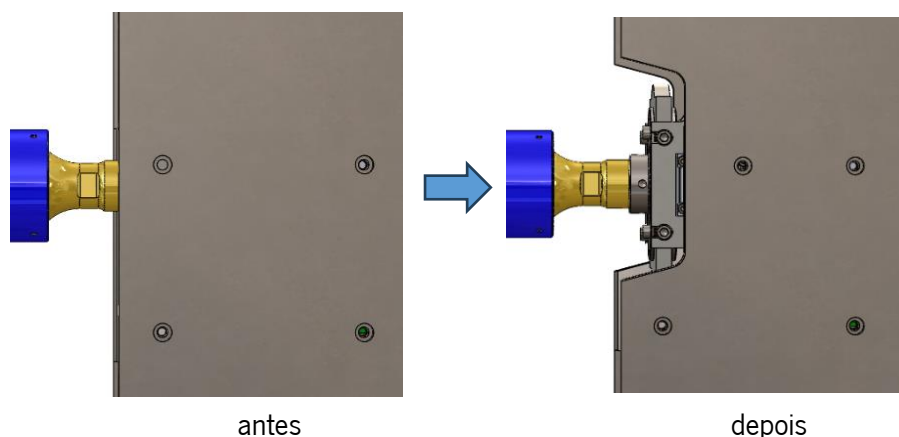


Figura 97 – Aberturas laterais para acesso às principais zonas de afinação.

Para ajudar no posicionamento das placas mencionadas acima (Figura 96), foi considerado útil acrescentar rebaixamentos onde as mesmas deslizam e que impedem que o sistema de descair durante a sua fixação/desmontagem na restante estrutura, após remover os 4 parafusos que fixam cada uma

delas à carcaça exterior. O mesmo foi feito para a chapa intermédia onde está assente a chumaceira FK17.

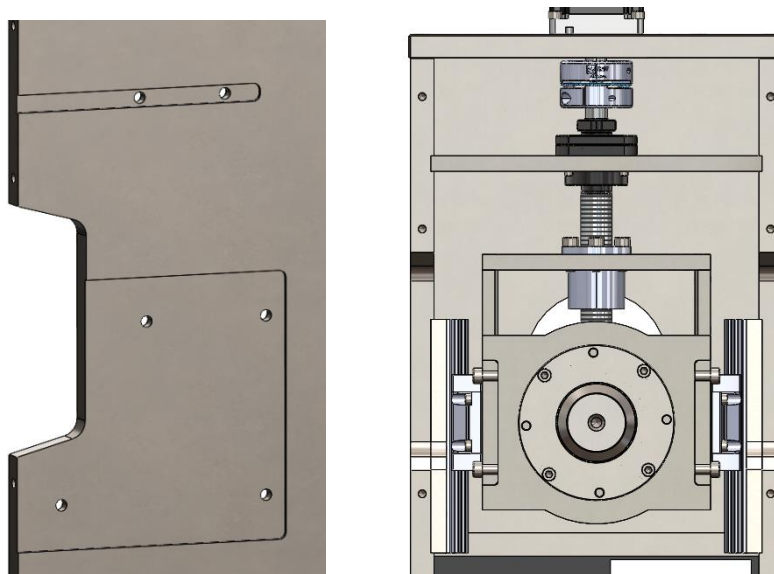


Figura 98 – Rebaixamentos nas placas laterais da carcaça para facilitar o posicionamento e montagem/desmontagem do sistema móvel.

Atendendo às duas possibilidades de posicionamento da ferramenta e aos diferentes cursos que o sistema móvel terá de percorrer para que a anterior entre em contacto com a matéria-prima a soldar, foi considerado importante manter uma configuração ajustável dos fins de curso magnéticos. Os suportes poliméricos do protótipo inicial apenas permitem um ajuste a partir do interior do equipamento, o que resulta num difícil acesso, ainda mais notório com a natureza da nova carcaça. Sendo o principal objetivo da nova configuração facilitar a manutenção e acesso aos componentes ajustáveis do sistema, convergiu-se para a adição de furos oblongos na lateral da carcaça (Figura 99 a)) para ajuste vertical da posição dos sensores magnéticos. O comprimento destas aberturas tem em conta a diferença entre as distâncias do eixo da ferramenta às suas faces de ataque, nas duas possíveis configurações de soldadura, ilustradas na Figura 21, Figura 32 e Figura 79. Desta forma, as duas posições limite inferiores deverão estar espaçadas no mínimo 10 mm, mas haverá a necessidade de aumentar este valor para ajustes relacionados com a substituição do batente de soldadura. O ajuste da posição do sensor magnético superior não é estritamente necessário, mas para é vantajoso caso se pretenda reduzir o curso de retorno à posição “home” e consequentemente o tempo de ciclo, para um futuro aumento da cadência de produção do equipamento. O ajuste horizontal dos mesmos será feito a partir do interior uma vez que só será necessário proceder ao mesmo uma vez. Outro ponto do protótipo inicial a ser corrigido foi o ajuste da distância dos sensores magnéticos aos componentes que os acionam, neste caso uma das chapas de aço da própria estrutura móvel. Na nova configuração os sensores serão ativados por 2 parafusos,

fixos na estrutura anterior, e que poderão ser afinados de forma a aproximar-se ou distanciar-se dos sensores, como ilustrado na Figura 99 b). Em substituição dos suportes poliméricos apresentados na Figura 17, convergiu-se para componentes com uma geometria mais simples, também ilustrada Figura 99 b), a serem posteriormente fabricados em alumínio por maquinagem.



Figura 99 – a) Furos de ajuste vertical dos sensores magnéticos e b) suportes metálicos com ajuste horizontal dos sensores e parafusos de acionamento.

Atendendo que se pretende aumentar a versatilidade do equipamento e facilitar possíveis melhorias futuras, considerou-se vantajoso preparar o mesmo para a substituição do servomotor atual pelo da gama acima, também compatível com o *servodriver* já adquirido. Assim, e após, uma análise das dimensões de ambos os modelos de motores, surgiram 2 possíveis métodos de adaptação do equipamento aos mesmos. Inicialmente, projetou-se uma chapa complementar de ligação do novo motor à estrutura da carcaça (Figura 100 a)), pela sobreposição dos furos de ligação do motor atual com o rebaixamento cilíndrico para o motor de gama superior. Contudo, para evitar o fabrico de componentes suplementares, convergiu-se para a maquinagem do rebaixamento indicado na Figura 100 b).

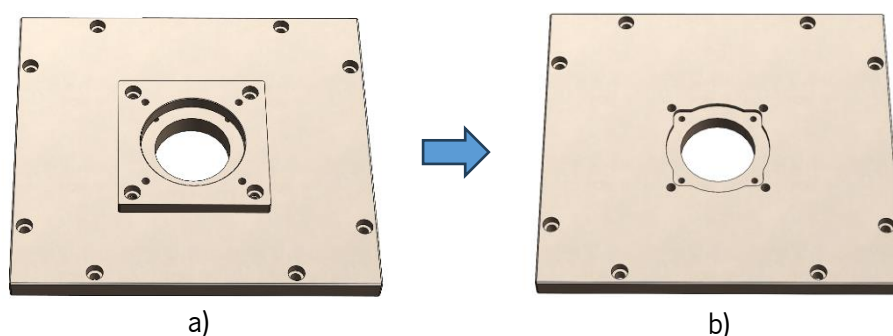


Figura 100 – Possibilidades de adaptação da chapa de topo ao servomotor de dimensão superior através: a) de uma chapa suplementar e b) da fresagem de um rebaixamento.

A alteração posterior da ferramenta de soldadura e o ajuste das flanges remetem para a necessidade de se ajustar a distância da superfície de soldadura na direção de atuação da vibração. Assim, e de forma idêntica ao que é utilizado em alguns equipamentos semelhantes, foi adicionada uma chapa intermédia (Figura 101) que servirá de base à célula e que apresenta dois furos oblongos paralelos ao eixo da ferramenta e que permitirão posicionar o batente de acordo com as variáveis mencionadas acima.

