

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

**Estudo de Tecnologias de Ligação Metálica para Aplicação
no Processo Produtivo de Condensadores *DC-Link* para
Automóveis Híbridos/Elétricos**

Rui Pedro Neves Moreira da Silva

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Rui Jorge Neto

Orientador no INEGI: Eng. Rui Miguel Soares

Orientador na empresa: Eng. Artur Francisco Costa

U. PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2019

Aos meus avós Sílvio e Jovita, embora longe, sempre presentes

Resumo

A presente dissertação é o resultado de um estágio em ambiente empresarial, tendo sido desenvolvida na Vishay Eletrónica Portugal, Lda, e na Unidade de Tecnologias Avançadas de Fabrico (UTAF) do INEGI, conjuntamente, na sequência de uma candidatura por parte da empresa ao sistema de incentivos à investigação e desenvolvimento tecnológico (SI I&DT). Esta empresa dedica-se à produção de condensadores *DC-Link* de filme metalizado, componentes amplamente utilizados nos inversores de potência DC/AC que assistem os motores elétricos em veículos elétricos/híbridos, com o intuito de minimizar a variação da diferença de potencial nestes elementos. No processo de fabrico dos condensadores *DC-Link*, a ligação dos principais constituintes (células condensadoras e terminais) é, ainda, realizada manualmente, o que resulta num aumento significativo do tempo de operação e, conseqüente, diminuição das cadências produtivas.

Deste modo, numa primeira fase deste projeto foram estudadas tecnologias de ligação de metais passíveis de serem automatizadas, tendo em consideração a combinação de materiais/processos que possibilitam o fabrico de condensadores de elevada performance elétrica, sem desprezar as suas propriedades mecânicas. Assim, foram analisados pormenorizadamente os processos de brasagem, soldadura por pontos, soldadura por ultrassons e soldadura *laser*, sendo, adicionalmente, abordado um processo híbrido resultante da combinação das tecnologias de brasagem e soldadura *laser*, a brasagem *laser*.

Numa segunda fase, de carácter experimental, foram examinados os processos de ligação implementados, atualmente, na cadeia produtiva da empresa, brasagem fraca e soldadura por pontos, na ligação dos elementos condensadores à rede de cobre estanhada, sendo estes processos analisados segundo as características mecânicas, elétricas e metalográficas conferidas às ligações soldadas. Este estudo foi desenvolvido com o intuito de se alcançar uma combinação de parâmetros que permitisse a otimização de cada uma das tecnologias referidas. Na segunda etapa da componente experimental, realizou-se uma análise da viabilidade de utilização de novas geometrias de terminais em cobre, diretamente acoplados aos elementos condensadores, em substituição da rede de cobre estanhada.

Os resultados obtidos, nos diferentes estudos efetuados, permitiram concluir que o processo de brasagem confere às ligações resistências mecânicas bastante superiores, quando comparado com o processo de soldadura por pontos, revelando-se este último inadequado para a concretização da ligação entre os elementos condensadores e os terminais em cobre. A tecnologia de brasagem *laser* assume-se como uma alternativa viável às tecnologias atualmente implementadas na empresa, devendo a sua aplicação ser analisada através da realização de um conjunto de ensaios experimentais similar ao efetuado para estas.

Palavras-Chave: Condensadores *DC-Link* de Filme Metalizado; Tecnologias de Ligação de Metais; Brasagem Fraca; Soldadura por Pontos; Soldadura por Ultrassons; Soldadura *Laser*; Brasagem *Laser*.

Study of Joining Technologies for Application in the Productive Process of DC-Link Capacitors for Hybrid/Electric Automobiles

Abstract

This dissertation is the result of a firm-based internship held at Vishay Eletrónica Portugal, Lda and at the Unidade de Tecnologias Avançadas de Fabrico (UTAF) at INEGI, in the context of an R&D project cofinanced through the Incentive System for Research and Technological Development (SI I&DT).

Vishay Eletrónica Portugal specialises in manufacturing metallized film DC-Link capacitors, widely used in DC/AC inverters that support electric engines in electric or hybrid vehicles, to reduce potential difference variation in these elements. In the DC-Link capacitor manufacturing process, the main parts - capacitor cells and terminals - are still connected manually, which significantly delays operations and consequently reduces production rate.

In the first phase of this project, we reviewed and analysed metal joining technologies that can be automated, taking into consideration the materials/process combinations that allow the manufacturing of high performance capacitors without neglecting their mechanical properties. Therefore, we have thoroughly analysed soldering, spot welding, ultrasonic welding and laser welding processes, as well as an additional hybrid process - laser soldering - that combines soldering technology and laser welding.

In the experimental stage of this research, we have examined the joining processes that are currently used in the firm's production line - soldering and spot welding - to connect the capacitor elements to the tinned copper grid. These processes were analysed according to the mechanical, electrical and metallographic characteristics conferred to the welded connections. This research aimed to reach a parameter combination that allowed the optimisation of each of the cited technologies. In the second experimental stage, we have analysed the viability of using new copper terminal geometries directly coupled to the capacitor elements instead of the tinned copper grid.

The results of the different studies that we have carried out show that the soldering process provides higher mechanical resistances to the connections compared to the spot welding process and we have found the latter to be an inadequate process to connect the capacitor elements and the copper terminals.

Laser soldering technology is a viable alternative to the technologies currently used by the firm, and its application should be further analysed through experimental tests and trials.

Keywords: Metallized Film DC-Link Capacitors; Metal Joining Technologies; Soldering; Spot Welding; Ultrasonic Welding; Laser Welding; Laser Soldering.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à *Vishay* Eletrónica Portugal em particular ao Engenheiro José Aurélio Campos, pela oportunidade de desenvolver o presente projeto num ambiente empresarial e pela disponibilização dos recursos necessários à sua correta realização. Adicionalmente, aproveito para agradecer a confiança depositada em mim ao longo dos últimos meses de trabalho.

Relativamente às pessoas que me acompanharam na execução deste projeto na empresa, gostaria de agradecer ao Engenheiro Artur Costa, na qualidade de orientador de estágio, pelo interesse demonstrado pelo trabalho desenvolvido e pela sua disponibilidade e apoio constante. Aos Engenheiros Luís Pacheco e Luiz Dias, membros do departamento de *R&D* e meus colegas de escritório, agradeço a ajuda prestada no esclarecimento de dúvidas, o espírito crítico e o interesse manifestado no projeto, contribuindo, deste modo, para o sucesso do desenvolvimento dos trabalhos de carácter prático. Ao Engenheiro Marc Vanoosthuyse, *R&D Manager* da divisão de condensadores de filme, agradeço a humildade e zelo demonstrado na discussão de ideias e todo o conhecimento transmitido. Aos restantes membros dos departamentos de *R&D* e de *Process Engineer* gostaria de agradecer a disponibilidade e apoio prestado no esclarecimento de dúvidas. Genericamente, queria agradecer aos vários funcionários da *Vishay* Eletrónica Portugal, com quem tive o prazer de interagir, pelo acolhimento, simpatia e disponibilidade.

Ao Professor Rui Neto, na qualidade de orientador na FEUP, pela transmissão de conhecimentos e experiência e pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas emergentes durante a realização dos trabalhos.

Às Técnicas de Laboratório Andreia Durães e Armanda Marques pelo auxílio prestado na execução dos ensaios mecânicos e metalográficos, respetivamente.

Quero, ainda, endereçar um profundo agradecimento ao Engenheiro Rui Soares, na qualidade de orientador no INEGI, pela dedicação ao projeto, constante disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e pelo apoio e contributos facultados, indispensáveis ao sucesso da dissertação.

Por fim, dado que a presente dissertação representa somente o culminar de um extenso percurso académico, reservo este espaço para agradecer, simbolicamente, a todos os meus amigos que me acompanharam numa jornada académica repleta de aventuras e à minha família por todo o apoio, compreensão e confiança depositada em mim, pilares fundamentais para o meu sucesso enquanto estudante.

Um sincero obrigado a todos vós,
Rui Pedro Neves Moreira da Silva

O autor agradece à operação POCI-01-0247-FEDER-039688 – *NextLink* – Nova Geração de *DC-Links* Produzidos Através de Processos Automáticos, Projeto em Co-Promoção (SI I&DT) cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Índice de Conteúdos

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do Projeto e Motivação	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Objetivos do Projeto.....	4
1.4	Metodologia do Projeto.....	4
1.5	Estrutura da Dissertação.....	5
2	Condensadores <i>DC-Link</i> de Filme Metalizado.....	7
2.1	Conceitos Elétricos Básicos	7
2.2	Condensadores de Filme Metalizado	9
2.3	Elementos Constituintes de uma Célula Condensadora	12
2.4	Processo Produtivo dos Condensadores <i>DC-Link</i>	14
3	Tecnologias de Ligação de Metais	17
3.1	Introdução	17
3.2	Brasagem.....	18
3.2.1	Fundamentos do Processo de Brasagem.....	18
3.2.2	Brasagem Fraca	21
3.2.3	Parâmetros do Processo.....	21
3.2.4	Ligas Utilizadas	22
3.2.5	Fluxos Utilizados.....	25
3.2.6	Forma do Material de Adição.....	26
3.2.7	Métodos de Aquecimento.....	26
3.3	Soldadura Por Pontos	27
3.3.1	Fundamentos da Soldadura Por Pontos	28
3.3.2	Parâmetros de Soldadura	31
3.3.3	Materiais Soldáveis por Pontos	33
3.3.4	Eléttodos.....	33
3.3.5	Estudo Térmico da Soldadura por Pontos	34
3.3.6	Defeitos de Soldadura.....	35
3.4	Soldadura Por Ultrassons	36
3.4.1	Fundamentos da Soldadura por Ultrassons	37
3.4.2	Parâmetros do Processo.....	38
3.4.3	Equipamentos	40
3.4.4	Materiais Soldáveis por Ultrassons	42
3.4.5	Estudo Térmico da Soldadura por Ultrassons	43
3.5	Soldadura <i>Laser</i>	46
3.5.1	Fundamentos da Soldadura <i>Laser</i>	47
3.5.2	Parâmetros do Processo.....	48
3.5.3	Materiais Soldáveis por <i>Laser</i>	50
3.5.4	Componentes de um Sistema <i>Laser</i>	50
3.5.5	Tipos de Soldadura	51
3.5.6	Tipos de <i>Laser</i> Utilizados.....	52
3.5.7	Estudo Térmico da Soldadura <i>Laser</i>	54

3.5.8 Laser Soldering	54
3.6 Comparação dos Diversos Processos	57
4 Procedimento Experimental.....	63
4.1 Definição do Plano Experimental	65
4.2 Análise da Solução Utilizada Atualmente na Empresa	67
4.2.1 Testes às Propriedades Mecânicas.....	69
4.2.2 Testes às Propriedades Elétricas.....	74
4.2.3 Análise Metalográfica	76
4.3 Estudo das novas Geometrias de Terminais.....	77
4.3.1 Testes às Propriedades Mecânicas.....	78
4.3.2 Testes às Propriedades Elétricas.....	81
4.3.3 Análise Metalográfica	82
5 Apresentação dos Resultados Experimentais	85
5.1 Resultados da Análise da Solução Utilizada na Empresa	85
5.1.1 Testes às Propriedades Mecânicas.....	85
5.1.2 Análise de Variâncias.....	95
5.1.3 Testes às Propriedades Elétricas.....	97
5.1.4 Análise Metalográfica	100
5.2 Resultados Relativos ao Estudo das Novas Geometrias de Terminais.....	107
5.2.1 Testes às Propriedades Mecânicas.....	107
5.2.2 Testes às Propriedades Elétricas.....	113
5.2.3 Análise Metalográfica	116
6 Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros	123
6.1 Conclusões da Comparação Teórica das Tecnologias de Ligação de Metais Estudadas ...	123
6.2 Conclusões da Análise dos Processos Atualmente Implementados na Empresa	124
6.3 Conclusões da Análise da Viabilidade de Utilização de Novas Geometrias de Terminais	125
6.4 Perspetivas de Trabalhos Futuros.....	127
Referências.....	129
ANEXO A: Desenho de Definição do Provete Projetado para os Ensaios de Tração.....	135
ANEXO B:Ficha Técnica do Adesivo HB AS 89/ AW 89	136
ANEXO C: Desenho de Definição do Provete Utilizado para os Ensaios Elétricos (Ligação “Elemento Condensador/Rede”).....	138
ANEXO D:Desenho de Definição da Geometria de Terminal 1	139
ANEXO E:Desenho de Definição da Geometria de Terminal 2.....	140
ANEXO F:Desenho de Definição da Geometria de Terminal 3.....	141
ANEXO G: Desenho de Definição da Geometria de Terminal 4.....	142
ANEXO H: Desenho de Definição da Geometria de Terminal 5.....	143
ANEXO I: Desenho de Definição do Provete Utilizado para os Ensaios Relativos às Geometrias de Terminais	144
ANEXO J: Resultados dos Testes Mecânicos – Curvas de Tração (Brasagem Fraca).....	144
ANEXO K: Resultados dos Testes Mecânicos – Curvas de Tração (Soldadura por Pontos).....	147
ANEXO L: Diagramas de Equilíbrio das Ligas Utilizadas na Metalização	149
ANEXO M: Ficha Técnica do Fluxo Alpha Telecore® HF-850	150

Índice de Figuras

Figura 1 – Logótipo da <i>Vishay Intertechnology, Inc.</i> ® [3].	3
Figura 2 - Diagrama de <i>Gantt</i> .	5
Figura 3 - Representação Esquemática Simplificada de um Condensador Ideal.	7
Figura 4 - Representação Esquemática Simplificada de um Condensador Considerando Perdas.	8
Figura 5 - Representação Esquemática Simplificada de um Condensador para Gamas de Frequências Elevadas.	8
Figura 6 - Classificação dos Diferentes Tipos de Condensadores (adaptado de [5]).	9
Figura 7 - Representação Tridimensional de uma Célula Condensadora (Bobine).	10
Figura 8 - Representação de um Condensador DC-Link e Respetivos Constituintes (adaptado de [1]).	11
Figura 9 - Vista em Perspetiva (à Esquerda) e Vista Seccionada (à Direita) de um Elemento Condensador e Respetivos Componentes (adaptado de [10]).	13
Figura 10 - Representação Esquemática dos Processos de Projeção Térmica por Gás (à esquerda) e por Arco (à direita) (adaptado de [11]).	14
Figura 11 - Relação entre as Tensões Envolvidas no Processo de Brasagem [12].	19
Figura 12 - Etapas do Processo de Brasagem: a) Remoção da camada de óxidos recorrendo a fluxos adequados; b) Penetração do metal de adição (solda) no estado líquido; c) Ligação por difusão [13].	20
Figura 13 - Variação da Atração Capilar com o Afastamento da Junta [12].	20
Figura 14 - Representação Simplificada do Processo de Brasagem Fraca por Chama (adaptado de [21]).	21
Figura 15 - Diagrama de Fases do Sistema Chumbo-Estanho e Respetivas Composições das Soldas mais Utilizadas no Processo de Soldagem (adaptado de [25]).	23
Figura 16 - Diagrama de Fases do Sistema Ternário Estanho-Prata-Cobre [27].	24
Figura 17 - Representação Simplificada do Processo de Soldadura por Pontos (adaptado de [28]).	27
Figura 18 - Resistências Envolvidas no Processo de Soldadura por Pontos (adaptado de [29]).	29
Figura 19 - Formação de um Ponto de Soldadura na Zona de Contacto entre Peças [31].	30
Figura 20 - Variação Esquemática da Resistência em Função do Tempo (adaptado de [29]).	30
Figura 21 - Relação entre a Intensidade da Corrente e o Tempo de Soldadura (adaptado de [29]).	31
Figura 22 - Estado Térmico de um Ponto de Soldadura após Interrupção do Fornecimento de Corrente de Soldadura [31].	35
Figura 23 - Defeitos observados no Processo de Soldadura por Pontos [29].	35

Figura 24 - Representação Simplificada do Processo de Soldadura por Ultrassons (adaptado de [41]).	36
Figura 25 - Potência de Soldadura em Função do Tempo para Diferentes Pressões do Sonótrodo [32].	39
Figura 26 - Sequência de Etapas para a Transformação de Energia Elétrica em Energia Mecânica sob a Forma de uma Vibração (adaptado de [42]).....	40
Figura 27 - Equipamento de Soldadura por Ultrassons (adaptado de [45]).	41
Figura 28 - Modelo Formulado e Respetivas Condições de Fronteira (adaptado de [48]).	44
Figura 29 - Distribuição da Temperatura na Interface de Soldadura (à esquerda) e no Sonótrodo (à direita) Quando Aplicada uma Força de Compressão de 1600 N e um Tempo de Soldadura de 0,5 s (adaptado de [48]).	45
Figura 30 - Representação Simplificada do Processo de Soldadura Laser (adaptado de [58]).	46
Figura 31 - Princípio de Funcionamento da Tecnologia Laser [62].....	47
Figura 32 - Análise microscópica da junta soldada obtida por soldadura laser sem oscilação do feixe laser (à esquerda) e com uma oscilação imposta (à direita) [32].	48
Figura 33 - Representação esquemática de um Sistema Laser e Principais Constituintes (adaptado de [63]).....	51
Figura 34 - Princípio de Funcionamento da Soldadura por Condução de Calor [63].	51
Figura 35 - Princípio de Funcionamento da Soldadura por Penetração (à esquerda) e Análise Microscópica de um Cordão de Soldadura Efetuado por Penetração (à direita) (adaptado de [63]). ...	52
Figura 36 - Imagens Térmicas Obtidas para o Processo de Brasagem Fraca Utilizando Soldas com Diferentes Temperaturas de Fusão (adaptado de [13]).	59
Figura 37 - Imagens Térmicas Obtidas para os Processos de Soldadura por Pontos, por Ultrassons e Laser, respetivamente (adaptado de [13]).	60
Figura 38 - Resultados relativos à resistência elétrica de contacto alcançada para as distintas tecnologias de ligação de metais consideradas (adaptado de [13]).	61
Figura 39 - Resultados relativos à força de tração máxima alcançada para as distintas tecnologias de ligação de metais consideradas (adaptado de [13]).	62
Figura 40 - Modelação Tridimensional dos Provetes Definidos para Execução dos Ensaios de Tração: a) Vista Frontal; b) Vista Isométrica.	70
Figura 41 - Disco de Metalização Concebido por Deposição por Projeção Térmica por Gás.	71
Figura 42 - Traçado das Dimensões das Chapas Metalizadas (à Esquerda) e Corte das Mesmas (à Direita).	71
Figura 43 – Equipamento de Brasagem Manual (à Esquerda) e Provette Obtido (à Direita).	72
Figura 44 - Execução do Processo de Soldadura por Pontos (à Esquerda) e Provetes Obtidos (à Direita).	72
Figura 45 – Aplicação do Adesivo aos Corpos Roscados (à Esquerda) e Disposição deste Elemento no Provette Final (à Direita).	73
Figura 46 - Equipamento de Ensaios de Tração Utilizado (à Esquerda) e Respetivo Modo de Fixação do Provette (à Direita).	73
Figura 47 - Método de Medição da Resistência Óhmica: Colocação das Pontas de Medição (à Esquerda) e Percurso da Corrente (à Direita).	74
Figura 48 - Modelação Tridimensional dos Provetes Definidos para os Testes às Propriedades Eléctricas.	74

Figura 49 – Provetes de Ensaio Utilizados nos Testes às Propriedades Elétricas, Ligados pelos Processos de Brasagem Fraca (à Esquerda) e Soldadura por Pontos (à Direita).	75
Figura 50 - Ohmímetro de Alta Precisão <i>GW-Instek® GOM 804</i>	75
Figura 51 – Microscópio Ótico Utilizado nas Análises Metalográficas (à Esquerda) e Montagem de uma Amostra em Vácuo com Resina Epóxi (à Direita).	76
Figura 52 - Geometrias de Terminais.....	77
Figura 53 – Diferentes Tipos de Falha na Rutura: a) Arrancamento pela Segunda Camada (Superior); b) Arrancamento pela Primeira Camada (Inferior); c) Filme Metalizado Visível.....	79
Figura 54 - Modelação Tridimensional dos Provetes Definidos para Execução dos Ensaios de Tração (Geometria 1): a) Vista de Cima; b) Vista Isométrica.....	79
Figura 55 - Terminal em Cobre Antes (à Esquerda) e Após (à Direita) Limpeza.....	80
Figura 56 - Provetes de Ensaio Utilizados nos Testes de Tração, Ligados pelos Processos de Brasagem Fraca (à Esquerda) e Soldadura por Pontos (à Direita).	80
Figura 57 - Equipamento de Ensaios de Tração Utilizado (à Esquerda) e Respetivo Modo de Fixação do Proвете (à Direita).	81
Figura 58 - Procedimento de Medição da Resistência Óhmica: Colocação das Pontas de Medição (à Esquerda) e Percurso da Corrente (à Direita).....	82
Figura 59 - Montagem de uma Amostra em Vácuo com Resina Epóxi.	83
Figura 60 - Tipos de Ruturas Observadas: Rutura pela Ligação Soldada (Amostra 1) e Rutura da Rede em Torno da Área de Soldadura (Amostra 2), respetivamente.	86
Figura 61 - Tipo de rutura observada nos ensaios realizados às ligações soldadas por pontos segundo a combinação de parâmetros 3 (amostra 3) e a combinação de parâmetros 5 (amostra 4), respetivamente.	89
Figura 62 - Rutura observada nos ensaios realizados às ligações soldadas por pontos segundo a combinação de parâmetros 6 (à esquerda) e indentação excessiva verificada nas soldaduras executadas segundo a mesma combinação de parâmetros (à direita).	90
Figura 63 - Determinação das Áreas de Soldadura dos Provetes Ligados Segundo o Processo de Brasagem Fraca.	91
Figura 64 – Imagens Metalográficas das Camadas de Metalização na Região Exterior à Zona de Soldadura.....	101
Figura 65 – Fenómeno de Expulsão de Material da Camada Superior de Metalização.	105
Figura 66 - Fenómeno de Fusão Parcial Existente entre a Rede de Cobre Estanhada e os Constituintes da Segunda Camada de Metalização – Amostra Ligada Segundo a Combinação de Parâmetros 2....	106
Figura 67 – Ruturas Observadas para a Amostra 1 (Filme Metalizado Visível) e para a Amostra 4 (Rutura pela Segunda Camada de Metalização), Respetivamente, Relativas à Geometria 1.....	108
Figura 68 - Tipos de Rutura Observados para a Geometria 4: Arrancamento pela Primeira Camada (Amostra 2) e pela Segunda Camada (Amostra 5), Respetivamente.	109
Figura 69 - Tipos de Rutura Observados para a Geometria 5: Filme Metalizado Visível (Amostra 1) e Arrancamento pela Segunda Camada (Amostra 3), Respetivamente.....	109
Figura 70 - Tipos de Rutura Observados para a Geometria 1: Arrancamento pela Primeira Camada (Amostra 5) e Arrancamento pela Segunda Camada (Amostra 1), Respetivamente.....	111
Figura 71 - Fenómeno de Levantamento da Segunda Camada de Metalização Relativamente à Primeira na Região Adjacente à Secção de Terminal Penetrada.	119

Figura J. 1 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 1 (T=320 °C; t=3 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.	145
Figura J. 2 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 2 (T=320 °C; t=5 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.	145
Figura J. 3 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 3 (T=360 °C; t=3 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.	145
Figura J. 4 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 4 (T=360 °C; t=5 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.	146
Figura J. 5 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 5 (T=400 °C; t=3 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.	146
Figura J. 6 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 6 (T=400 °C; t=5 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.	146
Figura K. 1 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 2 (I=56; t=4), pelo Processo de Soldadura por Pontos.	147
Figura K. 2 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 3 (I=64; t=3), pelo Processo de Soldadura por Pontos.	147
Figura K. 3 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 4 (I=64; t=4), pelo Processo de Soldadura por Pontos.	147
Figura K. 4 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 5 (I=72; t=3), pelo Processo de Soldadura por Pontos.	148
Figura K. 5 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 6 (I=72; t=4), pelo Processo de Soldadura por Pontos.	148
Figura L. 1 - Diagrama de Equilíbrio do Sistema Al-Zn.	149
Figura L. 2 - Diagrama de Equilíbrio do Sistema Zn-Sn.	149

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades Térmicas do Alumínio e do Cobre (adaptado de [22]).	24
Tabela 2 - Composição das Soldas à Base de Zinco e Respetivas Temperaturas de Fusão (adaptado de [22]).	25
Tabela 3 - Valores dos Parâmetros de Soldadura por Pontos para Diferentes Materiais e Espessuras (adaptado de [29]).	32
Tabela 4 - Propriedades do Alumínio das Chapas a Soldar e do Aço Utilizado no Sonótrodo e na Bigorna (adaptado de [48]).	43
Tabela 5 - Tipos de Lasers mais utilizados em Processamento de Materiais (adaptado de [63]).	53
Tabela 6 - Comparação das Vantagens e Desvantagens das Diferentes Tecnologias de Ligação de Metais Consideradas (adaptado de [1]).	58
Tabela 7 - Número de Provetes Necessário para os Testes às Ligações “Condensador/Rede de Cobre Estanhada”.	65
Tabela 8 - Número de Provetes Necessário para os Testes às Novas Geometrias de Terminais.	66
Tabela 9 – Parâmetros de Tempo e Temperatura Utilizados na Análise do Processo de Brasagem Fraca.	68
Tabela 10 - Parâmetros de Tempo e Intensidade da Corrente Utilizados na Análise do Processo de Soldadura por Pontos.	68
Tabela 11 - Correspondência entre os Parâmetros Intrínsecos ao Equipamento e os Parâmetros Associados ao Processo de Soldadura por Pontos.	69
Tabela 12 – Parâmetros Utilizados na Análise das Diferentes Geometrias de Terminais.	78
Tabela 13 - Força Máxima Alcançada para o Processo de Brasagem Fraca.	85
Tabela 14 - Força Máxima Alcançada para o Processo de Soldadura por Pontos.	88
Tabela 15 – Área de Soldadura Determinada para as Ligações Efetuadas pelo Processo de Brasagem Fraca.	92
Tabela 16 - Tensão Alcançada para o Processo de Brasagem Fraca.	92
Tabela 17 - Tensão Alcançada para o Processo de Soldadura por Pontos.	94
Tabela 18 - Resultados da Análise de Variância para a Tensão Obtida (Brasagem Fraca).	95
Tabela 19 - Resultados da Análise de Variância para a Tensão Obtida (Soldadura por Pontos).	96
Tabela 20 – Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Brasagem Fraca.	97
Tabela 21 - Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Soldadura por Pontos.	98
Tabela 22 - Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Brasagem Fraca.	100

Tabela 23 – Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Soldadura por Pontos.	104
Tabela 24 - Força Máxima Alcançada e Camada Visível após Rutura para o Processo de Brasagem Fraca.	107
Tabela 25 - Força Máxima Alcançada e Camada Visível para o Processo de Soldadura por Pontos.	110
Tabela 26 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Brasagem Fraca (Geometrias de Terminais).	113
Tabela 27 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Soldadura por Pontos (Geometrias de Terminais).	114
Tabela 28 – Comparação dos Resultados de Resistência Elétrica Alcançados para os Processos de Brasagem Fraca e Soldadura por Pontos (Geometrias de Terminais).	116
Tabela 29 - Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Brasagem Fraca (Geometrias de Terminais).	118
Tabela 30 - Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Soldadura por Pontos (Geometrias de Terminais).	122

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Evolução da Força de Tração Máxima em Função da Temperatura.	88
Gráfico 2 - Evolução da Força de Tração Máxima em Função da Intensidade da Corrente.	90
Gráfico 3 - Evolução da Tensão em Função da Temperatura.	93
Gráfico 4 - Evolução da Tensão em Função da Intensidade da Corrente.	94
Gráfico 5 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Brasagem Fraca, Antes e Após Envelhecimento Artificial.	98
Gráfico 6 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Soldadura por Pontos, Antes e Após Envelhecimento Artificial.	99
Gráfico 7 – Valor Médio das Forças de Tração Alcançadas para as Diferentes Geometrias Analisadas (Brasagem Fraca).	110
Gráfico 8 - Valor Médio das Forças de Tração Alcançadas para as Diferentes Geometrias Analisadas (Soldadura por Pontos).	112
Gráfico 9 - Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Brasagem Fraca, Antes e Após Envelhecimento Artificial (Geometrias de Terminais).	114
Gráfico 10 - Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Soldadura por Pontos, Antes e Após Envelhecimento Artificial (Geometrias de Terminais).	115

Siglas

AC – Corrente alternada
Ag – Prata
Al – Alumínio
Au – Ouro
Bi - Bismuto
Cd – Cádmio
CO₂ – Dióxido de Carbono
Cr – Crômio
Cu - Cobre
DC – Corrente contínua (*Direct current*)
EPM – Copolímero de etileno-propileno
ESL – Indutância em série equivalente
ESR - Resistência em série equivalente
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GL – Grau de liberdade
INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
Mo – Molibdénio
Nd:YAG - *Neodymium:yttrium aluminum garnet*
Ni – Níquel
Pb - Chumbo
PC – Policarbonato
PEN – Poli (naftalato de etileno)
PET – Poliéster
PP – Polipropileno
PPS – Poli (sulfeto de p-fenileno)
QM – Média de Quadrados
SAC – Estanho-Prata-Cobre (Sn-Ag-Cu)
Sb – Antimónio
Sn – Estanho
SQ – Soma de Quadrados
UTAF - Unidade de Tecnologias Avançadas de Fabrico
W – Tungsténio
Yb:YAG - *ytterbium:yttrium aluminum garnet*
Zn - Zinco
Zn-Al – Zinco-Alumínio
Zn-Sn – Zinco-Estanho

1 Introdução

A presente dissertação enquadra-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na opção de Produção, Conceção e Fabrico, tendo sido desenvolvida na *Vishay Eletrónica Portugal, Lda*, em parceria com a Unidade de Tecnologias Avançadas de Fabrico (UTAF) do INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, na sequência de uma candidatura por parte da empresa ao sistema de incentivos à investigação e desenvolvimento tecnológico (SI I&DT).

Neste capítulo, para além de uma apresentação geral da empresa e das suas necessidades na resposta às dificuldades atualmente existentes na indústria de componentes elétricos, realizar-se-á um enquadramento do projeto e respetiva motivação, juntamente com uma exposição dos principais objetivos que se pretendem alcançar com a sua execução.

De maneira a permitir uma fácil compreensão por parte do leitor, será ainda detalhada a metodologia adotada na concretização do projeto, assim como referida a estrutura seguida na dissertação, apresentando-se sequencialmente os assuntos abordados nos capítulos que se seguem.

1.1 Enquadramento do Projeto e Motivação

Os avanços verificados nas últimas décadas relativos à produção de veículos elétricos e à exploração de energias renováveis, motivados pelo aumento da consciencialização das populações acerca dos problemas ambientais que afetam atualmente o nosso planeta, pelo exponencial investimento em I&D efetuado pelas empresas nestas áreas e pelos crescentes incentivos financeiros adotados pelos governos visando o desenvolvimento e utilização de tecnologias “amigas” do ambiente, intensificaram as necessidades e especificações dos componentes elétricos/eletrónicos complementares associados a estas tecnologias [1].

Os condensadores *DC-Link* de filme metalizado são um caso particular destes componentes eletrónicos passivos, sendo amplamente utilizados como inversores de potência nos motores dos veículos elétricos/híbridos, em painéis solares e em turbinas eólicas. No caso particular dos veículos elétricos/híbridos, onde parte ou a totalidade da potência de locomoção passou a ser assegurada por motores elétricos, os condensadores *DC-Link* assumem uma importância vital para um correto e seguro funcionamento do motor, operando como um circuito elétrico/eletrónico de controlo associado a este componente [1].

É de salientar que durante o mês de setembro de 2018, em Portugal, as vendas de veículos elétricos/híbridos atingiram os 5,4 % de quota de mercado, superando os recordes anteriores. Esta percentagem corresponde a um valor absoluto de 711 viaturas elétricas vendidas, representando um crescimento de 119 % face ao mês homólogo do ano anterior (2017). No acumulado dos três primeiros trimestres do ano de 2018, a quota de mercado dos veículos elétricos/híbridos alcançou o patamar dos 3 % de viaturas vendidas no mercado nacional, colocando Portugal no terceiro lugar a nível da União Europeia, apenas ultrapassado

pela Holanda e pela Áustria. Nos primeiros nove meses de 2018 vendeu-se um total de 5.608 viaturas eletrificadas no país, contrastando com as 4.237 unidades vendidas na totalidade do ano de 2017, o que perfaz um aumento de 32% (sem considerar o último semestre de 2018) [2].

Assim sendo, a crescente procura por veículos movidos a eletricidade, armazenada em baterias, e, conseqüente expansão da sua produção, fomenta a necessidade de evoluções contínuas, nomeadamente ao nível da potência do motor e autonomia das baterias. Este fator resulta, também, no aumento dos requisitos e especificações dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado associados a estes elementos [1].

Dadas as crescentes necessidades em termos de especificações deste tipo de componentes, as empresas produtoras, como é o caso da *Vishay Eletrónica Portugal, Lda*, têm sido pressionadas no sentido de melhorar a performance e robustez mecânica, elétrica e térmica da sua gama de produtos, promovendo simultaneamente o aumento da sua densidade de potência, ou seja, a redução do seu peso e volume acompanhada pelo aumento da sua capacidade. Estes objetivos apenas poderão ser alcançados através da otimização dos processos produtivos e dos materiais atualmente utilizados no fabrico de tais componentes [1].

Deste modo, verifica-se imperativo o estudo de tecnologias de ligação metálica para aplicação no processo produtivo dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado, tanto no âmbito da otimização das tecnologias utilizadas no presente, como da viabilização de novas tecnologias que permitam obter cadências produtivas e especificações de produto superiores. Somente efetuando esta análise é que será possível desenvolver alicerces consistentes para o desenvolvimento de uma nova geração de condensadores *DC-Link*, capazes de responder com eficácia as crescentes necessidades associadas às tecnologias híbridas/elétricas.

1.2 Apresentação da Empresa

A *Vishay Intertechnology, Inc.*® é uma companhia multinacional norte-americana fundada em 1962 pelo empresário polaco *Felix Zandman*. O nome *Vishay* foi escolhido em memória dos antepassados do Dr. *Zandman* que faleceram durante o holocausto na sua vila ancestral de *Veisiejai*, atualmente situada na Lituânia [3].

Iniciando a sua atividade com a produção de resistências, devido a uma estratégia baseada no desenvolvimento contínuo de novos produtos e na aquisição de outras empresas do mesmo setor, a *Vishay*® contém, atualmente, uma vasta gama de produtos no seu portfólio, sendo um dos maiores fabricantes mundiais de semicondutores discretos e de componentes eletrónicos passivos [3].

Deste modo, retificadores, díodos, *MOSFETs* (*metal oxide semiconductor field-effect transistors*), componentes optoelectrónicos, circuitos integrados, resistores, condensadores e indutores são alguns dos produtos que constituem o catálogo produtivo da empresa. Estes componentes são utilizados em todo o tipo de equipamentos e aparelhos eletrónicos, tais como telemóveis, televisores, eletrodomésticos, computadores, sistemas de áudio e vídeo, equipamento médico, industrial e militar, subsistemas em automóveis e de geração de energia elétrica, entre outros [3].

A médio prazo, os planos de crescimento da *Vishay Intertechnology, Inc.*® passam pelo aumento dos seus recursos nas áreas referentes à investigação e desenvolvimento de produto (*R&D*), à engenharia de processos e ao marketing de produto. Para além do incentivo ao crescimento interno da empresa e, em concordância com a política adotada nas últimas décadas, o progresso da *Vishay*® pretende ser complementado com a aquisição de pequenas e médias empresas especializadas em áreas particulares da indústria eletrónica [3].

Ao longo do seu período de existência, são vários os exemplos desta política administrativa. Assim, nas décadas de 80 e 90, a empresa principiou a sua estratégia de

aquisição, com a integração da *Dale* (1985), *Draloric* (1987), *Sfernice* (1988), *Sprague* (1992), *Roederstein* (1993), *Vitramon* (1994), *Telefunken* e da *Siliconix* (1998). No início do século XXI esta política acentuou-se, mantendo-se até ao momento, com a aquisição da *Cera-Mite*, *Electro-Films*, *Spectrol* (2000), *Mallory (NACC)*, *Infineon: Infrared components business*, *General Semiconductor* (2001), *BCcomponents*, *Beyschlag* (2002), *International Rectifier: PCS business* (2007), *KEMET: Wet tantalum capacitor business* (2008), *Huntington Electric: Resistor businesses* (2011), *HiRel Systems* (2012), *MCB Industrie* (2013), *Holy Stone Polytech* e da *Capella Microsystems* (2014) [3].

Nas últimas cinco décadas, a empresa tem vindo a destacar-se na indústria de componentes elétricos/eletrónicos, posicionando-se na vanguarda da resposta aos mais recentes desafios em termos de conectividade, mobilidade e sustentabilidade.

Atualmente, a *Vishay Intertechnology, Inc*® integra fábricas em catorze países distintos, empregando mais de vinte mil pessoas, possuindo um volume de negócios de aproximadamente 2,5 mil milhões de dólares. Na figura 1 pode ser observado o logótipo do grupo *Vishay*® [3].



Figura 1 – Logótipo da *Vishay Intertechnology, Inc.*® [3].

A *Vishay Eletrónica Portugal, Lda* foi formada em 1969 com o nome de *Roederstein Eletrónica Portugal, Lda*, contando atualmente com mais de 200 colaboradores na totalidade dos seus diversos departamentos.

A divisão de condensadores de filme metalizado surgiu da fusão da *Roederstein*® com a *BCComponents*®, após a aquisição das duas companhias pelo grupo *Vishay*®, possuindo unidades de produção em cinco países distintos: Portugal, Bélgica, China, Índia e Estados Unidos. Estas fábricas possuem certificações de qualidade segundo as normas internacionais, das quais se podem realçar a *QS 9000*, a *ISO 14000* e a *ISO 9001* [3].

Atualmente, a *Vishay Eletrónica Portugal, Lda* produz, industrialmente, vários modelos de condensadores *DC-Link* de filme metalizado, encontrando-se estes em constante evolução, de maneira a dar resposta as exigências do mercado.

Deste modo, a empresa pretende concentrar os seus recursos no desenvolvimento das tecnologias associadas aos condensadores *DC-Link* de filme metalizado para aplicação no setor da mobilidade elétrica, com o intuito de alcançar os seguintes objetivos económicos [1]:

- Aumento da produção de condensadores *DC-Link* em cerca de 150.000 produtos/ano;
- Aumento da comercialização de *DC-Links* em cerca de 20 %;
- Aumento do volume de vendas anual da empresa em cerca de 62 % até 2022, representando um volume de negócios superior a 10 milhões de euros no ano mencionado (tendo apenas em consideração o segmento de condensadores *DC-Link*);
- Contribuição para a manutenção de uma quota de exportação superior a 90 %;

Adicionalmente aos objetivos económicos referidos, a *Vishay*® pretende revolucionar a sua capacidade produtiva através do desenvolvimento de um equipamento protótipo

semiautomático que integre um novo conceito de ligação dos componentes internos aos condensadores *DC-Link*.