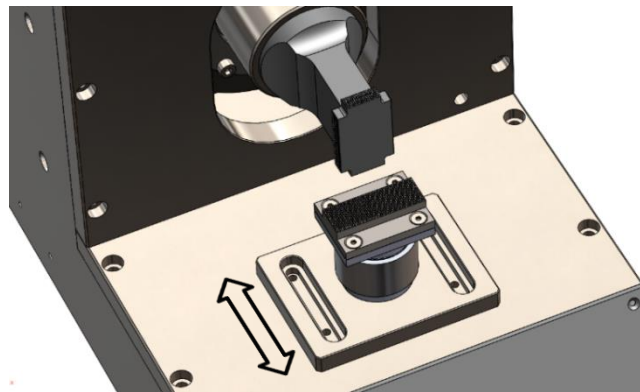


Figura 101 – Sistema de ajuste da posição da célula de carga.

De modo a cumprir a norma relativa ao controlo bimanual de equipamentos acima referida, foram adicionados dois botões laterais à carcaça, que o operador terá de acionar em simultâneo para dar início ao ciclo de soldadura, assim como um botão de paragem de emergência na parte frontal do equipamento para um acesso mais facilitado do que o disposto no painel elétrico. Da mesma forma, no painel de controlo inferior, em simultâneo com o acionador de emergência, acrescentou-se um módulo LCD de 20x4 caracteres com a finalidade de indicar algumas das variáveis do processo em tempo real. Os componentes mencionados foram dispostos como ilustrado na Figura 102 a).

De modo a fazer uso da área frontal da carcaça do equipamento, considerou-se útil a adição de uma cavidade para posicionamento de um ecrã HDMI de 4 polegadas (Figura 102 b)), que servirá de controlo de alguns aspetos do ciclo de soldadura, para omitir a necessidade de aceder ao painel exterior

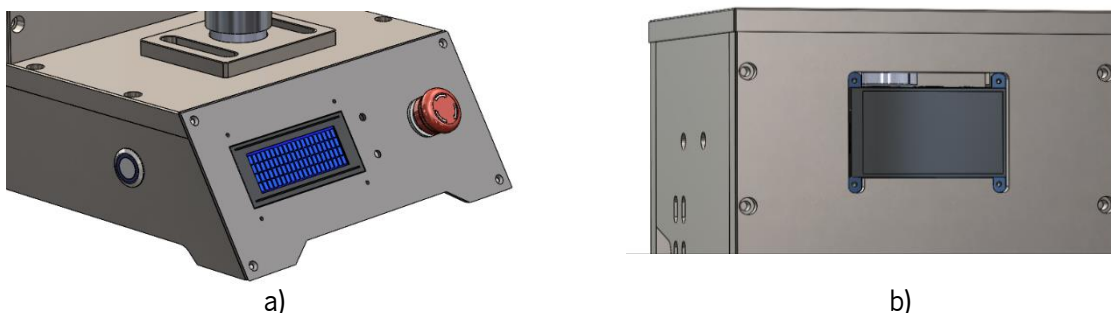


Figura 102 – a) Botões laterais para comando bimanual (1), botão de emergência (2) e módulo LCD; b) Ecrã HDMI de 4 polegadas na para controlo do equipamento.

ao equipamento. Em simultâneo, foi tida em atenção a necessidade de um sobre dimensionamento na geometria superior da cavidade de modo a ser possível conectar a cablagem ao ecrã.

Tendo em consideração a aparência exterior dos equipamentos já implementados no mercado, é possível concluir que será vantajoso e quase obrigatório projetar uma cobertura externa que, para além de ocultar algumas geometrias e cavidades da estrutura, impedindo a entrada de resíduos em zonas de difícil acesso, também contribui para uma utilização mais segura e para uma apresentação exterior mais apelativa. Este último atributo do equipamento, apesar de não ter um papel fundamental no funcionamento do mesmo, é sempre um fator que influencia a escolha por parte de quem estiver com intenções de adquirir um de vários modelos existentes, com as mesmas características funcionais.

Assim, e de acordo com o dito anteriormente acerca da possibilidade de se abrir a parte posterior da estrutura e deslizar o mecanismo para o exterior, conclui-se que o design da carcaça não poderá afetar essa facilidade de manutenção. Dito isto, numa primeira idealização do *design*, pensou-se numa chapa quinada que apenas envolvesse as laterais e a frente ou retaguarda do equipamento de forma a poder ser colocada e removida sem a necessidade de retirar a parte superior da estrutura. No entanto, para que os parafusos frontais não ficassem visíveis, seria vantajoso reformular a fixação das várias

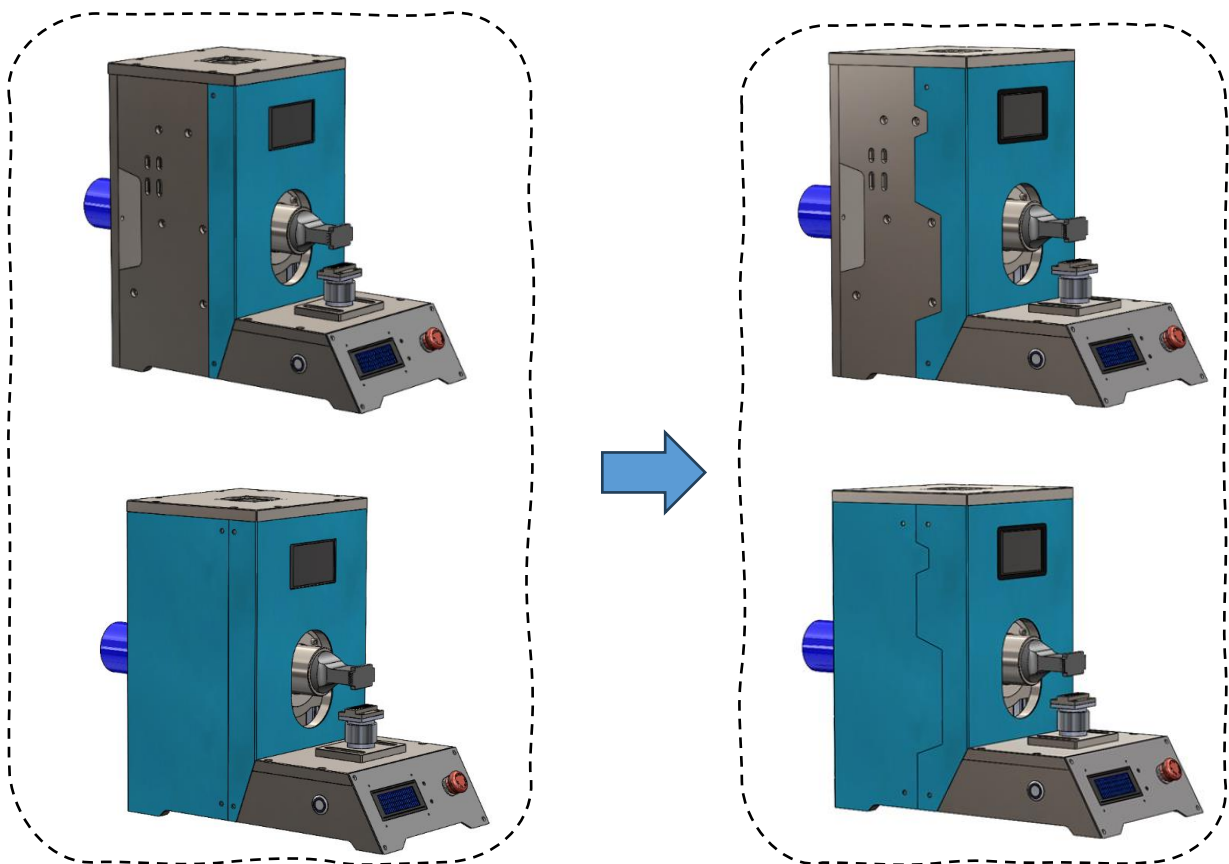


Figura 103 - Evolução da configuração da carcaça exterior de chapa do novo protótipo.

placas de aço da estrutura ou dividir o revestimento da máquina em dois componentes e assim revestir a totalidade a parte principal do equipamento. Na Figura 103 são apresentadas as 2 configurações idealizadas da carcaça de chapa mencionada, tendo na sua geometria final os recortes para acesso aos parafusos laterais.