Somente com a continuação de uma política de gestão, centrada na melhoria contínua dos seus produtos e respetivos processos de fabrico, é que será possível manter a empresa nos lugares cimeiros da indústria de componentes eletrónicos passivos.

1.3 Objetivos do Projeto

Os principais objetivos a alcançar com a realização deste estudo e respetivo estágio em ambiente empresarial são:

- Compreender os fundamentos do funcionamento de um condensador *DC-Link*;
- Identificar os principais constituintes de um condensador de filme metalizado e entender o seu processo produtivo;
- Investigar e comparar as características das diversas tecnologias de ligação de metais aplicadas na produção de componentes eletrónicos de potência;
- Reconhecer as principais limitações das tecnologias de ligação atualmente implementadas no processo produtivo da *Vishay* Eletrónica Portugal e averiguar soluções que possibilitem a sua menorização/ superação, nomeadamente ao nível da identificação de processos de ligação alternativos passíveis de serem automatizáveis;
- Propor tecnologias de ligação alternativas às atualmente implementadas no processo produtivo da empresa;
- Definir geometrias de provetes para testes de ligação e preparar o plano de ensaios experimentais;
- Examinar os processos de ligação aplicados nas diferentes etapas da cadeia produtiva da empresa e analisa-los em termos de propriedades mecânicas e elétricas alcançadas nas ligações soldadas;
- Analisar a metalografia das ligações soldadas, de maneira a complementar a informação recolhida nos ensaios às propriedades mecânicas e elétricas;
- Otimizar as tecnologias de ligação atualmente utilizadas em termos dos seus parâmetros de soldadura;
- Estudar a viabilidade da utilização de novas geometrias de terminais diretamente ligados aos elementos condensadores através da análise da microestrutura e das propriedades mecânicas e elétricas conferidas à ligação.

1.4 Metodologia do Projeto

A presente dissertação compreende duas fases primárias dissimilares, sendo uma delas de natureza teórica e outra de carácter prático/experimental. Assim sendo, numa primeira etapa proceder-se-á a uma pesquisa bibliográfica centrada nos fundamentos básicos dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado e do seu processo produtivo e, ainda, acerca das tecnologias de ligação de metais utilizadas nas indústrias de componentes eletrónicos de potência e que poderão ser aplicadas no fabrico destes condensadores. A segunda fase deste trabalho compreende a realização de ensaios experimentais no sentido de avaliar as tecnologias de ligação atualmente implementadas no processo produtivo dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado na *Vishay* Eletrónica Portugal e estudar a utilização de novas geometrias de terminais a conectar diretamente aos elementos condensadores. Para tal, serão realizados testes mecânicos, elétricos e metalográficos.

O diagrama de *Gantt*, presente na figura 2, apresenta as principais atividades a desenvolver ao longo deste projeto, assim como o planeamento temporal das mesmas.

Atividades	Tempo (semanas)	2018																2019							
		Duração	Início	Fim	Outubro					Novembro				Dezembro				Janeiro				Fevereiro			
					40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	1	2	3	4	5	6	7	8
Pesquisa Bibliográfica	9	01/out	30/nov	█					█																
Reunião Inicial na Vishay		31/out																							
Recolha de Normas de Soldadura	4	05/nov	30/nov						█																
Definição do Plano Experimental	2	03/dez	14/dez										█												
Reunião - Aprovação do Plano Experimental		12/dez											█												
Validação dos Testes Experimentais	2	10/dez	21/dez										█												
Desenho de Provetes	1	24/dez	28/dez														█								
Desenvolvimento e Produção de Provetes	2	02/jan	11/jan														█								
Testes às Propriedades Mecânicas	3	14/jan	29/jan														█								
Testes às Propriedades Elétricas Iniciais	1	21/jan	25/jan														█								
Testes à Microestrutura	2	21/jan	01/fev														█								
Testes às Propriedades Elétricas Finais	1	04/fev	08/fev														█								
Análise dos Resultados Experimentais	3	28/jan	15/fev														█								
Redação da Dissertação	16	01/nov	16/fev						█				█				█								

Figura 2 - Diagrama de Gantt.

1.5 Estrutura da Dissertação

O presente relatório foi concebido com o propósito de descrever o trabalho desenvolvido ao longo do período de estágio em ambiente empresarial. Deste modo, a sua estrutura encontra-se organizada em seis capítulos, apresentados sequencialmente consoante as etapas do projeto concretizadas.

No primeiro capítulo é realizado um enquadramento do projeto e respetiva motivação, assim como uma breve apresentação da empresa, os principais objetivos a alcançar e o planeamento temporal das atividades desenvolvidas inerentes à dissertação.

No segundo capítulo é feita uma descrição dos conceitos elétricos básicos que justificam o funcionamento de um condensador *DC-Link*, além de uma exposição detalhada dos principais constituintes de um elemento condensador de filme metalizado e respetivo processo produtivo.

No terceiro capítulo realiza-se um estudo aprofundado acerca das tecnologias de ligação de metais suscetíveis de serem utilizadas na produção de componentes eletrónicos, nomeadamente a brasagem fraca, a soldadura por pontos, a soldadura por ultrassons e a soldadura laser. Assim, são analisados os fundamentos em que assentam cada tecnologia referida, os parâmetros associados ao processo, os materiais passíveis de serem soldados e os equipamentos envolvidos em cada processo mencionado. Quando possível, é também apresentada uma análise de distribuição de temperatura sucinta associada a cada uma das tecnologias abordadas. No final deste capítulo é efetuada uma comparação dos diversos processos de ligação, realçando-se as vantagens e limitações intrínsecas a cada um.

No capítulo 4 é exibida a caracterização do problema de natureza prática, sendo definido o plano de ensaios experimentais. Deste modo, é examinada a solução atualmente implementada na cadeia produtiva da empresa e a viabilidade da utilização de novas geometrias de terminais. Para cada análise efetuada, é apontada a metodologia de ensaios definida, assim como a geometria determinada para os provetes de teste e respetiva produção. Os equipamentos de ensaios utilizados são, também, referidos.

No quinto capítulo são expostos os resultados obtidos nos ensaios experimentais elaborados e é efetuada a respetiva análise dos mesmos.

Por fim, no capítulo 6 é concretizada uma conclusão acerca dos assuntos e resultados apresentados nos capítulos anteriores, complementando-se com a perspetiva de trabalhos futuros em linha com o estudo desenvolvido.

2 Condensadores *DC-Link* de Filme Metalizado

2.1 Conceitos Elétricos Básicos

Genericamente, um elemento condensador pode ser definido como um componente constituído por duas placas metálicas paralelas (armaduras) separadas, em toda a sua extensão, por um meio isolante denominado por dielétrico. Este material deve ser escolhido tendo em conta a sua permissividade (ϵ), o fator de perdas (Tgd), a sua rigidez dielétrica e, ainda, a variação das suas propriedades em função da temperatura [4, 5].

A figura 3, apresentada em seguida, exibe a representação esquemática simplificada de um condensador ideal. Este componente elétrico é caracterizado pela sua capacidade “*C*”, sendo a sua unidade de medida o *Farad* [4].

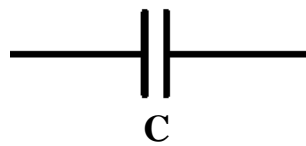


Figura 3 - Representação Esquemática Simplificada de um Condensador Ideal.

A capacidade de um condensador (equação 2.1) aumenta com o aumento da área das armaduras metálicas e com a diminuição da distância entre estas. Esta grandeza depende também da natureza do material dielétrico [4, 5].

Deste modo,

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

Onde:

- C – capacidade (Farad);
- A – área das armaduras (m^2);
- d – distância entre armaduras (m);
- ϵ – permissividade do material dielétrico (Farads/m).

Por sua vez, a permissividade do material dielétrico pode ser definida através da equação (2.2):

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r \quad (2.2)$$

Onde:

- ϵ_0 – permissividade do vazio;
- ϵ_r – permissividade relativa.

Na prática, numa célula condensadora (figura 7) verifica-se a presença de perdas, usualmente originadas por condução ou nos isolamentos. Deste modo, de maneira a minimizar

as perdas por condução deve ser escolhido um material de baixa resistividade elétrica, reduzir ao mínimo o comprimento das ligações e realizar bons contactos. Quanto à diminuição das perdas nos isolamentos, devem ser escolhidos dielétricos e isolamentos de perdas baixas, com grande resistividade e pouca sensibilidade à humidade. Adicionalmente, deve ser evitada a acumulação de poeiras ou outros contaminantes entre as armaduras. As células condensadoras devem ser protegidas do exterior, dentro de uma montagem, por encapsulamento, através de uma resina adequada à função (usualmente epóxi) [5, 6].

Assim sendo, a figura 4 esquematiza a representação simplificada de um elemento condensador considerando a presença de perdas, representada pela associação de uma resistência em série com a capacidade “C”. A sigla “E.S.R” designa a resistência equivalente em série originada pelas perdas elétricas [5, 6].

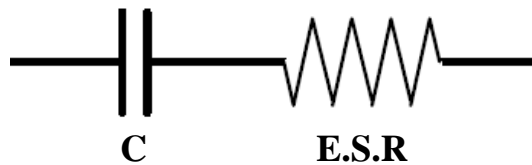


Figura 4 - Representação Esquemática Simplificada de um Condensador Considerando Perdas.

O valor da resistência equivalente em série pode ser obtido recorrendo à equação (2.3):

$$E.S.R = \frac{Tgd}{2\pi * f * C} \quad (2.3)$$

Onde:

- E.S.R – resistência equivalente em série (Ohm);
- Tgd – fator de perdas (%);
- f – frequência (Hz);
- C – capacidade (Farad).

Por fim, a energia elétrica armazenada num condensador pode ser calculada através da equação (2.4):

$$W = \frac{1}{2} * C * U^2 \quad (2.4)$$

Onde:

- W – energia armazenada (J);
- C – capacidade (Farad);
- U – tensão aplicada às armaduras do condensador (V).

Considerando gamas de frequências elevadas, a representação simplificada de um condensador pode ser esquematizada pelo circuito elétrico exibido na figura 5. Neste esquema elétrico, L representa a indutância própria do condensador. Embora qualquer condensador real, pelo facto de não ser perfeito, possua indutância própria, o valor desta propriedade apenas se revela expressivo para frequências elevadas [5, 6].

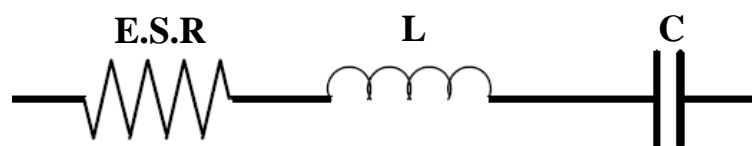


Figura 5 - Representação Esquemática Simplificada de um Condensador para Gamas de Frequências Elevadas.

Aquando da necessidade de existência de valores elevados de capacidade não normalizados, é possível a associação de vários elementos condensadores. Esta associação pode ser realizada de duas formas diferentes: em série ou em paralelo [4, 6].

Os condensadores podem classificar-se em dois grupos distintos, fixos ou reguláveis, diferenciando-se, ainda, consoante a natureza do material dielétrico utilizado [5]. A figura 6 resume os diferentes tipos de condensadores existentes em cada um dos grupos mencionados.

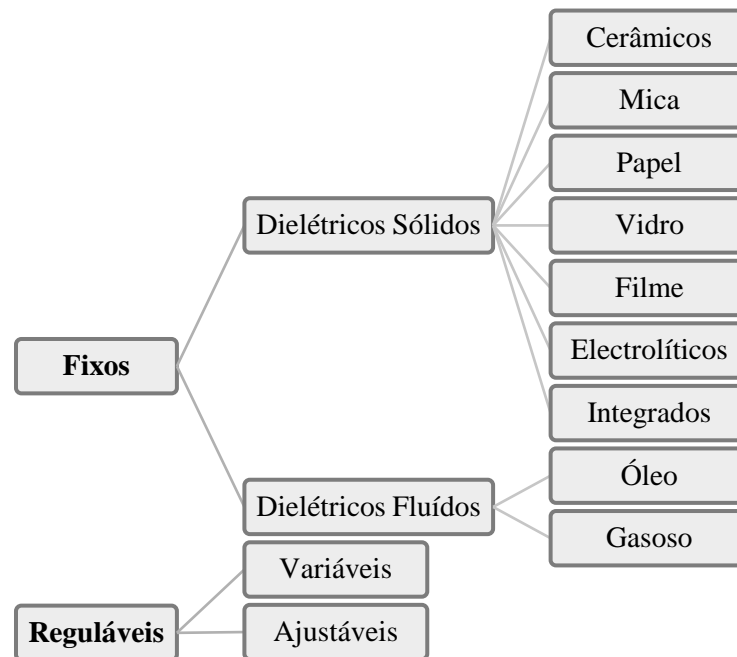


Figura 6 - Classificação dos Diferentes Tipos de Condensadores (adaptado de [5]).

No presente estudo, apenas serão analisados os condensadores de filme metalizado, dado serem o componente principal dos condensadores *DC-Link* aplicados na indústria automóvel elétrica.

Os condensadores cerâmicos, devido ao seu tamanho, propriedades elétricas e efeitos parasíticos revelam-se não competitivos com os condensadores de filme metalizado, para os elevados valores de capacitância para os quais os *DC-Link* funcionam [1]. Os condensadores eletrolíticos apresentam menores custos e possibilitam obter uma densidade de potência superior quando comparados com os condensadores de filme metalizado [7]. Contudo, esta tipologia detém várias limitações em termos de geometria, resultantes do seu modo de funcionamento, o que conduz a dificuldades na sua montagem e um tempo de vida curto. Adicionalmente, os condensadores eletrolíticos não permitem que ocorra uma inversão de corrente, havendo o perigo de curto-circuito e padecem, ainda, de elevada resistência em série equivalente (ESR) e elevada indutância em série equivalente (ESL) [1, 7].

2.2 Condensadores de Filme Metalizado

Os condensadores *DC-Link* de filme metalizado são sistemas elétricos passivos responsáveis por balancear a diferença de potência instantânea entre as baterias (fonte de entrada - lado DC) e a carga de saída (lado AC) [1, 8]. Deste modo, os condensadores *DC-Link* têm vindo a ser utilizados em inversores de potência DC/AC para alimentar motores elétricos em veículos elétricos/híbridos, com o intuito de minimizar a variação da diferença de potencial nestes componentes [1]. Assim, estes condensadores são fundamentais na garantia de um correto funcionamento e longevidade a todos os componentes elétricos que assistem [1, 7].

Os componentes principais dos condensadores *DC-Link* são os elementos condensadores de filme metalizado (bobines) ligados em paralelo [8]. Estes elementos consistem em enrolamentos de filme de material dielétrico alternados por camadas de metalização [5, 7, 8]. A figura 7 exibe a representação tridimensional de um elemento condensador.

Os materiais dielétricos usualmente utilizados são o polipropileno (PP), o poliéster (PET), o policarbonato (PC) e o Poli (sulfeto de p-fenileno) (PPS) [9]. Enquanto que os condensadores de filme de PP são utilizados para aplicações de elevada tensão e frequência, os condensadores de PET são mais recomendados para aplicações gerais de reduzida tensão e frequência, tais como acoplamento capacitivo, supressão de interferências, acumulação de carga, filtragem, entre outras. Relativamente aos condensadores de PC, estes são usados em aplicações automóveis. Por fim, os condensadores de PPS são empregues em equipamentos de telecomunicações, dispensando geralmente encapsulamento [1].

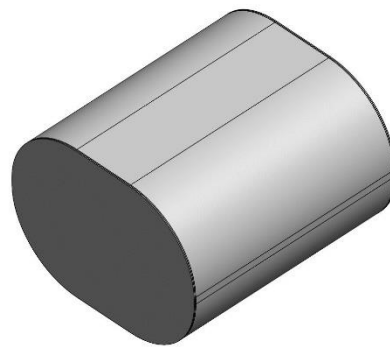


Figura 7 - Representação Tridimensional de uma Célula Condensadora (Bobine).

Os condensadores de filme metalizado possuem amplas gamas de parâmetros elétricos, contendo capacidades que podem variar entre as centenas de *picofarads* até aos milhares de *microfarads*, para tensões máximas na ordem das dezenas, podendo esta grandeza possuir valores até ao milhar de *Volt* [1, 6].

O principal problema associado a utilização de filmes metalizados procede da variação da sua capacidade e densidade de energia com o aumento da temperatura, podendo este resultar de solicitações externas ou do próprio funcionamento do condensador, devido ao calor gerado decorrente da passagem de correntes elevadas. Em contrapartida, o uso de materiais poliméricos como elemento dielétrico permite prolongar o tempo de vida útil do condensador, dada a sua capacidade de autorreparação [1, 9].

A *performance* de um elemento condensador pode ser parametrizada em função das propriedades do material dielétrico tais como a permissividade, a condutividade térmica e a condutividade elétrica, sendo esta última propriedade dependente da temperatura de funcionamento do condensador. Na verdade, a condutividade térmica do polímero utilizado como material dielétrico possui enorme influência no calor transferido para o interior dos condensadores. Contudo, a temperaturas de funcionamento elevadas, dado o aumento da condutividade elétrica da maioria dos polímeros com a temperatura, as perdas por condução devido a perdas de corrente no dielétrico tornam-se relevantes. Como consequência, a utilidade de um condensador de filme de polímero metalizado pode ficar comprometida para elevadas temperaturas de funcionamento [8].

Atualmente, estão a ser investigadas soluções baseadas na utilização de fitas híbridas, compostas pela combinação de um polímero convencional, como o PP ou o PPS, com um polímero dielétrico com propriedades superiores, como, por exemplo, polímero de acrilato, perfazendo uma multicamada. Com o intuito de reduzir o peso e volume dos condensadores, a

redução da espessura do filme de material dielétrico é outra das soluções analisadas, embora esta ação origine problemas em termos de dissipação de calor [1]. Desta forma, a otimização do peso e volume de um condensador de filme metalizado necessita de um balanço delicado entre o aumento da densidade de energia e o controlo da geração de calor no interior deste componente [8].

Usualmente, os condensadores *DC-Link* de filme metalizado são aplicados na indústria eletrónica de potência, como, por exemplo, em sistemas de luz, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, veículos híbridos/elétricos e *drives* de motores. Devido ao aumento das necessidades nas indústrias referidas, nomeadamente no setor automóvel, aeroespacial e energético, as especificações exigidas aos condensadores *DC-Link* são cada vez mais rigorosas, sendo os principais desafios imputados a estes componentes por parte da Vishay® [1]:

- Apresentar uma menor taxa de falha durante o seu tempo útil de vida, garantindo a segurança dos restantes componentes elétricos/eletrónicos em seu redor;
- Aumentar a densidade de potência e a densidade de capacidade para o mesmo volume (em cerca de 20 %);
- Reduzir o peso dos condensadores para a mesma capacidade e potência (em cerca de 20 %);
- Melhorar o funcionamento destes elementos em meios ambientais com condições adversas, como, por exemplo, elevada temperatura ou humidade;
- Reduzir as resistências e indutâncias internas equivalentes parasíticas (ESR e ESL) para valores inferiores a $0,5\text{ m}\Omega$ e 10 nH , respetivamente;
- Melhorar a robustez elétrica de funcionamento dos condensadores em ensaios de fadiga de longa duração;
- Automatizar um elevado número de etapas da cadeia produtiva dos condensadores *DC-Link*, promovendo a eficiência dos processos de ligação e de montagem.

A figura 8, apresentada em seguida, representa um condensador *DC-Link* e respetivos constituintes. Nesta ilustração, é possível visualizar a associação de diversos elementos condensadores em paralelo.

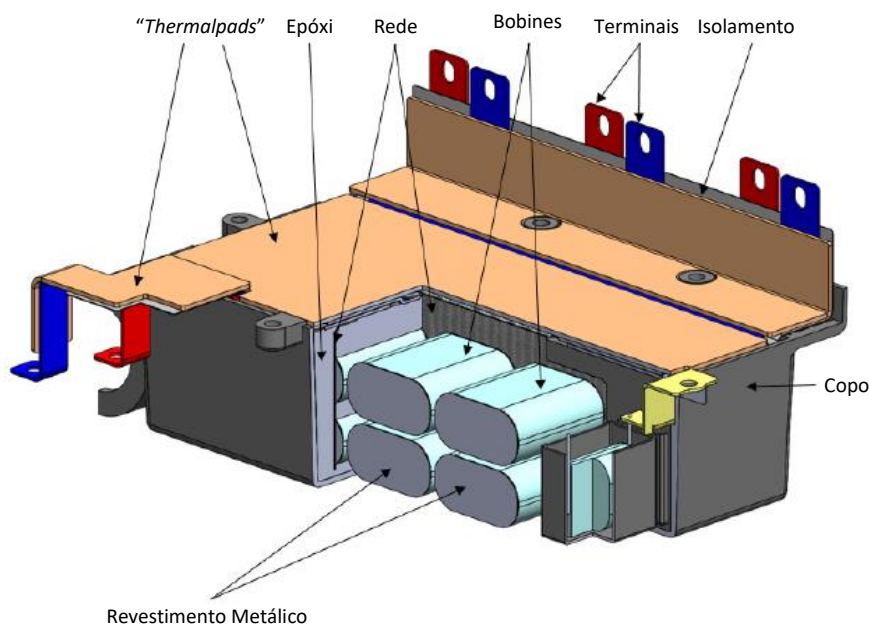


Figura 8 - Representação de um Condensador DC-Link e Respetivos Constituintes (adaptado de [1]).

Nos seguintes subcapítulos serão abordados, de forma pormenorizada, os constituintes de um elemento condensador, assim como as diferentes etapas que formam a cadeia produtiva dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado.

2.3 Elementos Constituintes de uma Célula Condensadora

A figura 9 exibe uma vista em perspectiva de um elemento condensador (à esquerda), apresentando detalhadamente os componentes descritos ao longo dos próximos parágrafos e, também, uma vista em corte (à direita) onde é possível visualizar as camadas de metalização aplicadas às extremidades (margens comuns) de uma célula condensadora.

Tal como foi referido anteriormente, uma célula condensadora (bobine) consiste num enrolamento de filme de material dielétrico metalizado. Assim sendo, os condensadores podem ser produzidos através do enrolamento de dois filmes de material polimérico metalizado (números 2 e 3) à volta de um núcleo oco (número 4), originando uma forma aproximadamente cilíndrica. O filme é usualmente constituído por um substrato polimérico, possuindo um lado metalizado/condutoivo criado por deposição por vapor (números 5 e 13) e um lado oposto não condutivo (números 6 e 14). Tal como já foi referido, o material polimérico utilizado pode ser polipropileno (PP), poli(naftalato de etileno) (PEN), um copolímero de etileno-propileno (EPM), poliéster (PET), entre outros. Este substrato pode possuir uma espessura que varia desde 0,3 μm até 30 μm , sendo preferíveis espessuras entre 1,0 μm e 8,0 μm . O revestimento metálico utilizado no lado condutivo deve ser à base de zinco, alumínio, ou uma liga de zinco-alumínio [10].

Cada um dos filmes estão divididos em segmentos (números 8 e 16) através de faixas não condutivas (números 9 e 17), com o objetivo de minimizar o risco de ocorrência de curto-circuitos que resultariam na falha da totalidade do elemento condensador. Assim sendo, caso se verifique uma falha localizada, o curto-circuito permanece confinado a um segmento, não comprometendo o condensador por completo. Por outro lado, cada filme possui uma margem densamente metalizada num dos seus extremos verticais (números 7 e 15) para promover a adesão da metalização realizada, posteriormente, por projeção térmica e uma margem não condutiva ao longo do outro extremo (números 10 e 18). Para cada um dos filmes, as margens idênticas encontram-se nos extremos opostos [10].

Os dois filmes são ligeiramente desfasados na vertical, para que as suas extremidades não se sobreponham, criando uma margem comum em cada um dos extremos do cilindro. Este desfasamento varia, normalmente, entre 0,5 e 2 mm, obtendo-se uma margem comum no topo do condensador (número 11) para as camadas do primeiro filme e uma margem comum na base do condensador (número 12) para as camadas relativas ao segundo filme. Esta solução construtiva permite que as ligações elétricas sejam feitas em cada uma das extremidades das células condensadoras [10].

Após finalizado o enrolamento dos filmes, os extremos do elemento condensador gerado são metalizados com camadas de zinco (números 19 e 20), ou de ligas deste elemento, usualmente por uma técnica de projeção térmica, como, por exemplo, projeção por arco (*arc spraying*) ou por gás (*gas flame spraying*). Estes processos de revestimento geram uma estrutura porosa e irregular que depende dos parâmetros utilizados na projeção térmica, sendo os mais influentes a velocidade e temperatura das partículas projetadas e o gás de atomização usado [10].

Preferencialmente, a liga utilizada na metalização deve conter pelo menos 80 % de zinco, sendo uma liga constituída por percentagens de zinco superiores a 94 % considerada excelente. Na totalidade das suas camadas, a metalização deve conter espessuras entre 0,2 e 1,5 mm, tendo em consideração que o custo e o peso desta aumenta consideravelmente com o aumento da espessura. Nas camadas superiores, as ligas de zinco devem possuir quantidades de

estanho para promover uma melhor soldadura dos terminais. A presença de estanho na metalização, para além de melhorar a molhagem do zinco, protege este material da oxidação e da humidade. Para além disto, Parler e Leigh [10] referem que uma determinada quantidade de porosidade deste revestimento atua como isolamento térmico, promovendo a diminuição da transferência de calor durante o processo de união por soldadura e protegendo a célula condensadora de danificação, devido à fusão do material dielétrico. Deste modo, a porosidade da metalização deve possuir valores entre 20 a 40 % [10].

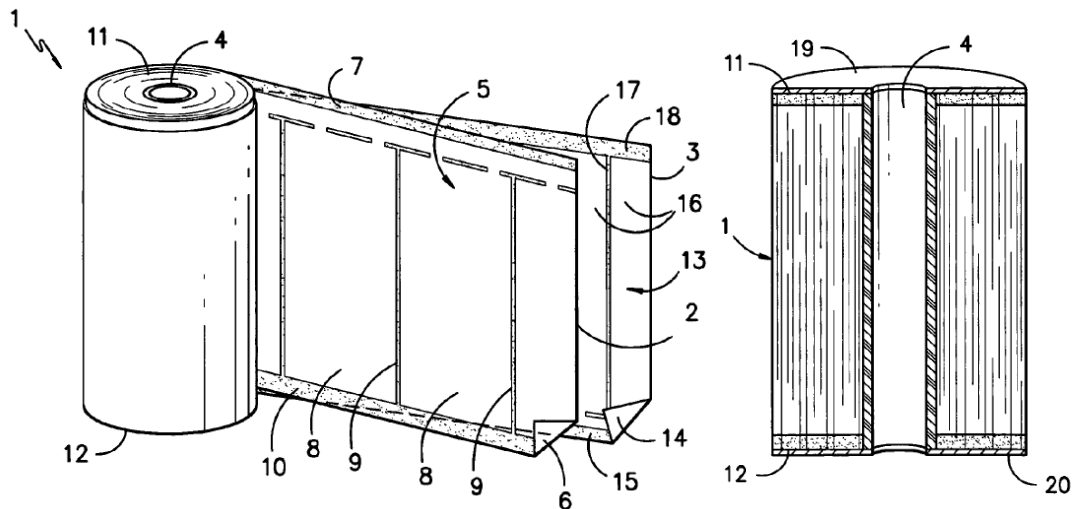


Figura 9 - Vista em Perspetiva (à Esquerda) e Vista Seccionada (à Direita) de um Elemento Condensador e Respetivos Componentes (adaptado de [10]).

Legenda:

- | | |
|---|--|
| 1 – Elemento condensador; | 11 - Margem comum (filme anterior); |
| 2 – Filme metalizado (anterior); | 12 – Margem comum (filme posterior); |
| 3 – Filme metalizado (posterior); | 13 – Lado condutivo/metalizado (filme posterior); |
| 4 – Núcleo isolado; | 14 – Lado não condutivo/não revestido (filme posterior); |
| 5 – Lado condutivo/metalizado (filme anterior); | 15 – Margem densamente revestida (filme posterior); |
| 6 – Lado não condutivo/não metalizado (filme anterior); | 16 – Segmentos (filme posterior); |
| 7 – Margem densamente revestida (filme anterior); | 17 – Faixas não condutivas (filme posterior); |
| 8 – Segmentos (filme anterior); | 18 – Margem não condutiva (filme posterior); |
| 9 – Faixas não condutivas (filme anterior); | 19 - Revestimento metálico (superior); |
| 10 – Margem não condutiva (filme anterior); | 20 - Revestimento metálico (inferior). |

Os terminais podem ser conectados às metalizações que revestem as extremidades dos elementos condensadores através de processos como a brasagem fraca (*soldering*) ou a soldadura por pontos (*spot welding*). Preferencialmente, estes devem possuir espessuras entre 0,2 e 0,7 mm e ser fabricados em alumínio, cobre ou respetivas ligas. De maneira a aumentar a compatibilidade entre os metais que se pretendem ligar, os terminais podem ser revestidos com um segundo material metálico ou incluir uma estrutura laminada de dois ou mais metais [10].

Investigações desenvolvidas por Parler e Leigh [10] indicam a vantagem da utilização do alumínio nos terminais em detrimento do cobre, embora, possam surgir algumas complicações relativas ao processo de ligação por brasagem. Nestas pesquisas, foi estudada a aplicação dos dois materiais referidos nos terminais de um condensador, examinando-se a

resistência mecânica obtida na ligação soldada por pontos. Esta característica foi analisada através da força obtida em ensaios de arrancamento realizados antes e depois da aplicação de um envelhecimento artificial [10].

Os resultados obtidos indicam que, mesmo utilizando espessuras cerca de 60 % inferiores para os terminais em cobre (0,25 mm para o cobre e 0,4 mm para o alumínio) e valores de energia superiores na soldadura dos terminais em cobre do que no caso dos terminais em alumínio (3,0 kW e 2,5 kW para o cobre e o alumínio, respetivamente), as forças obtidas para o cobre são cerca de metade das obtidas para o alumínio (46,26 N e 89,85 N, respetivamente). Após efetuados ensaios de envelhecimento, a uma temperatura igual a 85 °C durante uma semana, verificou-se uma diminuição de cerca de 75 % da resistência mecânica no caso dos terminais em cobre (de 46,26 N para 11, 56 N), enquanto que para os terminais em alumínio o valor da força manteve-se constante. Deste modo, os autores defendem a utilização de ligas de alumínio contendo, no mínimo, 80 % deste elemento, sendo preferíveis composições com percentagens de alumínio superiores a 90 % [10].

2.4 Processo Produtivo dos Condensadores *DC-Link*

Neste subcapítulo serão descritas, de forma sucinta, as diferentes etapas que constituem a cadeia produtiva de um condensador *DC-Link* de filme metalizado, atualmente implementada na *Vishay Eletrónica Portugal, Lda*.

O processo produtivo dos condensadores de filme metalizado pode ser descrito tendo em conta três fases fundamentais: a bobinagem, a pré-montagem e a montagem [5].

A primeira etapa do processo de produção consiste no enrolamento a alta velocidade de um filme de polipropileno metalizado, formando-se, deste modo, um elemento condensador denominado de bobine [1].

As extremidades da bobine são, de seguida, revestidas por projeção térmica de diversas camadas de ligas metálicas, com o intuito de funcionarem como terminais, como sistema de fixação mecânica para evitar o desenrolamento do filme e facilitar o processo de ligação à rede metálica. A deposição da metalização por projeção térmica pode ser realizada por gás (*gas flame spraying*) ou por arco (*arc spraying*) [1]. Em ambos os processos, uma fonte de calor é utilizada para fundir o material da metalização, enquanto um jato de gás com elevada velocidade divide e projeta o material metálico contra a superfície a revestir. Quando comparada com a tecnologia de projeção térmica por arco, a projeção por gás permite obter espessuras de revestimento mais reduzidas (espessuras mínimas da ordem dos 15 µm), embora o custo dos equipamentos seja superior [11]. A figura 10 esquematiza os processos de metalização referidos ao longo do presente parágrafo.

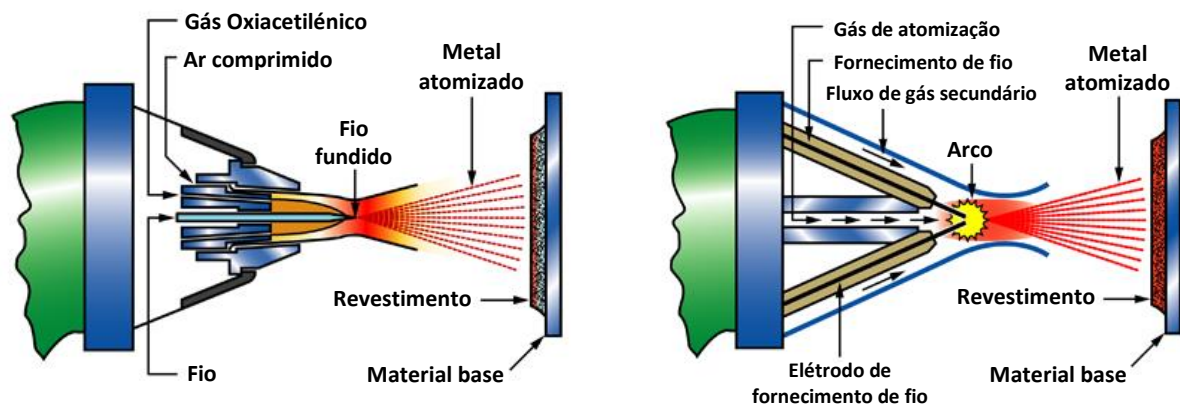


Figura 10 - Representação Esquemática dos Processos de Projeção Térmica por Gás (à esquerda) e por Arco (à direita) (adaptado de [11]).

As ligas atualmente utilizadas pela empresa para produzir as camadas de metalização são compostas por elementos metálicos como o zinco, o alumínio, o estanho e o cobre, sendo o revestimento metálico usualmente constituído pela combinação destes elementos em múltiplas camadas. Deste modo, são frequentemente utilizadas metalizações constituídas por ligas de Zn-Al (1ªcamada), com 14 % a 16 % de Al (em peso), e por liga de Zn-Sn (2ªcamada), com 29 % a 30 % de Zn, com o objetivo de garantir uma baixa impedância na bobine, um contacto adequado entre os filmes metalizados e uma boa resistência mecânica do conjunto. A 2ª camada de metalização possui, ainda, o dever de permitir uma soldadura de qualidade dos terminais, ou das redes de cobre estanhado, às extremidades da bobine [1]. Apesar da preferência pela utilização dos elementos metálicos mencionados, a composição das metalizações está em constante evolução, não tendo esta uma definição exata. Devido a este fator e, dada a sua influência nas propriedades elétricas, na resistência mecânica da bobine e na soldabilidade aos elementos de ligação, a composição das camadas de metalização é uma das principais características acauteladas pela confidencialidade industrial.

Subsequentemente, é realizado o corte e preparação de vários elementos auxiliares que integram a montagem final dos condensadores *DC-Link*, tais como [1]:

- a) Placas de cobre que vão funcionar como conectores para ligar aos restantes componentes do condensador e servem de suporte à estrutura;
- b) Rede de cobre estanhada que é utilizada para ligar o conjunto de bobines e facilitar os processos de brasagem (*soldering*) ou de soldadura por pontos (*welding*);
- c) Filme de poliéster (PET) responsável pelo isolamento entre as duas placas de cobre;
- d) Caixa externa do componente obtida por injeção.

Em seguida, é realizado o processo de brasagem das redes de cobre estanhado às placas de cobre, seguindo-se a montagem das placas de cobre soldadas à rede e do filme de PET [1].

A etapa seguinte, de enorme importância na cadência do processo produtivo dos condensadores de filme metalizado, consiste na ligação dos elementos condensadores entre si, em paralelo, e do conjunto dos condensadores aos terminais. Para tal efeito, atualmente, a Vishay® utiliza as tecnologias de brasagem fraca (*soldering*) e de soldadura por pontos (*spot welding*), recorrendo à rede de cobre estanhado para facilitar a associação das diversas bobines que podem constituir um condensador *DC-Link* [1]. Estas tecnologias de ligação de metais serão estudadas pormenorizadamente no capítulo seguinte (capítulo 3).

O encapsulamento integra a etapa final da cadeia de produção dos condensadores *DC-Link*, onde uma resina de base epoxídica é vazada, por gravidade, sobre o conjunto de elementos condensadores colocado previamente internamente à caixa de polímero (copo) que dará a forma externa ao componente. Este encapsulamento permite o isolamento elétrico do conjunto de condensadores (bobines), concedendo, também, resistência mecânica a vibrações ao mesmo. Este elemento possui, ainda, uma função de proteção, preservando os condensadores das variações de temperatura e humidade exteriores e retardando o fogo em caso de incêndio, sendo por isso constituído por um material com propriedades de resistência ao fogo, compatível com as exigências da indústria automóvel [1].

Usualmente, o processo de encapsulamento é realizado manualmente, resultando no aparecimento de problemas pontuais como a formação de bolhas de ar. Estes poros, durante o processo de cura, vão ficar aprisionados no interior da resina epóxi, o que origina o aparecimento de heterogeneidades a nível das propriedades mecânicas e a existência de zonas de ponte elétrica [1].

Uma das limitações existentes no processo de produção implementado na empresa prende-se com a dificuldade de automatização de algumas etapas da cadeia produtiva, sendo

estas realizadas manualmente, o que dificulta o aumento das cadências de produção, impossibilita o controlo apertado de todos os parâmetros do processo e afeta a repetibilidade e produtividade. A utilização do processo de brasagem manual, como tecnologia de ligação dos diversos elementos metálicos, e o vazamento manual da resina epóxi que constitui o encapsulamento evidenciam esta problemática.

3 Tecnologias de Ligação de Metais

3.1 Introdução

Os progressos recentes no setor automóvel, especificamente ao nível do desenvolvimento de veículos híbridos e totalmente elétricos, elevaram, de forma drástica, as necessidades da indústria em termos de cadência de produção e complexidade dos sistemas auxiliares de transformação e tratamento de sinais elétricos, como é o caso dos sistemas elétricos passivos. Deste modo, as recentes gamas de veículos elétricos/híbridos requerem uma eletrónica de potência robusta, ao nível dos requisitos elétricos, mecânicos e térmicos, sendo este um fator fundamental para o seu elevado desempenho [1].