Por fim, e integrando todas as soluções conceptuais mencionadas ao longo do presente capítulo, a configuração da versão final do equipamento resultou no modelo apresentado na Figura 104, sendo que o atravancamento e outras dimensões gerais podem ser consultadas no Anexo F: Atravancamento e Dimensões gerais da Configuração final do equipamento.

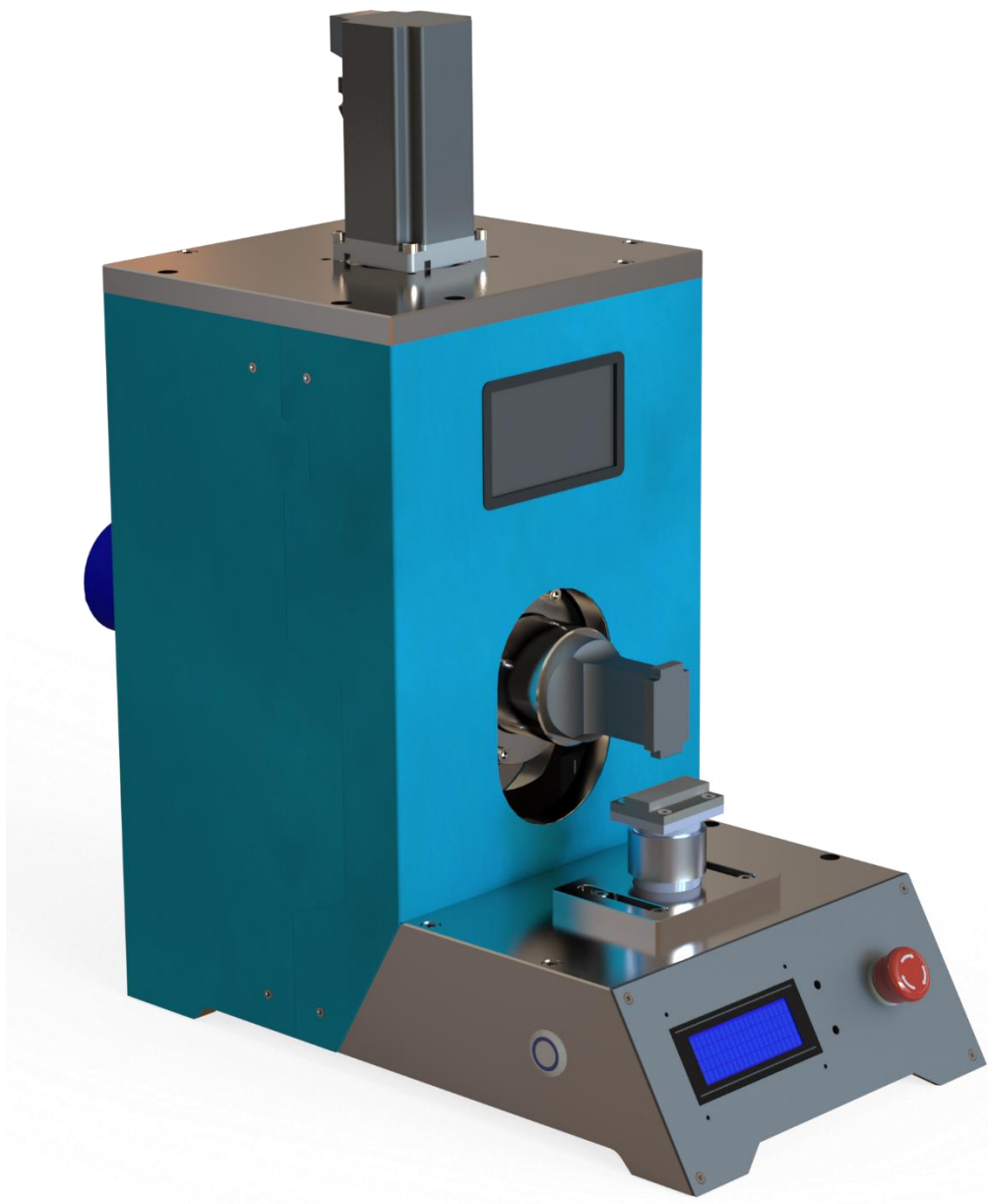


Figura 104 - Configuração do modelo final do equipamento a fabricar.

O projeto da versão final do protótipo a fabricar resultou num processo iterativo, procurando resolver as “fragilidades” de cada uma das iterações na iteração seguinte. Tal como mencionado no início do documento, uma das metodologias a aplicar aquando da conceção do protótipo é o projeto para o fabrico (*Design for Manufacturing*), que se resume na atenção a dar aos componentes e ao conjunto, tendo em conta a facilidade de conceção e os meios de fabrico disponíveis. Estando perante uma atividade académica, é de elevada importância ter esse princípio presente, uma vez que os meios e os prazos são mais escassos.

Diretamente relacionado com o tópico anterior, um ponto crucial no projeto de um equipamento ou produto é o custo de todo o processo de desenvolvimento e do seu fabrico, sendo que este último ocupa a maior percentagem e é nele que se foca a maior procura pela otimização. Uma vez que o protótipo inicial foi especialmente pensado e construído com o custo mínimo de fabrico, é de entender que a nova versão não superará a anterior nesse aspeto. No entanto, considerando que o sistema *booster/transdutor/sonotrode* não sofreu alterações, as diferenças de custo assentam apenas na nova estrutura, nos processos de fabrico de cada uma das suas partes que a constituiu, e na aquisição de novos componentes que completam a parte elétrica do equipamento.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÃO

A realização da presente dissertação resultou na interiorização pessoal na área dos ultrassons, mais especificamente na soldadura de metais por ultrassons, desde os aspetos teóricos até à sua aplicação experimental.

O trabalho de investigação consequente do projeto do equipamento, que recaiu no estudo do mecanismo de união de materiais (cobre) pela tecnologia supra mencionada, não permitiu uma total verificação do efeito de algumas variáveis do processo na qualidade e resistência da ligação, mas contribuiu para um melhor entendimento do método e de alguns dos seus obstáculos aquando da sua aplicação real. Além disso, serviu de exemplo para a efetividade do processo de soldadura por ultrassons, quer através da avaliação da resistência da união, quer a partir da observação por microscopia das interfaces dos materiais.

Através da análise realizada aos provetes dos vários ensaios de soldadura realizados, foi possível confirmar e visualizar alguns dos fenómenos mencionados na literatura acerca do mecanismo de união. Corroborou-se a existência de regiões de total fusão do material, contradizendo a natureza atribuída a esta tecnologia por vários autores, e de zonas em que a interface entre camadas consecutivas de cobre se transformaram num volume contínuo. Por outro lado, verificou-se o fenómeno de união por aderência e deformação plástica severa induzida pela vibração, considerado como principal responsável pelo desempenho desta tecnologia, de acordo com a grande parte da bibliografia analisada.

A fase de avaliação e testagem do protótipo existente permitiu um ganho de sensibilidade no diagnóstico de falhas e resolução das mesmas em contexto semelhante a um ambiente industrial e empregou vários domínios abordados ao longo do percurso académico.