Os condensadores atualmente disponíveis no mercado necessitam de uma constante intervenção com o objetivo de melhorar continuamente o seu desempenho e reduzir as suas limitações, desenvolvendo-se novos conceitos de condensadores, como é o caso dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado para a indústria automóvel elétrica, que permitem alcançar um novo patamar de performance numa aplicação onde as limitações de espaço e peso evidenciam-se como relevantes. Assim sendo, no desenvolvimento dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado, torna-se essencial a investigação em torno das tecnologias de ligação dos elementos capacitivos (bobines) e terminais laminados que constituem o condensador, bem como ao nível dos materiais utilizados nas diversas etapas de produção deste tipo de componentes [1].

Tal como foi referido no capítulo anterior, atualmente a Vishay® utiliza na cadeia produtiva dos seus condensadores os processos de brasagem fraca e soldadura por pontos, sendo o primeiro o mais utilizado. Na maioria dos componentes fabricados, a ligação é, ainda, realizada manualmente, o que resulta num aumento significativo do tempo de operação e consequente diminuição das cadências de produção, solução pouco competitiva face ao mercado atual.

Deste modo, serão estudadas tecnologias de ligação de metais passíveis de serem automatizadas, tendo em consideração a combinação de materiais/processos que possibilitam o fabrico de condensadores de elevada performance elétrica, sem desprezar as suas propriedades mecânicas [1]. Assim, serão explorados os processos de brasagem, ligação por pontos, laser e ultrassons, com o objetivo de se identificar qual o processo, ou combinação de processos, que melhor responde as necessidades da cadeia produtiva da empresa, quer em termos de materiais utilizados, como de parâmetros de processo. Todas as tecnologias referenciadas já são atualmente utilizadas na indústria de componentes elétricos e eletrónicos, apresentando cada uma delas diferentes vantagens e limitações. Ao longo deste capítulo serão apresentados cada um destes processos, procedendo-se no final à comparação entre os mesmos.

3.2 Brasagem

O termo “brasagem” refere-se ao processo de ligação de dois elementos metálicos recorrendo a um metal de adição no estado líquido e cuja temperatura de fusão é inferior à dos metais base. Deste modo, os elementos metálicos base não participam por fusão na constituição da junta [12, 13].

Neste processo, o metal de adição é colocado na junta entre os materiais a ligar e, em seguida, a sua temperatura é elevada até uma temperatura que permita a sua fusão. Ao arrefecer, o material de adição vai solidificar, provocando a união entre os materiais a ligar por um processo de difusão entre este e os materiais base [1, 13, 14].

O processo de brasagem pode ser caracterizado segundo a temperatura de fusão do metal de adição. Quando esta é superior a 450 °C, o processo denomina-se por brasagem forte e quando a temperatura de fusão do metal de adição é inferior a 450 °C, o processo designa-se por brasagem fraca ou soldagem [12, 15].

A temperatura de fusão da solda deve, no entanto, ser no mínimo 50 °C inferior à temperatura de fusão dos elementos metálicos a unir. Este facto resulta na vantagem de materiais com diferentes pontos de fusão poderem ser ligados através do processo de brasagem, o que não se verifica noutros processos de soldadura [13].

Na brasagem, em oposição ao recomendado na soldadura, a peça deve ser aquecida uniformemente, podendo ser utilizados inúmeros métodos de aquecimento, tais como banho de sais, forno, chama oxi-gás (oxiacetilénica), indução de alta frequência e resistência elétrica [15].

Relativamente ao metal de adição, este deve “molhar” a superfície das partes a ligar, podendo ser necessário o uso de fluxos, deve promover uma boa ligação por difusão com o metal base sem a formação de compostos intermetálicos frágeis e, tal como foi referido anteriormente, o seu ponto de fusão tem que ser inferior ao dos elementos metálicos base [12, 16].

Recentemente, têm sido desenvolvidos novos processos de brasagem como, por exemplo, a brasagem por indução. Neste processo, uma bobine de indução aquece localmente a zona de ligação, fundindo somente o material de brasagem sem provocar um sobreaquecimento dos materiais metálicos a ligar. Estes progressos tendem a colmatar algumas limitações demonstradas pela tecnologia de brasagem, podendo inclusive viabilizar a sua automatização e conseqüente produção em larga escala [1, 17].

Nos parágrafos seguintes serão abordados pormenorizadamente os fundamentos do processo de brasagem, assim como as ligas, os fluxos e os métodos de aquecimento utilizados na brasagem fraca, tecnologia amplamente utilizada na indústria eletrónica.

3.2.1 Fundamentos do Processo de Brasagem

O princípio chave do processo de brasagem centra-se na penetração por capilaridade do metal de adição, no estado de fusão, na junta criada [13, 14]. Este escoamento do metal de adição através do espaço da junta depende da tensão superficial do sistema. Deste modo, a velocidade de penetração depende da resistência ao movimento do fluido e, ainda, de uma propriedade denominada por molhagem, que caracteriza a ação entre o metal de adição e o metal base [12, 16].

Considerando uma distância de progressão do metal no estado líquido (dx) e a tensão superficial na interface sólido/líquido para os metais em questão (S_{sl}), para uma largura igual à unidade, a força nas duas interfaces gerada pela tensão superficial será igual a $2 \cdot dx \cdot S_{sl}$ [12].

Sendo $2 \cdot dx \cdot S_s$ a força existente anteriormente à molhagem, correspondente à tensão superficial do sólido, e sabendo que para o líquido avance a distância dx é necessário que a energia livre do sistema diminua, pode-se afirmar que [12]:

$$2 \cdot dx \cdot S_s > 2 \cdot dx \cdot S_{sl} \quad (3.1)$$

Ou ainda,

$$S_s - S_{sl} > 0 \quad (3.2)$$

O que significa que a tensão superficial do sólido tem que ser superior à tensão superficial na interface sólido/líquido. Estas tensões superficiais são, frequentemente, difíceis de calcular, podendo ser avaliadas indiretamente a partir da relação entre elas. Na figura 11, apresentada em seguida, é visível essa relação.

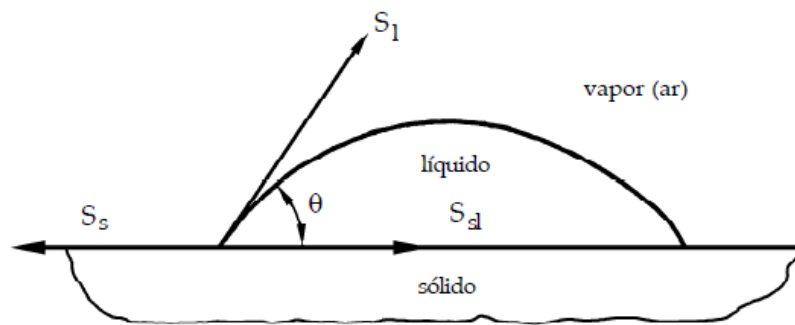


Figura 11 - Relação entre as Tensões Envolvidas no Processo de Brasagem [12].

Através da análise da figura acima apresentada, é possível relacionar as diferentes tensões superficiais recorrendo à seguinte relação [12]:

$$S_s = S_{sl} + S_l \cdot \cos(\theta) \quad (3.3)$$

Ou ainda,

$$S_s - S_{sl} = S_l \cdot \cos(\theta) \quad (3.4)$$

Onde θ representa o ângulo de contacto e S_l a tensão superficial do líquido em contacto com o ar. A equação (3.3) traduz, deste modo, a condição que tem de ser cumprida quando um líquido em contacto com um sólido atinge o equilíbrio.

Numa operação de brasagem, para que ocorra molhagem completa, tem de se verificar a condição $\theta = 0$, ou seja, $\cos(\theta) = 1$ [12]. Assim sendo, a equação (3.3) fica:

$$S_s = S_{sl} + S_l \quad (3.5)$$

Por outro lado, para que ocorra penetração por capilaridade e conseqüente enchimento da junta,

$$S_s - S_{sl} > 0 \quad (3.6)$$

$$\therefore S_l \cdot \cos(\theta) > 0 \quad (3.7)$$

E sendo $S_l > 0$ e $\cos(\theta) > 0$, podemos concluir que $\theta < 90^\circ$. Deste modo, o ângulo de contacto determina se se verifica penetração do metal de adição no estado de fusão, não indicando, no entanto, o modo como essa penetração ocorre (velocidade de progressão) [13, 14].

A união entre a solda e os materiais metálicos a ligar é obtida por difusão, devido à elevada temperatura a que ocorre o enchimento de junta. Assim sendo, verifica-se a difusão de

elementos metálicos do material de adição para os materiais base e vice-versa. Após a estabilização da área de difusão, constata-se a formação de uma união que pode possuir maior resistência do que os próprios materiais que se pretendiam ligar [13]. A figura 12 esquematiza o processo de ligação referido ao longo deste parágrafo.

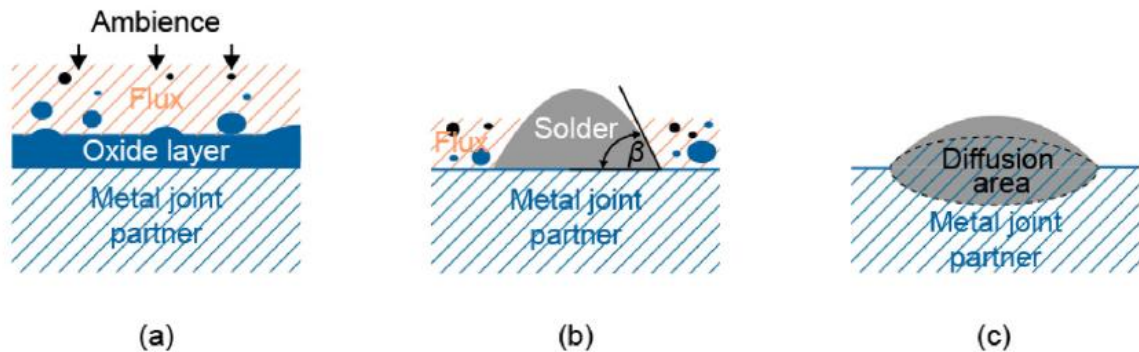


Figura 12 - Etapas do Processo de Brasagem: a) Remoção da camada de óxidos recorrendo a fluxos adequados; b) Penetração do metal de adição (solda) no estado líquido; c) Ligação por difusão [13].

Durante o fenómeno de difusão, como existe a alteração da composição do metal de adição no estado líquido, das suas características de molhagem e, até mesmo da sua temperatura de solidificação, pode ocorrer uma solidificação prematura e interrupção da progressão do metal líquido. Todas estas contrariedades tornam o processo de enchimento da junta num fenómeno complexo [12, 14].

Se considerarmos um escoamento contínuo e desprezando a possibilidade de alteração dos teores de elementos de liga no metal de adição com o aumento da sua temperatura, o tempo de enchimento de uma junta na posição horizontal pode ser calculado através da equação (3.8).

$$t = \frac{3 \cdot \eta}{S_1 \cdot \cos(\theta) \cdot D} \cdot l^2 \quad (3.8)$$

Na equação (3.8), acima apresentada, a varável l representa o comprimento da junta e D a largura da mesma. Através da sua análise podemos verificar que o tempo de enchimento diminui à medida que aumenta o afastamento da junta e a tensão superficial e diminui o ângulo de contacto [16].

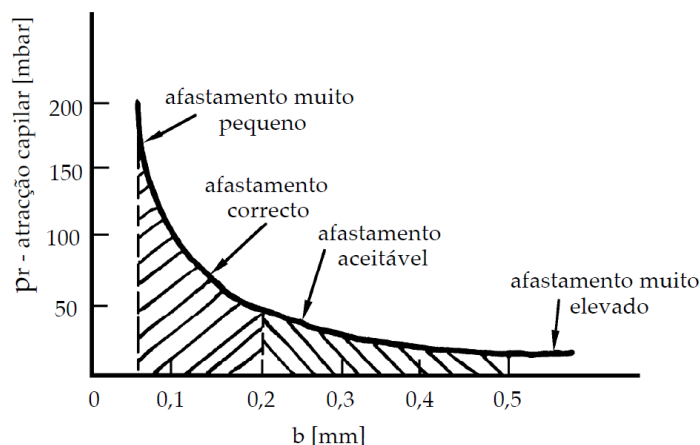


Figura 13 - Variação da Atração Capilar com o Afastamento da Junta [12].

Na figura 13 está representada a variação da atração capilar com o afastamento da junta. Considerando afastamentos entre 0,05 e 0,5 mm o enchimento da junta ocorre automaticamente, por efeito das forças de atração capilar, imediatamente após o contacto do metal de adição com a junta.

3.2.2 Brasagem Fraca

A brasagem fraca, ou soldagem, é uma tecnologia de ligação de metais utilizada no processo de fabrico de componentes eletrónicos passivos, como é o caso dos condensadores [18, 19]. Os testes experimentais realizados industrialmente, em termos de propriedades elétricas e mecânicas, indicam que a qualidade dos componentes eletrónicos produzidos depende, numa primeira instância, da qualidade da operação de soldagem [20].

Neste processo, como a temperatura de fusão do metal de adição é relativamente baixa (inferior a 450 °C), é possível ligar metais heterogéneos sem que se verifique a formação de compostos intermetálicos, evitando-se a ocorrência de transformações metalúrgicas indesejáveis. Algumas das desvantagens conectadas a esta tecnologia prendem-se com o facto de as juntas não poderem ser utilizadas a temperaturas elevadas e obter-se baixa resistência mecânica em comparação com a obtida utilizando o processo de brasagem forte [12, 21, 22].

Na operação de soldagem, as duas partes metálicas a ligar devem ser montadas com um espaçamento da ordem dos 0.08 a 0.13 mm, de maneira a permitir que a solda em fusão penetre na junta por efeito de capilaridade [12, 13]. As duas superfícies devem estar isentas de sujidades e de óxidos, recorrendo-se ao uso de um fluxo durante a operação com o objetivo de eliminar os óxidos presentes e evitar a sua formação durante o aquecimento. Este aquecimento pode ser obtido utilizando ferros de soldagem, uma chama oxiacetilénica (figura 14), por indução ou resistência, em forno, ou recorrendo a um laser [13].

A figura 14 esquematiza o processo de brasagem fraca por chama.

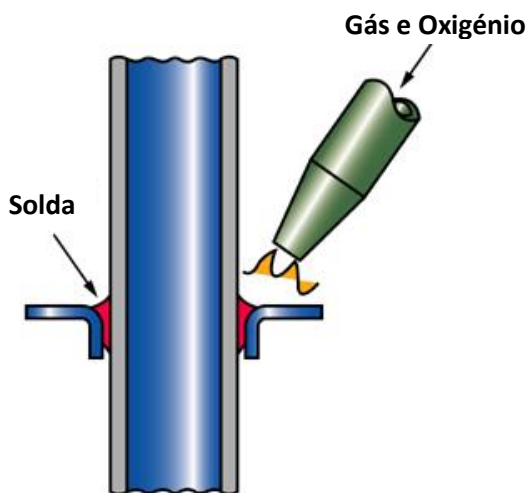


Figura 14 - Representação Simplificada do Processo de Brasagem Fraca por Chama (adaptado de [21]).

3.2.3 Parâmetros do Processo

Os principais parâmetros que influenciam o processo de brasagem são a temperatura, o tempo de brasagem, a natureza do material de adição, a quantidade de material de adição e de fluxo utilizado e a pressão de contacto [1]. Estes parâmetros vão influenciar tanto a microestrutura como as propriedades mecânicas da junta obtida [23]. O tempo de arrefecimento após realização do processo e o modo como este é efetuado (em forno ou ar) também terão impacto nestas propriedades [24]. Com o intuito de controlar a qualidade da junta de soldadura produzida, é importante ter em consideração a capacidade de molhagem das superfícies a ligar, o afastamento entre estas, a composição da solda e o tipo de fluxo adequado [20].

A temperatura a que se realiza a brasagem depende diretamente do material de adição utilizado, dado que este tem de ser aquecido até uma temperatura que permita a sua fusão. No

fabrico de componentes elétricos, esta temperatura não pode ser excessiva para não danificar outros materiais constituintes do componente como, por exemplo, os filmes de polipropileno metalizado no caso dos condensadores [19, 23]. Assim, são preferíveis temperaturas de brasagem reduzidas, dentro do possível, e taxas de arrefecimento rápidas, com o intuito de produzir juntas com melhores resistências ao corte, ductilidade e resistências ao desgaste [24].

Devido à sua elevada dependência de inúmeros fatores, em termos práticos, a temperatura do processo difere usualmente da temperatura referenciada nos equipamentos de brasagem. Na soldagem por contacto, esta temperatura diminui com a redução da temperatura dos ferros de brasagem durante intervalo de tempo entre soldaduras, com a diminuição do diâmetro da ferramenta utilizada e, ainda, com a redução da condutividade térmica do material da haste [20].

3.2.4 Ligas Utilizadas

As ligas utilizadas como soldas no processo de brasagem fraca são, usualmente, constituídas tendo por base o sistema chumbo-estanho, destacando-se cinco composições habituais, estando a sua escolha dependente das necessidades requeridas na aplicação. Quanto mais elevado for o teor de chumbo (Pb) menor será o custo associado à liga, mas as características de molhagem e as propriedades da ligação da mesma diminuirão [12, 21].

Deste modo, são de realçar as seguintes ligas de chumbo-estanho e respetivas composições [12]:

- Liga A (95 – 100 % Estanho) – Utilizadas para trabalhos de qualidade, justificando-se o custo elevado da liga associado à elevada pureza;
- Liga B (60 % Estanho – 40 % Chumbo) – Corresponde à composição eutética, como se pode comprovar pelo diagrama de fase presente na figura 15. Esta composição permite obter um ponto de fusão mais reduzido (cerca de 183 °C) e uma resistência ao corte mais elevado. Este tipo de ligas são amplamente utilizadas na brasagem de componentes eletrónicos;
- Liga C (50 % Estanho – 50 % Chumbo) – Utilizadas em aplicações gerais;
- Liga D (40 % Estanho – 60 % Chumbo) – Utilizadas em aplicações de baixo custo, por exemplo: latas, representando a liga mais barata das consideradas;
- Liga E (30 % Estanho – 70 % Chumbo) – Utilizadas em trabalhos de pichelaria e em componentes de automóveis. Devido a possuírem um intervalo de solidificação elevado, da ordem dos 80 °C, estas ligas permitem a sua moldação à forma pretendida, detendo uma consistência pastosa no intervalo de temperatura referido. Devido ao elevado teor de chumbo na liga, as suas propriedades de molhagem são reduzidas, sendo necessária a aplicação de uma camada de estanho na junta antes de se iniciar a brasagem fraca.

Industrialmente, são ainda utilizadas outras ligas contendo elevado teor de bismuto (cerca de 50 %), possuindo temperaturas de fusão mais reduzidas em comparação com as ligas à base de chumbo-estanho geralmente utilizadas [12, 13, 21].

No diagrama de fases apresentado em seguida (figura 15) são evidenciadas as diferentes composições para o sistema chumbo-estanho referidas ao longo dos últimos parágrafos.

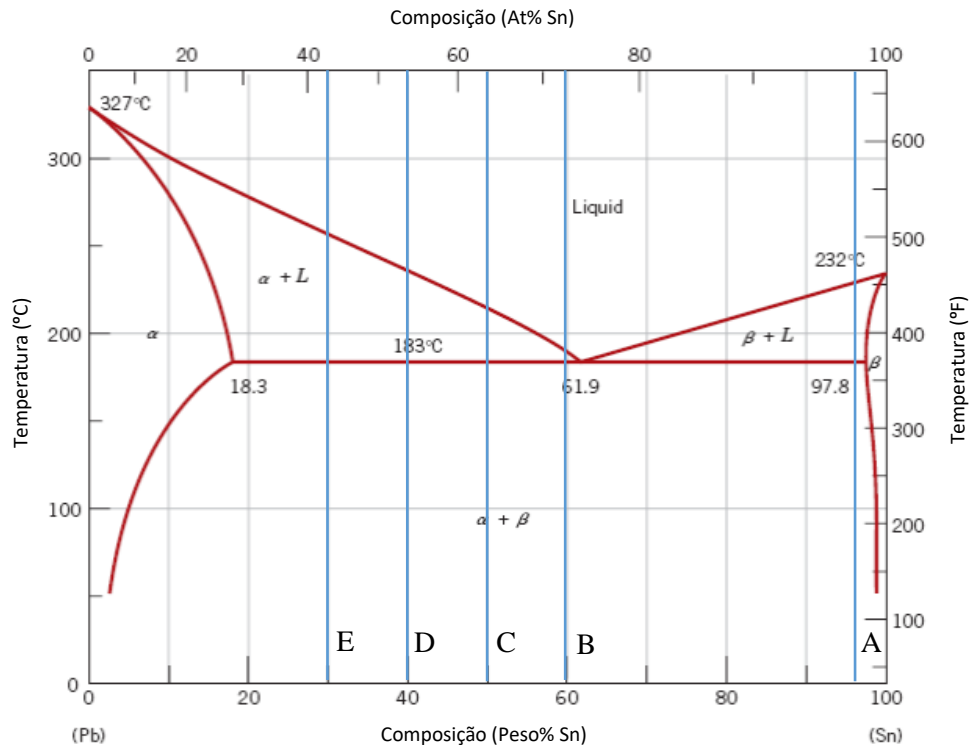


Figura 15 - Diagrama de Fases do Sistema Chumbo-Estanho e Respetivas Composições das Soldas mais Utilizadas no Processo de Soldagem (adaptado de [25]).

Atualmente, as soldas à base de chumbo têm vindo a ser gradualmente substituídas por alternativas menos tóxicas e ambientalmente mais amigáveis na produção de componentes eletrónicos. Alguns dos materiais utilizados como substitutos do chumbo são o cobre (Cu), o estanho (Sn) e a prata (Ag), embora outros metais possam ser utilizados, como é o caso do bismuto (Bi), do zinco (Zn) e do antimónio (Sb) [21, 26].

Uma liga usualmente utilizada como solda no fabrico de componentes elétricos é a SAC, cujo nome deriva da sua composição à base de estanho, prata e cobre (Sn-Ag-Cu). Esta liga apresenta uma composição próxima da composição eutética ternária do sistema estanho-prata-cobre, possuindo cerca de 3 a 4 % de prata, 1 % de cobre e pelo menos 95 % de estanho, possuindo uma temperatura de fusão próxima dos 221 °C [21, 24]. As juntas de solda baseadas na constituição eutética do sistema Sn-Ag/Cu, usando como material base o cobre, exibem três características microestruturais distintas [24]:

- Uma estrutura eutética (Ag_3Sn intermetálica numa matriz de estanho essencialmente pura);
- Dendrites $\eta\text{-Cu}_6\text{Sn}_5$ no “*bulk solder*” devido a dissolução do cobre dos substratos;
- Uma camada intermetálica Cu-Sn na interface da junta.

O diagrama de fases do sistema ternário estanho-prata-cobre, que sustenta a informação referida no parágrafo anterior, pode ser observado na figura 16, exibida em seguida.

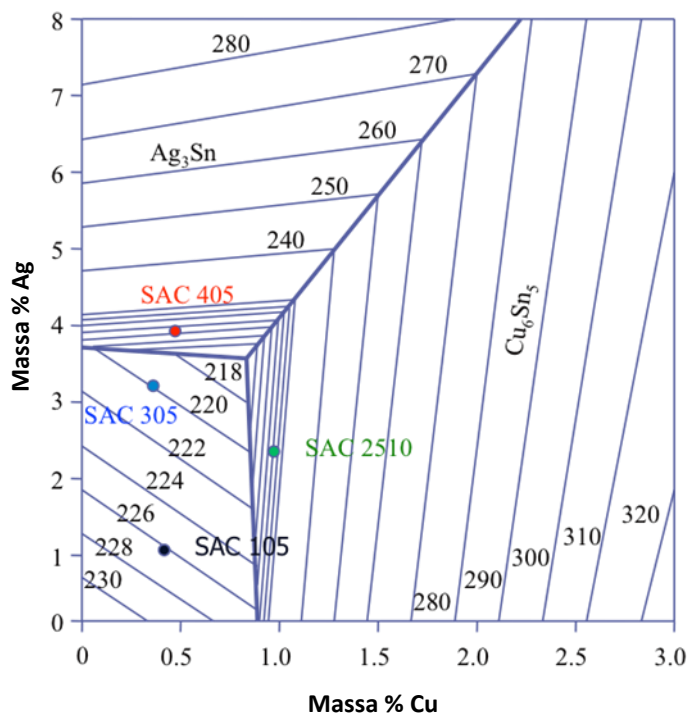


Figura 16 - Diagrama de Fases do Sistema Ternário Estanho-Prata-Cobre [27].

Quando comparada com as ligas à base de chumbo-estanho, a solda SAC confere melhores propriedades mecânicas à junta, exibindo uma ótima molhagem na brasagem de cobre ou ligas de cobre e permitindo um maior espectro de aplicações, nomeadamente ao nível dos componentes elétricos/eletrônicos para automóveis [13, 24].

Geralmente, o processo de brasagem fraca é utilizado na ligação de condutores na indústria eletrônica, realizando-se a ligação entre dois materiais dissimilares como o alumínio (Al) e o cobre (Cu). As grandes diferenças no comportamento térmico destes materiais estão relacionadas com a sua temperatura de fusão, com a temperatura de fusão dos seus óxidos, com a sua condutividade térmica e com o seu coeficiente de expansão linear [22]. Esta informação pode ser consultada na tabela 1, assim como os respetivos valores no caso do alumínio e do cobre.

Tabela 1 - Propriedades Térmicas do Alumínio e do Cobre (adaptado de [22]).

Propriedades	Alumínio	Cobre
Massa Específica ρ (kg/m ³)	2700	8900
Ponto de Fusão T_f (°C)	660	1083
Ponto de Ebulição T_w (°C)	2519	2567
Ponto de Fusão dos Óxidos (°C)	2050 (Al ₂ O ₃)	1064 (Cu ₂ O) 1336 (CuO)
Coefficiente de Expansão Linear α (1/K)	$23.6 \cdot 10^{-6}$	$16.7 \cdot 10^{-6}$
Condutividade Térmica λ (W/mK)	237	397

Devido à presença de óxidos de alumínio com elevadas temperaturas de fusão (2050 °C) quando comparadas com a temperatura de fusão do alumínio puro (660 °C), este elemento torna-se mais difícil de soldar do que o cobre. Assim, na brasagem de juntas entre alumínio e cobre,

tanto as soldas como os fluxos utilizados devem ser escolhidos como se fossem especificamente para brasagem de alumínio. Este facto pode levantar problemas relacionados com a molhagem e o fator de propagação no cobre. Na soldagem destas ligas combinadas são utilizadas soldas constituídas por estanho-zinco (Sn-Zn), zinco-cádmio (Zn-Cd) e zinco-alumínio (Zn-Al). As soldas à base de zinco com adição de alumínio até 15 % em peso demonstram ser opções interessantes na brasagem destes materiais, tendo o seu uso constantemente aumentado [22].

Na tabela 2 são expostas três soldas, geralmente utilizadas, à base de zinco com adição de alumínio, tendo estas respetivamente 2, 4 e 15 % de alumínio (em peso). O espectro das temperaturas de fusão das soldas é, também, apresentado na tabela, variando entre os 382 e os 450 °C. É de referir que o sistema alumínio-zinco atinge uma composição eutética para 5 % de alumínio, a uma temperatura de 382 °C [22]. O diagrama de equilíbrio para o sistema alumínio-zinco pode ser visualizado através da consulta do anexo L.

Tabela 2 - Composição das Soldas à Base de Zinco e Respetivas Temperaturas de Fusão (adaptado de [22]).

Designação de Solda <i>PN EN ISO 3677 - Ponto de Fusão (°C)</i>	Abreviatura	Composição Química (wt%)	
		Zn	Al
<i>S-Zn98Al2-382/407</i>	<i>L-ZnAl2</i>	98	2
<i>S-Zn96Al4-382/387</i>	<i>L-ZnAl4</i>	96	4
<i>S-Zn85Al15-382/450</i>	<i>L-ZnAl15</i>	85	15

Os estudos realizados por *Mirski et al* [22] no sentido de avaliar o comportamento destas soldas na ligação de juntas entre alumínio e cobre concluíram que, a molhagem do alumínio é bastante mais satisfatória do que a do cobre, sendo que a primeira otimiza-se para um ângulo de contacto de 6° conseguido com todas as soldas referidas e a segunda otimiza-se para um ângulo de 35°, conseguindo apenas recorrendo à solda *L-Zn-Al15* [22]. No subcapítulo 3.2.1, relativo aos fundamentos do processo de brasagem, foi referido que a facilidade de penetração por capilaridade do material de adição aumenta com a diminuição do ângulo de contacto.

Os resultados obtidos para o fator de propagação seguem a mesma tendência do que os alcançados para a molhagem, maximizando-se recorrendo à solda *L-ZnAl15*. Para esta solda, o resultado obtido foi de 1025 mm² no caso do alumínio e 246 mm² para o cobre. Nas soldas à base de zinco, este fator aumenta com o aumento da percentagem de alumínio, tanto para o alumínio como para o cobre [22].

Os testes de soldadura efetuados a 400 °C demonstram, ainda, a ocorrência do fenómeno de difusão na fronteira do material de adição com o cobre, conseguindo-se juntas soldadas com tensões de corte da ordem dos 30 MPa. Verificou-se também o aumento desta propriedade com o aumento da percentagem de alumínio nas soldas.

3.2.5 Fluxos Utilizados

Os fluxos são responsáveis pela eliminação dos óxidos existentes nas superfícies metálicas a ligar e pela prevenção da ocorrência de oxidação durante o processo de brasagem, contribuindo para a otimização das condições do processo [13, 14, 21].

Quando o metal de adição é constituído tendo por base o sistema Chumbo-Estanho, o fluxo é formado por cloreto de zinco com 10% de cloreto de amónia, de maneira a diminuir o

ponto de fusão. Uma das principais desvantagens deste tipo de fluxo é a sua elevada corrosividade, pelo que deve ser removido imediatamente com água quente [12].

Em aplicações onde não seja possível a remoção do fluxo, por exemplo em componentes eletrónicos, o fluxo utilizado deve ser não corrosivo. Este tipo de fluxo, geralmente composto à base de resinas, possui um reduzido poder de limpeza, tendo apenas uma função de proteção durante o processo de ligação. No sentido de melhorar a capacidade de limpeza deste tipo de fluxos, as resinas podem ser ativadas com hidrocloreto de hidrazina ou hidrocloreto de anilinas. Aquando da utilização destes compostos, é necessário promover um aquecimento controlado e adequado devido à libertação de ácido hidróclorídrico com o aumento da temperatura. Dado que os resíduos gerados são corrosivos, deve-se promover uma decomposição total dos compostos durante o aquecimento [12, 22].

3.2.6 Forma do Material de Adição

O material de adição utilizado no processo de brasagem pode encontra-se sob a forma de barra, fio, fio tubular com fluxo, fita ou, préformas. Este material é geralmente cortado com a forma da junta, colocado na posição pretendida e em seguida aquecido [15]. Em aplicações onde é necessário efetuar juntas múltiplas podem, ainda, utilizar-se banhos de solda em fusão. Para algumas aplicações, onde é essencial a automatização do processo de brasagem, o material de adição pode encontrar-se sob a forma de uma pasta resultante da mistura de pó metálico com fluxo, facilitando a sua colocação em posição na junta [1, 18, 19]. Na indústria eletrónica, nomeadamente na produção de condensadores, o material de adição é geralmente fornecido em forma de fio junto aos componentes a soldar, sendo fundido quando em contacto com um ferro de brasagem aquecido (brasagem manual) [1]. Nos últimos anos, a utilização de préformas tem vindo a aumentar, nomeadamente na união de componentes em placas de circuitos, sendo estas uma solução versátil para aplicações de difícil montagem e com cadências produtivas elevadas.

3.2.7 Métodos de Aquecimento

Na brasagem fraca, são vários os tipos de fonte de calor que podem ser utilizados. Dependendo da facilidade em controlar o fluxo de calor e da complexidade da aplicação, esta operação pode ser realizada manualmente ou de forma automática [16].

A brasagem manual permite uma maior flexibilidade de operação e um custo reduzido associado ao processo [21]. Em contrapartida, são necessários operadores qualificados e experientes, dado que o fator humano interfere diretamente na qualidade e consistência do processo. Deste modo, a realização do processo de brasagem de forma manual acarreta alguns custos e contrapartidas relacionados com o controlo de qualidade das juntas efetuadas, originando, adicionalmente, cadências produtivas reduzidas [16, 21].

Esta tecnologia pode ser efetuada de forma automática recorrendo a instalações permanentes que utilizam métodos de aquecimento como, por exemplo, resistências elétricas, ultrassons, feixes *lasers* ou equipamentos de indução. A principal desvantagem associada ao uso destes equipamentos relaciona-se com o elevado capital associado à sua implementação, operação e manutenção, sendo somente viáveis para grandes produções ou em situações em que a reprodutibilidade de características é essencial. Em contrapartida, estas soluções permitem uma redução significativa dos tempos de produção, contribuindo para a melhoria da eficiência do processo e para a diminuição da variabilidade deste, possibilitando um controlo de qualidade mais eficaz [16, 21]. A substituição da brasagem manual por este tipo de equipamentos, recorrendo a um feixe laser como fonte de calor, por exemplo, evidencia-se como uma necessidade para aumentar a qualidade e a eficiência do processo produtivo dos condensadores de filme metalizado.

3.3 Soldadura Por Pontos

A tecnologia de soldadura por pontos é um processo de soldadura por fusão e por resistência, no qual duas peças sobrepostas são ligadas através de pontos de soldadura gerados pelo calor obtido por resistência à passagem de corrente através das peças, que são mantidas em posição devido a força de compressão exercida pelos elétrodos [28]. Deste modo, as peças a ligar são parte integrante do circuito elétrico [1]. Neste processo não é necessária a utilização de fluxos ou materiais de adição [28].

Na zona onde é concentrada a passagem de corrente, as superfícies a ligar são aquecidas por um impulso de corrente de elevada intensidade e baixa tensão durante um curto período de tempo na ordem dos 0,01 aos 0,63 segundos, formando-se a soldadura. Acabada a passagem de corrente, os elétrodos são mantidos em posição sendo aplicada a mesma força de compressão até ocorrer a solidificação completa do ponto de soldadura [29, 30]. Na figura 17 encontra-se esquematizado o processo de soldadura por pontos. Nesta ilustração, os elétrodos encontram-se em faces opostas das peças a unir, embora também possam ser dispostos em paralelo relativamente a uma das superfícies, situação usual na soldadura de terminais em condensadores de filme metalizado.

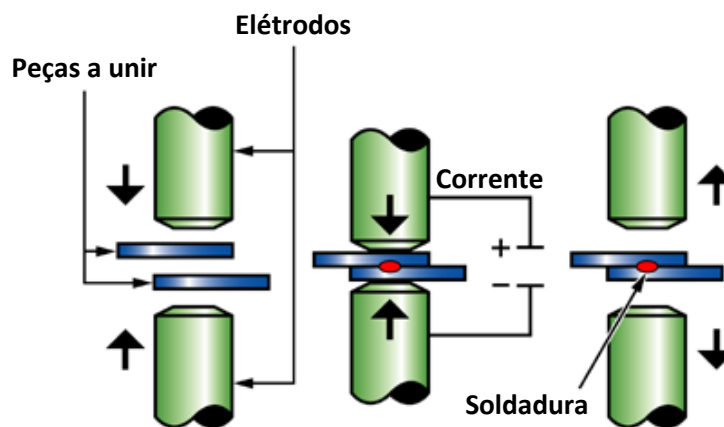


Figura 17 - Representação Simplificada do Processo de Soldadura por Pontos (adaptado de [28]).

O ponto de soldadura é constituído por um núcleo de material metálico aquecido até à sua fusão, no local de contacto entre as duas peças. Após a solidificação, constitui uma união localizada entre elas [31].

O aquecimento produzido na zona de união é obtido por efeito de Joule [30, 32]:

$$\dot{Q} = I^2 * R \quad (3.9)$$

Onde \dot{Q} representa o calor transferido por unidade de tempo (J/s), I a intensidade da corrente (A) e R a resistência na zona de interface que funde e origina a zona soldada entre as peças metálicas a ligar [30, 32].

Esta tecnologia, quando utilizada para soldar materiais com elevada condutividade térmica, como é o caso do alumínio e do cobre usualmente utilizados na indústria de componentes elétricos/eletrónicos, necessita de correntes elétricas elevadas, o que resulta num aumento do custo dos equipamentos [1]. As intensidades de corrente utilizadas para se conseguir o aquecimento por efeito de Joule podem ir até aos 100.000 Amperes. Como a resistência dos componentes a ligar é geralmente reduzida, estas intensidades conseguem-se para tensões relativamente baixas, da ordem de 1 a 20 Volts [29].

As fontes de corrente usualmente usadas são transformadores monofásicos. Quando são necessárias intensidades de corrente de elevada ordem, como, por exemplo, na soldadura de materiais com alta condutividade térmica ou elevada espessura, é exigida a utilização de transformadores trifásicos [29].

No sentido de reduzir a corrente elétrica necessária, os componentes a serem soldados podem ser revestidos por eletrodeposição com outros materiais, como ouro (Au), prata (Ag) ou níquel (Ni). Estes elementos permitem melhorar as características térmicas, elétricas e mecânicas da ligação. Neste tipo de ligações, a tecnologia utilizada é uma combinação dos processos de soldadura por pontos e brasagem, dado que o material depositado vai funcionar como material de adição, embora a fonte de calor seja causada pelo sistema de soldadura por pontos [1, 33].

Uma das grandes vantagens da soldadura por pontos relativamente à brasagem prende-se com o facto de ser um processo fácil de automatizar, permitindo que seja integrado em linhas de produção em série, sem necessidade de operadores qualificados. As taxas de soldadura podem variar entre 12 e 180 pontos por minuto [28]. O custo desta tecnologia, quando aplicada em produções elevadas, é considerado baixo, sendo o custo dos equipamentos dependente da sua sofisticação e complexidade, o que pode resultar em investimentos iniciais elevados [1].

3.3.1 Fundamentos da Soldadura Por Pontos

Resistências Elétricas Envolvidas no Processo

No processo de soldadura por pontos, sendo esta uma soldadura por resistência, podem ser consideradas as seguintes resistências [29, 34, 35]:

- Resistência de contacto entre os eléctrodos e as peças;
- Resistência de contacto entre os componentes a ligar;
- Duas resistências óhmicas (elétricas) dependentes do material das peças atravessadas pela corrente elétrica.

A concentração localizada de calor necessária à formação do ponto de soldadura resulta da ação simultânea da temperatura e pressão. A temperatura vai influenciar tanto as resistências de contacto como as resistências óhmicas, enquanto a pressão apenas faz variar as primeiras [35, 36].