A conceção do novo equipamento não seguiu todos os objetivos propostos no início do plano de trabalho por se considerar que as alterações propostas teriam um maior impacto na otimização do mecanismo e estrutura do que na efetividade do processo de soldadura, resultante da reutilização dos componentes principais do sistema de propagação e aplicação dos ultrassons empregues no protótipo primitivo. No entanto, considera-se que a configuração final corrigiu as principais dificuldades encontradas aquando do manuseamento do equipamento, nomeadamente na montagem e manutenção do mesmo, que são tarefas presentes no ciclo de vida de todos instrumentos industriais e, após fabricado, esperar-se-ia que este conduzisse a resultados mais fiáveis e com maior repetibilidade.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Em ambiente industrial, o projeto e conceção de um equipamento são tarefas normalmente morosas, que requerem um trabalho conjunto de uma equipa de vários membros com formação especializada em diferentes áreas da engenharia e da ciência. Assim, o presente trabalho, apesar de ter permitido a idealização e desenvolvimento de soluções, beneficiaria do seguimento e aprofundamento da investigação em vários aspetos. Um destes seria a verificação da eficácia de soldadura de uma gama de materiais mais extensa e a definição clara das limitações em termos de espessura dos componentes a unir, com base num dado conjunto especificações de um equipamento, auxiliado por um maior número de fontes de informação e ensaios experimentais. Desta forma, seria possível a criação de perfis de configurações comuns de materiais a soldar, com os parâmetros ótimos já definidos, de modo a que o operador apenas tenha de selecionar o perfil que melhor corresponda aos componentes a unir.

Seria também benéfico estudar de forma mais intrínseca o fenómeno/mecanismo da soldadura de materiais metálicos por ultrassons, e conhecer e caracterizar a natureza da união, relativamente à sua microestrutura e fases envolvidas durante o processo.

Aquando da fase de projeto e desenho de *boosters* e ferramentas, faz-se uma análise das várias frequências de ressonância, de forma a que o modo de vibração longitudinal aconteça a uma frequência o mais próxima possível do valor ao qual o gerador e transdutor foram desenvolvidos para funcionar. Assim, para alcançar um patamar de funcionamento mais aprimorado e eficiente, seria benéfico estudar de forma mais exaustiva os aspetos teóricos e práticos por detrás do comportamento acústico de *boosters*, bem como os aspetos fundamentais da área da análise modal.

De modo a conceber um equipamento mais completo e capaz de obter resultados com maior fiabilidade, seria vantajoso investir na otimização do sistema de transmissão de ultrassons e da sua ligação à parte estrutural do equipamento recorrendo a ferramentas computacionais mais moldadas para a análise modal e de fadiga, de modo a convergir para a geometria ótima dos componentes sem a necessidade de testar experimentalmente várias configurações e respeitando assim o objetivo principal da metodologia do projeto para o fabrico. Ainda relativamente a aspetos construtivos do equipamento, seria importante desenvolver um sistema versátil de fixação de componentes a soldar, que permita um ajuste preciso e facilitado da posição dos mesmos e que possibilite o operador de manter ambas as mãos no comando bimanual do equipamento aquando da ativação do ciclo de soldadura.

Uma otimização do sistema de quantificação da força exercida na união também aumentaria a precisão e exatidão dos valores medidos e contribuiria para um aumento da repetibilidade do processo. Incluído ainda neste tópico, considerando a célula de carga como um componente sensível a variações

externas e que não deverá sofrer impactos/perturbações, a mesma deveria estar posicionada abaixo da zona acessível do equipamento ou envolvida numa blindagem, sem que a precisão/exatidão de medição da carga fosse afetada e sem prejudicar o posicionamento dos componentes a soldar.

Por fim, e aproveitando as capacidades computacionais atuais, poder-se-ia também recorrer a *Machine Learning* para obter resultados mais fiáveis e com maior repetibilidade, com a alteração dos parâmetros de forma automática em função do comportamento dos materiais (monitorização mais intrínseca) (Mongan et al., 2020; Elangovan, 2012).

ANEXOS

ANEXO A: MODO DE FUNCIONAMENTO E PROCEDIMENTO DE UTILIZAÇÃO DO PROTÓTIPO INICIAL

1. RODAR A ALAVANCA VERMELHA NO SENTIDO HORÁRIO;
2. LIGAR O COMPUTADOR;
3. PRESSIONAR O BOTÃO VERDE PARA RETORNAR À POSIÇÃO SUPERIOR (*HOME*) DO SISTEMA MÓVEL;
4. PRESSIONAR NOVAMENTE PARA COMEÇAR O CICLO DE SOLDADURA.

Os parâmetros do gerador/transdutor, assim como tempo de soldadura são guardados no próprio gerador e sobrepõem-se aos indicados no programa.

O separador *CONTROL* permite variar a frequência do gerador entre 19 e 21 kHz e a potência a atingir e ajustar a amplitude das oscilações do transdutor de forma percentual.

O separador *CONTROLLER* diz respeito aos parâmetros do servo motor:

- NA PRIMEIRA CASA, UM VALOR ALEATÓRIO E VARIÁVEL VERIFICA O SINAL DO MOTOR;
- NA SÉTIMA CASA É INDICADO UM VALOR (EM *BITS*) CORRESPONDENTE AO SINAL DA CÉLULA DE CARGA;
- NA OITAVA CASA, O VALOR INDICA A FORÇA (EM N) A QUE A CÉLULA DE CARGA CONSIDERA QUE ESTÁ A SER SUJEITA (NUNCA É NULO PELA EXISTÊNCIA DO BATENTE) E O VALOR OSCILA ENTRE 30 E 50.

O separador *COMM* diz respeito à comunicação entre o equipamento e o programa:

- DEVE SER SELECIONADA A OPÇÃO *COM1* OU *COM2* EM FUNÇÃO DA PORTA DE LIGAÇÃO DO EQUIPAMENTO AO COMPUTADOR;
- A OPÇÃO *RES (RESET)* PODE OU NÃO SER NECESSÁRIA DE ATIVAR;
- O PARÂMETRO *MODBUS ADDRESS* DEVE SER ESCOLHIDO DE FORMA QUE O VALOR NO CANTO INFERIOR ESQUERDO DO SEPARADOR SEJA VARIÁVEL, VERIFICANDO A COMUNICAÇÃO ENTRE AS DUAS PARTES DO SISTEMA (SELECIONAR O 5).

Erros:

Caso haja uma falha de energia ao ligar o equipamento e o computador, voltar a ligar o disjuntor (alavanca n.5, neste caso): o erro deve-se à forma como o sistema foi desligado anteriormente ou a uma das partes elétricas utilizadas

Caso seja dado sinal de ter ocorrido um erro no ciclo de soldadura (botão stop iluminado), verificar se a falha é sinalizada no driver (nomenclatura de erro) ou no gerador (botão ON/OFF iluminado).

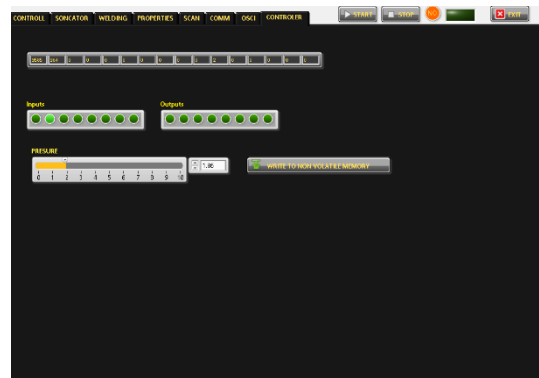
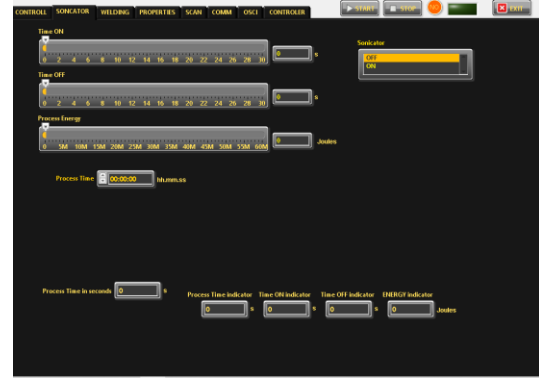
Erro no driver: pressionar o botão *Boot* no interior do quadro elétrico;

Erro no gerador: Pressionar botão *ON/OFF* do gerador;

Notas:

O valor máximo de torque exercido pelo motor foi limitado de modo que o valor máximo da carga não ultrapasse o limite da célula de carga (200 kg), sendo que os valores do parâmetro *pressure* (0 a 10) têm em conta uma carga mínima diferente de 0 (de modo a possibilitar a soldadura) e máxima tal que o motor exerça uma força descendente ligeiramente inferior a 2000 N.