As resistências de contacto dependem de vários fatores, destacando-se a natureza dos materiais metálicos a ligar e suas propriedades, o acabamento superficial dos mesmos, a pressão de contacto a que estão submetidas as superfícies em contacto e a temperatura [34, 36, 37].

Quanto à natureza dos materiais, propriedades como a condutividade térmica e o calor específico vão influenciar a capacidade de difusão térmica do material e, conseqüentemente, o aumento de temperatura originado pela passagem de corrente. A resistividade elétrica do componente também vai variar com a temperatura. A dureza e resistência à compressão do material, tendo em conta as pressões exercidas pelo eléctrodo, vão condicionar a área real de contacto e, deste modo, a resistência de contacto [29, 31, 35].

Relativamente ao acabamento superficial, fatores como a rugosidade, o estado microgeométrico e o grau de contaminação das superfícies influenciam a resistência elétrica de contacto [29, 36].

O aumento da força de compressão (pressão de contacto) provoca a diminuição da resistência elétrica de contacto, dado que provoca um aumento da secção real de contacto por cedência das micro-rugosidades [29, 35, 36]. Este parâmetro deve alcançar um valor mínimo que permita uma resistência de contacto entre chapas regular e uma resistência de contacto

elétrodo-chapa de valor reduzido, com o intuito de impossibilitar um aquecimento prévio prejudicial nesse local [31].

Por fim, o aumento da temperatura resulta na diminuição da resistência de contacto, uma vez que promove a plasticidade dos materiais e as micro-rugosidades cedem mais facilmente às pressões exercidas [31, 35, 36].

Na figura 18, apresentada em seguida, estão representadas as diversas resistências existentes no processo de soldadura por pontos.

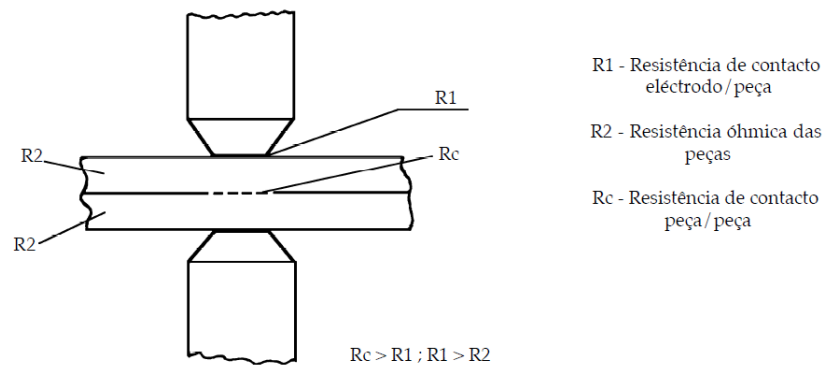


Figura 18 - Resistências Envolvidas no Processo de Soldadura por Pontos (adaptado de [29]).

Formação do Ponto de Soldadura

Na soldadura por pontos é necessário concentrar uma quantidade de calor na zona de contacto das duas peças que permita a formação de um núcleo de material fundido, de dimensões controladas e altura inferior à espessura da chapa. Deste modo, se o calor gerado for reduzido, ocorre apenas uma colagem, não existindo fusão do material. Se o calor produzido for exagerado, os elementos a ligar podem ser furados [29, 38, 39].

Neste processo, uma primeira descarga elétrica permite a eliminação dos óxidos e contaminantes das superfícies dos materiais a ligar e um segundo pulso é utilizado para soldar as peças [38, 39]. Após a eliminação dos óxidos superficiais, a temperatura eleva-se e a área afetada pelo calor aumenta. A temperatura da zona afetada pelo calor atinge o ponto de fusão do material e os elementos fundem-se formando um núcleo de soldadura [32, 39].

Tal como foi mencionado anteriormente, verificam-se resistências de contacto entre o eletrodo e a peça e entre as duas peças a ligar e estas diminuem com o aumento da pressão de contacto. Neste processo, interessa que a resistência entre as superfícies das peças seja elevada para promover uma boa soldadura enquanto a resistência entre o eletrodo e a peça deve ser o mais reduzida possível para evitar a colagem destes elementos [32, 35]. Dado que o eletrodo é constituído por um material bom condutor de eletricidade e calor, para a mesma pressão, a resistência entre o eletrodo e a peça é inferior à resistência peça-peça [31, 36].

A força de compressão é um parâmetro relevante na tecnologia de soldadura por pontos. Caso a força de compressão seja reduzida, gerar-se-á uma elevada resistência entre o eletrodo e a peça, formando-se uma fonte de calor nessa zona, que poderá prejudicar o efeito de concentração pretendido e o estado do eletrodo. Se a força de compressão for demasiado elevada, a resistência de contacto vai decair, tornando difícil a localização de calor na zona pretendida [29, 31, 32]. Assim sendo, a escolha de uma força de compressão adequada resulta do compromisso entre os efeitos referidos ao longo deste parágrafo.

A figura 19 exhibe o processo de formação de um ponto de soldadura, ilustrando a criação de um núcleo de material fundido no local de contacto entre as duas peças. Ao redor desta bolsa

de material, devido à elevada temperatura, o material encontra-se no estado pastoso [31, 32]. Dado que a corrente elétrica atravessa as peças a ligar, a força eletromagnética induzida provoca correntes de convecção no núcleo fundido. Este núcleo aumenta até à interrupção do fluxo de corrente. Em seguida, a refrigeração dos elétrodos é responsável pela solidificação do núcleo fundido [34].

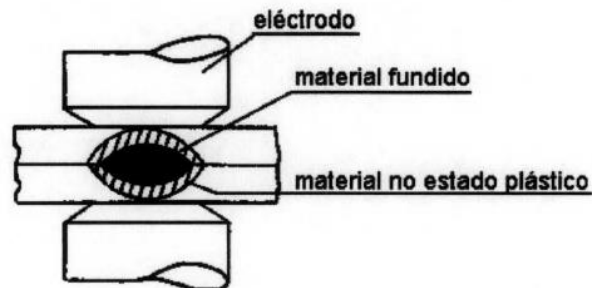


Figura 19 - Formação de um Ponto de Soldadura na Zona de Contacto entre Peças [31].

A maior libertação de calor, obtida por efeito de Joule, deve ser conseguida na zona de contacto entre as duas peças. Este efeito é bastante rápido e, aplicando uma intensidade de corrente adequada, à medida que a temperatura aumenta a resistência de contacto diminui, tornando-se nula quando os materiais a ligar atingem a fusão [34, 40]. Neste momento, apesar da resistência de contacto desaparecer, a resistência óhmica aumenta por efeito da temperatura e o calor continua a ser produzido no local pretendido [29, 31, 34].

A figura 20 exhibe a variação da resistência em função do tempo. Durante um curto intervalo de tempo, t_i , é a resistência de contacto entre as peças a responsável pela localização desejada de calor [31, 34]. Neste intervalo de tempo, dada a elevada intensidade de corrente inicial e o forte gradiente de calor, existe um espectro de temperaturas bastante amplo, que vai desde a temperatura do elétrodo, pouco superior à do ambiente, até à temperatura de fusão do material. Anulando-se a resistência de contacto na zona de separação, a resistência óhmica das zonas contíguas, a altas temperaturas, é responsável pela continuação da localização do calor. A diminuição da resistência no final da curva é justificada pelo aumento da secção do ponto de soldadura [29, 36].

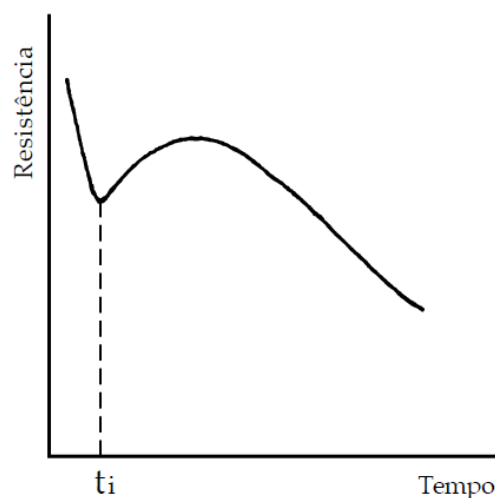


Figura 20 - Variação Esquemática da Resistência em Função do Tempo (adaptado de [29]).

Através da análise da variação das resistências envolvidas ao longo do processo, responsáveis pela formação do ponto de soldadura, conclui-se que a tecnologia de soldadura por pontos assenta numa resistência óhmica elevada, provocada pelo incremento da resistividade com o aumento da temperatura [29, 31].

3.3.2 Parâmetros de Soldadura

Os principais parâmetros envolvidos neste processo são a intensidade da corrente, o tempo de ligação, a composição do material, a superfície de contacto, o tipo de eléctrodo utilizado, a temperatura do eléctrodo e a força de compressão. Estes fatores vão influenciar a qualidade da soldadura obtida [1, 28, 37].

No diagrama apresentado na figura 21 é exibida a relação da intensidade da corrente com o tempo de soldadura para várias forças de compressão e espessuras de chapa. Neste diagrama são evidenciadas 3 zonas distintas: A, B e C. A primeira zona (A) é caracterizada por tempos de soldadura bastante longos, resultando numa diminuição da produtividade da operação. A zona B representa a zona de soldadura ótima, ou seja, é aquela onde o compromisso entre os valores da intensidade da corrente e o tempo de passagem da mesma é o melhor. Por fim, a zona C é marcada por uma intensidade de corrente excessiva, o que pode resultar na danificação das peças a soldar ou projeções de metal fundido [29].

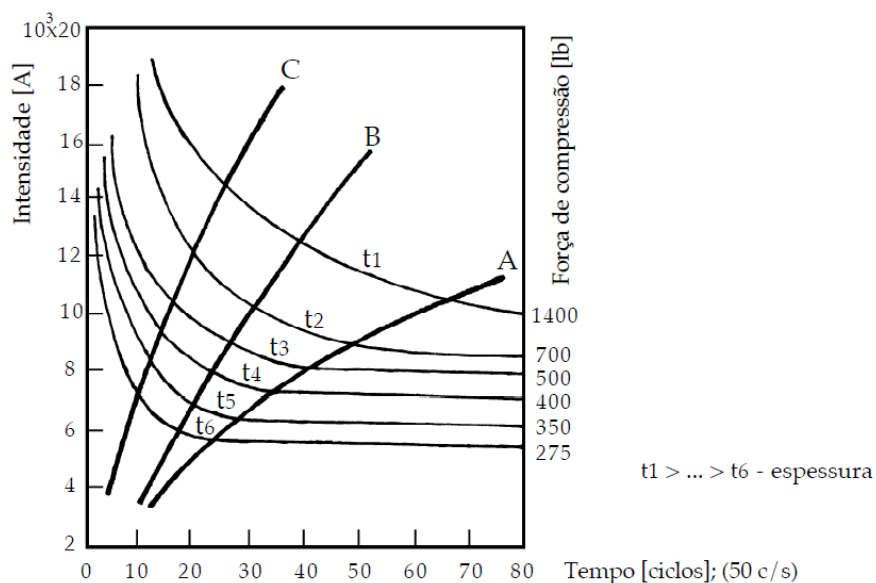


Figura 21 - Relação entre a Intensidade da Corrente e o Tempo de Soldadura (adaptado de [29]).

Na indústria de componentes eletrónicos são amplamente utilizadas as soldaduras rápidas, com elevadas intensidades, nomeadamente na soldadura de materiais com elevada condutividade térmica, como é o caso do alumínio (Al) e do cobre (Cu) e em soldaduras de localização muito precisas, imposta pela diferença de espessuras ou das temperaturas de fusão dos dois materiais [29 37].

A soldadura rápida apresenta como grandes vantagens um alto rendimento térmico e melhor conservação dos eléctrodos. Dada a rapidez da operação, as perdas de calor por condutividade são reduzidas, os eléctrodos sofrem menores deformações e conservam a sua dureza original, assegurando densidades de correntes constantes. No entanto, tempos de soldadura curtos podem influenciar as velocidades de arrefecimento, dado que o campo de temperaturas é menos uniforme e maior o gradiente de calor. Deste modo, na soldadura de materiais temperáveis pode verificar-se o aparecimento prejudicial de zonas martensíticas,

aumentando a resistência do material mas diminuindo a sua capacidade de sofrer deformações [29].

Para além da intensidade da corrente, outro parâmetro a ter em conta é o estado da superfície das peças a ligar, dado que este influencia a resistência de contacto entre as peças. A rugosidade das superfícies, a presença de calamina, massas lubrificantes ou impurezas são fatores que afetam esta resistência. Assim sendo, previamente à realização do processo de soldadura por pontos, o estado superficial dos componentes deve ser controlado [29, 31].

Por fim, a força de compressão é outro dos parâmetros que requerem um controlo apertado durante o processo de soldadura por pontos, tendo uma importância vital mesmo durante o período de arrefecimento da soldadura. A aplicação de pressões mais elevadas no período de arrefecimento da soldadura obriga a que o material adjacente à zona de contacto siga a contração, eliminando possíveis defeitos relacionados com a formação de poros, rechupes, tensões residuais ou aparecimento de fissurações [29, 31].

Na tabela 3, é apresentado o diâmetro do ponto de soldadura necessário em função da espessura a soldar e do material da peça. Nesta tabela, são ainda referenciados os parâmetros intensidade de corrente, tempo de soldadura e força de compressão requeridos para se realizar uma soldadura eficaz em cada um dos pares de materiais/espessuras considerados. Cada um destes parâmetros aumenta com o incremento da espessura da chapa, para cada material, como seria de esperar [29].

Tal como é possível constatar, para materiais com elevada condutividade térmica e elétrica, como é o caso do alumínio, são necessárias intensidades de corrente mais elevadas para soldar a mesma espessura de chapa. Em oposição, o aço inox, por ser o material menos condutor térmico e elétrico considerado na tabela, é o que requer menor intensidade de corrente para soldar por pontos a mesma espessura de chapa [29, 40].

Tabela 3 - Valores dos Parâmetros de Soldadura por Pontos para Diferentes Materiais e Espessuras (adaptado de [29]).

Espessura da Chapa [mm]	Intensidade da Corrente [A]	Tempo de Soldadura [ciclos]	Força de compressão [kg]	Diâmetro do Ponto [mm]
Aço inox:				
0,5	3200	3	140	2,5
1,5	9000	8	450	5,6
3	16000	16	1100	8,5
Aço macio:				
0,5	6000	5	100	3,5
1,5	12000	12	330	6,5
3	18500	20	600	8,5
Alumínio:				
0,5	18000	4	140	3
1,5	34000	12	350	6
3	63000	15	650	9

3.3.3 Materiais Soldáveis por Pontos

A adequação de um material para ser soldado recorrendo à tecnologia de soldadura por pontos depende da sua condutividade térmica e do seu ponto de fusão [32]. Deste modo, materiais com condutividade térmica baixa e ponto de fusão reduzido necessitam de menor geração de calor e, conseqüentemente, menor potência de soldadura. Dado que a condutividade térmica e elétrica estão correlacionadas para a maioria dos metais, é mais fácil de soldar por pontos aços do que ligas de cobre, por exemplo [32]. Alguns dos materiais usualmente soldados recorrendo a esta tecnologia são o alumínio, o bronze, o ferro fundido, os aços macios, o aço inoxidável, o níquel e o magnésio [28].

É de lembrar que no início do capítulo 3.3 foi referido que materiais com elevada condutividade térmica e elétrica, como é o caso do alumínio, tornam mais complexa a aplicação desta tecnologia devido à necessidade de correntes elétricas mais elevadas, o que resulta num aumento do custo dos equipamentos. Ainda assim, é possível obter-se soldaduras de elevada qualidade, recorrendo aos procedimentos adequados. Na soldadura por resistência do alumínio, por vezes é necessária a execução de uma decapagem prévia à soldadura para remover a camada de óxido refratário na superfície do material [31].

O aço, desde que o seu teor de carbono não ultrapasse os 0,18 %, evidencia-se como o material mais facilmente soldável utilizando a tecnologia de soldadura por pontos. Acima deste teor de carbono, verifica-se um fenómeno de têmpera o que torna necessário realizar um pós aquecimento do ponto de soldadura [31].

O aço inoxidável, devido à sua elevada resistividade térmica e elétrica, é passível de ser soldado com baixas intensidades de corrente. Na soldadura por pontos dos aços inox 18-8 (18 % de cromo e 8 % de níquel) não estabilizados devem-se utilizar tempos de soldadura reduzidos com o objetivo de evitar a precipitação de carbonetos nas juntas de grão e conseqüente perda de propriedades de resistência à corrosão [31].

O níquel e respetivas ligas possuem uma elevada soldabilidade, embora esta diminua com o aumento do teor de enxofre na liga. Quando tal acontece, pode ocorrer um eutético abaixo do ponto de fusão, provocando o aparecimento de fissuras no ponto de soldadura. Para evitar a ocorrência de oxidação na soldadura destas ligas, devem ser utilizados tempos de soldadura curtos [31].

A tecnologia de soldadura por pontos encontra-se bastante otimizada aquando da união de materiais metálicos semelhantes. Em contrapartida, verificam-se algumas dificuldades na ligação de materiais heterogéneos ou em combinações dissimilares. As dissimetrias podem ser resultantes da diferença de espessuras, da natureza dos materiais ou da presença de revestimentos. Estas desigualdades vão influenciar as condições de contacto entre as peças e, conseqüentemente, a forma como o núcleo fundido é gerado durante o processo de soldadura [37].

3.3.4 Eléttodos

Os eléctttodos são ferramentas ocas com circulação de água no seu interior, com o objetivo de permitir a sua refrigeração, e podem conter uma ponta tronco-cónica ou esférica [28]. O último tipo referido permite um melhor contacto com a peça, um alinhamento do eléctttodo mais simples, um arrefecimento das pontas do eléctttodo mais eficiente e gera pontos de soldadura visualmente mais perfeitos [29].

A secção e a forma das pontas dos eléctttodos definem a área através da qual a corrente de soldadura atravessa desde o eléctttodo às peças a soldar [31].

Os elétrodos de soldadura por pontos devem possuir uma boa condutividade térmica e elétrica, minimizar a resistência de contacto entre estes e as peças a soldar e deter uma resistência mecânica e dureza que lhes permitam garantir deformações diminutas a temperaturas na ordem dos 200 a 300 °C. Deste modo, têm como função conduzir a corrente elétrica aos componentes a soldar e, ao mesmo tempo, aplicar um esforço [31].

Estas ferramentas são constituídas, geralmente, por ligas à base de cobre (Cu), sendo adicionados outros elementos como, por exemplo, crómio (Cr), molibdénio (Mo), tungsténio (W) ou cádmio (Cd) com o intuito de aumentar a sua dureza e resistência ao desgaste [28, 29].

O diâmetro do eletrodo a utilizar na soldadura vai depender da espessura das chapas e da resistividade elétrica do material [28]. Na soldadura de chapas de espessura fina, independentemente da intensidade da corrente, o diâmetro do ponto de soldadura é cerca de 1,3 vezes superior ao diâmetro da ponta do eletrodo. Relativamente à soldadura de chapas grossas, o diâmetro do eletrodo deve respeitar a seguinte relação com a espessura das peças [31]:

$$\varnothing \text{ eletrodo} = 2 * \text{espessura} + 2,5 \text{ [mm]} \quad (3.10)$$

Uma soldadura por pontos de qualidade exímia só será alcançada caso os elétrodos se encontrem em boas condições. Um eletrodo considerado bom consegue aguentar cerca de 4000 a 6000 pontos, necessitando de alguma manutenção, enquanto que um eletrodo de cobre, sem adição de elementos de liga, apenas produz algumas centenas de pontos [29, 31].

3.3.5 Estudo Térmico da Soldadura por Pontos

Ao longo deste capítulo, tem sido referida a dificuldade da utilização da soldadura por pontos em materiais com elevada condutividade térmica e elétrica, como, por exemplo, o alumínio e o cobre utilizados em vários componentes elétricos/eletrónicos. No processo de soldadura destes materiais, a quantidade de calor gerada na interface das peças (ponto de ligação) é inferior e, ao mesmo tempo, as perdas por condução são mais elevadas [29, 31].

A soldadura de materiais com condutividades térmicas reduzidas, como os aços inoxidáveis, apresenta o problema contrário. Como a quantidade de calor gerada na interface das peças é excessiva, torna-se necessário remover parte deste calor com a finalidade de evitar a ebulição do metal fundido e evitar a sua projeção [29, 31].

Quando se utiliza a tecnologia de soldadura por pontos para soldar materiais com espessuras distintas ou com composições químicas diferentes, podem surgir algumas dificuldades em alcançar um balanço térmico adequado [29, 37, 40]. Nestes casos, poderão ocorrer defeitos de soldadura, nomeadamente a formação de soldaduras assimétricas relativamente ao plano de separação das duas superfícies a ligar, dado que o calor gerado e as perdas por condução não serão iguais nas duas peças a soldar [37, 40]. Este fenómeno é referido no subcapítulo 3.3.6, respeitante aos defeitos de soldadura por pontos. Em geral, para estes casos, o balanço térmico é alcançado recorrendo à utilização de elétrodos com diâmetros da ponta distintos ou constituídos por diferentes materiais, alterando a condutividade térmica do eletrodo. Em situações que seja necessária uma redução do calor transmitido, podem ser utilizados elétrodos revestidos com materiais de resistividade mais elevada [37, 40].

Na figura 22, encontra-se representado o estado térmico do ponto de soldadura e das peças ligadas no momento em que é interrompido o fornecimento de corrente de soldadura, ou seja, no instante em que termina o provisionamento de energia sob a forma de calor. Deste modo, pode verificar-se a existência de uma zona nuclear que se encontra à temperatura de fusão (zona A), uma região em redor à zona central onde o material se encontra em estado plástico (zona B), uma área que praticamente alcança a temperatura crítica (zona C), uma região a temperatura inferior à crítica (zona D) e, por fim, uma zona que permanece à temperatura ambiente (zona E) [31].

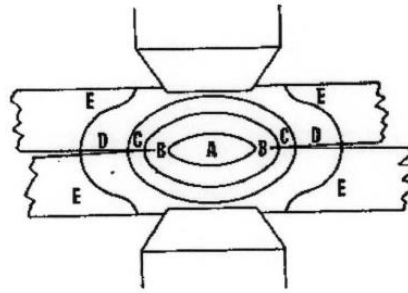


Figura 22 - Estado Térmico de um Ponto de Soldadura após Interrupção do Fornecimento de Corrente de Soldadura [31].

Após a fusão do material metálico, poderão surgir problemas de natureza metalúrgica relacionados com arrefecimentos demasiado rápidos. No caso de alguns aços pode ocorrer a formação de estruturas temperadas, do tipo bainítico ou martensítico. Usualmente, estes problemas são superados recorrendo a ciclos de tratamento térmico pós soldadura, com menor intensidade e tempos de duração mais longos. Em certos casos também se pode optar por efetuar ciclos de revenido após o arrefecimento das peças soldadas [29].

3.3.6 Defeitos de Soldadura

No processo de soldadura por pontos, o ponto gerado deve ser simétrico relativamente ao plano de apartação das duas superfícies. Um dos defeitos que frequentemente ocorre neste processo é exatamente a obtenção de um ponto de soldadura assimétrico. Este pode resultar do desgaste ou falta de alinhamento dos elétrodos, ocorrendo também na soldadura de materiais com diferentes composições. A falta de simetria do ponto origina o aparecimento de superfícies indentadas ou falta de penetração numa das peças, contribuindo para a diminuição da resistência da soldadura. Outros dos defeitos geralmente observados são o excesso de indentação, a separação das chapas, a expulsão de material na interface e a fusão superficial [29, 31].

A indentação superficial resume-se ao abatimento da superfície da peça em contacto com o eléctrodo e não deve ser superior a 10 % da espessura da chapa. Associada a este fenómeno encontra-se a separação excessiva das chapas, que deve ser reduzida ao mínimo com o objetivo de diminuir o momento fletor na junta e a distorção do conjunto dos dois componentes soldados [29].

A expulsão de material metálico da interface decorre da presença de defeitos como porosidades e fissuras resultantes da utilização de parâmetros de soldadura errados como, por exemplo, o desenvolvimento duma elevada quantidade de calor e uma força de compressão baixa. A geração excessiva de calor também contribui para o aumento do fenómeno de indentação [29, 31, 32]. A presença de porosidades no núcleo fundido provoca um aumento da resistência elétrica de contacto e uma diminuição da resistência mecânica da junta [32].

Relativamente à fusão superficial, este defeito advém da existência de altas resistências de contacto entre o eléctrodo e a superfície da peça, conferindo um aspeto indesejável aos pontos de soldadura [29].

Na figura 23, podem ser observados alguns dos defeitos referidos ao longo dos últimos parágrafos.

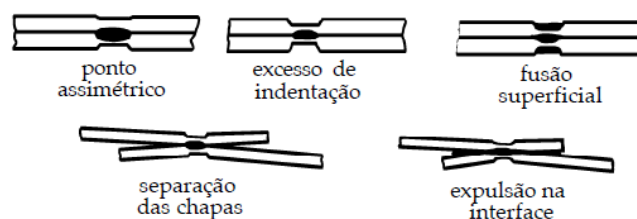


Figura 23 - Defeitos observados no Processo de Soldadura por Pontos [29].

3.4 Soldadura Por Ultrassons

A tecnologia de soldadura por ultrassons pode ser considerada como um caso particular do processo de soldadura por fricção [1]. Este processo de ligação de materiais ocorre no estado sólido, sem necessidade de se recorrer a materiais de adição [32, 41, 42]. Para que ocorra a ligação entre as superfícies a soldar, é necessário exercer uma pressão, relativamente baixa, e facultar uma vibração de elevada frequência durante um curto período de tempo (usualmente entre 200 a 500 milissegundos). Esta pressão tem como principal função evitar o escorregamento do material e controlar a deformação plástica do mesmo [42, 43].

Através da aplicação de pressão, um movimento oscilatório de baixa amplitude gera a energia libertada por fricção criando a união dos materiais [32, 44]. A ligação resultante pode, então, ser atribuída ao calor gerado pela fricção, em particular a adesão metálica associada a efeitos de difusão e recristalização [1, 41, 45].

Neste processo, a vibração é fornecida segundo o plano das superfícies de contacto, com uma amplitude abaixo dos 50 μm e uma frequência ultrassónica compreendida entre os 20 e os 70 kHz [43, 46]. Para efetuar a ligação entre elementos metálicos, a frequência de 20 kHz é usualmente a utilizada. A deformação plástica gerada pela oscilação referida provoca a dispersão e eliminação dos óxidos superficiais e a atenuação das rugosidades, criando um aumento da área de contacto de metal puro [41, 43, 46].

Geralmente, este processo é caracterizado por requerer um baixo consumo de potência, não permitindo temperaturas muito elevadas na zona de soldadura, o que permite tempos de soldadura reduzidos [32, 43].

Na figura 24 encontra-se esquematizado o processo de soldadura por ultrassons e respetivos intervenientes.

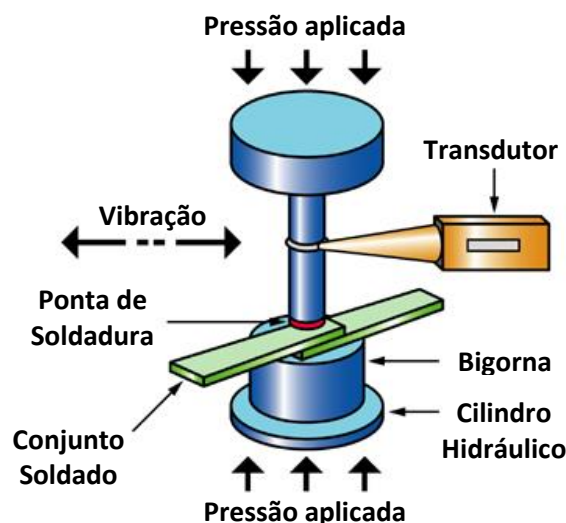


Figura 24 - Representação Simplificada do Processo de Soldadura por Ultrassons (adaptado de [41]).

Uma instalação destinada ao processo de soldadura por ultrassons é constituída essencialmente por um conversor, um amplificador, um sonótrodo e um suporte. No conversor, dá-se a transformação da energia elétrica em energia mecânica devido à existência de cerâmicos piezoelétricos. O amplificador, dependendo da sua geometria, tem como função aumentar, diminuir ou manter a amplitude de vibração, podendo o ganho variar entre 0,5 e 2,5. Relativamente ao sonótrodo, este vai ser responsável por transmitir ativamente a energia de oscilação para a parte de cima dos materiais a ligar [1]. Os únicos parâmetros que são necessários definir no equipamento de soldadura são a potência, a força de fixação e o tempo

de soldadura (ou taxa), que variam consoante a espessura e a natureza dos materiais a serem soldados [41, 47].

A tecnologia de soldadura por ultrassons apresenta algumas vantagens comparativamente com outros processos de ligação de materiais metálicos. Este método não necessita do uso de fluxos de calor ou de material de adição, permitindo a ligação de materiais dissimilares e com diferentes secções [32, 42, 43].

Esta tecnologia apresenta uma baixa resistência elétrica na zona de soldadura, o que permite obter ligações com boas propriedades elétricas, tornando-se num dos processos mais interessantes para implementar na indústria eletrónica [1, 32, 42]. Ligações entre materiais com elevada condutividade térmica, como o cobre e o alumínio, quando realizadas segundo este processo, apresentam resultados promissores [32, 43]. Este processo evita a ocorrência de empenos, contrações e distorções na área contígua à zona de soldadura. Sendo uma tecnologia relativamente simples, permite uma alta repetibilidade e um controlo automático do processo, revelando-se facilmente automatizável [1, 42, 44]. Taxas de produção da ordem das 1000 peças por hora, carregadas manualmente, são facilmente atingíveis [41].

O processo de soldadura por ultrassons revela-se, deste modo, rápido de executar, económico quando aplicado em produções em larga escala e limpo, não apresentando perigos ambientais [41, 44].

A grande desvantagem deste processo prende-se com as limitações a nível da geometria de junta e com o aumento exponencial da potência necessária com o aumento da dureza dos materiais a ligar [1, 48].

3.4.1 Fundamentos da Soldadura por Ultrassons

Os princípios da tecnologia de soldadura por ultrassons remontam às investigações conduzidas por *Pierre Curie* acerca do efeito piezoelétrico verificado em certos materiais. Nas pesquisas efetuadas, *Pierre Curie* descobriu que cristais assimétricos, como, por exemplo, o quartzo, geram uma carga elétrica quando submetidos a uma pressão mecânica. Do mesmo modo, quando aplicada uma oscilação elétrica nos cristais piezoelétricos, estes geravam uma vibração mecânica [45, 49]. No início da década de 50, durante a realização de experiências com o intuito de estudar a aplicação de ultrassons aos eletrodos no processo de soldadura por pontos, conclui-se que os materiais ficavam soldados mesmo antes de ocorrer a passagem de corrente elétrica [45]. As seguintes pesquisas acerca deste fenómeno revelaram que a soldadura era obtida quando era aplicada uma vibração ultrassónica às peças em simultâneo com uma pressão [45, 47].

Neste processo, vibrações de elevada frequência são combinadas com pressões com o objetivo de unir dois materiais de forma rápida e segura, sem que haja produção significativa de calor [44, 48, 49]. Durante a execução da soldadura por ultrassons, verifica-se a atuação de forças normais e de corte nas peças a serem soldadas e na interface de soldadura. Estas forças são o resultado da vibração ultrassónica da ferramenta (sonótrodo) quando comprimida contra as peças a soldar. O conhecimento aprofundado das forças que atuam na interface entre peças permite controlar as resistências geradas na soldadura e evitar a colagem do sonótrodo à superfície das peças [48].

A frequência de vibração utilizada pelo sonótrodo deve corresponder à frequência emitida pela fonte de potência que, por sua vez, deve ser equivalente à frequência de ressonância da peça de trabalho. Desta forma, torna-se possível aumentar a carga induzida e maximizar o efeito da vibração no processo de soldadura [50].

No início da soldadura, os óxidos e restantes contaminantes presentes nas superfícies em contacto são corrompidos pela vibração ultrassónica gerada por um sistema piezoelétrico e

a área de contacto de metal puro aumenta [44, 49]. Em seguida, as micro-rugosidades das peças a soldar entram em contacto e deformam plasticamente devido às forças de corte geradas entre estas. Este fenómeno, aliado à existência de fricção na interface entre as peças a soldar, provoca o aquecimento dos materiais envolvidos, resultando na sua ligação [32, 49, 51].

Neste processo, a energia de vibração é transmitida entre as superfícies contíguas, havendo absorção de energia em cada uma das interfaces o que provoca a existência de deformação plástica superficial [42, 49, 52].

A tecnologia de soldadura por ultrassons tem como fundamento o fenómeno de coalescência entre os átomos das superfícies a soldar. As ligações geradas por este processo podem distinguir-se entre adesão metálica e difusão no estado sólido [42, 52].

A união por difusão caracteriza-se por ser mais forte e resistente do que a simples adesão metálica e na zona de contacto entre as superfícies em que ocorre podem verificar-se pontos de ligação denominados por ilhas de soldadura [42, 46, 51].

3.4.2 Parâmetros do Processo

Os principais parâmetros associados ao processo de soldadura por ultrassons são a frequência de vibração, o tempo de soldadura, a pressão de contacto, a amplitude, a energia elétrica e o material do sonótrodo [1, 42, 48]. Algumas características inerentes ao material a soldar como a dureza, a estrutura cristalina, o estado superficial e a espessura também influenciam a qualidade do processo [42, 43].

A frequência de vibração é uma característica subordinada à frequência do equipamento utilizado e depende da capacidade que a fonte de potência possui de transformar os 50/60 Hz adquiridos à rede numa frequência superior, geralmente entre 20 a 70 kHz. A fonte de potência é usualmente construída tendo em consideração que a frequência produzida seja equivalente à frequência de ressonância para a qual o sonótrodo se encontra ajustado [42, 52].

Relativamente aos tempos de soldadura, nesta tecnologia de ligação de metais são utilizados tempos muito curtos (inferiores a um segundo), estando a duração da soldadura dependente da energia e da potência fornecida [41, 44]. Deste modo, é preferível a utilização de potências elevadas e tempos curtos, na medida em que tempos de soldadura elevados resultam num aquecimento excessivo das peças a ligar, resultando num pior acabamento superficial [52, 53]. Outras adversidades causadas pelo uso de tempos de soldadura longos centram-se na presença de fissuras perto da área de soldadura devido à ressonância e na formação de indentações mais pronunciadas [32, 54].

Na figura 25 encontra-se apresentada a potência mecânica de soldadura em função do tempo de duração do processo, para diferentes valores de pressão. Neste gráfico, é possível observar uma diminuição da potência de soldadura no final de cada curva. A ocorrência desta diminuição está diretamente relacionada com a presença de fissuras no material metálico [32, 54].

A pressão aplicada influencia diretamente a deformação plástica gerada no material, dado ser este o parâmetro que promove o contacto entre superfícies. A aplicação de pressões reduzidas pode originar deslizamentos relativos entre o sonótrodo e a superfície que se encontra em contacto com este, provocando o aquecimento e desgaste da ferramenta [55]. Em oposição, pressões excessivas geram uma deformação plástica do material a soldar exagerada, provocando uma redução da área e uma diminuição da resistência mecânica da junta produzida [54]. O excesso de pressão traduz-se, também, num aumento da potência necessária, o que poderá resultar na formação de rebarbas ou na colagem do sonótrodo à superfície [55].

Assim, devem-se utilizar pressões elevadas dentro de um limite razoável. O aumento da pressão promove o aumento da potência de soldadura e, conseqüentemente, o incremento do calor transferido para a área de soldadura necessário à ocorrência dos fenômenos de difusão [32]. Deste modo, uma maior potência de soldadura resulta numa melhoria das características da soldadura. Contudo, na figura 25, pode ser observado que para a maior pressão utilizada (5.0 bar) verificou-se uma diminuição da potência de soldadura relativamente à pressão imediatamente abaixo (4.2 bar). Esta ocorrência verifica-se, presumivelmente, devido à força do sonótrodo começar a exceder o limite plástico do material metálico em questão. A esta pressão ocorre, ainda, uma extrusão excessiva do material e as juntas soldadas apresentam maior resistência elétrica de contacto e menor resistência mecânica [32].

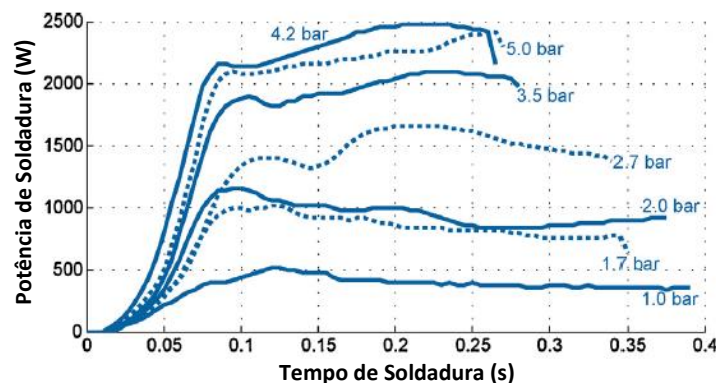


Figura 25 - Potência de Soldadura em Função do Tempo para Diferentes Pressões do Sonótrodo [32].

Quanto à amplitude, este parâmetro encontra-se interligado com a potência fornecida. A amplitude deve ser adaptada de acordo com a dimensão da secção a soldar, ou seja, amplitudes baixas devem ser utilizadas para secções reduzidas e amplitudes elevadas para secções maiores [42, 51]. O uso de amplitudes baixas originam um aumento do tempo de soldadura e podem comprometer a ocorrência do fenómeno de difusão devido ao amortecimento natural do material a soldar [55]. A utilização de amplitudes elevadas traduz-se num aumento da deformação plástica do material e da temperatura na zona de interface das peças a unir. Amplitudes mais elevadas facilitam a ocorrência do fenómeno de difusão e a aderência entre as superfícies, reduzindo o tempo de soldadura necessário para a existência de uma boa união. Este parâmetro influencia, ainda, a resistência mecânica da junta obtida [54,55].

Por fim, a energia envolvida no processo de soldadura por ultrassons tem como função principal aumentar a aderência entre as superfícies em contacto, contribuindo para a deformação plástica das mesmas [42, 53]. Este parâmetro vai depender sobretudo do material constituinte dos elementos a ligar e da sua secção. Assim, quanto maior a dureza do material que se pretende soldar, maior será a energia requerida para soldar uma determinada secção [42, 53, 55]. Caso a energia fornecida for diminuta, ocorre apenas uma adesão parcial entre as superfícies em contacto, não ocorrendo ligação por difusão. Pelo contrário, caso seja facultada energia em excesso, podem ocorrer alguns defeitos de soldadura, tais como a extrusão do material, a distorção, a redução da secção transversal e a colagem do sonótrodo à superfície. Estes defeitos contribuem para a diminuição da resistência mecânica da junta de soldadura [46, 55].

Torna-se importante lembrar que a energia de vibração, juntamente com a pressão de contacto, é a principal responsável pela eliminação dos óxidos e impurezas superficiais do material a soldar [41, 53].

A pressão de contacto, a amplitude de vibração e o tempo de soldadura evidenciam-se como os parâmetros fundamentais a serem otimizados com o intuito de se obterem juntas soldadas de elevada qualidade recorrendo à tecnologia de soldadura por ultrassons [44, 53, 55].

Relativamente às características dos materiais, tal como acontece noutros processos de soldadura já examinados, o estado superficial adquire uma importância fundamental na qualidade do processo, devendo ser evitada a presença de óxidos e outros contaminantes na superfície de contacto [44, 51]. A espessura e restantes dimensões exteriores têm influência nos parâmetros que são concedidos ao equipamento utilizado na realização da soldadura. A estrutura cristalina e a dureza do material a soldar vão influenciar a deformação plástica superficial do mesmo e, conseqüentemente, o processo de soldadura [32, 42, 51].

3.4.3 Equipamentos

Tal como foi mencionado no início deste capítulo, uma instalação de soldadura por ultrassons é composta por quatro elementos base: um conversor, um amplificador, um sonótrodo e um suporte. Os três primeiros componentes referidos são responsáveis pela transformação de energia elétrica numa vibração [1, 47].

Na figura 26 é exposta a sequência de etapas necessária para ocorrer a transformação de energia elétrica fornecida pela rede em energia mecânica, sob a forma de uma vibração. Durante este processo, a energia fornecida pela rede, a uma frequência na gama dos 50 a 60 Hz, é transformada para uma frequência bastante superior, geralmente na ordem dos 20 a 70 kHz. Após esta transformação, a energia elétrica é convertida em energia mecânica, mantendo-se a mesma frequência. O amplificador presente na instalação é responsável por aumentar, reduzir, ou manter a amplitude da vibração consoante as necessidades, passando-a em seguida ao sonótrodo que aumenta a amplitude e transfere a vibração para a superfície do material a soldar [42, 51, 52].

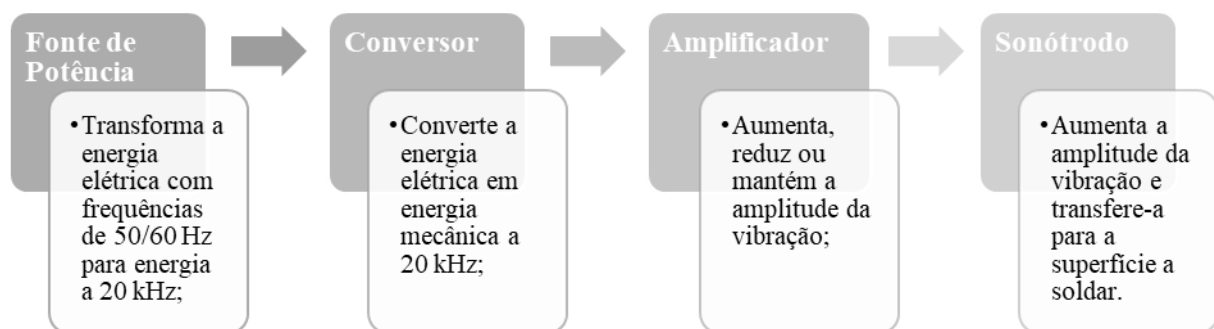


Figura 26 - Sequência de Etapas para a Transformação de Energia Elétrica em Energia Mecânica sob a Forma de uma Vibração (adaptado de [42]).

Convencionalmente, existem dois tipos de equipamentos que permitem a aplicação da tecnologia de soldadura por ultrassons: o sistema *wedge-reed* (cunha-linguete) e o sistema *lateral-drive*. O último equipamento referido permite que a amplitude seja definida pelo operador. Tal não é possível no sistema *wedge-reed* pois a amplitude está dependente da flexão do linguete (*reed*), sendo este usualmente utilizado quando são necessárias elevadas potências.

O processo de soldadura por ultrassons necessita deste modo dos seguintes constituintes [42, 51, 55]:

- Um componente que exerça pressão entre as peças a soldar e que as mantenha em posição;
- Um mecanismo que forneça energia mecânica (vibração) a uma das peças a unir;
- Um mecanismo que gere a energia vibratória;
- Um circuito que controle o tempo de aplicação, a pressão de contacto e a energia fornecida.

Na figura 27 está representado um equipamento básico de soldadura por ultrassons, assim como se encontram identificados todos os seus constituintes.

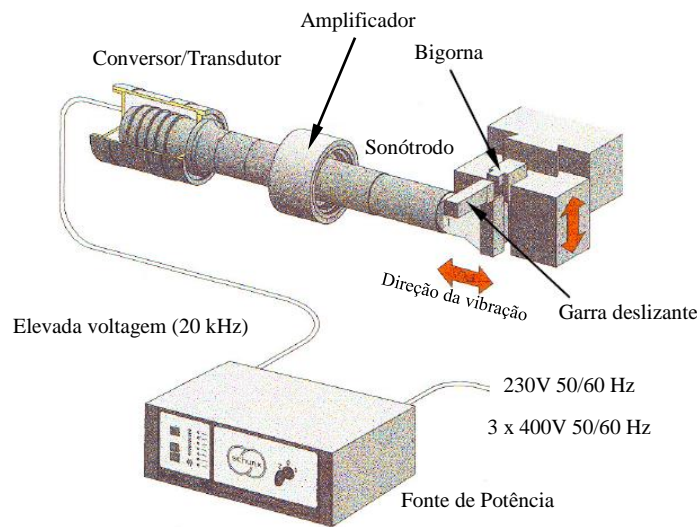


Figura 27 - Equipamento de Soldadura por Ultrassons (adaptado de [45]).

Tal como já foi referido, a fonte de potência tem como função proceder à transformação da energia da rede que se encontra à frequência de 50/60 Hz em energia elétrica de elevada frequência, normalmente na ordem dos 20 kHz. Este componente encontra-se ligado ao conjunto conversor, amplificador e sonótrodo por um cabo coaxial [42, 45, 52, 56].

O conversor transforma o sinal elétrico recebido da fonte de potência numa vibração mecânica, mantendo a frequência do mesmo durante o processo. Este componente pode ser magnetostrictivo ou piezoelétrico [42, 51, 56]. O primeiro tipo referido é constituído por uma estrutura de chapas de níquel sobrepostas, variando o seu comprimento consoante o fluxo magnético que as atravessa. Estes conversores possuem uma eficiência energética à volta dos 60 % e são aptos para trabalhar durante longos períodos de tempo [52, 56].

Os conversores piezoelétricos possuem uma eficiência energética mais elevada quando comparados com os magnetostrictivos, sendo esta da ordem dos 90 %, o que resulta em conversores mais compactos e numa maior intensidade de vibração permitida [56]. O seu funcionamento advém da variação de dimensão de cerâmicos piezoelétricos, como é o caso do zirconato de chumbo, quando sujeitos a uma corrente elétrica variável [52, 56].

Tanto os conversores magnetostrictivos como os piezoelétricos possuem um sistema de arrefecimento para não ocorrerem alterações nas suas propriedades durante o funcionamento [52].

Relativamente ao amplificador, este encontra-se instalado entre o conversor e o sonótrodo e tem como função aumentar, diminuir ou manter constante a amplitude da vibração. O ganho fornecido pelo amplificador pode variar entre 0,5:2,5. Geralmente, o amplificador contém um anel que constitui um ponto de vibração neutra, servindo de apoio e fixação no equipamento de soldadura por ultrassons e resistindo aos esforços durante o processo. Este componente é geralmente fabricado em titânio ou em alumínio, devido à necessidade de resistir aos esforços de fadiga a que vai estar sujeito durante o seu funcionamento [51].

O sonótrodo tem como função principal transmitir ativamente a vibração proveniente do amplificador para a superfície superior dos materiais a soldar. Usualmente, este componente também promove o aumento da amplitude da vibração [42, 44, 56]. A ponta do sonótrodo vai influenciar a indentação gerada no material e, conseqüentemente, a transmissão de energia e a

existência, ou não, de escorregamento relativo entre o sonótrodo e o conjunto de peças a soldar [42, 56]. Esta pode apresentar a forma de múltiplas pirâmides ou ondas paralelas. Esta ferramenta deve possuir elevada resistência à fadiga, sendo normalmente fabricado em aço inoxidável, titânio ou ligas de alumínio e deve ser projetado para que a sua frequência natural de vibração seja igual à frequência emitida pela fonte de potência [42, 56].

O sonótrodo desempenha uma função essencial pois, dado que oscila a uma frequência mínima a rondar os 20 kHz, este elemento vai ter que expandir cerca de 20.000 vezes por segundo sem aquecer em demasia ou entrar em cedência, enquanto cria as condições necessárias à execução da soldadura por ultrassons [45]. Este componente vibra paralelamente ao plano da interface de soldadura e perpendicularmente ao eixo de aplicação da força de compressão [44].

A bigorna tem como função principal dar suporte e permitir a compressão dos materiais a unir, sendo projetada para ser um elemento anti-ressonante de maneira a impedir a dissipação de energia de vibração através da mesma, permitindo a concentração da energia nos materiais a soldar. Este componente desloca-se sobre calhas lubrificadas e aplica pressão nas peças a soldar. Tanto o movimento referido como a pressão são conseguidos através de um sistema hidráulico ou pneumático, sendo o sistema hidráulico preferível para aplicações de elevada potência. A superfície da bigorna que entra em contacto com o conjunto de materiais a soldar possui, tal como o sonótrodo, uma forma de ondas paralelas [42, 46, 52].

A garra deslizante desloca-se na direção das ondas do sonótrodo e tem como principal função limitar a largura da soldadura. Esta ferramenta é acionada mecanicamente através de um mecanismo de parafuso sem fim e possui um revestimento que permite diminuir o seu desgaste, evitar a adesão dos materiais e aumentar o seu período de vida [46, 56]. Normalmente, a garra deslizante é fabricada em aço hipereutectóide, ou seja, com uma percentagem de carbono superior a 1,2 [45].

Tal como a garra deslizante, a placa de retoque tem como finalidade definir a largura da soldadura. Este componente desloca-se juntamente com a bigorna com o intuito de assegurar que a folga entre esta e o sonótrodo é mínima. Aquando do fornecimento da vibração às peças a unir deve-se garantir que não existe contacto entre a garra e o sonótrodo para que não ocorra a expulsão do material a soldar [42, 46, 56].

A superfície de contacto das ferramentas envolvidas no processo de soldadura por ultrassons como o sonótrodo, a bigorna ou a garra deslizante, deve possuir elevada resistência ao desgaste com o objetivo de se conseguir obter com qualidade o maior número possível de ciclos de soldadura. Deste modo, estas ferramentas podem sofrer tratamentos térmicos de têmpera ou revestimentos metálicos para aumentar o seu comportamento ao desgaste. Um revestimento usualmente utilizado é o nitreto de titânio e alumínio produzido por deposição física a vapor (PVD-TiAl), cuja aplicação garante um excelente comportamento ao desgaste, juntas de soldadura com um elevado padrão de qualidade e uma redução de custos no processo de produção. Este revestimento possui uma combinação de propriedades como elevada dureza, adesão e resistência a temperaturas elevadas, tendo alta estabilidade térmica e coeficientes de expansão térmica e de transmissão de calor semelhantes aos do aço [45].

3.4.4 Materiais Soldáveis por Ultrassons

Dado que esta tecnologia tem por base um processo mecânico (a deformação plástica causada pela transmissão de uma vibração), praticamente todos os materiais metálicos podem ser soldados por ultrassons. Os materiais usualmente soldáveis recorrendo a este processo são os metais dúcteis, os metais preciosos, o alumínio e o cobre e respetivas ligas. Este processo é geralmente aplicado para unir chapas, sendo excelente para ligar chapas finas a chapas mais espessas e para ligar contactos em placas de circuitos. Deste modo, a tecnologia de soldadura por ultrassons é utilizada para soldar placas de alumínio com 2 a 3 milímetros de espessura,

chapas de cobre com 1,5 a 2 milímetros e folhas de aço inoxidável com 0,2 a 0,4 milímetros [41].

O processo de soldadura por ultrassons é viável para soldar materiais metálicos com pontos de fusão distintos, juntas que estão em proximidade com componentes sensíveis ao calor e metais que usualmente formariam compostos intermetálicos frágeis nas juntas de soldadura [44, 48]. Aquando da junção de materiais dissimilares, pelo menos uma das partes deve ser relativamente leve pois, caso tal não sucedesse, seria necessária uma elevada quantidade de energia para fazer vibrar um material pesado à frequência necessária [47, 48].

Nos últimos anos, têm sido realizadas algumas pesquisas no sentido de estudar a formação de juntas de soldadura entre materiais dissimilares como o alumínio e o bronze/cobre para aplicação na indústria de componentes elétricos [44]. Tal como tem vindo a ser referido, estes materiais caracterizam-se pelas suas excelentes propriedades térmicas e elétricas, boa resistência mecânica e elevada resistência à corrosão e fadiga. Apesar do cobre possuir maior condutividade térmica, expansão térmica e condutividade elétrica do que o bronze, verificam-se maiores distorções de soldadura nestes materiais do que nas soldaduras de bronze. Deste modo, é importante examinar as características das soldaduras entre alumínio e bronze [44].

Nas diversas tentativas efetuadas com o intuito de ligar alumínio e bronze recorrendo ao processo de soldadura “*friction stir*”, verificou-se a formação de compostos intermetálicos frágeis, resultando numa diminuição da resistência mecânica das juntas de soldadura. Assim sendo, o recurso à tecnologia de soldadura por ultrassons pode integrar a solução para ultrapassar estas dificuldades [44].

O processo de soldadura por ultrassons também pode ser aplicado na ligação de alguns polímeros [41, 48].

3.4.5 Estudo Térmico da Soldadura por Ultrassons

Durante a soldadura por ultrassons de metais, os fenómenos de deformação plástica, histerese elástica e fricção geram o calor na interface das peças a serem ligadas [47, 48].

Estudos realizados com o intuito de determinar a distribuição de temperatura na interface de contacto entre as peças a unir revelaram que, no máximo, apenas 40 a 80 % da temperatura de fusão dos metais era alcançada durante o processo de soldadura por ultrassons, dependendo este valor dos parâmetros definidos [48]. Assim sendo, não se verifica a fusão dos materiais em contacto, ocorrendo a soldadura no estado sólido [32, 44].

Elangovan *et al* [48] estudaram a distribuição da temperatura na interface da soldadura por ultrassons através da modelação numérica, sendo a peça de trabalho fabricada em alumínio. Para a realização da análise térmica foram considerados o coeficiente de condutividade térmica (k), o calor específico (c) e a massa específica (ρ). Na tabela 4 são apresentados os valores destas propriedades para o material das chapas a soldar, alumínio, e para o material do sonótrodo e da bigorna [48].

Tabela 4 - Propriedades do Alumínio das Chapas a Soldar e do Aço Utilizado no Sonótrodo e na Bigorna (adaptado de [48]).

Material	Condutividade Térmica	Calor Específico	Massa Específica
	(W/ (m °C))	(J/ (kg °C))	(kg/m ³)
Alumínio (peça)	183	896	2700
Aço (sonótrodo e bigorna)	24,3	460	7800

Na tecnologia de soldadura por ultrassons, é gerado calor na interface de soldadura e respetiva periferia, assim como na superfície do sonótrodo devido à fricção e deformação plástica. Esta geração de calor e conseqüente aumento de temperatura possui um impacto nas propriedades das juntas soldadas [48, 51]. Numa primeira instância da soldadura, a deformação plástica ocorre na interface de contacto entre o sonótrodo e a chapa superior, enquanto esta ferramenta exerce pressão sobre a mesma. Durante este período temporal, embora exista geração de calor, a sua transferência para o sonótrodo pode ser desprezada devido à curta duração da fase quando comparada com o tempo total de soldadura [48].

A geração de calor associada à deformação plástica pode ser analisada separadamente da geração de calor devida à ocorrência de fricção. No modelo realizado, a primeira está confinada à área de deformação e a segunda é associada a uma área de fricção que rodeia a área de soldadura [48, 51].

No início do ciclo de soldadura, as ilhas de deformação ocorrem aleatoriamente dentro da zona de deformação. Estas ilhas vão funcionar como fontes de calor. Deste modo, devido à elevada condutividade térmica do alumínio, a temperatura vai aumentar rapidamente ao longo da zona de deformação [48]. Assim, a potência desenvolvida nas ilhas de deformação é distribuída pelo volume total da zona de deformação. O calor gerado devido à deformação será equivalente à potência dissipada pela área de soldadura [48, 51].

O calor fornecido por fricção será dado pela potência de fricção, igual ao produto da força de atrito pela velocidade média do sonótrodo, a dividir pela área de fricção. Por sua vez, esta área distribui-se concentricamente à área de soldadura, apresentando um raio exterior duas vezes superior ao desta [48, 51].

Na figura 28 é representado o modelo formulado por Elangovan et al [48] e respetivas condições de fronteira para o estudo da distribuição da temperatura nos componentes a soldar e nas ferramentas presentes no processo. A força aplicada pelo sonótrodo foi de 1600 N [48].

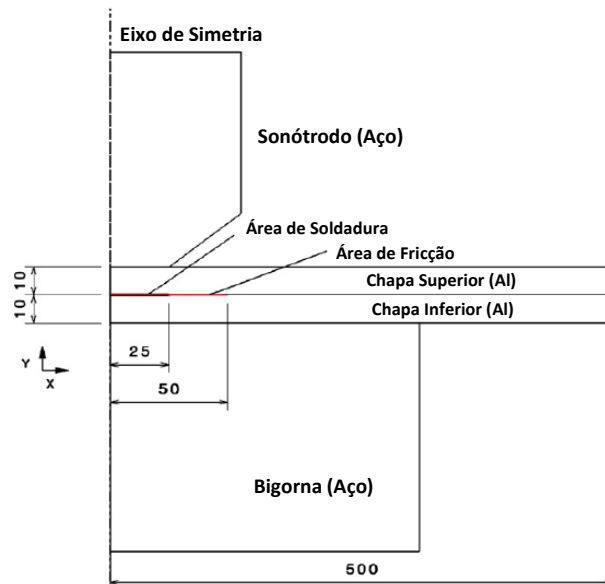


Figura 28 - Modelo Formulado e Respetivas Condições de Fronteira (adaptado de [48]).

Os resultados para a distribuição da temperatura no final da soldadura podem ser examinados na figura 29. Através da análise dos resultados alcançados constata-se que a temperatura máxima verificada na interface, no final da soldadura, foi de 336,816 °C (figura 29a)). Nesta ilustração, é possível observar que a zona termicamente afetada na soldadura por ultrassons situa-se na área de deformação compreendida debaixo do sonótrodo. É ainda possível analisar a variação da temperatura com a espessura da chapa (direção vertical), havendo uma diferença de cerca de 58 °C entre a interface da soldadura e a superfície superior do conjunto de peças soldadas. A variação da temperatura obtida na direção horizontal depende, sobretudo, na condutividade dos materiais envolvidos, neste caso, alumínio [48].

Na figura 29b) está representada a distribuição da temperatura no sonótrodo. A partir da sua análise, é possível concluir que área termicamente afetada nesta ferramenta é relativamente diminuta devido à baixa condutividade térmica do seu material constituinte (aço), quando comparada com a do alumínio das peças soldadas [48].

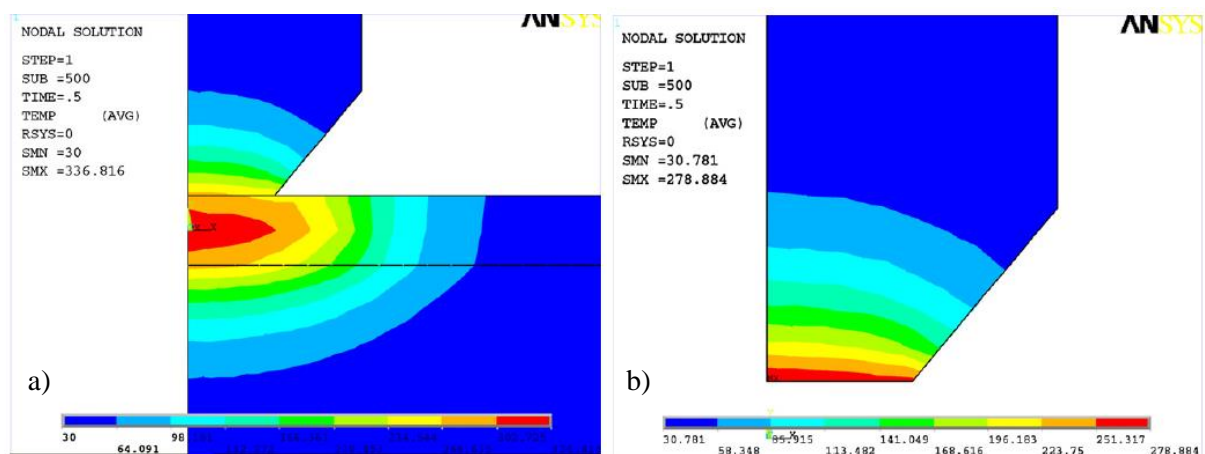


Figura 29 - Distribuição da Temperatura na Interface de Soldadura (à esquerda) e no Sonótrodo (à direita) Quando Aplicada uma Força de Compressão de 1600 N e um Tempo de Soldadura de 0,5 s (adaptado de [48]).

Em suma, a distribuição da temperatura diminui progressivamente com o aumento da distância à área de soldadura situada debaixo do sonótrodo. O aumento do tempo do processo promove o aumento da interface de soldadura. Tempos de soldadura mais longos podem ser necessários para soldar chapas com maiores espessuras, dado que a vibração de partes mais pesadas necessita de maior energia. As forças de compressão também influenciam as temperaturas obtidas na interface das peças em contacto. Um aumento excessivo das forças de compressão resulta numa diminuição da temperatura gerada na interface, resultando somente na deformação do material nesta área e não na sua ligação. Deste modo, uma escolha adequada da força de compressão é fundamental para se obter uma boa soldadura [48].

3.5 Soldadura Laser

Na tecnologia *laser*, a ligação é efetuada tendo por base a interação entre um feixe *laser* localizado e o componente a ligar. Esta ligação é conseguida se a densidade de energia absorvida na zona focal for suficientemente elevada para aquecer o material até ao ponto de fundir parte do material a ligar [1, 57]. Assim sendo, a soldadura *laser* utiliza o fenómeno de absorção de ondas eletromagnéticas para aquecer os materiais a soldar. O feixe *laser* pode ser proveniente de várias fontes distintas [32, 57]. Nalguns casos podem ser utilizados materiais de adição embora, tipicamente, tal não seja necessário [1, 58].

Caso se ultrapasse o valor de energia crítica, a energia absorvida é de tal ordem que pode vaporizar o material e na interação entre o feixe e o vapor do metal ocorre fusão em profundidade, originando soldaduras mais espessas [1].

A figura 30 representa, esquematicamente, o processo de soldadura *laser*. Nesta representação pode-se observar a formação de um “*keyhole*” durante o processo. A formação deste elemento será descrita no subcapítulo 3.5.1 respeitante aos fundamentos da soldadura *laser*.

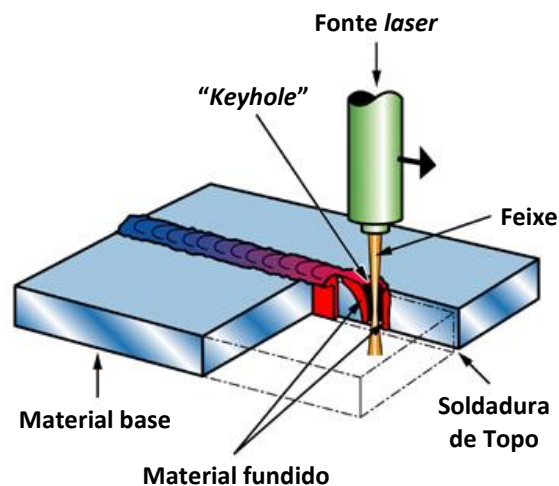


Figura 30 - Representação Simplificada do Processo de Soldadura Laser (adaptado de [58]).

O processo de soldadura *laser* pode ser utilizado na união de materiais dissimilares ou com espessuras distintas [58, 59]. Devido à largura estreita e penetração profunda inerente à utilização de um feixe *laser* neste tipo de soldadura, o espaço entre as peças a soldar deve ser o mínimo possível [32, 58]. A elevada densidade de potência do feixe *laser* permite a utilização de altas velocidades de soldadura [32, 57].

A presença de um feixe *laser* bastante localizado nesta tecnologia de soldadura resulta na formação de uma pequena área afetada pelo calor, tornando a soldadura *laser* especialmente adequada para ligações em componentes sensíveis ao calor. Este processo é aplicado quando é fundamental um controlo preciso da transferência de energia para a junta de soldadura [57, 58]. A grande vantagem da aplicação da soldadura *laser* na indústria de componentes elétricos resulta precisamente deste fator, dado ser possível um elevado controlo da zona termicamente afetada e uma alta precisão do processo [1, 59].

A principal desvantagem desta tecnologia de ligação de metais prende-se com o alto custo dos equipamentos envolvidos, embora não sejam tão elevados como os de soldadura por feixe de elétrons. Contudo, estes investimentos são justificados para volumes de produção elevados ou para a execução de soldaduras em condições críticas que não possam ser realizadas por outros processos e que exijam um elevado controlo de qualidade. O risco da exposição da

pele ou dos olhos ao feixe *laser* ou as considerações ambientais relativas à libertação de fumos tóxicos são outras das desvantagens que este processo apresenta [58].

Como a soldadura *laser* não necessita de uma câmara de vácuo, esta tecnologia tem vindo a substituir a soldadura por feixe de eletrões em várias aplicações, particularmente na área da indústria microeletrónica. De facto, é na produção de componentes microeletrónicos que se verifica uma maior aplicação da soldadura *laser*. No fabrico destes componentes, quer na realização de soldaduras de escala reduzida, são utilizados *lasers* pulsados [58].

Atualmente, a utilização da soldadura *laser* tem vindo a aumentar na produção de componentes para as indústrias automóvel, aeronáutica e aeroespacial, devido à elevada precisão do processo e taxa de produção [58].

3.5.1 Fundamentos da Soldadura *Laser*

Os princípios de funcionamento da tecnologia de soldadura *laser* estão intrinsecamente ligados com os conceitos base da física atómica. Um átomo é constituído por um núcleo, por sua vez formado por neutrões e protões, e por uma nuvem eletrónica composta por eletrões. Quando se fornece energia a um átomo, os eletrões vão alterar a sua posição na nuvem eletrónica, ocupando órbitas superiores com maior energia, com o intuito de alcançarem um equilíbrio entre si. No momento subsequente, em que os eletrões tendem a voltar ao seu estado fundamental, é libertada a energia absorvida por estas partículas sobre a forma de fotões ocorrendo a emissão de um feixe de luz [60, 61, 62].

Deste modo, um sistema *laser* necessita de três elementos fundamentais: uma fonte de excitação, um meio ativo e uma cavidade ressonante. A fonte de excitação representa a fonte de energia que possibilita a excitação dos eletrões. Por sua vez, o meio ativo pode estar no estado sólido, líquido ou gasoso e constitui o meio onde os eletrões do átomo são excitados. Por fim, a cavidade ressonante, sendo constituída por espelhos que refletem o feixe de luz de forma a armazenar energia, permite a oscilação dos fotões que estão a ser emitidos devido ao processo de emissão estimulada, conseguindo-se obter valores de energia bastante elevados [60, 62].

A figura 31 representa o princípio de funcionamento de um sistema *laser*, descrito nos últimos parágrafos, assim como os seus elementos constituintes. Para além dos elementos referidos, a tecnologia *laser* necessita, ainda, de um sistema dissipador de calor capaz de remover o calor libertado pelo meio ativo e não consumido para a produção de radiação *laser*. A dissipação de calor pode ser efetuada por convecção, através de um permutador de calor, ou por condução [60, 62, 63].

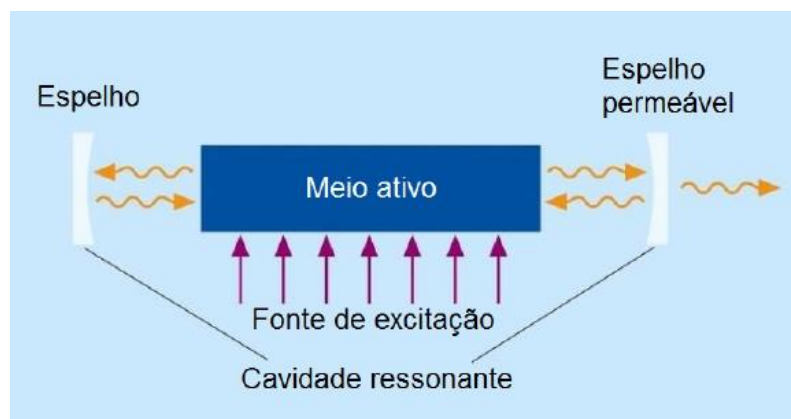


Figura 31 - Princípio de Funcionamento da Tecnologia Laser [62].

Tal como foi referido, na soldadura *laser* um feixe de luz monocromática incide na junta a soldar, aquecendo o material numa zona bastante localizada, a zona focal. Em consequência deste aquecimento localizado, uma parte do material vai fundir originando a ligação pretendida entre os dois componentes [58, 64].

Na soldadura *laser* de componentes elétricos, são utilizadas densidades de potência bastante elevadas, usualmente superiores a 10^{12} W/m², o que promove a fusão e a evaporação dos metais. O vapor produzido origina uma pressão de retração que abre um orifício nas peças a soldar [32, 65]. Este orifício é denominado de “*keyhole*”, no qual o feixe *laser* é refletido e absorvido, obtendo-se elevadas taxas de absorção. Um dos efeitos a evitar durante a execução da soldadura *laser* é a expulsão de material desta cavidade sob a forma de salpicos [32, 64].

O processo tradicional de soldadura *laser* provoca juntas soldadas caracterizadas por larguras reduzidas quando comparadas com a sua profundidade [32, 64, 65]. Deste modo, de maneira a aumentar a área de contacto e obter uma profundidade de soldadura mais estável, podem ser aplicadas oscilações sobrepostas ao feixe *laser*. A figura 32 exhibe a soldadura de duas chapas de aço revestido a níquel, ligadas recorrendo à soldadura *laser* tradicional (à esquerda) e recorrendo à soldadura *laser* com oscilação do feixe (à direita), impondo nesta oscilação uma frequência de 200 Hz e uma amplitude de 0,25 mm. O efeito da oscilação na junta soldada obtida é evidente, alcançando-se uma largura duas vezes superior do que utilizando apenas a soldadura *laser* sem oscilação [32].

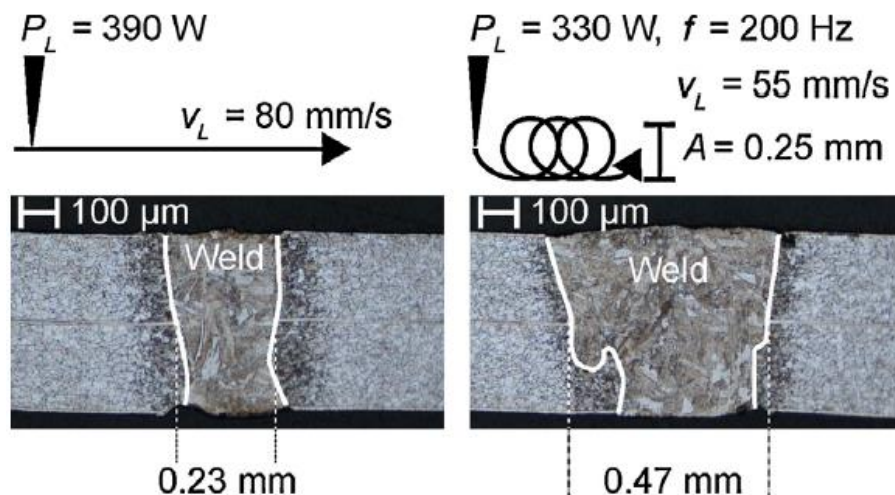


Figura 32 - Análise microscópica da junta soldada obtida por soldadura laser sem oscilação do feixe laser (à esquerda) e com uma oscilação imposta (à direita); Parâmetros do Processo: Potência do Laser (PL), Velocidade do Laser (VL), Frequência de Oscilação (f), Amplitude (A) [32].

3.5.2 Parâmetros do Processo

Os principais parâmetros associados ao processo de soldadura *laser* são a densidade de potência, a velocidade de avanço, o diâmetro do feixe e a distância focal [1, 60]. Outros parâmetros que devem ser controlados nesta tecnologia são o ângulo de divergência, a polarização e o gás protetor utilizado no processo [60].

A potência deve ser selecionada consoante a espessura das peças a soldar, dado que um aumento da espessura das peças conduzirá a um incremento da potência necessária. A utilização de potências elevadas permite, também, o uso de velocidades de soldadura superiores [60, 62].

Por sua vez, a velocidade de soldadura depende da natureza dos materiais a soldar e da penetração pretendida. Uma diminuição da velocidade resulta numa penetração superior. Tendo

em conta a condutividade térmica dos materiais envolvidos, quanto mais espessas forem as peças a unir, menor deve ser a velocidade devido ao aumento da penetração requerida [60].

O diâmetro do feixe *laser* e a distância focal são dois parâmetros intrinsecamente ligados. A aplicação de uma distância focal reduzida resulta num menor diâmetro de foco e consequente diminuição da definição da profundidade de soldadura. Deste modo, a profundidade de soldadura aumenta com a diminuição do diâmetro de foco. Assim, revela-se necessário adequar o valor da profundidade de maneira a evitar uma posição de foco crítica [60].

A correta definição da posição de foco é fundamental para a obtenção de soldaduras *laser* com qualidade. Neste processo, o ponto focal deve situar-se algumas décimas de milímetro abaixo da superfície superior do conjunto de peças a unir. Este requisito assume uma importância vital nos casos em que a profundidade e a penetração são elementos críticos na soldadura [60, 62].

Quanto à polarização do feixe *laser*, este parâmetro influencia a extensão da zona termicamente afetada. Assim sendo, a utilização de uma polarização inadequada resulta na obtenção de uma zona termicamente afetada superior, contribuindo, ainda, para uma velocidade de soldadura inferior e um cordão de soldadura mais espesso. O raio de polarização pode ser linear ou circular [60].

O ângulo de divergência atribuído ao *laser* influencia o caminho percorrido pelo mesmo, devendo ser o menor possível [60].

Por fim, o gás protetor tem como função proteger a soldadura do ambiente atmosférico, evitando a degradação das suas características e que o vapor gerado seja demasiado denso. De maneira a conseguir este último objetivo, quer o ponto de incidência do gás, quer o ângulo do fluxo devem ser controlados. Usualmente, os ângulos utilizados variam entre 30 a 60 graus [60]. Deste modo, o gás de proteção é utilizado para prevenir que o material fundido entre em reação química com alguns constituintes do ar ambiente, como, por exemplo, o oxigénio [63].

Um dos gases mais utilizado para proteção na soldadura *laser* é o hélio (He), dado que este permite a obtenção de uma boa penetração da soldadura e bons acabamentos das juntas soldadas. No caso de equipamentos a operar com *lasers* a CO₂, o azoto (N₂) é o gás normalmente utilizado para este fim, dado que proporciona um acabamento superficial aceitável e uma boa penetração, possibilitando a execução de uma soldadura correta [60, 63]. Nos processos de soldadura em que o gás de proteção não tem grande influência na qualidade da junta soldada alcançada, é utilizado o dióxido de carbono por razões económicas. Na soldadura de ligas de alumínio, o gás de proteção deve ser o hélio ou o azoto, estando a escolha dependente da série da liga em causa [60].

Tal como nos outros processos de soldadura estudados ao longo deste capítulo, verificam-se alguns parâmetros associados às peças a soldar que influenciam a qualidade da soldadura obtida. Deste modo, o estado superficial tem um elevado impacto na qualidade do processo, devendo ser evitada ao máximo a presença de contaminantes na superfície de contacto. A influência do aumento da espessura das peças a unir na potência necessária e na velocidade de avanço do feixe também já foi mencionada ao longo deste subcapítulo. Por fim, a natureza dos materiais metálicos determina a viabilidade de se utilizar a tecnologia de soldadura *laser*. Assim, constatam-se várias complicações na soldadura *laser* de materiais metálicos não ferrosos [60].

3.5.3 Materiais Soldáveis por *Laser*

Devido à transferência de calor ser altamente concentrada numa zona específica durante o processo de soldadura *laser*, este processo pode superar algumas dificuldades inerentes à soldadura de aços ou ligas com elevados teores de carbono, aços inoxidáveis, aços duros e metais refratários, minimizando os problemas que podem ocorrer quando metais sensíveis ao calor são soldados [58, 59]. Deste modo, os materiais a ser soldados, recorrendo a esta tecnologia, não devem conter superfícies polidas ou refletoras, de maneira a maximizar a absorção da energia proveniente do feixe *laser*. A existência de superfícies metálicas que promovam a reflexão do feixe *laser* pode conduzir a outros problemas como, por exemplo, a danificação de componentes na proximidade da soldadura [32, 66]. Este processo não é adequado para soldar materiais como o ouro (Au) e a prata (Ag) [58].

Recentemente, algumas pesquisas têm vindo a ser efetuadas com o intuito de estudar o potencial da tecnologia *laser* em micro soldadura, nomeadamente na junção de materiais dissimilares como o cobre (Cu) e o alumínio (Al) [59]. Enquanto que o primeiro material referido apresenta uma elevada temperatura de fusão e boa fluidez, o segundo possui uma fluidez reduzida, difícil soldabilidade e tendência para a oxidação, o que levanta problemas na soldadura destes materiais através de métodos convencionais. Quando realizada com os parâmetros adequados, a soldadura *laser* promove a fusão do cobre que, revestindo o alumínio, forma por difusão um composto fundido que proporciona a ligação entre estes dois materiais [1, 67]. Durante este processo, pode haver formação de compostos intermetálicos que vão influenciar as propriedades mecânicas da junta soldada, reduzindo a resistência mecânica da mesma, por exemplo [32, 66].

Assim sendo, a soldadura *laser* surge como uma alternativa viável para executar a ligação entre materiais dissimilares que à partida, recorrendo a outras tecnologias, se apresentavam difíceis de unir [1, 59]. Uma variante desta tecnologia, a brasagem *laser*, tem vindo a emergir como um método passível de ser utilizado para realizar juntas soldadas entre alumínio e cobre, com o propósito de reduzir os compostos intermetálicos gerados por outras tecnologias de soldadura [32, 66].