ANEXO B: INTERFACE GRÁFICA DO PROGRAMA DE CONTROLO DO EQUIPAMENTO



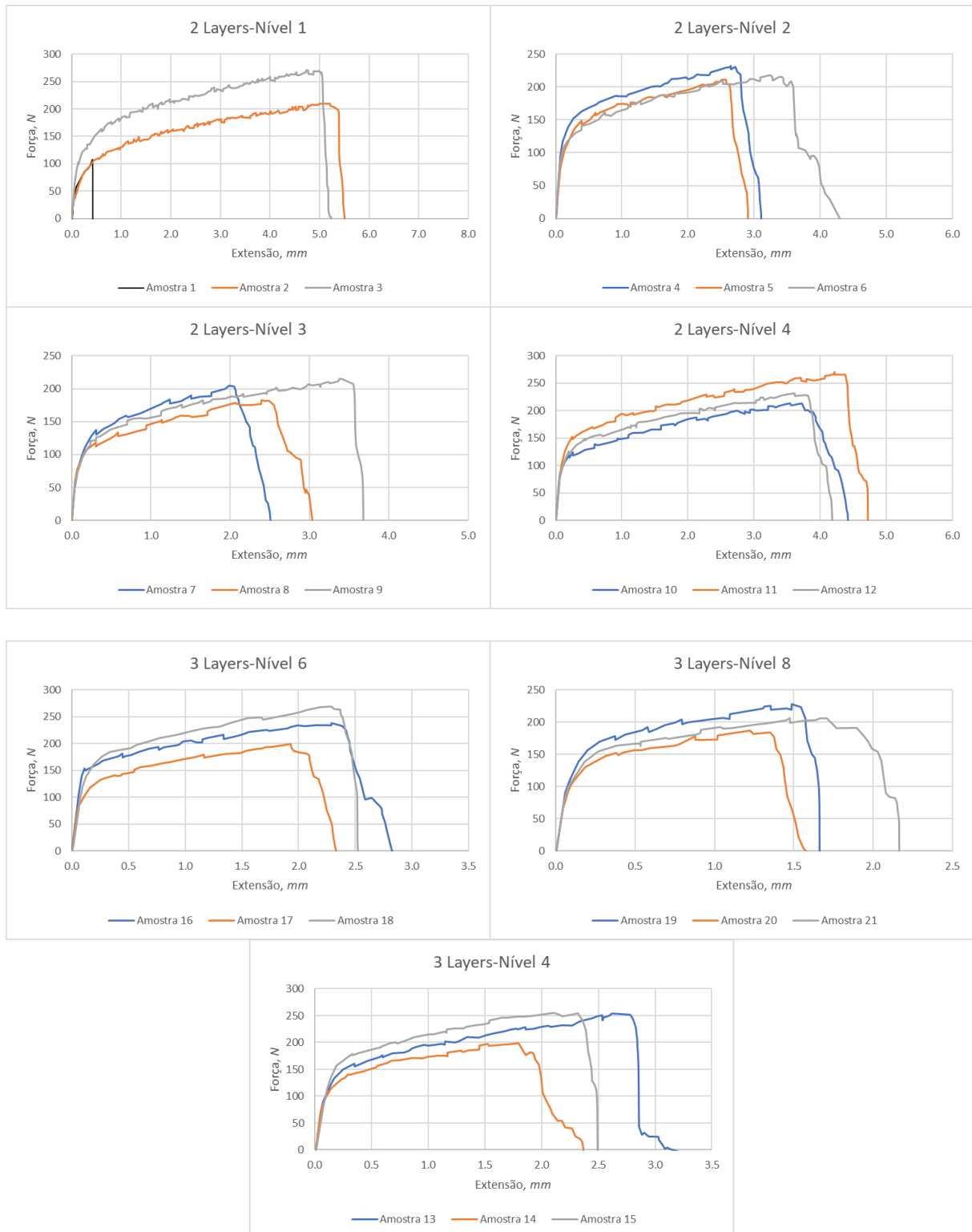
ANEXO C: CONDIÇÕES DE SOLDADURA DAS AMOSTRAS A UTILIZAR NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

N. Amostra	N. Layers	Nível de carga	Potência (W)	Tempo (s)	Energia (J)	F (N)
2 Layers						
Amostra 1	2	1	1326	0.73	755	510
Amostra 2	2	1	1307	0.73	751	540
Amostra 3	2	1	1368	0.73	761	520
Amostra 4	2	2	1392	0.73	807	680
Amostra 5	2	2	1397	0.73	812	670
Amostra 6	2	2	1374	0.73	790	705
Amostra 7	2	3	1561	0.73	834	790
Amostra 8	2	3	1621	0.73	878	800
Amostra 9	2	3	1935	0.73	772	785
Amostra 10 (1')	2	4	2029	0.68	851	1030
Amostra 11 (2')	2	4	2137	0.55	696	1050
Amostra 12 (3')	2	4	2023	0.45	595	1060
3 Layers						
Amostra 13	3	4	1289	0.73	693	970
Amostra 14	3	4	1437	0.73	771	940
Amostra 15	3	4	1462	0.73	787	1000
Amostra 16	3	6	1572	0.6	688	1250
Amostra 17	3	6	1440	0.73	779	1240
Amostra 18	3	6	1760	0.73	762	1250
Amostra 19	3	8	1933	0.62	725	1450
Amostra 20	3	8	1895	0.54	616	1500
Amostra 21	3	8	1989	0.54	609	1550
4 Layers						
Amostra 22	4	6	1327	0.73	700	1300
Amostra 23	4	6	1260	0.73	665	1250
Amostra 24	4	6	1244	0.73	665	1230
Amostra 25	4	8	1410	0.73	724	1515
Amostra 26	4	8	1386	0.73	718	1426
Amostra 27	4	8	1386	0.73	750	1460
Amostra 28	4	10	1543	0.73	742	1800
Amostra 29	4	10	1550	0.73	800	1760
Amostra 30	4	10	1581	0.73	842	1730