3.5.4 Componentes de um Sistema *Laser*

Um mecanismo de soldadura *laser* é constituído por vários componentes, sendo de realçar a fonte *laser*, as lentes de focagem, a estação de trabalho e os diversos dispositivos que permitem uma utilização em segurança ao seu operador [62].

A fonte *laser* representa o mecanismo onde é produzido o feixe *laser*, sendo considerado o núcleo de todo o sistema. Este componente é, usualmente, constituído por um sistema de dissipação de energia [62, 63].

As lentes de focagem permitem controlar a direção de incidência do feixe *laser* no conjunto de peças a soldar. Este componente possibilita a manipulação da fonte com o intuito de direcionar o feixe para o local pretendido para a junta de soldadura, permitindo uma soldadura localizada de elevada precisão [61, 62].

A estação de trabalho representa a estrutura onde é fixado o conjunto de peças a soldar. Dependendo do sistema, a soldadura pode realizar-se fixando a peça e concedendo ao sistema de focagem um deslocamento relativamente a esta ou de forma contrária, fixando o sistema de focagem e impondo um deslocamento à mesa de fixação [62, 63].

Com o objetivo de garantir a segurança dos seus utilizadores, às máquinas de soldadura *laser* devem possuir certos dispositivos. Devido ao perigo de exposição acidental dos olhos ao feixe *laser* e consequente danificação da retina, estes equipamentos estão normalmente munidos de visores de proteção *laser* ou advertem para a obrigatoriedade do uso de óculos de

proteção. Dada a libertação de fumos tóxicos durante o processo, algumas máquinas contêm, ainda, sistemas de aspiração de vapores [61, 62].

A figura 33, exibida em seguida, representa esquematicamente um sistema *laser* assim como os seus principais constituintes.

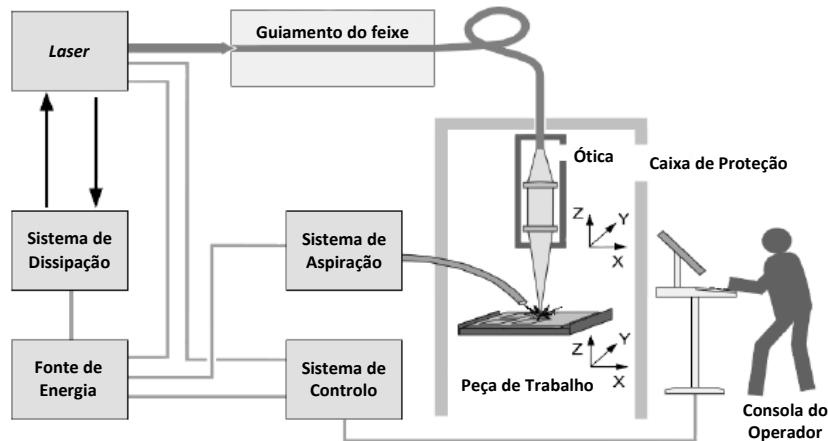


Figura 33 - Representação esquemática de um Sistema Laser e Principais Constituintes (adaptado de [63]).

3.5.5 Tipos de Soldadura

O processo de soldadura *laser* pode ser realizado segundo dois modos distintos, por condução ou penetração (*keyhole*) [62, 64].

Na soldadura por condução apenas ocorre a mudança de estado do material metálico a soldar entre sólido-líquido e vice-versa, não se verificando a vaporização de elementos de liga. Este facto deve-se a não ser necessário a utilização de densidades de potência elevadas, estando o seu valor situado entre 100 a 10^4 W/mm² [61, 62]. Neste tipo de soldadura, a penetração alcançada é bastante menor do que na soldadura por *keyhole* [65]. A profundidade de material fundido devido ao calor transmitido pelo feixe *laser* à peça pode variar entre décimas de milímetro até um milímetro [63]. O princípio de funcionamento da soldadura por condução é exposto na figura 34.

Alguns materiais podem apresentar obstáculos à execução do processo de soldadura por condução de calor, conforme a sua condutividade térmica. Quando o calor transferido para o material a soldar não é dissipado rapidamente, verifica-se uma acumulação de calor e a temperatura pode ultrapassar o valor limite de vaporização. Deste modo, haverá a libertação de vapores metálicos e a penetração aumenta exponencialmente, transformando-se num processo de soldadura por penetração [63, 64].

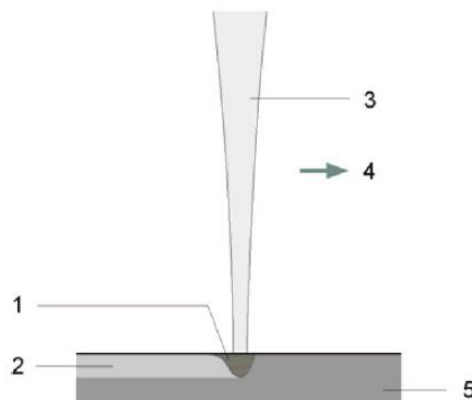


Figura 34 - Princípio de Funcionamento da Soldadura por Condução de Calor: 1 – Material Fundido; 2 – Cordão de Soldadura; 3 – Feixe *Laser*; 4 – Sentido de Avanço; 5 – Peça a Soldar [63].

Na soldadura por penetração a densidade de potência é bastante elevada quando comparada com a utilizada na soldadura *laser* por condução, sendo o seu valor superior a $10\text{kW}/\text{mm}^2$ [61, 62, 63]. Desta forma, a fonte *laser* necessita de possuir maior potência e uma secção de foco mais reduzida. A concentração de uma enorme quantidade de energia promove a fundição do metal, a vaporização do mesmo e a criação de uma bolsa de vapor [62, 63, 68]. Este vapor vai exercer pressão sobre o material fundido, originando o deslocamento do mesmo. Paralelamente a este fenómeno, a energia vai sendo progressivamente absorvida pelo material metálico que vai continuar a fundir, resultando na formação de um orifício estreito e profundo designado por *keyhole*. O cordão de soldadura obtido é caracterizado por uma largura reduzida e profundidade elevada [63, 64, 65, 68].

Deste modo, a soldadura por penetração caracteriza-se pela sua elevada eficiência e velocidade de processamento. Dada a velocidade de síntese do cordão de soldadura, a zona termicamente afetada é bastante diminuta, o que contribui para a minimização das distorções nas peças soldadas [63, 68]. Na figura 35 encontra-se ilustrado o princípio de funcionamento da soldadura por *keyhole* (à esquerda) e a microscopia de um cordão de soldadura efetuado segundo este processo (à direita).

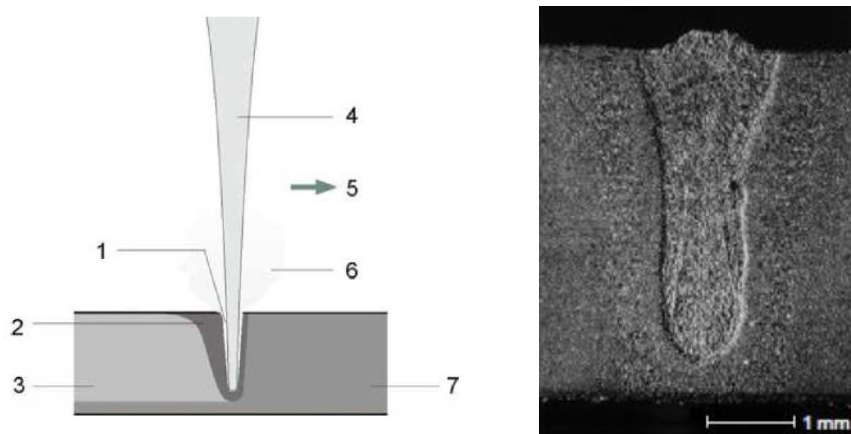


Figura 35 - Princípio de Funcionamento da Soldadura por Penetração: 1 - Keyhole; 2 - Material Fundido; 3 - Cordão de Soldadura; 4 - Feixe *Laser*; 5 - Sentido de Avanço; 6 - Vapor de Metal; 7 - Peça a Soldar; (à esquerda) e Análise Microscópica de um Cordão de Soldadura Efetuado por Penetração (à direita) (adaptado de [63]).

3.5.6 Tipos de *Laser* Utilizados

Os *lasers* utilizados neste processo de soldadura podem operar de forma contínua ou pulsada. No primeiro modo de funcionamento, o feixe *laser* é constante no tempo, ou seja, a excitação dos elétrons que origina o feixe é contínua temporalmente. No modo pulsado, o feixe *laser* varia no tempo, sendo constantemente ligado e desligado alternadamente. Este modo, sendo o mais utilizado, permite obter uma elevada quantidade de energia num curto período temporal, podendo ser aplicado de três modos diferentes: *Q-Switching*, *Modelocking* e *Pulsed pumping* [60, 62].

No processamento de materiais são vários os tipos de *lasers* que podem ser aplicados, estando a sua classificação relacionada com o meio ativo que estes utilizam [63]. Deste modo, existem três grandes grupos de *lasers*, sólidos, líquidos e gasosos, estando a sua seleção dependente da finalidade pretendida [60]. A escolha de um equipamento *laser* deve ter em conta os seguintes fatores [60, 62]:

- Potência máxima necessária;
- Comprimento de onda da radiação emitida;

- Diâmetro do feixe;
- Simetria e estabilidade do feixe;
- Modo eletromagnético.

A tabela 5 resume os principais tipos de *lasers* usados industrialmente, descrevendo o seu meio ativo, comprimento de onda e áreas de aplicação.

Tabela 5 - Tipos de Lasers mais utilizados em Processamento de Materiais (adaptado de [63]).

Tipo de Laser	Meio Ativo	Exemplo/Comprimento de Onda	Área de Aplicação
Lasers Gasosos	Gases ou mistura de gases	CO ₂ (dióxido de carbono) - 10,6 μm	Corte e soldadura de metais, também pode ser aplicado em processos de endurecimento.
Lasers no estado solido	Material cristalino: cristal ou vidro dopado com íons ativos	<i>Nd:YAG (neodymium:yttrium aluminum garnet)</i> - Lasers de haste - 1,064 μm <i>Yb:YAG (ytterbium:yttrium aluminum garnet)</i> - Lasers de disco - 1,03 μm <i>Yb:glass (ytterbium:glass)</i> - Lasers de fibras - 1,05 a 1,1 μm	Soldadura, brasagem <i>laser</i> e corte.
Lasers de díodos	Semicondutores	<i>GaInP (gallium indium phosphide)</i> - 0,67 a 0,68 μm <i>GaAs (gallium arsenide)</i> - 0,78 a 0,98 μm	Soldadura por condução, processos de endurecimento, também é utilizado de forma indireta para bombear <i>lasers</i> no estado solido.
Lasers de Excímeros	Gases raros	Krípton (Kr), xénon (Xe), árgon (Ar) adicionados de um gás halogeneto e hélio (He) - 0,193 a 0,351 μm	Soldadura, corte de materiais metálicos, marcação de materiais e micro-maquinação.

Atualmente, os *lasers* de CO₂ são amplamente utilizados na soldadura de metais por possuírem feixes de elevada qualidade e boa densidade de potência [60]. Estes equipamentos detêm uma grande gama de potências disponível (desde a dezena de Watts até 40 kW), o que torna a sua aplicação bastante flexível [59].

Nos últimos anos, os *lasers* no estado solido têm vindo a sofrer uma enorme evolução, o que resulta num aumento da sua aplicação a nível industrial [60]. A soldadura *laser Nd:YAG* permite uma boa qualidade de soldadura e o uso de velocidades elevadas. Adicionalmente, possui uma elevada penetração e revela-se fácil de automatizar. Contudo, devido ao aquecimento elevado verificado no seu interior, os *lasers Nd:YAG* podem originar distorções térmicas nas superfícies a soldar [61, 62]. Adicionalmente, este tipo de *lasers* possui uma eficiência reduzida [69]. Normalmente, estes *lasers* são comercializados em modo pulsado, dado que possuem picos de potência [61, 62].

Os *lasers Yb:YAG* surgiram como uma solução para as principais desvantagens dos *lasers Nd:YAG*. Nos *lasers Yb:YAG*, devido à espessura fina dos discos, a dissipação de calor é bastante superior, proporcionando um arrefecimento muito mais eficiente e, conseqüentemente, uma qualidade superior do feixe *laser* [60, 62]. Com a finalidade de aumentar o seu rendimento, estes *lasers* são excitados por *lasers* de díodos [62, 69].

Os *lasers* de fibras possuem um tamanho compacto, alta eficiência e excelentes parâmetros de feixe, necessitando de uma reduzida manutenção. Contudo, o principal inconveniente deste equipamento prende-se com o seu preço elevado [62, 69].

Relativamente aos *lasers* de díodos, estes são constituídos por materiais semicondutores bastante compactos, o que faz com que sejam muito aplicados na indústria eletrónica. Porém, ao facto de só conseguirem focar a sua potência em pontos focais de elevado diâmetro traduz-se na obtenção de densidades de potência reduzidas [62, 69].

Por fim, os *lasers* de excímeros garantem uma elevada qualidade final, dado que o seu feixe é extremamente preciso. Deste modo, a zona termicamente afetada na peça de trabalho é bastante reduzida [62]. Esta tecnologia é caracterizada por utilizar pulsos de curta duração e de elevada potência [60].

3.5.7 Estudo Térmico da Soldadura *Laser*

Durante o processo de soldadura *laser* existe a transferência de energia da cavidade formada pela incidência do feixe para as restantes partes das peças metálicas, devido a fenómenos de condução de calor, influenciados pela condutividade térmica dos materiais em questão, e de convecção através do vapor libertado à entrada da cavidade [68]. Deste modo, podem ocorrer problemas de distorção devido ao calor gerado no processo de fusão do material metálico. O calor transferido ao restante material das peças a soldar pode originar empenos resultantes de expansões e contrações térmicas. Assim, torna-se fundamental assegurar a existência de dissipação de calor. Esta dissipação pode ser efetuada recorrendo à soldadura em modo pulsado ou substituindo cordões contínuos por traços que permitam gerar curtas interrupções para dissipação de calor [63].

Contudo, quando comparada com outros processos de soldadura, a tecnologia laser provoca uma zona termicamente afetada bastante diminuta devido à elevada concentração de energia numa área muito localizada, sendo os defeitos referidos no parágrafo anterior também mínimos [57].

No caso dos condensadores de filme metalizado, onde um terminal é soldado à camada de metalização, de espessura reduzida, que reveste as extremidades da célula condensadora, a fusão dos materiais a ligar deve ser cuidadosamente analisada, de maneira a acautelar uma transferência de calor excessiva para o interior do elemento condensador e possível danificação do filme de polipropileno metalizado.

3.5.8 *Laser Soldering*

A tecnologia de soldadura “*Laser Soldering*” resulta da combinação dos fundamentos dos processos de brasagem fraca e soldadura *laser*. Deste modo, um feixe *laser* é utilizado para aquecer um material de adição (solda), devidamente posicionado na junta de soldadura entre os materiais metálicos a unir, até à sua temperatura de fusão [69]. Ao arrefecer, o material de adição vai solidificar, originando uma ligação entre os materiais base.

Tal como no processo de soldadura *laser*, a presença de um feixe incidente numa área muito localizada resulta na formação de uma diminuta zona afetada pelo calor, tornando esta tecnologia particularmente adequada para efetuar uniões em componentes sensíveis ao calor. Adicionalmente, a utilização de um material de adição possibilita o uso de temperaturas mais reduzidas, dada a necessidade de fundir somente a solda e não os materiais metálicos em contacto. Assim sendo, esta tecnologia promove um controlo bastante preciso da transferência de energia para a junta de soldadura [69].

O elevado controlo da energia transferida através do feixe *laser* para a junta de soldadura resulta num controlo superior das taxas de aquecimento e arrefecimento da junta, permitindo controlar a evolução da sua microestrutura e, deste modo, as propriedades mecânicas da mesma [69, 70, 71].

A principal vantagem da utilização do processo de *laser soldering* no fabrico de componentes elétricos e eletrónicos prende-se, essencialmente, com as características enunciadas nos parágrafos anteriores, dado que permite um elevado controlo da zona termicamente afetada, menores temperaturas de soldadura comparativamente aos processos convencionais e uma alta precisão do processo [69].

Durante o processo de brasagem por *laser*, a energia sob a forma de calor tem de ser transferida do feixe para o material de adição. A eficiência desta transferência depende de inúmeros fatores, sendo os mais críticos o comprimento de onda do *laser* e a natureza do material onde o feixe vai incidir. Isto deve-se à elevada percentagem de energia disponível que pode ser dissipada por reflexão, estando este fenómeno dependente dos dois parâmetros referidos [69].

A utilização de um material de adição favorece a união de materiais metálicos dissimilares com diferentes pontos de fusão. Tal como no processo de brasagem fraca, a temperatura de fusão da solda deve ser, no mínimo, 50 °C inferior ao ponto de fusão dos elementos metálicos a ligar [13]. Devido às temperaturas envolvidas no processo serem relativamente reduzidas, é possível efetuar a ligação sem que haja a formação de compostos intermetálicos frágeis, evitando-se a ocorrência de transformações metalúrgicas indesejáveis e consequente degradação das propriedades mecânicas das juntas [70].

A ligação de constituintes nas placas de circuitos é um dos exemplos da aplicação desta tecnologia na indústria de componentes eletrónicos. Nesta aplicação são usualmente utilizadas as soldas SAC (estanho-prata-cobre), cujas propriedades já foram apresentadas na secção 3.2.4, referente às ligas utilizadas como soldas no processo de brasagem fraca. Estas soldas potenciam propriedades mecânicas de qualidade superior nas juntas soldadas, assim como possibilitam uma boa molhagem no cobre e respetivas ligas. Embora as soldas à base de estanho-chumbo assegurem o cumprimento dos principais requisitos da indústria elétrica/eletrónica, estas têm vindo a ser preteridas pelas soldas SAC devido às regulações ambientais mais restritas, dada a elevada toxicidade do chumbo [70].

Porém, a temperatura de fusão das ligas tendo por base o sistema estanho-prata-cobre à composição eutética, sendo superior à temperatura de fusão das ligas à base de estanho-chumbo à composição eutética (221 °C vs 183 °C), pode impor alguns desafios à soldagem de componentes elétricos/eletrónicos por métodos tradicionais, contribuindo para o aumento das tensões térmicas nas juntas soldadas [70]. Assim, a tecnologia *laser soldering* destaca-se como sendo um processo promissor para mitigar estas contrariedades [69].

Usualmente, para realizar a ligação de peças segundo este processo, recorre-se a dois tipos de *lasers* [70]:

- *Lasers* de CO_2 no estado gasoso;
- *Lasers Nd:YAG* (*neodymium:yttrium aluminum garnet*) no estado sólido.

Qualquer um destes dois tipos de *laser* promove o aquecimento localizado somente na área de junta. A utilização de um feixe muito preciso possibilita a execução de micro-soldaduras, por exemplo, em placas de circuitos, sem comprometer os componentes sensíveis ao calor na sua periferia [69, 70, 71]. Recorrendo aos *lasers Nd:YAG* é possível uma absorção seletiva da energia do feixe por parte dos materiais metálicos, devido ao comprimento de onda específico deste tipo de *lasers* (1.064 μm), permitindo um varrimento contínuo do feixe através da junta sem comprometer os restantes componentes. Os *lasers Nd:YAG* viabilizam o alcance da temperatura de fusão quer das soldas à base de estanho-chumbo, quer das soldas SAC [70].

Nos últimos anos, os *lasers* de díodos, constituídos por materiais semicondutores, têm vindo a ser aplicados no processo de *laser soldering* no fabrico de componentes elétricos/eletrónicos [69]. O curto comprimento de onda que caracteriza a energia dos *lasers* de díodos faz com que estes sejam mais facilmente absorvidos por superfícies metálicas.

A tecnologia *laser soldering*, por ser um processo sem contacto, permite a execução de ligações em zonas de difícil acesso e em superfícies curvas, que poderiam revelar alguns impedimentos quando realizadas segundo processos convencionais [69]. Deste modo, esta tecnologia viabiliza a resposta a certas dificuldades inerentes aos processos de soldadura convencionais, sendo, ainda, uma alternativa para os casos em que o custo inerente à brasagem manual são proibitivos para produções em série [69, 71].

3.6 Comparação dos Diversos Processos

Ao longo deste capítulo foram descritos vários processos de soldadura passíveis de serem aplicados na indústria de componentes elétricos/eletrônicos, nomeadamente na produção de condensadores *DC-Link* de filme metalizado, possibilitando obter elevada performance elétrica sem detrimento das suas propriedades mecânicas [1]. Deste modo, este subcapítulo surge da necessidade de proceder a um resumo das características de cada um dos processos abordados, comparando as suas vantagens e limitações e refletindo sobre a sua adequação à aplicação em causa.

De todos os processos considerados, a brasagem fraca é o que possui maior flexibilidade de aplicação. Contudo, por ser um processo de difícil automatização, realizado usualmente de forma manual, esta tecnologia necessita de operadores qualificados [21]. Este facto dificulta um controlo preciso dos parâmetros associados ao processo, não sendo possível garantir a sua exata repetibilidade para grandes séries [21]. As tecnologias de soldadura por pontos, ultrassons e *laser* verificam-se relativamente fáceis de automatizar, após estarem otimizadas, permitindo a obtenção de elevadas cadências produtivas [28, 41, 58].

Embora os processos de brasagem fraca e soldadura por ultrassons sejam os mais adequados, todas as tecnologias de soldadura consideradas neste capítulo permitem a união de materiais dissimilares. Todavia, algumas tecnologias podem apresentar algumas limitações ao nível dos materiais dos componentes a soldar. Deste modo, a soldadura por pontos possui uma reduzida eficiência na união de materiais com elevada condutibilidade térmica/elétrica [28]. Em oposição, a soldadura por ultrassons potencia a ligação destes materiais [41]. Quanto à soldadura *laser*, esta apresenta algumas limitações na união de materiais com superfícies polidas devido à reflexão do feixe incidente [58].

Os processos de soldadura por pontos e por ultrassons são bastante limitados em termos de geometria de junta, viabilizando somente a união de peças sobrepostas (*“lap joints”* ou *“tee joints”*). Os restantes processos não apresentam limitações significativas relativamente às geometrias de junta executáveis. Adicionalmente, devido à necessidade de exercer uma força de compressão, as duas tecnologias referidas não permitem a execução de soldaduras acedendo apenas a um lado do conjunto de componentes a soldar [28, 41].

As tecnologias de soldadura por pontos e de soldadura laser permitem efetuar ligações na periferia de componentes sensíveis ao calor, sem que se verifique a ocorrência de distorções térmicas nas peças soldadas, já que possibilitam uma transferência de energia bastante localizada [28, 58].

Relativamente aos custos associados às tecnologias, a soldadura laser apresenta um elevado custo dos equipamentos, sendo apenas sustentável para a produção de grandes séries de componentes [58]. Em oposição, a brasagem fraca é o processo que requer um menor custo em termos de equipamentos utilizados, porém os custos associados ao controlo de qualidade do processo podem ser elevados [21].

A possibilidade de utilizar diferentes tecnologias de ligação em etapas distintas da cadeia produtiva dos condensadores *DC-Link* irá permitir usufruir das vantagens de cada uma e, ao mesmo tempo, mitigar algumas das limitações. Com o mesmo intuito, a utilização de tecnologias híbridas que resultam da combinação de dois processos, como, por exemplo, a brasagem utilizando como fonte de calor um feixe laser ou uma resistência, pode evidenciar-se como uma solução interessante [1]. A tabela 6 resume as diversas vantagens e desvantagens associadas a cada um dos processos de soldadura estudados.

Tabela 6 - Comparação das Vantagens e Desvantagens das Diferentes Tecnologias de Ligação de Metais Consideradas (adaptado de [1]).

	Vantagens	Desvantagens
Brasagem Fraca	<ul style="list-style-type: none"> • Origina menores distorções térmicas e tensões residuais; • Reduz a reação metalúrgica entre os materiais de base e o material de adição (dado que os metais a ligar não são fundidos); • Pode ser utilizada para ligações de materiais dissimilares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de uma boa preparação da superfície dos componentes, de modo a garantir um bom contacto entre as superfícies, molhagem e ausência de impurezas; • Processo de difícil automatização pela necessidade de aplicação do material de adição e utilização de fluxo; • Necessita de operadores qualificados quando realizada manualmente; • O material de adição tem propriedades mecânicas inferiores às dos materiais a ligar; • Elevado custo associado à dificuldade de controlo de qualidade.
Soldadura por Pontos	<ul style="list-style-type: none"> • A zona termicamente afetada é reduzida, com baixa acumulação de temperatura e reduzidas distorções térmicas; • Permite obter elevadas velocidades de soldadura (10 m/min para chapas finas e 3 m/min para chapas espessas); • Processo fácil de automatizar e com arranque rápido; • Os riscos ambientais associados ao processo são mínimos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de uma preparação cuidada das zonas a ligar, resultando num aumento das etapas e do custo; • Requer uma elevada capacitância, precisando de instalações elétricas específicas; • Possui uma baixa eficiência em materiais com elevada condutibilidade térmica/ elétrica (por exemplo: Cu e Al).
Ultrassons	<ul style="list-style-type: none"> • Ligações soldadas apresentam boas propriedades elétricas; • Pode ser utilizado em ligações entre materiais dissimilares; • Permite ligar tanto secções espessas como finas; • Processo simples, fácil de automatizar e com resultados interessantes para ligações entre materiais com elevada condutibilidade térmica (por exemplo: Cu, Au, Al, Ag); 	<ul style="list-style-type: none"> • Processo limitado a uma geometria de junta; • A potência necessária para a ligação aumenta exponencialmente com o aumento da dureza dos materiais a soldar; • Depende da deformação dos materiais metálicos a ligar; • Pode gerar poluição sonora devido à ressonância das peças a ligar.
Laser	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de automatizar depois de estar otimizado, sendo adequado para a produção em série; • Permite um controlo preciso da energia transferida para a junta da soldadura; • Ao ser localizado, não provoca elevada entrega térmica nem causa deformações significativas na chapa; • Permite a soldadura de componentes sensíveis ao calor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Somente adequado para ligação de chapas de espessura reduzida; • Custo associado aos equipamentos e ao processo elevado; • Escalabilidade do equipamento reduzida.

Com o intuito de obter uma perspectiva geral acerca da adequação dos diversos processos, abordados ao longo deste capítulo, na ligação de componentes na indústria de componentes elétricos/eletrônicos, Brand *et al* [13] realizaram uma análise quantitativa em termos de calor transferido para a célula, resistência elétrica de contacto e resistência mecânica da junta soldada, numa ligação entre uma célula de bateria e um terminal [13, 32].

Deste modo, para comparar as diferentes tecnologias de ligação de metais foram utilizadas chapas de CuZn37 com 0,2 mm de espessura ligadas ao terminal negativo de células de baterias de lítio cilíndricas com a designação 26650. O terminal negativo deste tipo de células é constituído por aço revestido a níquel [13, 32]. As chapas de CuZn37 foram escolhidas dado que este material permite a aplicação de todos os processos considerados [32].

Para investigar a transferência de calor para a célula, no caso da brasagem fraca, foram utilizadas três soldas com pontos de fusão distintos (90 °C, 124 °C e 145 °C, respetivamente). Com o objetivo de reduzir o tempo de aquecimento, de maneira a não danificar a célula, a temperatura dos ferros de brasagem manual foi estabelecida em 450 °C [13].

As figuras 36 e 37 exibem as imagens térmicas obtidas imediatamente após o processo de união dos componentes e seis segundos após a conclusão do mesmo, para a tecnologia de brasagem fraca (*soldering*) e para os restantes processos de soldadura, respetivamente. Estas imagens foram conseguidas recorrendo a uma câmara termográfica [13].

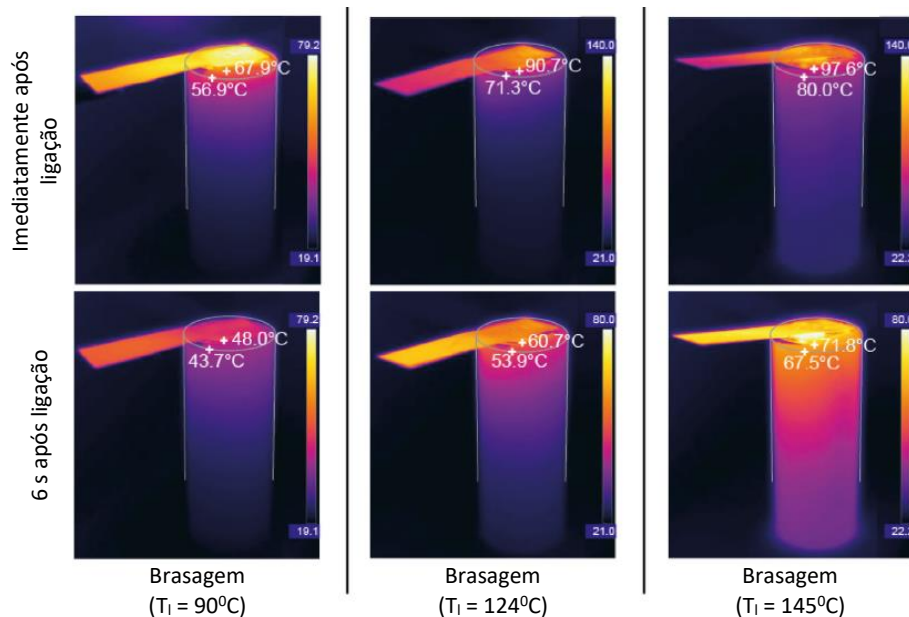


Figura 36 - Imagens Térmicas Obtidas para o Processo de Brasagem Fraca Utilizando Soldas com Diferentes Temperaturas de Fusão (adaptado de [13]).

Através da observação das figuras 36 e 37 é possível concluir que os processos de soldadura por pontos e de soldadura *laser* permitem efetuar a ligação entre os dois componentes sem que se verifique uma elevada transferência de calor para a célula, garantindo assim a integridade desta e salvaguardando a sua danificação [32]. Nestes processos, a transferência de energia é bastante localizada. Opostamente, no processo de brasagem fraca verificou-se a maior transferência de calor para a célula após a execução da ligação [13].

Assim sendo, no processo de soldadura por pontos a máxima temperatura obtida no topo da célula foi de 31 °C, enquanto que na soldadura *laser* foi de aproximadamente 87 °C. Esta disparidade deve-se, em parte, à diferença na área de soldadura concebida nos dois processos [13]. A maior temperatura registada no topo da célula foi obtida para o processo de soldadura por ultrassons (cerca de 110 °C), embora neste a área de soldadura gerada seja consideravelmente superior quando comparada com a obtida nos processos de soldadura por

pontos e *laser*. Ainda assim, seis segundos após a conclusão da soldadura, a temperatura diminui para metade [13, 32]. No processo de brasagem fraca, utilizando uma solda com temperatura de fusão equivalente a 145 °C, alcançou-se uma temperatura máxima no topo da célula de 97,6 °C. Contudo, através da visualização da figura 36, verifica-se que a transferência de calor para a célula é bastante superior do que nos outros processos, havendo uma maior distribuição da temperatura ao longo da célula de bateria e um menor decremento da mesma seis segundos após findado o provisionamento de calor [13].

É de relembrar que no processo de brasagem fraca a temperatura mínima que se tem de alcançar corresponde à temperatura de fusão da solda utilizada. No caso da soldadura por pontos, a temperatura obtida em cada ponto corresponde ao ponto de fusão dos metais em contacto. Na soldadura por ultrassons, 30 a 60 % desta temperatura deve ser atingida para se conseguir a união entre os materiais metálicos. Relativamente à soldadura *laser* por *keyhole*, alcança-se a temperatura de ebulição do material base [13, 32].

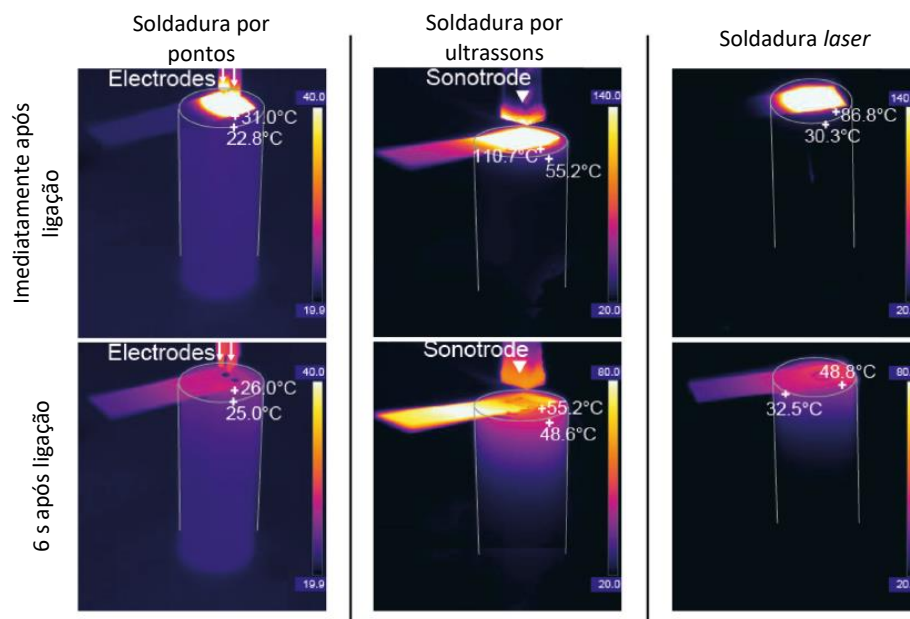


Figura 37 - Imagens Térmicas Obtidas para os Processos de Soldadura por Pontos, por Ultrassons e Laser, respetivamente (adaptado de [13]).

Os resultados alcançados nos estudos efetuados por Brand *et al* [13], relativos à resistência elétrica de contacto, podem ser visualizados na figura 38. Nesta ilustração, é representado um eixo das abcissas independente para cada um dos processos de ligação de metais analisados, dado que a área de contacto e a geometria de soldadura depende de cada tecnologia e não é quantitativamente comparável entre estas [13]. Deste modo, a área de contacto foi variando na brasagem fraca através da variação da área de sobreposição, na soldadura por pontos consoante a alteração do número de pontos efetuados, na soldadura por ultrassons através da variação da área do sonótrodo utilizado e na soldadura *laser* segundo a alteração do tamanho dos cordões de soldadura gerados pelo feixe [13]. Apenas no último ponto considerado no gráfico presente na figura 38 é que os processos podem ser comparados, já que estes se encontram otimizados [32].

Como se pode constatar, a brasagem fraca é o processo que permite obter os melhores resultados, dado que minimiza a resistência elétrica na zona de contacto entre as duas peças, sendo o seu valor aproximadamente 0,080 mΩ. Este resultado pode ser explicado devido à presença de um metal de adição inserido entre os metais base e à difusão atómica existente entre estes. O segundo valor mais reduzido, cerca de 0,130 mΩ, foi alcançado para a soldadura *laser* [13].

As tecnologias de soldadura por pontos e de soldadura por ultrassons conduziram a resistências elétricas de contacto relativamente elevadas, sendo o seu valor $0,167\text{ m}\Omega$ e $0,169\text{ m}\Omega$, respetivamente [13]. No primeiro caso, este resultado pode ser explicado devido à propensão deste processo gerar poros preenchidos com vapores de zinco no núcleo de soldadura. No segundo caso, a elevada resistência elétrica pode ser explicada pela ocorrência de somente uma adesão superficial dos metais em contacto [13, 32].

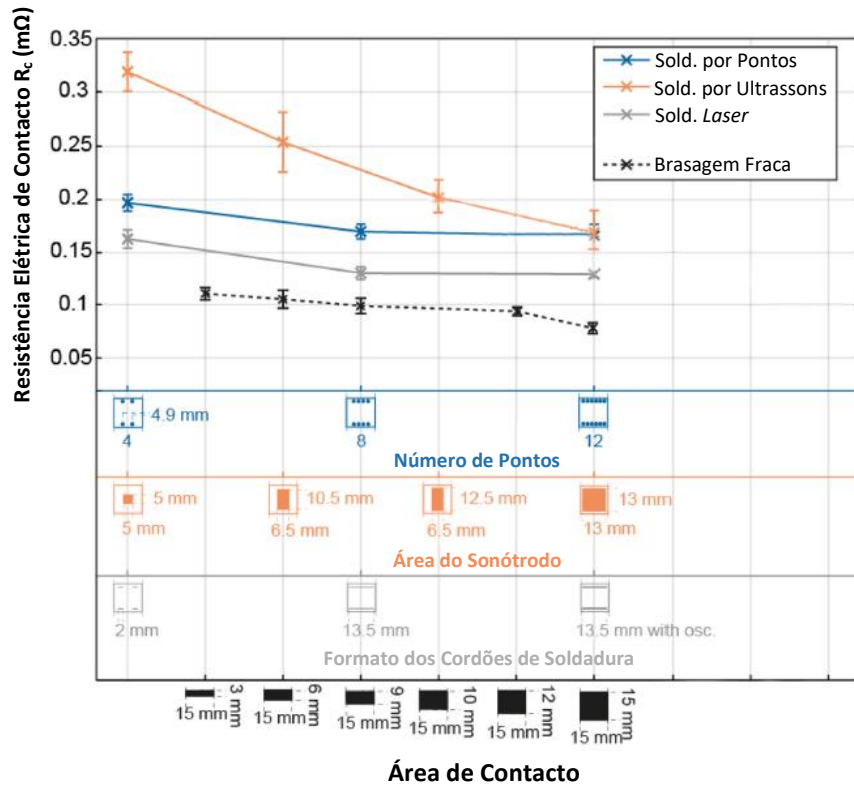


Figura 38 - Resultados relativos à resistência elétrica de contacto alcançada para as distintas tecnologias de ligação de metais consideradas (adaptado de [13]).

Com o objetivo de estudar a resistência mecânica das juntas soldadas, foram realizados testes de arrancamento segundo a direção longitudinal às chapas. Os resultados obtidos em termos de força suportada podem ser visualizados na figura 39. Nas tecnologias de soldadura, todas as amostras testadas romperam pelo cordão de soldadura. Contudo, na brasagem fraca, o arrancamento deveu-se à fadiga do material, não ocorrendo na junta soldada [13, 32]. Assim, a resistência mecânica da junta para o caso da brasagem fraca, é ainda superior à obtida [13].

Através da análise dos resultados adquiridos, constata-se que a brasagem fraca é o processo para o qual se obtém o valor mais elevado para a força de tração, situando-se este nos 1112,30 N. Este resultado pode ser explicado pelos fenómenos de difusão ocorrentes nesta tecnologia, gerando juntas bastante coesas. O segundo valor mais elevado obteve-se para o processo de soldadura *laser*, sendo este equivalente a 876,80 N. Relativamente à tecnologia de soldadura por ultrassons, o maior valor alcançado foi de 661,32 N. Por fim, o valor mais reduzido referente à força de tração máxima foi conseguido para o processo de soldadura por pontos, sendo este igual a 316,78 N [13]. Este resultado deve-se, em parte, devido à presença de poros dentro do núcleo de soldadura, fenómeno referido anteriormente na análise dos resultados relativos à resistência elétrica [13, 32].