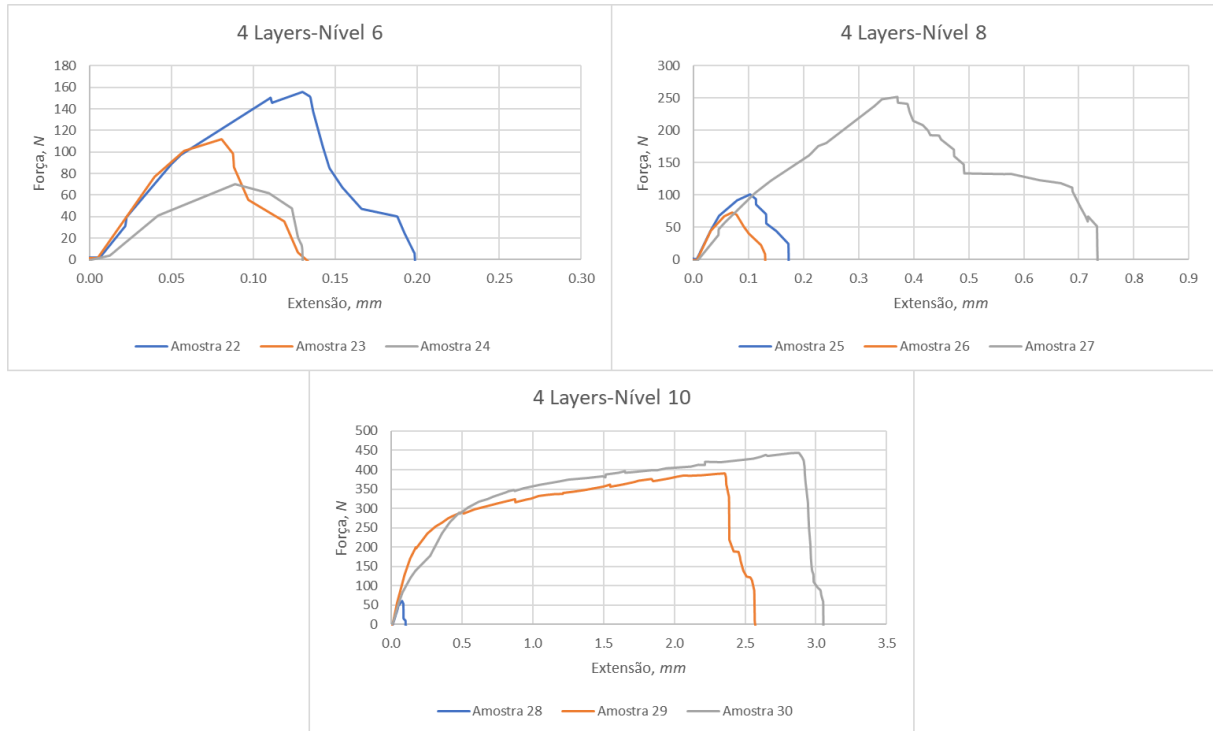
ANEXO D: CONDIÇÕES DE SOLDADURA DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE DE MICROESTRUTURA

Novas amostras para microscopia						
N. Amostra	N. Layers	Nível de carga	Potência (W)	Tempo (s)	Energia (J)	F (N)
1	2	1	1238	0.73	677	500
2	2	2	1296	0.73	752	690
3	2	3	1489	0.73	826	880
4	2	4	1673	0.73	837	970
5	3	4	1056	0.73	510	940
6	3	6	1318	0.73	677	1215
7	3	8	1592	0.73	732	1470
8	4	6	939	0.73	484	1200
9	4	8	1092	0.73	559	1480
10	4	10	1312	0.73	660	1660

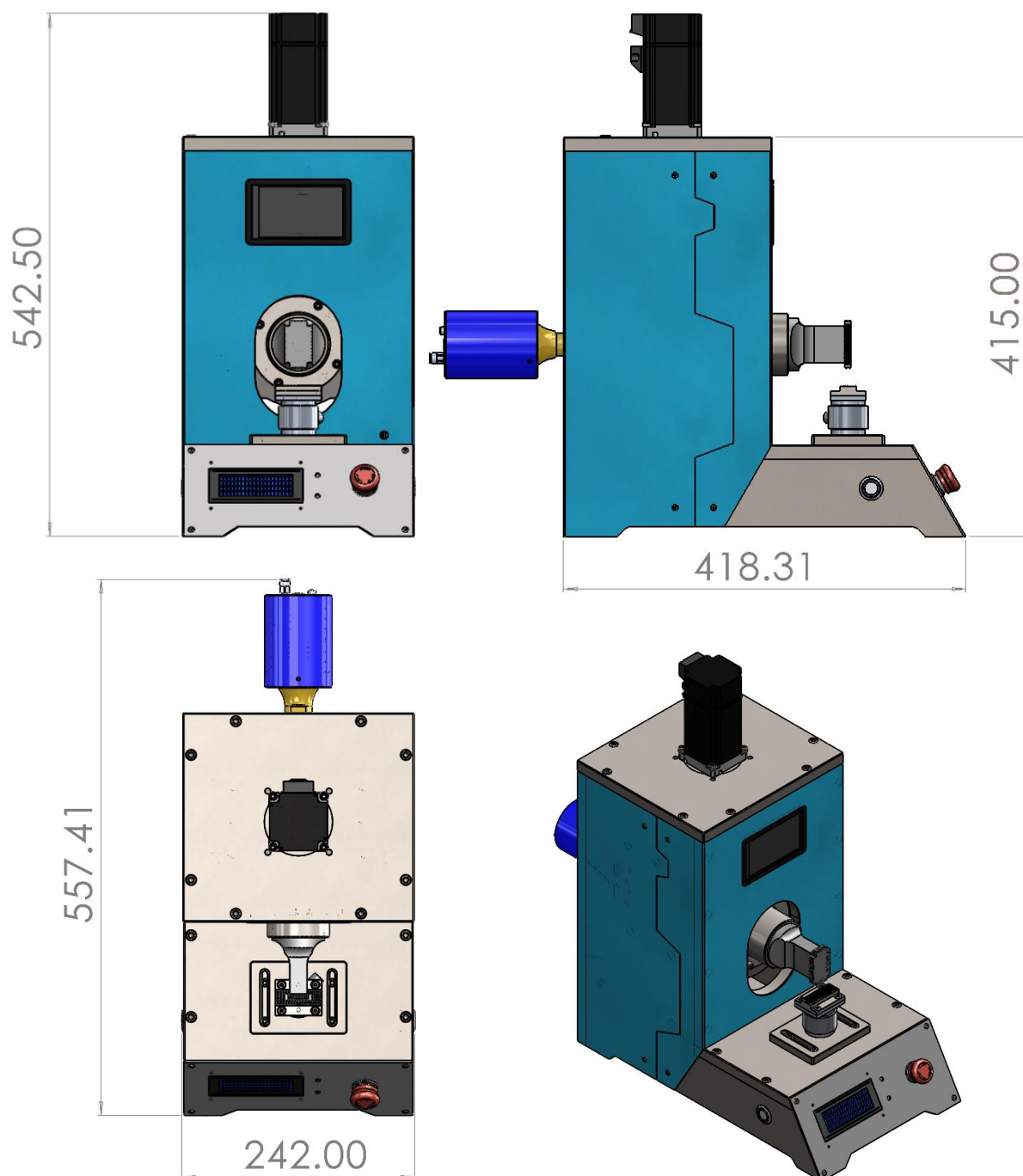
ANEXO E: GRÁFICOS FORÇA-EXTENSÃO DOS PROJETOS SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE TRAÇÃO



ANEXO E: GRÁFICOS FORÇA-EXTENSÃO DOS PROVETES SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE TRAÇÃO



ANEXO F: ATRAVANCAMENTO E DIMENSÕES GERAIS DA CONFIGURAÇÃO FINAL DO EQUIPAMENTO



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 15 kHz Spot Welders / Sonics & Materials, Inc.* (n.d.). Retrieved July 4, 2024, from <https://www.sonics.com/metal-welding/products/spot-welders/15-khz-spot-welders/>
- 3000W-20-kHz-Ultrasonic-Metal-Welding-Machine-in-Factory-Price.webp (imagem WEBP, 2000 × 2000 pixels) - Redimensionado (37%).* (n.d.). Retrieved July 4, 2024, from <https://image.made-in-china.com/2f0j00rVAziJclkBgm/3000W-20-kHz-Ultrasonic-Metal-Welding-Machine-in-Factory-Price.webp>
- Al-Sarraf, Z., & Lucas, M. (2012). A study of weld quality in ultrasonic spot welding of similar and dissimilar metals. *Journal of Physics: Conference Series*, 382(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/382/1/012013>
- Aptiv. (2021). *What Is a Busbar?* What Is a Busbar? <https://www.aptiv.com/en/insights/article/what-is-a-busbar>
- automatic mask ear loop welding machine ultrasonic welding machine for mask.* (n.d.). Retrieved January 8, 2024, from <https://www.packingmachinesupplier.com/products/Automatic-mask-ear-loop-welding-machine-ultrasonic-welding-machine-for-mask.html>
- Bakavos, D., & Prangnell, P. B. (2010). Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet. *Materials Science and Engineering: A*, 527(23), 6320–6334. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2010.06.038>
- Balasubramani, N., Venezuela, J., Yang, N., Wang, G., StJohn, D., & Dargusch, M. (2022). An overview and critical assessment of the mechanisms of microstructural refinement during ultrasonic solidification of metals. In *Ultrasonics Sonochemistry* (Vol. 89). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106151>
- Basics of piezoelectricity.* (n.d.). Retrieved January 8, 2024, from https://www.sdtools.com/help/pz_basics
- Bates, P. J., MacDonald, J., Sidiropoulos, V., & Kontopoulou, M. (2005). Comparison of experimental and analytical vibration welding meltdown-time profiles for nylon 66 and polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 45(6), 789–797. <https://doi.org/10.1002/PEN.20333>
- Battery - Foil, sheet and cylinder welding / TELSONIC Ultrasonics.* (n.d.). Retrieved January 8, 2024, from <https://www.telsonic.com/en/metal-welding/battery-foil-sheet-cylinder-welding/>
- Berg, R. E. (2023). Ultrasonis. In *Encyclopedia Britannica*.