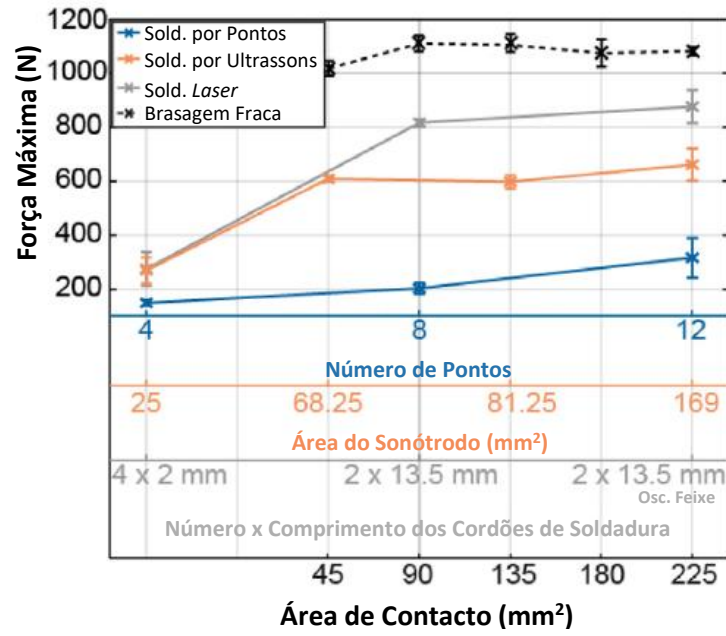


Figura 39 - Resultados relativos à força de tração máxima alcançada para as distintas tecnologias de ligação de metais consideradas (adaptado de [13]).

4 Procedimento Experimental

A presente investigação tem como principal objetivo a análise aprofundada das tecnologias de ligação atualmente implementadas no processo produtivo (montagem) dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado, na *Vishay* Eletrónica Portugal, e consequente otimização dos seus parâmetros, bem como analisar a viabilidade técnica de utilização de novas geometrias de terminais a conectar diretamente aos elementos condensadores.

Assim, a componente experimental deste projeto será composta por duas análises distintas:

1. Análise dos processos atualmente implementados - a primeira etapa do procedimento experimental tem como objetivo o estudo das ligações soldadas através das tecnologias atualmente implementadas no processo produtivo dos condensadores *DC-Link* (brasagem fraca e soldadura por pontos), entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada;
2. Análise da viabilidade de utilização de novas geometrias de terminais - a segunda etapa do procedimento experimental relaciona-se com a análise da viabilidade de utilização de novas geometrias dos terminais em cobre (em substituição da rede de cobre estanhado), diretamente acoplados às células condensadoras. Esta etapa tem como objetivo analisar novas possibilidades em termos de geometrias/materiais que permitam uma melhoria da robustez elétrica e mecânica, acompanhada de uma redução de custos, pontos fundamentais para o aumento da competitividade da empresa face ao mercado atual.

Na primeira etapa, pretende-se, então, estudar os processos de brasagem e soldadura por pontos entre as bobines e a rede de cobre estanhado, atualmente implementados na empresa. Desta forma, deseja-se analisar a influência dos parâmetros associados aos processos nas propriedades elétricas e mecânicas da ligação e, ainda, verificar a influência destes na zona termicamente afetada por análises metalográficas, parâmetro fundamental no caso dos condensadores devido à sua sensibilidade a altas temperaturas. Esta etapa envolve então as seguintes fases:

- Definição do plano experimental (combinações de parâmetros a implementar);
- Ensaios mecânicos da junta soldada:
 - Metodologia de ensaio;
 - Definição da geometria dos provetes;
 - Produção dos provetes;
- Ensaios elétricos da junta soldada:
 - Metodologia de ensaio;
 - Definição da geometria dos provetes;
 - Produção dos provetes;
- Análise metalográfica da ligação:
 - Preparação dos provetes.

O segundo objetivo deste projeto relaciona-se com o estudo das novas geometrias dos terminais em cobre, a conectar diretamente aos elementos condensadores, envolvendo este as seguintes etapas:

- Definição do plano experimental (parâmetros e geometrias de terminal a implementar);
- Ensaios mecânicos da junta soldada:
 - Metodologia de ensaio;
 - Definição da geometria dos provetes;
 - Produção dos provetes;
- Ensaios elétricos da junta soldada:
 - Metodologia de ensaio;
 - Definição da geometria dos provetes;
 - Produção dos provetes;
- Análise metalográfica da ligação:
 - Preparação dos provetes.

Deste modo, com o presente projeto e respetiva componente experimental, pretende-se obter dados que permitam à empresa aumentar a eficiência das soluções atualmente adotadas, em termos de robustez elétrica e mecânica das soldaduras obtidas e, ao mesmo tempo, testar novas soluções que possam ser adotadas num futuro próximo, de maneira a dar resposta às necessidades de mercado inerentes a este tipo de produtos.

Adicionalmente, a análise prática dos mecanismos de ligação de um condensador, recorrendo à execução de ensaios de soldadura, irá permitir superar algumas limitações das diferentes tecnologias utilizadas e aumentar a flexibilização dos processos de ligação na cadeia produtiva dos condensadores de filme metalizado produzidos pela *Vishay®*. Para tal, será necessário o conhecimento das normas que orientam os ensaios de soldadura e a correta definição das metodologias dos testes experimentais, das geometrias dos provetes de teste e das configurações dos ensaios. Somente deste modo será possível uma análise precisa da viabilidade técnica de cada uma das soluções adotadas e consequente seleção das mais promissoras.

Nos subcapítulos que se seguem, será apresentada a definição do plano experimental adotado nesta investigação, assim como o número de provetes necessários à sua execução. Adicionalmente, para cada tipologia de testes realizados, será explanada a definição da geometria dos provetes, assim como o seu processo produtivo, a validação dos ensaios experimentais a realizar e os instrumentos utilizados para esse efeito. Sempre que necessário, serão também apresentadas as normas que justificam os procedimentos adotados.

4.1 Definição do Plano Experimental

Relativamente ao estudo das ligações efetuadas entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada, considerando a pesquisa bibliográfica realizada previamente, definiu-se como metodologia experimental a variação dos parâmetros temperatura e tempo, para o caso da brasagem fraca, e da intensidade da corrente e do tempo, para o caso da soldadura por pontos. Para cada um dos processos referidos, os restantes parâmetros de soldadura foram mantidos constantes durante a execução da totalidade dos testes experimentais. Para cada combinação de parâmetros efetuada, foram definidas como necessárias cinco amostras ($n=5$) para os ensaios relativos às propriedades mecânicas e às propriedades elétricas, sendo, adicionalmente, analisada metalograficamente uma amostra.

A tabela 7 sintetiza a informação mencionada, ao longo do último parágrafo, respeitante à definição do plano experimental dos testes de soldadura efetuados às ligações “condensador/rede de cobre estanhada” e respetivo número de provetes necessário à sua realização.

Tabela 7 - Número de Provetes Necessário para os Testes às Ligações “Condensador/Rede de Cobre Estanhada”.

Processo	Número de Teste	Parâmetros Variáveis	Testes Experimentais – Número de Provetes Necessários				Número Total de Provetes
			Microestrutura	Mecânicos	Elétricos		
					Iniciais	Finais	
Brasagem Fraca (Soldering)	1	T = 320 °C; t = 3 s	1	5	5		11
	2	T = 320 °C; t = 5 s	1	5	5		11
	3	T = 360 °C; t = 3 s	1	5	5		11
	4	T = 360 °C; t = 5 s	1	5	5		11
	5	T = 400 °C; t = 3 s	1	5	5		11
	6	T = 400 °C; t = 5 s	1	5	5		11
Soldadura por Pontos (Welding)	7	IC = 56; t_r = 3	1	5	5		11
	8	IC = 56; t_r = 4	1	5	5		11
	9	IC = 64; t_r = 3	1	5	5		11
	10	IC = 64; t_r = 4	1	5	5		11
	11	IC = 72; t_r = 3	1	5	5		11
	12	IC = 72; t_r = 4	1	5	5		11
		Número Total de Provetes	12	60	60		132
		Número Total de Testes	12	60	120		192

*Onde: T – Temperatura; t – tempo; IC – Intensidade da Corrente (referência); t_r – tempo (referência).

Os valores de intensidade da corrente e de tempo presentes na tabela 7, relativos ao processo de soldadura por pontos, representam uma referência intrínseca ao equipamento de soldadura utilizado, sendo por isso adimensionais. A correspondência entre estes e os parâmetros associados ao processo de soldadura por pontos, tempo (em ciclos) e intensidade da corrente (em kA), encontra-se apresentada na tabela 11 (página 69).

Relativamente ao estudo da utilização de novas geometrias dos terminais em cobre, diretamente ligados aos elementos condensadores, foram analisadas cinco geometrias distintas, mantendo-se os parâmetros associados ao processo constantes para ambas as tecnologias utilizadas. Nesta análise, o número de amostras definido para cada tipologia de ensaio foi equivalente ao determinado anteriormente para o estudo das ligações entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada.

A tabela 8 resume a informação mencionada, ao longo do último parágrafo, referente à definição do plano experimental dos testes de soldadura efetuados às novas geometrias de terminais, apresentando o número de provetes necessário à sua execução.

Tabela 8 - Número de Provetes Necessário para os Testes às Novas Geometrias de Terminais.

Processo	Geometrias	Testes Experimentais – Número de Provetes Necessários				Número Total de Provetes
		Microestrutura	Mecânicos	Elétricos		
				Iniciais	Finais	
Brasagem Fraca (<i>Soldering</i>)	Geometria 1	1	5	5		11
	Geometria 2	1	5	5		11
	Geometria 3	1	5	5		11
	Geometria 4	1	5	5		11
	Geometria 5	1	5	5		11
Soldadura por Pontos (<i>Welding</i>)	Geometria 1	1	5	5		11
	Geometria 2	1	5	5		11
	Geometria 3	1	5	5		11
	Geometria 4	1	5	5		11
	Geometria 5	1	5	5		11
	Número Total de Provetes	10	50	50		110
	Número Total de Testes	10	50	100		160

É ainda de se realçar que os ensaios às propriedades elétricas, para as duas análises efetuadas, foram realizados antes e após um envelhecimento artificial aplicado aos provetes, com o intuito de se averiguar a ocorrência de degradação das propriedades elétricas da ligação soldada. Este envelhecimento artificial possui uma duração total de 10 dias, sendo constituído por ciclos de 30 minutos com temperatura mínima de -40 °C e temperatura máxima de 125 °C.

Tal como se poderá verificar pelas informações contidas nos próximos subcapítulos, o tipo e a geometria dos provetes necessários à execução dos ensaios experimentais podem variar consoante a tipologia de teste, para cada uma das análises efetuadas. Assim, a definição da geometria dos provetes e a descrição aprofundada do seu processo produtivo serão apresentadas para cada tipologia dos ensaios realizados.

4.2 Análise da Solução Utilizada Atualmente na Empresa

A solução implementada pela *Vishay Eletrónica Portugal* para executar as ligações entre os diversos elementos condensadores (bobines) em paralelo no interior de um condensador *DC-Link* envolve a utilização de uma rede de cobre estanhada, o que permite uma maior flexibilização do processo embora prejudique a sua automatização e, conseqüente, escalabilidade. A união de cada bobine à rede é, atualmente, realizada recorrendo à brasagem fraca, realizada de forma manual ou semiautomática, e à soldadura por pontos, realizada de forma semiautomática.

No que diz respeito à tecnologia de brasagem fraca (*soldering*), esta ligação é efetuada utilizando os seguintes parâmetros:

- **Material de Adição:** SAC305;
- **Fluxo:** 2,2 % de fluxo interno à solda (*Alpha Telecore® HF-850*);
- **Temperatura:** 450 °C quando realizada de forma manual e 410 °C quando realizada de forma semiautomática;
- **Reflow Time:** 5 segundos (Parâmetro controlado pelo operador);
- **Pressão de Contacto:** Manual (Parâmetro controlado pelo operador);
- **Área do Ponto de Soldadura:** Variável dependente do tempo, da pressão e da quantidade de material de adição (Parâmetro controlado pelo operador).

Como se pode verificar através da análise dos parâmetros enunciados, a brasagem fraca, realizada manualmente, induz uma grande variabilidade ao processo. A utilização de ferros de brasagem manual resulta na impossibilidade de efetuar as ligações mantendo constante a pressão de contacto exercida, estando esta variável associada ao método de cada operador. Adicionalmente e, associada a este fator, a ausência de controlo sobre a quantidade específica de material de adição utilizado em cada ligação faz com que haja variações na área dos pontos de soldadura gerados. O “*reflow time*”, ou seja, o tempo que a solda demora a depositar-se na área de soldadura após fusão no contacto com o ferro de soldar depende, também, da habilidade de cada operador. Deste modo, todas as situações referidas terão impacto nas propriedades concedidas à ligação soldada entre cada bobine e a rede de cobre estanhada, dificultando a repetibilidade do processo e conseqüente controlo de qualidade.

Na secção 3.2.4, referente às ligas utilizadas no processo de brasagem fraca (páginas 22 a 25), foram elucidadas as propriedades das soldas SAC, compostas à base de estanho, prata e cobre (Sn-Ag-Cu), nomeadamente da SAC305 (composição: 96,5 % de estanho, 3 % de prata e 0,5 % de cobre). Esta solda possui uma temperatura de fusão de, aproximadamente, 221 °C, sendo esta temperatura bastante reduzida quando comparada com a temperatura definida pela empresa para execução do processo de soldagem (410 °C/450 °C). Assim sendo, constata-se que a temperatura atualmente utilizada poderá ser excessiva, devendo este parâmetro ser alvo de uma análise refletida. É de relembrar que uma temperatura elevada, associada a um “*reflow time*” extenso, poderá resultar numa transferência de calor excessiva para o elemento condensador, o que poderá comprometer o seu funcionamento através da danificação do filme metalizado. No entanto, neste processo poderá justificar-se a elevada temperatura utilizada, devido à ineficiência do método de aquecimento, que deverá ser otimizado, tal como referido na revisão bibliográfica.

Nesta etapa do trabalho experimental foi, então, analisada a influência dos parâmetros tempo e temperatura nas propriedades das ligações efetuadas entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada, através da sua variação. Para tal, foram definidos três valores de temperatura e dois valores de tempo distintos, consoante a informação exposta na tabela 9. A solda utilizada na totalidade dos ensaios experimentais foi a SAC305 com 2,2 % de fluxo interno (*Alpha Telecore® HF-850*). Na tentativa de manter constante os restantes parâmetros

associados ao processo de brasagem fraca, as diversas ligações inerentes à produção dos provetes de soldadura foram realizadas pelo mesmo operador, neste caso, o estudante.

Tabela 9 – Parâmetros de Tempo e Temperatura Utilizados na Análise do Processo de Brasagem Fraca.

Número de Teste	Combinação de Parâmetros	
	<i>Reflow Time</i>	Temperatura
Teste Experimental 1	3 s	320 °C
Teste Experimental 2	5 s	320 °C
Teste Experimental 3	3 s	360 °C
Teste Experimental 4	5 s	360 °C
Teste Experimental 5	3 s	400 °C
Teste Experimental 6	5 s	400 °C

Relativamente à tecnologia de soldadura por pontos, foi analisada a influência dos parâmetros tempo e intensidade da corrente nas propriedades das ligações obtidas entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada, através da sua variação. Para tal, foram definidos três valores de intensidade da corrente e dois valores de tempo de soldadura distintos, consoante a informação presente na tabela 10. Os restantes parâmetros associados ao processo foram mantidos constantes durante a concretização da totalidade dos ensaios experimentais.

Tabela 10 - Parâmetros de Tempo e Intensidade da Corrente Utilizados na Análise do Processo de Soldadura por Pontos.

Número de Teste	Combinação de Parâmetros	
	Tempo de Ligação	Intensidade da Corrente
Teste Experimental 7	3	56
Teste Experimental 8	4	56
Teste Experimental 9	3	64
Teste Experimental 10	4	64
Teste Experimental 11	3	72
Teste Experimental 12	4	72

Tal como foi anteriormente referido, os valores exibidos na tabela 10, relativos ao tempo e à intensidade da corrente, representam somente uma referência intrínseca ao equipamento de soldadura por pontos utilizado na empresa, não representando um valor específico dos dois parâmetros, sendo por isso adimensionais. Através do auxílio do equipamento verificador portátil de soldadura por resistência - MM315 da Amada *Miyachi* America, foi possível determinar a correspondência exata dos parâmetros associados ao equipamento, referidos anteriormente, com os parâmetros associados ao processo de soldadura por pontos, tempo (em ciclos) e intensidade da corrente (em kA).

A correspondência entre os parâmetros intrínsecos ao equipamento e os parâmetros associados ao processo de soldadura por pontos encontra-se exposta na tabela 11. É de salientar que para cada combinação de parâmetros referida, a intensidade da corrente (em kA) e o tempo (em ciclos) foram medidos cinco vezes, encontrando-se patente na tabela 11 o valor médio obtido para cada conjunto de medições.

Tabela 11 - Correspondência entre os Parâmetros Intrínsecos ao Equipamento e os Parâmetros Associados ao Processo de Soldadura por Pontos.

Parâmetros Associados ao Equipamento		Parâmetros Associados ao Processo	
Tempo de Ligação [ref]	Intensidade da Corrente [ref]	Tempo [ciclos]	Intensidade da Corrente [kA]
3	56	2	0,624
4	56	3	0,776
3	64	2	0,714
4	64	3	0,910
3	72	2	0,816
4	72	3	0,990

Em seguida, serão apresentados os fundamentos que justificam a execução dos ensaios experimentais realizados com o intuito de estudar as ligações obtidas entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada. Para cada ensaio experimental, será, também, explanada a geometria de provete adotada e o seu respetivo processo produtivo.

4.2.1 Testes às Propriedades Mecânicas

O método 211A da norma MIL-STD-202G [72] relativa aos métodos de teste *standard* para componentes elétricos e eletrônicos, concebida pelo departamento da defesa dos Estados Unidos da América, determina que a resistência mecânica das ligações soldadas em componentes elétricos pode ser avaliada através de testes de arrancamento (*pull tests*), também conhecidos por testes de tensão [72]. Esta tipologia de testes, devido à sua versatilidade, pode ser utilizada na grande maioria das situações, sendo semelhante a um ensaio de tração convencional.

De acordo com a norma referida, a rede de cobre estanhada deve ser tracionada longitudinalmente, numa direção perpendicular à camada de metalização que reveste a extremidade da bobine, onde a rede se encontra soldada, sendo que esta ligação deve aguentar uma força mínima de, aproximadamente, 20 N (*5 pounds*). Segundo a mesma norma, o método de fixação ao equipamento de testes deve ser definido individualmente para cada ensaio que se pretende efetuar, estando dependente da geometria dos elementos submetidos ao teste de arrancamento [72]. No final de cada ensaio verifica-se a destruição do provete, dado que este é tracionado até atingir o ponto de rutura.

Definição da Geometria dos Provetes

Numa fase embrionária da definição da geometria dos provetes, testou-se efetuar os ensaios de tração na rede de cobre estanhada diretamente soldada a um elemento condensador. Esta solução, embora corresponda integralmente à ligação que é realizada na realidade, acarreta algumas limitações ao nível da execução dos ensaios de tração. Em primeiro lugar, devido à geometria do elemento condensador, a sua fixação não é de todo simples, originando problemas de escorregamento. Adicionalmente, em ensaios exploratórios verificou-se a inexistência da repetibilidade do processo, isto é, o ponto de rutura pode acontecer tanto por separação da união entre o revestimento metálico e o filme metalizado (no topo do elemento condensador), como por cedência da ligação soldada. Deste modo, nos casos em que se observasse a separação das camadas de metalização do resto do elemento condensador, não seria possível avaliar a resistência mecânica da ligação soldada.

Devido a esta evidência, definiu-se como provete de ensaio o conjunto composto por uma chapa de metalização, obtida pelo processo de projeção térmica, semelhante à utilizada nos elementos condensadores (bobines) e por uma rede de cobre estanhada soldada à face superior da metalização. De forma a permitir a fixação deste conjunto ao equipamento de ensaios, a chapa constituída por metalização será adesivada a um corpo roscado que se fixa diretamente à máquina de tração. A seleção cuidada do adesivo a utilizar neste tipo de testes foi efetuada tendo em consideração o ponto de rutura alcançado em ensaios preliminares e as condições de cura do adesivo à temperatura ambiente.

A figura 40 exhibe a modelação tridimensional dos provetes definidos para execução dos ensaios mecânicos, realizada recorrendo ao *software SolidWorks®*. Nesta ilustração encontram-se identificados os elementos referidos ao longo do presente parágrafo.

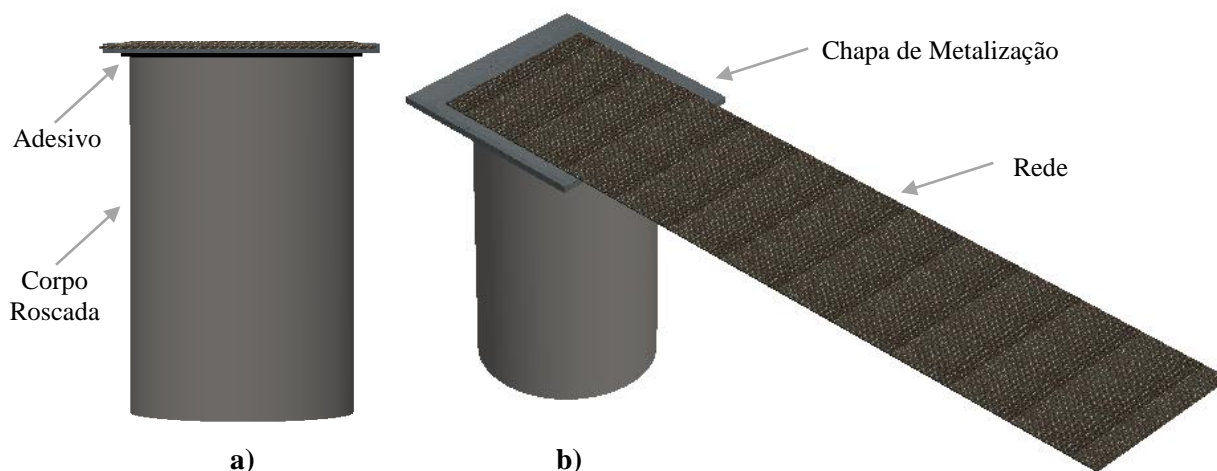


Figura 40 - Modelação Tridimensional dos Provetes Definidos para Execução dos Ensaios de Tração: a) Vista Frontal; b) Vista Isométrica.

O desenho de definição dos provetes projetados para a realização dos ensaios de tração pode ser visualizado através da consulta do anexo A.

Produção dos Provetes de Ensaio

A primeira etapa da produção dos provetes de ensaio definidos para a análise da resistência mecânica consiste na produção das chapas metalizadas possuindo a mesma constituição, em termos de elementos de liga, da metalização presente nas extremidades dos elementos condensadores. Para tal, foi utilizada a metalização de referência “ZB” constituída por um substrato de zinco-alumínio (Zn-Al), com 14 % a 16 % de alumínio, e uma segunda camada de zinco-estanho (Zn-Sn), constituída por 29 % a 30 % de zinco (em peso). Tal como foi referido na secção 2.3, respeitante aos elementos constituintes de uma célula condensadora, a presença de estanho nas camadas superiores da metalização promove a adesão da solda ao revestimento metálico.

Assim, a metalização foi realizada recorrendo ao processo de projeção térmica por gás, sendo depositadas cinco camadas de zinco-alumínio, numa espessura total de 0,75 mm (considerando os fenómenos de compactação), e uma camada de zinco-estanho contendo uma espessura de 0,25 mm, o que perfaz uma espessura total da metalização de 1 mm. Deste modo, conseguiu-se obter a espessura ideal que permite uma boa adesão da solda ao revestimento metálico sem causar a sua fragmentação. A figura 41, apresentada em seguida, exhibe o disco de metalização gerado após o término do processo de deposição por projeção térmica por gás.

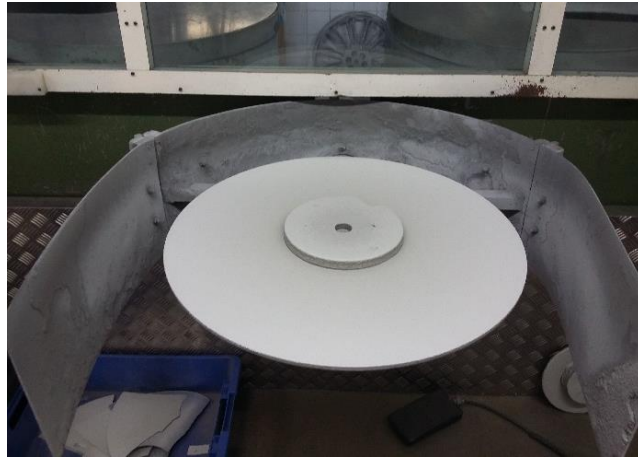


Figura 41 - Disco de Metalização Concebido por Deposição por Projeção Térmica por Gás.

Após a obtenção do disco de metalização, foi realizado o traçado equivalente às chapas de metalização de secção quadrangular (dimensões 30x30 mm²), procedendo-se em seguida ao seu corte através da utilização de uma serra elétrica de fita vertical. Na produção das chapas de metalização foi considerado um desperdício (*scrap*) de 30 %, sendo fabricadas 86 chapas. A figura 42 expõe as etapas referidas ao longo do presente parágrafo.

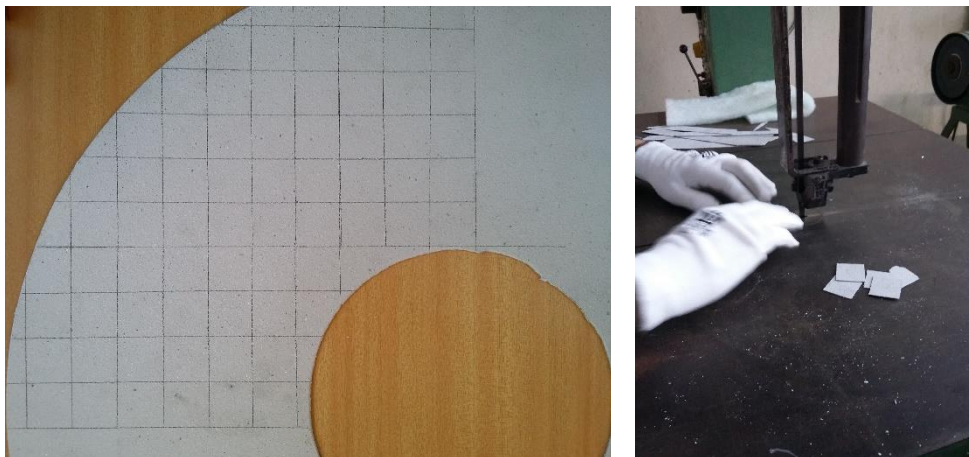


Figura 42 - Traçado das Dimensões das Chapas Metalizadas (à Esquerda) e Corte das Mesmas (à Direita).

Em seguida, foi realizado o corte da rede de cobre estanhada nas dimensões pretendidas (25x110 mm²) num total de 86 unidades, considerando um desperdício de 30 %. O comprimento da rede (110 mm) foi dimensionado para ser superior à soma da distância entre amarras/provete (50 mm) com o comprimento mínimo necessário para a fixação desta na amarra superior do equipamento de tração (55 mm).

Posteriormente, a rede de cobre estanhada foi ligada às chapas de metalização recorrendo aos processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos, consoante as combinações de parâmetros apresentadas no início do atual capítulo (secção 4.2). É de relembrar que foram produzidas cinco amostras para cada combinação, adicionando-se uma sexta amostra para validação dos ensaios.

A brasagem fraca (*soldering*) foi efetuada recorrendo ao ferro de soldar manual *Weller*® *WXP200 24 V/200 W*, conectado à unidade de controlo *Weller*® *WX1* de 200 W. A figura 43 ilustra o equipamento de brasagem utilizado e os provetes obtidos após a realização deste processo.



Figura 43 – Equipamento de Brasagem Manual (à Esquerda) e Provete Obtido (à Direita).

A soldadura por pontos (*welding*) foi efetuada recorrendo a uma ponte de soldadura conectada a um controlador de corrente *CS-279M* da *SAFCO SYSTEMS®*. Para o efeito, foram utilizados dois elétrodos paralelos de ponta retangular (área de secção: $2,08 \times 3,35 \text{ mm}^2$), fabricados numa liga à base de cobre (Cu). Cada amostra a soldar foi posicionada a uma distância vertical inicial de 1 mm, relativamente à ponta do elétrodo, de maneira a simular as condições utilizadas no processo produtivo da empresa (processo semiautomático). A figura 44 exhibe a execução de um ponto de soldadura utilizando o equipamento referido e os provetes obtidos após finalizado o processo.

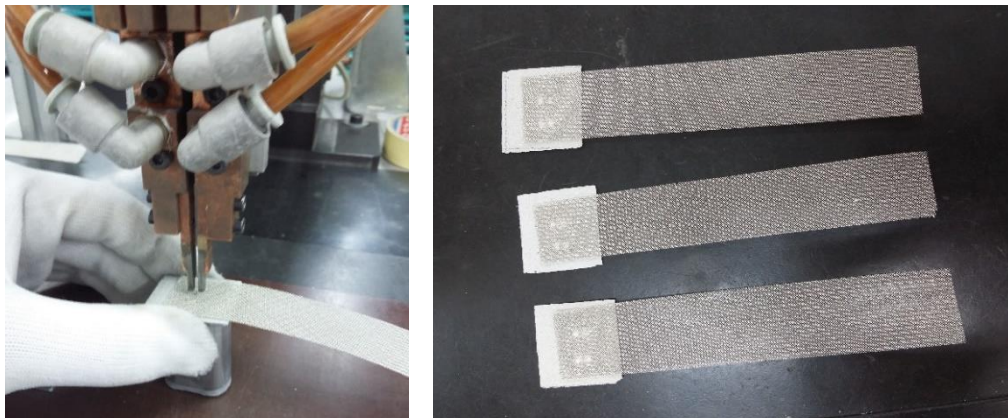


Figura 44 - Execução do Processo de Soldadura por Pontos (à Esquerda) e Provetes Obtidos (à Direita).

A etapa final da produção dos provetes a serem ensaiados mecanicamente está relacionada com a adesão das amostras aos corpos roscados que permitem a sua fixação no equipamento de tração. Esta ligação é efetuada através de um adesivo HB AS 89/ AW 89, da HB Química, Lda, com propriedades de cura à temperatura ambiente durante 24 horas. As propriedades do adesivo podem ser visualizadas através da consulta do anexo B, relativo à ficha técnica do mesmo.

A união da base das placas de metalização com as cabeças roscadas compreende as seguintes etapas:

- Aumento da rugosidade da superfície inferior da placa de metalização, com o auxílio de uma lixa, com o intuito de permitir uma melhor adesão ao corpo roscado;
- Aumento da rugosidade do corpo roscado e limpeza primária dos óxidos e impurezas superficiais através do processo de granalhagem;

- Limpeza do corpo roscado e da base do provete com acetona industrial (desengorduramento);
- Aplicação do adesivo e união do conjunto “placa de metalização/rede de cobre estanhada” às cabeças roscadas;
- Cura do adesivo durante 24 h à temperatura ambiente, de acordo com as recomendações do fabricante (pico exotérmico atingido 4 h após a sua aplicação).

A figura 45 ilustra a aplicação do adesivo às cabeças roscadas e a sua disposição específica no provete final.



Figura 45 – Aplicação do Adesivo aos Corpos Roscados (à Esquerda) e Disposição deste Elemento no Provete Final (à Direita).

Equipamentos Utilizados nos Ensaios Experimentais

Para a execução dos ensaios de arrancamento (*pull tests*), foi utilizada uma máquina de ensaios de tração *INSTRON® 5900R*, existente no laboratório de ensaios mecânicos do INEGI, que pode ser visualizada na figura 46, juntamente com o modo de fixação do provete ao equipamento. Estes ensaios foram realizados à velocidade de 1 mm/min, com uma distância entre amarras/provete de 50 mm.

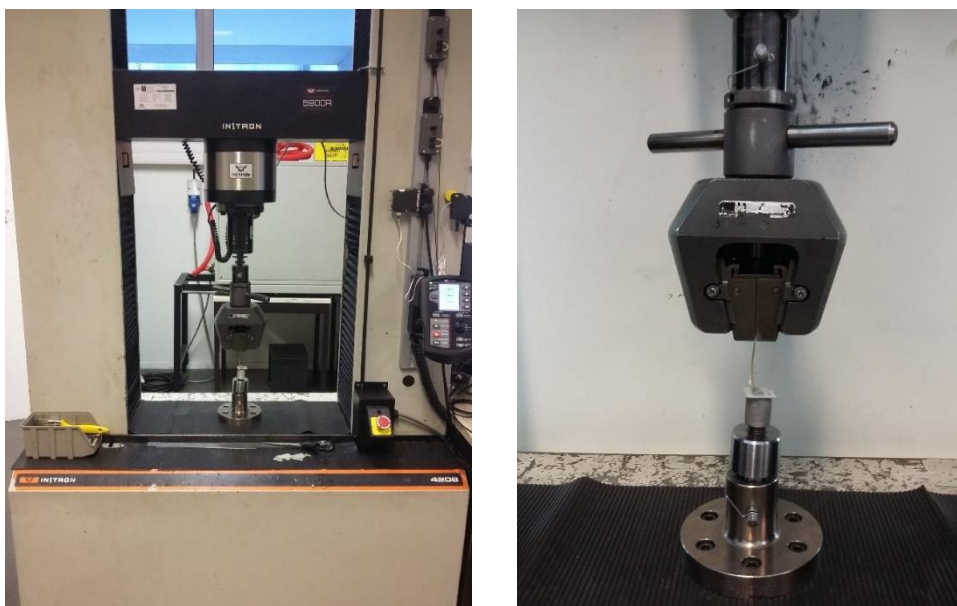


Figura 46 - Equipamento de Ensaios de Tração Utilizado (à Esquerda) e Respetivo Modo de Fixação do Provete (à Direita).

4.2.2 Testes às Propriedades Elétricas

Os ensaios às propriedades elétricas consistem na medição da resistência óhmica (em DC) existente entre uma das extremidades da rede de cobre estanhada e a metalização que reveste o topo do elemento condensador. Assim, a resistência medida equivale à resistência que se opõe à passagem de corrente que percorre a rede até uma distância definida na metalização, atravessando a área de soldadura. Deste modo, embora esta resistência elétrica não represente unicamente a resistência de contacto originada pelo processo de ligação, permite quantificar a resistência óhmica existente entre a rede de cobre estanhada e o elemento condensador e, conseqüente, comparação dos valores obtidos para os diferentes processos de ligação, brasagem e soldadura por pontos.

A figura 47 ilustra a posição de colocação das pontas de medição nos testes efetuados e o percurso da corrente oposta pela resistência óhmica medida. O método de medição manteve-se inalterável durante a realização da totalidade dos ensaios experimentais, sendo duas pontas colocadas no centro da extremidade da rede e as outras duas no centro da metalização, com um espaçamento de 4 mm entre si.

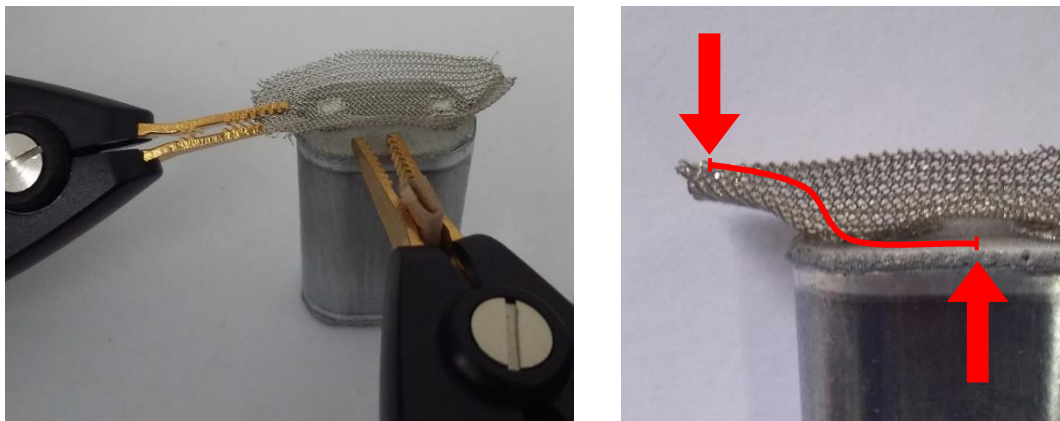


Figura 47 - Método de Medição da Resistência Óhmica: Colocação das Pontas de Medição (à Esquerda) e Percurso da Corrente (à Direita).

Definição da Geometria dos Provetes

A tipologia de ensaio definida para avaliação das propriedades elétricas não apresenta limitações consideráveis relativas à geometria das amostras. Deste modo, os provetes de ensaio são formados por um elemento condensador (bobine) e por uma rede de cobre estanhada ligada à extremidade superior deste, por brasagem fraca ou por soldadura por pontos. A figura 48 exhibe a modelação tridimensional, realizada recorrendo ao *software SolidWorks®*, dos provetes definidos para a execução dos testes de medição da resistência elétrica. O seu desenho de definição pode ser visualizado através da consulta do anexo C.

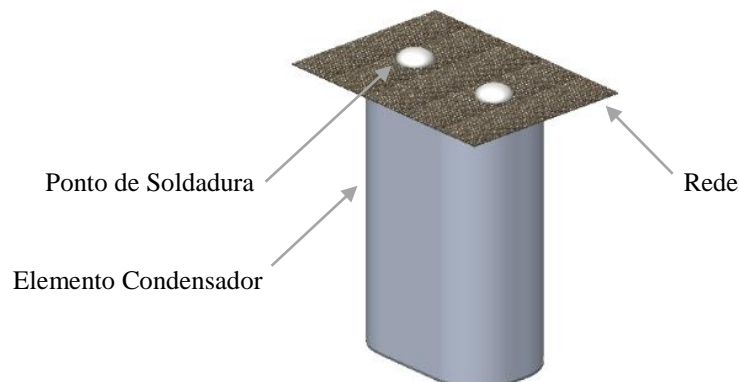


Figura 48 - Modelação Tridimensional dos Provetes Definidos para os Testes às Propriedades Elétricas.