- Blaha, F., & Langenecker, B. (1955). Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung. *Die Naturwissenschaften*, 42(20), 556. <https://doi.org/10.1007/BF00623773>
- Boosters. (n.d.). Retrieved September 19, 2023, from <https://sonotronic.de/en/products/ultrasonic-components/boosters/>
- Busbar Welding of EV Batteries / Ultrasonic Welding Technology. (n.d.). Retrieved January 8, 2024, from <https://tech-sonic.us/busbar-welding-ev-battery/>
- Butt, J., Mebrahtu, H., & Shirvani, H. (2016). Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper foil/1050 aluminium composites made with composite metal foil manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.014>
- Bychkov, I. V., Kuzmin, D. A., Kamantsev, A. P., Koledov, V. V., & Shavrov, V. G. (2016). Magnetostrictive hypersound generation by spiral magnets in the vicinity of magnetic field induced phase transition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 417, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.05.060>
- Cai, W., Blau, P. J., & Qu, J. (2013). *Friction Coefficients of Battery Metals and the Usage in Ultrasonic Welding Simulations*.
- Cai, W., Daehn, G., Vivek, A., Li, J., Khan, H., Mishra, R. S., & Komarasamy, M. (2019). A state-of-the-art review on solid-state metal joining. In *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* (Vol. 141, Issue 3). American Society of Mechanical Engineers (ASME). <https://doi.org/10.1115/1.4041182>
- Cheeke, J. D. N. (2002). *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*.
- Chen, Y. C., Bakavos, D., Gholinia, A., & Prangnell, P. B. (2012). HAZ development and accelerated post-weld natural ageing in ultrasonic spot welding aluminium 6111-T4 automotive sheet. *Acta Materialia*, 60(6–7), 2816–2828. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2012.01.047>
- Cheng, X. M., Yang, K., Wang, J., Xiao, W. T., & Huang, S. S. (2022). Ultrasonic system and ultrasonic metal welding performance: A status review. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 84, pp. 1196–1216). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.067>
- Curie point / Temperature, Magnetism & Ferromagnetism / Britannica. (2016). <https://www.britannica.com/science/Curie-point>
- Daniels, H. P. C. (1965). Ultrasonic welding. *Ultrasonics*, 3(4), 190–196. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(65\)90169-1](https://doi.org/10.1016/0041-624X(65)90169-1)

- Das, A., Li, D., Williams, D., & Greenwood, D. (2018). Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing. *World Electric Vehicle Journal*. <https://doi.org/10.3390/wevj9020022>
- Das, A., Masters, I., & Williams, D. (2019). Process robustness and strength analysis of multi-layered dissimilar joints using ultrasonic metal welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1–4), 881–900. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2936-3>
- Dhara, S., & Das, A. (2020). Impact of ultrasonic welding on multi-layered Al–Cu joint for electric vehicle battery applications: A layer-wise microstructural analysis. *Materials Science and Engineering: A*, 791. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139795>
- Doppler effect / Definition, Example, & Facts / Britannica*. (n.d.). Retrieved June 17, 2024, from <https://www.britannica.com/science/Doppler-effect>
- Du, P., Chen, W., Deng, J., Li, K., & Liu, Y. (2020). Effects of knurl tooth angle on mechanical and thermal behaviors of aluminum ultrasonic welding. *Ultrasonics*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106207>
- Eagle Brass 110 EPT COPPER, Annealed*. (n.d.). MatWeb. Retrieved January 15, 2024, from <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=d51a19947e624563bde3c3e7be245602>
- Elangovan, S. (2012). *Experimental Investigations on Optimization of Ultrasonic Welding Parameters for Copper to Brass Joints Using Response Surface Method and Genetic Algorithm*. <https://www.researchgate.net/publication/267512384>
- Fujii, H. T., Shimizu, S., Sato, Y. S., & Kokawa, H. (2017). *High-strain-rate deformation in ultrasonic additive manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.030>
- H. Kreye. (1977). *Melting Phenomena in Solid State Welding Processes*.
- Haddadi, F., & Abu-Farha, F. (2015). Microstructural and mechanical performance of aluminium to steel high power ultrasonic spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 262–274. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.019>
- Haddadi, F., & Abu-Farha, F. (2016). The effect of interface reaction on vibration evolution and performance of aluminium to steel high power ultrasonic spot joints. *Materials and Design*, 89, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.121>
- Hazlett, T. H., & Ambekar, S. M. (1970). *Additional Studies on Interface Temperatures and Bonding Mechanisms of Ultrasonic Welds*.
- Horn Catalog Ultrasonic Horn Catalog 2*. (2014).

<https://image.made-in-china.com/202f0j00tjSaidCInHRO/20K-15K-Ultrasonic-Welding-Generator-Transducer-Flange-for-The-Mask-Welding-Machine.jpg>. (n.d.).

<https://www.emerson.com/en-us/catalog/branson-l20-spot-welder>. (n.d.).

https://www.ultrasonic-resonators.org/design/isolation_mounts/isolation_mounts.html. (n.d.).

Isolation mounts / Ultrasonic Resonators. (n.d.). Retrieved January 2, 2024, from https://www.ultrasonic-resonators.org/design/isolation_mounts/isolation_mounts.html

Kim, J., Kim, J., Kim, I. J., Kang, S., & Chun, K. (2019). An analysis of mechanical properties for ultrasonically welded multiple C1220-Al1050 layers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(19). <https://doi.org/10.3390/app9194188>

Komiyama, K., Sasaki, T., & Watanabe, Y. (2016). Effect of tool edge geometry in ultrasonic welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 714–721. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.10.031>

Langenecker, B. (1966). Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 13(1), 1–8. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1966.29367>

Lee, D., & Cai, W. (2017). The effect of horn knurl geometry on battery tab ultrasonic welding quality: 2D finite element simulations. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 428–441. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.009>

Lee, S. S., Kim, T. H., Hu, S. J., Cai, W. W., & Abell, J. A. (2010). Joining technologies for automotive lithium-ion battery manufacturing - A review. *ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2010*, 1, 541–549. <https://doi.org/10.1115/MSEC2010-34168>

Li, H., & Cao, B. (2019). Effects of welding pressure on high-power ultrasonic spot welding of Cu/Al dissimilar metals. *Journal of Manufacturing Processes*, 46, 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.018>

Li, J., Chu, F., & Feng, Y. (2023). Effect of atomic diffusion on interfacial heat transfer and tensile property of copper/aluminum composites. *Materials Today Communications*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106757>

Li, Z., Huang, Z., Sun, F., Li, X., & Ma, J. (2020a). Forming of metallic glasses: mechanisms and processes. In *Materials Today Advances* (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077>

Li, Z., Huang, Z., Sun, F., Li, X., & Ma, J. (2020b). Forming of metallic glasses: mechanisms and processes. In *Materials Today Advances* (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077>

- Liesegang, M., Yu, Y., Beck, T., & Balle, F. (2021). Sonotrodes for ultrasonic welding of titanium/cfrp-joints—materials selection and design. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/jmmp5020061>
- Lin, J. Y., Nambu, S., & Koseki, T. (2019). Evolution of bonding interface during ultrasonic welding between steel and aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24(1), 83–91. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1491376>
- Liu, Z., Li, Y., Liu, Z., Yang, Y., Li, Y., & Luo, Z. (2023). Ultrasonic welding of metal to fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 85, pp. 702–712). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.001>
- Mongan, P. G., Hinchy, E. P., O'Dowd, N. P., & McCarthy, C. T. (2020). Optimisation of Ultrasonically Welded Joints through Machine Learning. *Procedia CIRP*, 93, 527–531. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.04.060>
- MPX Ultrasonics Welding System / TELSONIC Ultrasonics*. (n.d.). Retrieved January 18, 2024, from <https://www.telsonic.com/en/products/mpx-ultrasonics-welding-system/>
- Müller, F. W., Schiebahn, A., & Reisgen, U. (2022). Quality prediction of disturbed ultrasonic metal welds. *Journal of Advanced Joining Processes*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100086>
- Nambu, S., Seto, K., Lin, J.-Y., & Koseki, T. (2018). Development of a bonding interface between steel/steel and steel/Ni by ultrasonic welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 23(8), 687–692. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1473077>
- Nong, L., Shao, C., Kim, T. H., & Hu, S. J. (2018). Improving process robustness in ultrasonic metal welding of lithium-ion batteries. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.04.014>
- Nunes, R., Faes, K., De Meester, S., De Waele, W., & Kubit, A. (2022). Influence of welding parameters and surface preparation on thin copper–copper sheets welded by ultrasonic welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(1–2), 373–388. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10164-9>
- Okada, M., Shin, S., Miyagi, M., & Matsuda, H. (1963). *Joint Mechanism of Ultrasonic Welding**. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.4.250>
- Opieli, K. J. (2023). Special Issue on Ultrasound Technology in Industry and Medicine. *Citation: Opieli Nski, K.J. Special Issue on Ultrasound Technology in Industry and Medicine. Appl. Sci*, 2023, 1455. <https://doi.org/10.3390/app13031455>

- Precise and efficient welding with ultrasonic welding machines / Herrmann Ultraschall.* (n.d.). Retrieved July 4, 2024, from <https://www.herrmannultraschall.com/en/products/ultrasonic-welding-machines>
- Quality Ultrasonic Metal Welder Battery Spot Welding Machines for Tab - vplcorp.* (n.d.). Retrieved July 4, 2024, from <https://www.vplcorp.com/product/quality-ultrasonic-metal-welder-battery-spot-welding-machines-for-tab/>
- Rajiv Kumar, N., Nishanth, S., Karthick, S., Ramakrishnan, T., Arul, N., & Syed, K. (2023). Investigation on the mechanical properties of AA5052/AZ61A by ultrasonic welded joints. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.05.608>
- Sampaio, F. V, Zwicker, R. ;, Pragana, M. F. R., Bragança, M. F., Silva, I. ;, Nielsen, C. M. A., & Martins, C. V. (2022). Busbars for e-mobility: State-of-the-Art Review and a New Joining by Forming Technology. *Citation*, 111–141. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90487-6_4
- Sanga, B., Wattal, R., & Nagesh, D. S. (2018). Mechanism of joint formation and characteristics of interface in ultrasonic welding: Literature review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 6(1), 107–119. <https://doi.org/10.21533/pen.v6i1.158>
- Sasaki, T., Sakata, Y., & Watanabe, T. (2014). Effect of tool geometry on ultrasonic welding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 61. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/61/1/012006>
- Schimanek, R., Bilge, P., & Dietrich, F. (2023). Automated remanufacturing of lithium-ion batteries with shear separation, ultrasonic separation, and ultrasonic welding. *Procedia CIRP*, 116, 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.039>
- Sezer, N., & Koç, M. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. In *Nano Energy* (Vol. 80). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>
- Shakil, M., Tariq, N. H., Ahmad, M., Choudhary, M. A., Akhter, J. I., & Babu, S. S. (2014). Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints. *Materials and Design*, 55, 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.074>
- Shibo, L., Guijun, B., Yijun, M., Xianchong, S., Yang, L. B., Dayou, P., & Kweng, C. C. (2020). Ultrasonic welding aluminium alloy 7075 to titanium alloy Ti-6Al-4V: Parameter optimization and mechanical property. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 744(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/744/1/012029>

- Siddiq, A., & Sayed, E. (2011). *Ultrasonic-assisted manufacturing processes: Variational model and numerical simulations*. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2011.11.004>
- SONOWELD Generators / MPI Ultrasonics - sonic and ultrasonic processing technology*. (n.d.). Retrieved January 8, 2024, from <https://www.mpi-ultrasonics.com/content/sonoweld-generators>
- Sri Yeswanth, B., Varalakshmi, K. V., & Kumar, S. (2023). Investigation of mechanical properties and microstructure characteristics on ultrasonic metal welding of aluminum alloy 8011 sheets. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.610>
- Stacy, J. (2020). *Ultrasonic Metal Welding Enables Advances in Battery Technology - Tech Briefs*. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/bt/features/articles/37429>
- Uchino, K. (2010). Piezoelectric composite materials. In *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology* (pp. 318–346). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9781845699758.1.318>
- Uchino, K. (2017). The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective. In *Advanced Piezoelectric Materials* (pp. 1–92). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102135-4.00001-1>
- Ultrasonic Booster - Sonic-power*. (2016). <https://sonic-power.com/Product/ultrasonic-booster-ultraschall-booster/>
- Ultrasonic Copper Tube Sealer - BONNE Ultrasonic Welder*. (n.d.). Retrieved January 13, 2024, from <https://www.bonneultrasonicwelder.com/product/ultrasonic-copper-tube-sealer/>
- Ultrasonic Metal Welding / Emerson GB*. (n.d.). Retrieved January 13, 2024, from <https://www.emerson.com/en-gb/automation/welding-assembly-cleaning/metal-welding>
- Ultrasonic welding of battery cells / TELSONIC Ultrasonics*. (n.d.). Retrieved January 13, 2024, from <https://www.telsonic.com/en/application-finder/ultrasonic-welding-of-battery-cells/>
- Ultrasonic Welding of Wire to Metal / ASSEMBLY*. (2020). <https://www.assemblymag.com/articles/95925-ultrasonic-welding-of-wire-to-metal>
- VD2-010SA1G - WECON PORTUGAL - TECTOMA*. (n.d.). Retrieved January 8, 2024, from <https://wecon.pt/produtos/servo/vd2-010sa1g/>
- Wang, G., Croaker, P., Dargusch, M., McGuckin, D., & StJohn, D. (2017). Simulation of convective flow and thermal conditions during ultrasonic treatment of an Al-2Cu alloy. *Computational Materials Science*, 134, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.03.041>
- WATANABE, T., MIYAJIMA, D., & YANAGISAWA, A. (2009). *Effect of weld tip geometry on ultrasonic welding of A6061 aluminum alloy*.

- WD60M-04030S-A1G* - *WECON PORTUGAL* - *TECTOMA*. (n.d.). Retrieved January 8, 2024, from <https://we-con.pt/produtos/servo/wd60m-04030s-a1g/>
- Yang, X., Zhou, J., Zhang, S., Shen, J., Tian, J., Chen, W., & Zhang, Q. (2015). The electric field induced strain behavior of single PZT piezoelectric ceramic fiber. In *Ceramics International* (Vol. 41).
- Yazdian, A., & Karafi, M. R. (2022). An analytical approach to design horns and boosters of ultrasonic welding machines. *SN Applied Sciences*, 4(6). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05044-6>
- Zwicker, M. F. R., Moghadam, M., Zhang, W., & Nielsen, C. V. (2020). Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining. *Journal of Advanced Joining Processes*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100017>