4.2.3 Análise Metalográfica

A análise metalográfica, efetuada às ligações entre a rede de cobre estanhada e a metalização que reveste o topo do elemento condensador, consiste na visualização por microscopia ótica dos cortes transversais aos pontos de soldadura correspondentes a cada uma das combinações de parâmetros estudadas, inerentes aos processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos. Este estudo permite a comparação da zona termicamente afetada associada a cada combinação de parâmetros, assim como a análise da presença de defeitos de soldadura, da existência de fusão entre os diversos elementos intervenientes na ligação e se ocorre, ou não, danificação do elemento condensador devido à transferência de calor para o seu interior durante a soldadura.

Definição da Geometria dos Provetes

A geometria dos provetes utilizados na execução dos ensaios metalográficos é equivalente à definida para os testes relativos às propriedades elétricas, necessitando unicamente de preparação adequada. Deste modo, foram produzidos 18 provetes equivalentes aos expostos na secção 4.2.2, considerando um desperdício (*scrap*) de 30 %.

Preparação dos Provetes de Ensaio

Para cada combinação de parâmetros foi produzida uma amostra para corte e posterior análise metalográfica da junta de soldadura. Como tal, cada provete produzido foi cortado transversalmente e colocado num porta-amostras, sendo este procedimento efetuado recorrendo a uma montagem em vácuo, com resina epóxi. De seguida, procedeu-se ao polimento da amostra para identificação, por microscopia ótica, da zona termicamente afetada e dos defeitos de soldadura decorrentes do processo. Deste modo, a preparação dos provetes de ensaio compreendeu as seguintes etapas:

- Corte das amostras produzidas para cada combinação de parâmetros estudada;
- Montagem das amostras em vácuo com resina epóxi;
- Sequência de polimento das amostras com lixas de granulometria 320, 500, 800 e 1200 (equipamento de polimento semiautomático da *Struers*®), pano de polir de 3 µm e 1 µm e polimento final com alumina.

Equipamentos Utilizados nos Ensaios Experimentais

Para a realização da análise metalográfica das amostras foi utilizado um microscópio ótico *OLYMPUS*® *PMG3* e um sistema de aquisição de imagens da *LEICA*®, existentes no laboratório de materialografia do INEGI. Estes equipamentos, juntamente com a montagem de uma amostra em vácuo com resina epóxi, podem ser visualizados na figura 51.

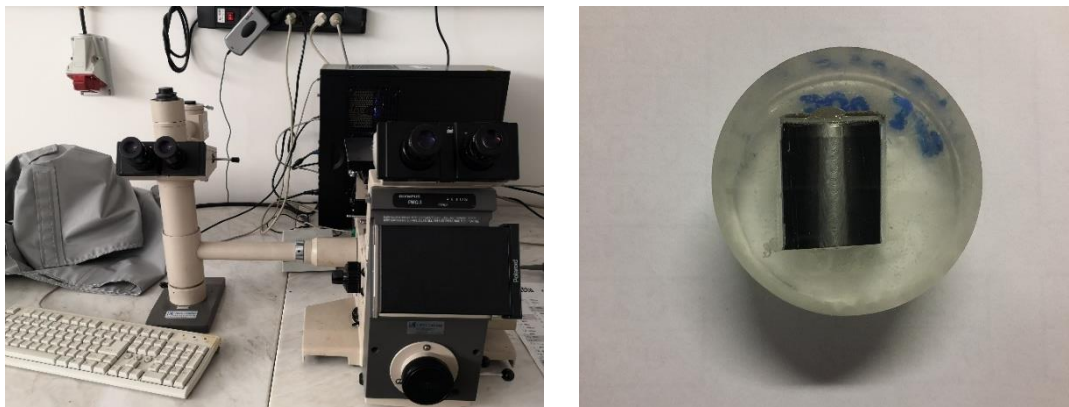


Figura 51 – Microscópio Ótico Utilizado nas Análises Metalográficas (à Esquerda) e Montagem de uma Amostra em Vácuo com Resina Epóxi (à Direita).

4.3 Estudo das novas Geometrias de Terminais

Nesta fase do projeto será estudada a adequação do uso de novas geometrias de terminais, ligados diretamente aos elementos condensadores, sendo para este efeito consideradas cinco geometrias distintas. A figura 52 exhibe as diferentes configurações projetadas para os terminais em questão. Os desenhos de definição, para cada geometria proposta, podem ser visualizados através da consulta dos anexos D ao H.



Figura 52 - Geometrias de Terminais.

Deste modo, tanto a geometria 1 como a geometria 5 contêm uma secção circular na zona de soldadura, diferenciando-se entre si somente nas suas dimensões. Enquanto que o diâmetro exterior da primeira configuração referida é igual a 4 mm, o da segunda é equivalente a 6 mm. A espessura desta zona, nas geometrias mencionadas, é de 0,5 mm e 1 mm, respetivamente. Relativamente à geometria 2, esta apresenta uma secção reta na zona de soldadura, com uma espessura de 1,5 mm. A geometria 3 possui uma extremidade com a forma de um garfo, de espessura igual a 1 mm, enquanto a geometria 4 apresenta uma terminação na zona de soldadura com o formato de um “t”, de espessura equivalente a 1,2 mm. O material escolhido para cada terminal foi o cobre (Cu), não possuindo este qualquer revestimento.

De maneira a comparar com exatidão as diferentes configurações, o único parâmetro variável durante a realização dos ensaios experimentais foi a própria geometria do terminal, mantendo-se os parâmetros associados ao processo constantes, para cada uma das tecnologias utilizadas.

Assim, na execução das ligações por brasagem fraca manual, foi utilizada uma temperatura de 360 °C e um “*reflow time*” equivalente a 5 s. A solda usada foi a SAC305 com 2,2 % de fluxo interno (*Alpha Telecore® HF-850*). De modo a garantir a repetibilidade do processo, todas as amostras foram ligadas pelo mesmo operador, neste caso, o estudante.

Relativamente às ligações efetuadas pelo processo de soldadura por pontos, foi utilizado um tempo de ligação de referência 4 (3 ciclos) e uma intensidade de corrente de referência 64 (0,910 kA). Os restantes parâmetros, associados ao equipamento de soldadura, mantiveram-se inalteráveis, sendo, para o efeito, utilizados dois elétrodos paralelos de ponta retangular (área de secção: 2,08x3,35 mm²) fabricados numa liga à base de cobre (Cu) e posicionando-se a amostra a uma distância vertical de 1 mm, relativamente à ponta do elétrodo.

A tabela 12 sintetiza a informação relativa aos parâmetros utilizados na análise das diferentes geometrias de terminais, para os processos de brasagem fraca e soldadura por pontos.

Tabela 12 – Parâmetros Utilizados na Análise das Diferentes Geometrias de Terminais.

Processo	Geometria	Parâmetros Utilizados			
		Reflow Time [s]		Temperatura [°C]	
Brasagem Fraca (Soldering)	Geometria 1	5 s		360 °C	
	Geometria 2				
	Geometria 3				
	Geometria 4				
	Geometria 5				
		Tempo de Ligação		Intensidade da Corrente	
		[Ref]	[ciclos]	[Ref]	[kA]
Soldadura por Pontos (Welding)	Geometria 1	4		3	
	Geometria 2				
	Geometria 3				
	Geometria 4				
	Geometria 5				
		4	3	64	0,910 kA

Em seguida, serão expostos os fundamentos que justificam a execução dos testes experimentais com o intuito de analisar a viabilidade de utilização de novas configurações de terminais. Para cada ensaio experimental, será, também, explanada a geometria de provete adotada e o seu respectivo processo produtivo.

4.3.1 Testes às Propriedades Mecânicas

Os testes adotados para a análise da resistência mecânica concedidas à ligação soldada foram os testes de arrancamento (*pull tests*), sendo idênticos a um ensaio de tração convencional. Os fundamentos para a realização destes ensaios foram anteriormente apresentados no capítulo homólogo, concernente aos testes às propriedades mecânicas na análise das ligações realizadas entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada.

Assim, de acordo com o método 211A da norma MIL-STD-202G [72], o terminal deve ser tracionado perpendicularmente à superfície onde se encontra soldado, devendo a ligação aguentar uma força mínima de, aproximadamente 20 N (*5 pounds*). O método de fixação ao equipamento de tração não se encontra especificado, podendo ser definido individualmente consoante a geometria dos elementos submetidos a ensaio.

No estudo das geometrias de terminais diretamente ligados à metalização dos elementos condensadores, revela-se importante definir, através da visualização da zona de rutura, o que representa, ou não, uma “boa” soldadura. Deste modo, quando submetido ao ensaio de tração, caso a rutura se dê na primeira ou na segunda camada de metalização, o resultado pode ser considerado positivo, dado não ocorrer danificação do filme metalizado. Opostamente, caso na rutura seja visível o filme de polipropileno metalizado (caracterizado por uma tonalidade mais escura quando comparado com a metalização), o resultado deve ser considerado negativo, encontrando-se a célula condensadora comprometida. A figura 53, presente no início da página seguinte, ilustra os critérios de análise de falha explicados neste parágrafo.

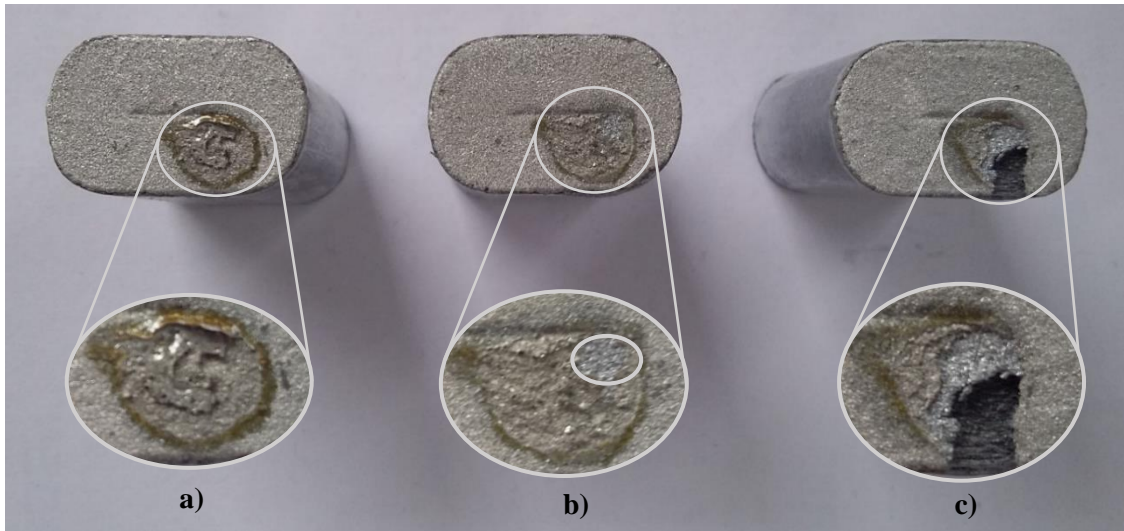


Figura 53 – Diferentes Tipos de Falha na Rutura: a) Arrancamento pela Segunda Camada (Superior); b) Arrancamento pela Primeira Camada (Inferior); c) Filme Metalizado Visível.

Definição da Geometria dos Provetes

De maneira a ser possível a compreensão da fratura obtida após realização dos testes de tração, os provetes de ensaio são constituídos por um elemento condensador (bobine) e por um terminal ligado à metalização superior deste, por brasagem fraca ou por soldadura por pontos. A figura 54 exhibe a modelação tridimensional dos provetes definidos para a realização dos ensaios mecânicos, concretizada recorrendo ao *software SolidWorks®*. Neste modelo encontra-se representado o provete alusivo à geometria de terminal 1 ligado por brasagem fraca, sendo idêntico para as restantes configurações. O desenho de definição pode ser visualizado através da consulta do anexo I.

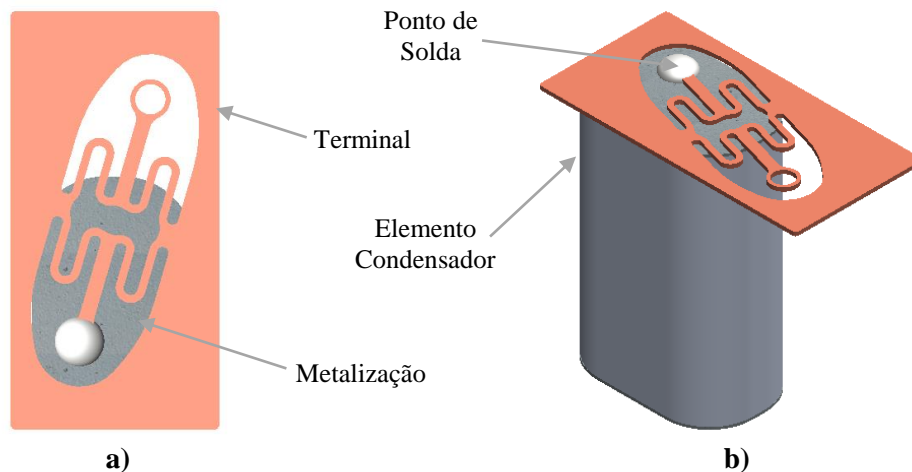


Figura 54 - Modelação Tridimensional dos Provetes Definidos para Execução dos Ensaios de Tração (Geometria 1): a) Vista de Cima; b) Vista Isométrica.

Produção dos Provetes de Ensaio

A primeira etapa do fabrico dos provetes a ensaiar relaciona-se com a limpeza dos terminais em cobre. O contacto deste material com o ar, na ausência de algum revestimento, promove a sua rápida oxidação. Deste modo, os terminais foram cuidadosamente limpos com uma solução aquosa de ácido acético com o intuito de remover os contaminantes e gorduras superficiais. Efetuada a limpeza referida, os terminais foram passados por água para remover o

ácido acético da sua superfície, sendo posteriormente secos e guardados num ambiente isento de humidade, recorrendo a sacos selados e bolsas de partículas dessecantes (sílica-gel). Na figura 55 encontra-se a representação de um terminal em cobre antes de ser submetido a limpeza e após a realização deste processo.



Figura 55 - Terminal em Cobre Antes (à Esquerda) e Após (à Direita) Limpeza.

Concluída a preparação da totalidade dos terminais, estes elementos foram ligados aos elementos condensadores através dos processos de brasagem fraca e de soldadura pontos, recorrendo a um ponto de soldadura, consoante os parâmetros apresentados no início da presente secção (secção 4.3 – tabela 12). Os equipamentos usados para o efeito foram os mesmos utilizados na secção 4.2, na execução das ligações entre as células condensadoras ou as chapas metalizadas com a rede de cobre estanhada.

Deste modo, foram produzidos 72 provetes, considerando um desperdício de 30 %. É de relembrar que foram produzidas cinco amostras para cada geometria, intrinsecamente a cada processo, adicionando-se uma sexta amostra para validação dos ensaios.

A figura 56 apresenta os provetes obtidos para análise das propriedades mecânicas, ligados pelos processos de brasagem fraca e soldadura por pontos, respetivamente. Embora nesta ilustração apenas figure o resultado alcançado para a geometria 1, este é semelhante ao conseguido para as restantes geometrias, alterando-se somente a configuração do terminal.



Figura 56 - Provetes de Ensaio Utilizados nos Testes de Tração, Ligados pelos Processos de Brasagem Fraca (à Esquerda) e Soldadura por Pontos (à Direita).

Equipamentos Utilizados nos Ensaios Experimentais

Na execução dos ensaios de arrancamento (*pull tests*), foi utilizada uma máquina de ensaios de tração *Zwick 1435-60 tensile tester* do fabricante *ZwickRoell®*, existente nas instalações da *Vishay Eletrónica Portugal*. Este equipamento pode ser observado na figura 57, juntamente com uma vista aproximada do modo de posicionamento e fixação do provete relativamente às amarras. Assim, o elemento condensador é fixado na amarra superior da máquina de tração e o terminal em cobre fica confinado a uma posição específica por uma amarra em forma de “V”. À medida que a amarra superior se vai deslocando, o terminal em cobre vai deformar até que se verifique a rutura da ligação soldada.

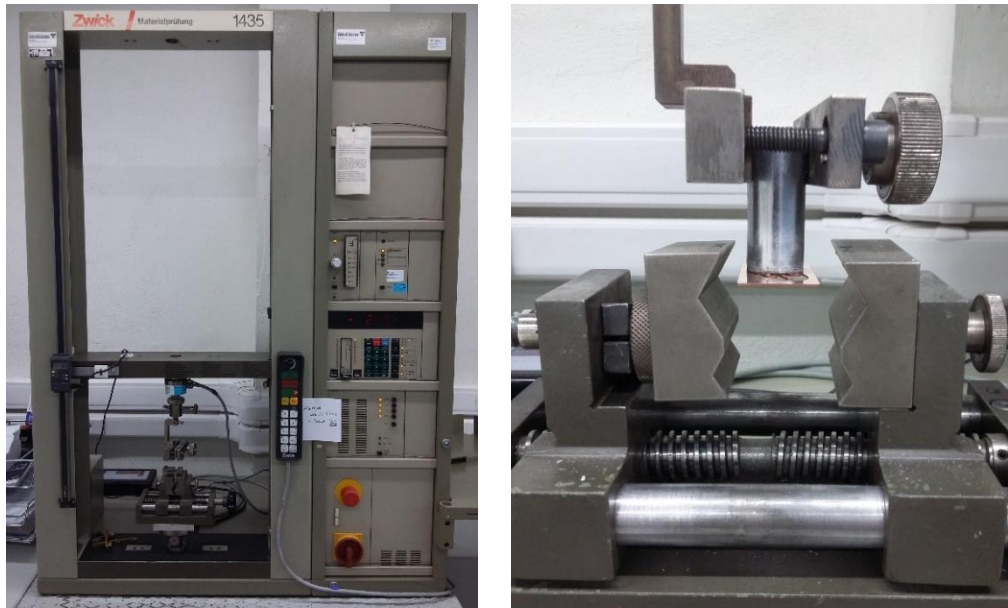


Figura 57 - Equipamento de Ensaios de Tração Utilizado (à Esquerda) e Respetivo Modo de Fixação do Provete (à Direita).

4.3.2 Testes às Propriedades Elétricas

Os ensaios às propriedades elétricas realizados para as ligações entre os elementos condensadores e os terminais são semelhantes aos executados anteriormente para as ligações entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada. Assim sendo, estes testes consistem na medição da resistência óhmica (em DC) existente entre uma das extremidades do terminal e a metalização que reveste o topo da célula condensadora. Deste modo, o valor medido equivale à resistência que se opõe à passagem da corrente que percorre o terminal até uma distância definida na metalização, atravessando a área de soldadura.

Tal como foi mencionado na secção 4.2.2, embora a resistência elétrica medida não represente exclusivamente a resistência de contacto provocada pelo processo de ligação, a sua determinação permite quantificar a resistência óhmica existente entre cada geometria de terminal e o elemento condensador, possibilitando, ainda, a comparação dos valores obtidos para a mesma configuração, utilizando duas tecnologias de ligação distintas.

A figura 58 expõe o método de colocação das pontas de medição nos testes efetuados e o percurso da corrente oposta pela resistência elétrica medida. O procedimento de medição manteve-se constante durante a concretização dos testes experimentais, sendo dispostas duas pontas no centro da extremidade do terminal e as restantes duas no centro da metalização, possuindo um espaçamento de 4 mm entre si.

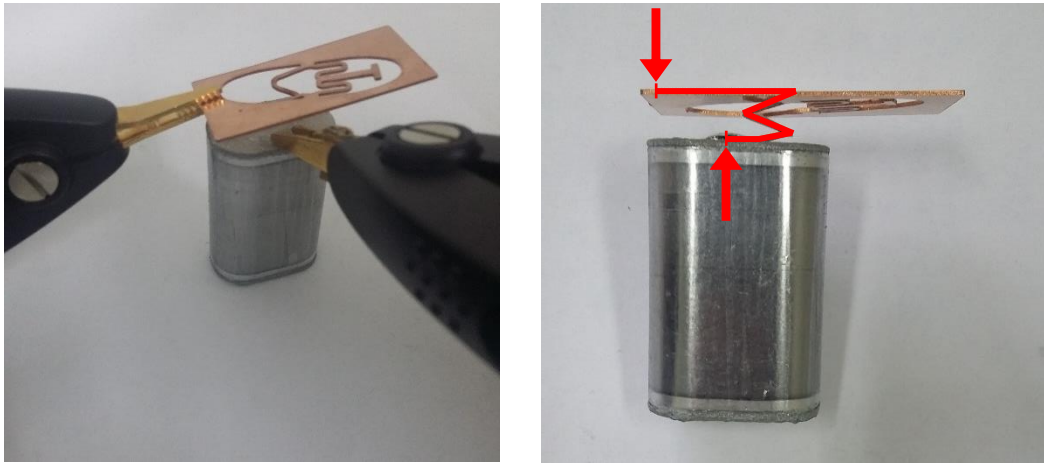


Figura 58 - Procedimento de Medição da Resistência Óhmica: Colocação das Pontas de Medição (à Esquerda) e Percurso da Corrente (à Direita).

Definição da Geometria e Produção dos Provetes de Ensaio

Os provetes utilizados para a elaboração dos ensaios às propriedades elétricas são em tudo semelhantes aos definidos para os testes às propriedades mecânicas. Assim sendo, a definição da geometria dos provetes e respetiva produção foi já explanada na secção 4.3.1.

Deste modo, foram produzidos 72 provetes para análise das propriedades elétricas, considerando um desperdício (*scrap*) de 30 %. Para cada geometria foram concebidas cinco amostras, intrinsecamente a cada processo, adicionando-se uma sexta amostra para validação dos ensaios.

Equipamentos Utilizados nos Ensaios Experimentais

Para a realização das medições da resistência elétrica existente entre a extremidade do terminal em cobre e o revestimento metálico do elemento condensador, foi utilizado um ohmímetro de alta precisão *GW-Instek® GOM 804* com medição a quatro pontos (ponta *Kelvin*). Este instrumento de medição foi apresentado anteriormente, na secção equivalente dedicada às ligações entre a rede de cobre estanhada e os elementos condensadores (secção 4.2.2).

4.3.3 Análise Metalográfica

A análise metalográfica desenvolvida para as ligações entre os elementos condensadores e os terminais em cobre é semelhante à realizada, anteriormente, para as ligações efetuadas entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada. Deste modo, esta análise consiste na visualização por microscopia ótica do corte transversal aos pontos de soldadura, efetuados para cada geometria de terminal, através dos processos de brasagem e de soldadura por pontos.

Esta observação permite a identificação da zona termicamente afetada associada a cada geometria de terminal, para cada processo estudado, assim como a examinação da presença de defeitos de soldadura nas amostras ensaiadas.

Definição da Geometria dos Provetes

A geometria dos provetes utilizados na concretização dos ensaios microscópicos é semelhante à definida para os testes relativos às propriedades mecânicas e elétricas, necessitando unicamente de preparação adequada. Deste modo, foram produzidos 15 provetes, considerando um desperdício de 30 %.

Preparação dos Provetes de Ensaio

Tal como se sucedeu na análise metalográfica das ligações efetuadas entre a rede de cobre estanhada e os elementos condensadores, cada provete produzido foi cortado transversalmente e colocado num porta-amostras, sendo este procedimento efetuado recorrendo a uma montagem em vácuo, com resina epóxi. Em seguida, realizou-se o polimento das amostras através de uma sequência de operações bem definida: polimento das amostras com lixas de grão 320, 500, 800 e 1200 (equipamento de polimento semiautomático da *Struers*®), passagem de pano de polir de 3 μm e de 1 μm e polimento final com alumina.

A figura 59 representa a montagem de uma amostra em vácuo com resina epóxi. Nesta ilustração é possível observar o corte da célula condensadora e do terminal em cobre.

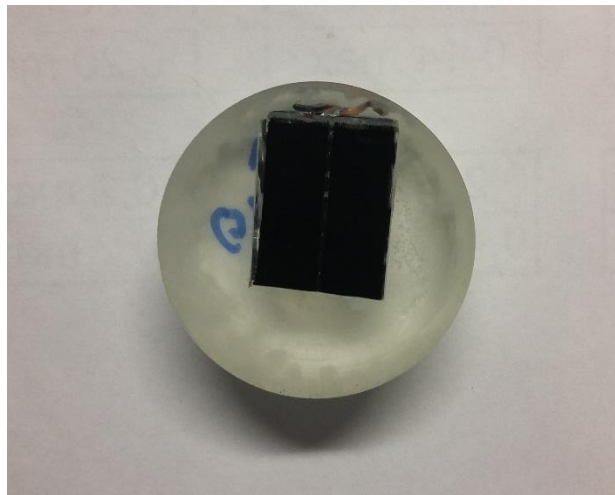


Figura 59 - Montagem de uma Amostra em Vácuo com Resina Epóxi.

Equipamentos Utilizados nos Ensaios Experimentais

Para a realização da análise metalográfica das amostras referentes às diferentes geometrias de terminais em cobre, foi utilizado um microscópio ótico *OLYMPUS*® *PMG3* e um sistema de aquisição de imagens da *LEICA*®, existentes no laboratório de materialografia do INEGI. Estes equipamentos já foram apresentados anteriormente, na secção equivalente dedicada à análise metalográfica das ligações efetuadas entre a rede de cobre estanhada e os elementos condensadores (secção 4.2.3).

5 Apresentação dos Resultados Experimentais

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados após realização dos ensaios experimentais, assim como retiradas as primeiras conclusões relativamente a estes. Assim, nos subcapítulos que se seguem, os resultados relativos às características mecânicas, elétricas e metalográficas serão expostos separadamente, para cada um dos estudos desenvolvidos. Adicionalmente, será efetuada uma análise de variância, recorrendo ao *software Minitab®*, aos resultados alcançados referentes às propriedades mecânicas obtidas nas ligações entre a rede de cobre estanhada e as placas de metalização.

5.1 Resultados da Análise da Solução Utilizada na Empresa

5.1.1 Testes às Propriedades Mecânicas

Tal como já foi referido na secção 4.2.1, os ensaios de tração foram realizados à velocidade de 1mm/min, com uma distância entre amarras/provete de 50 mm e utilizando uma célula de carga de 1 kN. Nesse capítulo, foi ainda mencionado que, segundo o método 211A da norma MIL-STD-202G, a ligação soldada deveria aguentar uma força mínima de aproximadamente 20 N, para ser considerada uma boa soldadura.

Na tabela 13 encontram-se apresentados os resultados referentes à força máxima alcançada nos ensaios de tração executados na análise das ligações “placa de metalização/rede de cobre estanhada”, efetuadas recorrendo ao processo de brasagem fraca, segundo as combinações de parâmetros referidas anteriormente.

Tabela 13 - Força Máxima Alcançada para o Processo de Brasagem Fraca.

Amostra	Força Máxima [N]					
	T=320 °C; t=3 s	T=320 °C; t=5 s	T=360 °C; t=3 s	T=360 °C; t=5 s	T=400 °C; t=3 s	T=400 °C; t=5 s
n=1	12,310	43,830	0,3517	47,176	55,529	56,969
n=2	50,805	40,714	45,694	51,985	48,417	56,380
n=3	14,163	53,023	28,151	48,268	58,115	53,871
n=4	49,379	50,338	33,562	48,014	51,450	62,857
n=5	55,239	44,769	41,069	51,603	36,979	62,836
Média	36,379	46,535	37,119*	49,409	50,098	58,582
Desvio Padrão	21,25	5,02	7,79*	2,22	8,22	4,06

* Valores de média e desvio padrão calculados desprezando a amostra 1 para a combinação de parâmetros 3 (considerando as cinco amostras: Média = 29,766 N; Desvio Padrão = 17,77 N).

Nos ensaios relativos à combinação de parâmetros 1 ($T=320\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=3\text{ s}$) verificou-se o descolamento do ponto de soldadura relativamente à placa de metalização nas amostras 1, 3 e 4. Este resultado deve-se, em parte, ao reduzido *reflow time* imposto que, associado a uma temperatura pouco elevada, dificulta a ligação da solda à placa de metalização, havendo apenas uma adesão superficial entre estes dois elementos. Este fator justifica os reduzidos valores obtidos nas amostras 1 e 3 (12,31 N e 14,16 N, respetivamente), concluindo-se que estas representam soldaduras de má qualidade. Embora na amostra 4 também se tenha verificado rutura pela ligação soldada, esta configura uma situação distinta das referidas, dado que se alcançou uma força de tração máxima de aproximadamente 49,38 N, o que representa uma soldadura de boa qualidade. Nas restantes amostras (amostras 2 e 5) constatou-se a rutura da rede em redor do ponto de soldadura, registando-se forças máximas superiores a 50 N. Deste modo, para a combinação de parâmetros referida, foi obtida uma força máxima média de aproximadamente 36,38 N. A figura 60 exhibe os dois tipos distintos de rutura mencionados ao longo do presente parágrafo.

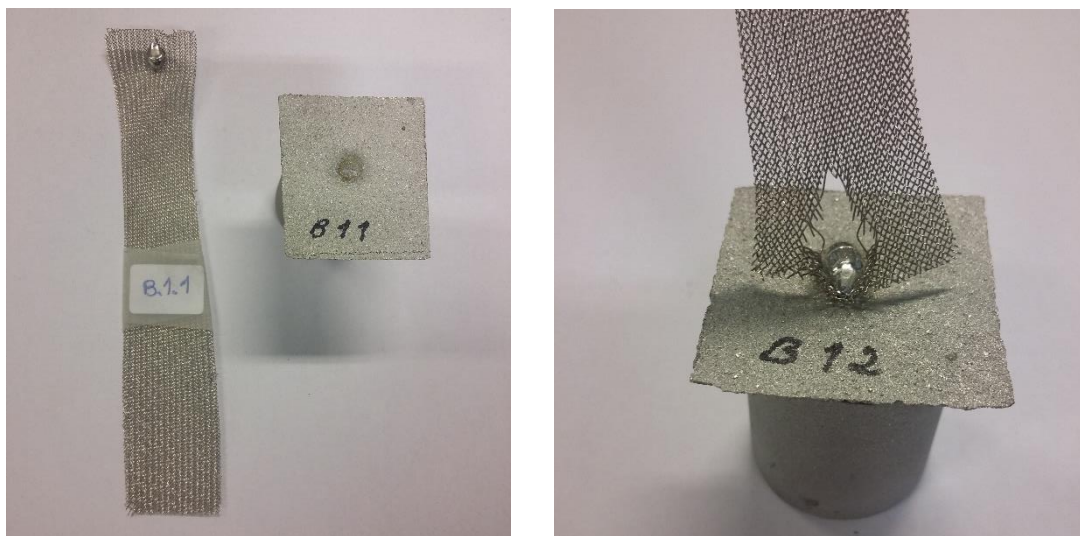


Figura 60 - Tipos de Ruturas Observadas: Rutura pela Ligação Soldada (Amostra 1) e Rutura da Rede em Torno da Área de Soldadura (Amostra 2), respetivamente.

Para a combinação de parâmetros 2 ($T=320\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{ s}$) verificou-se a ocorrência de rutura da rede à volta do ponto de soldadura para todas as amostras testadas. Assim, a média das forças máximas alcançadas para as cinco amostras testadas foi de 46,53 N, sendo o valor mínimo obtido equivalente a 40,71 N (amostra 2). Deste modo, não se verificou a ocorrência de soldaduras de má qualidade do ponto de vista mecânico, sendo a rutura explicada pelo fator de concentração de tensões nos filamentos que compõe a rede.

Relativamente à combinação de parâmetros 3 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=3\text{ s}$) verificou-se a rutura pela ligação soldada nas amostras 1, 3 e 4. Contudo, para a amostra 1 verificou-se a separação da rede da placa de metalização imediatamente após o início do ensaio de tração, comprovando-se a não conformidade deste provete para a realização do ensaio. Este fator é confirmado pelo valor de força máxima alcançado para a amostra 1, exposto na tabela 13, equivalente a 0,3517 N. Para as amostras 3 e 4, obtiveram-se valores de força máxima de 28,15 N e 33,56 N, respetivamente, sendo consideradas soldaduras de boa qualidade. Nas amostras 2 e 5 observou-se a ocorrência de rutura da rede à volta da área de ligação. Nos ensaios relativos a estas amostras, alcançaram-se forças máximas equivalentes a 45,69 N (amostra 2) e 41,07 N (amostra 5). A média das forças máximas atingidas foi de, aproximadamente, 37,12 N, desprezando a contribuição da amostra 1 para o cálculo deste parâmetro estatístico.

Para a combinação de parâmetros 4 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{ s}$) constatou-se a rutura da rede em redor da área de soldadura para a totalidade das amostras submetidas a ensaio. Deste modo, a média das forças máximas obtidas foi de 49,41 N, sendo o valor mínimo alcançado equivalente a 47,18 N (amostra 1). A variação de valores obtidos foi, também, mínima para a combinação de parâmetros referida (desvio padrão igual a 2,22 N). Assim, a utilização de uma temperatura de $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ associada a um *reflow time* de 5 s promove a obtenção de ligações de excelente qualidade.

Nos ensaios relativos à combinação de parâmetros 5 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=3\text{ s}$), verificou-se a rutura da rede em redor da área de soldadura na totalidade das amostras testadas, excetuando-se a amostra 5, na qual se verificou a rutura da ligação soldada. Deste modo, o valor mínimo registado foi obtido para a amostra 5, sendo este de, aproximadamente, 36,98 N. Ainda assim, todas as amostras ensaiadas constituem soldaduras de boa qualidade segundo o critério da força de ligação mínima referido anteriormente. Assim, a média das forças máximas alcançadas para as cinco amostras testadas foi de, aproximadamente, 50,10 N.

Por fim, para a combinação de parâmetros 6 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{ s}$) comprovou-se a rutura da rede à volta da área de ligação para as cinco amostras submetidas a ensaio, sendo o valor médio das forças máximas obtidas equivalente a 58,58 N. O valor mínimo alcançado foi registado para a amostra 3, sendo este de, aproximadamente, 53,87 N. Numa primeira análise e, considerando apenas a norma referida anteriormente, estes resultados aparentam indicar a ocorrência de soldaduras de excelente qualidade, contudo, esta constatação deve ser acautelada devido à ocorrência de uma elevada transferência de calor para o interior do elemento condensador, no caso da ligação real entre a rede de cobre estanhada e o elemento condensador. Esta informação deve, então, ser completada através da análise da zona termicamente afetada possibilitada pela análise metalográfica.

A partir da análise da tabela 13 constata-se que a utilização de um *reflow time* reduzido resulta numa maior variação dos resultados alcançados, originando, na prática, uma dificuldade acrescida na repetibilidade do processo. Esta constatação deve-se ao facto de um *reflow time* superior favorecer uma natural propagação da solda relativamente à superfície da metalização, resultando em áreas de soldadura superiores e numa menor concentração de material de adição numa área reduzida. A aplicação de um *reflow time* equivalente a 5 s possibilita, ainda, que a solidificação da solda ocorra de forma menos abrupta.

Tendo em conta as informações referidas ao longo dos últimos parágrafos, a combinação de parâmetros 4 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{ s}$) evidencia-se como a solução que potencia a otimização do processo de brasagem fraca, dado que promove o alcance de soldaduras de excelente qualidade, segundo o critério de força mínima estabelecido, proporcionando, em simultâneo, uma variação associada aos resultados reduzida e uma transferência de calor controlada. Esta solução permite, deste modo, uma redução significativa das temperaturas utilizadas atualmente no processo de brasagem fraca (*soldering*) implementado pela empresa.

O gráfico 1, apresentado na página seguinte, ilustra a variação da força de tração máxima em função da temperatura de soldadura, para cada um dos *reflow times* utilizados. Na sua elaboração foram considerados os valores médios obtidos para as cinco amostras ensaiadas para cada combinação de parâmetros. Este gráfico permite a comparação dos resultados mencionados ao longo dos últimos parágrafos, obtidos para as diferentes combinações de parâmetros analisadas.

As curvas relativas aos ensaios de tração, efetuados para análise do processo de brasagem fraca, para a totalidade das combinações de parâmetros referidas, podem ser visualizadas através da consulta do anexo J.

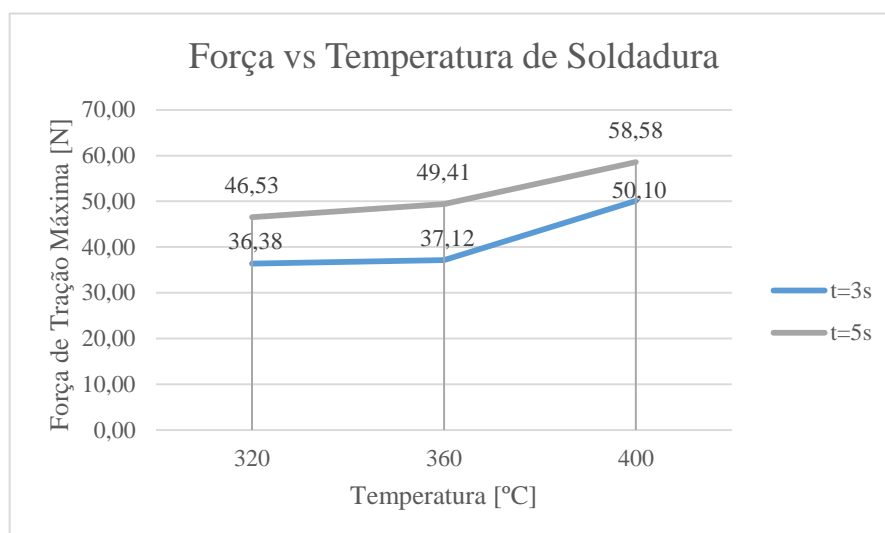


Gráfico 1 – Evolução da Força de Tração Máxima em Função da Temperatura.

Na tabela 14 encontram-se expostos os resultados relativos à força máxima alcançada nos ensaios de tração executados na análise das ligações “placa de metalização/rede de cobre estanhada”, efetuadas recorrendo ao processo de soldadura por pontos, segundo as combinações de parâmetros referidas anteriormente no capítulo 4. Nesta tabela, as combinações de parâmetros são apresentadas consoante as referências utilizadas no equipamento de soldadura por pontos. Em caso de dúvida, os parâmetros associados ao processo equivalentes aos parâmetros do equipamento podem ser consultados na tabela 11 (página 69).

Tabela 14 - Força Máxima Alcançada para o Processo de Soldadura por Pontos.

Amostra	Força Máxima [N]					
	I=56; t=3	I=56; t=4	I=64; t=3	I=64; t=4	I=72; t=3	I=72; t=4
n=1	-	14,999	6,068	20,486	6,631	24,859
n=2	-	16,650	6,250	20,257	6,909	23,247
n=3	-	16,675	6,415	26,582	11,318	26,048
n=4	-	14,535	3,737	19,786	13,278	24,853
n=5	-	11,548	5,801	23,759	10,460	19,421
Média	-	14,881	5,674	22,174	9,719	23,686
Desvio Padrão	-	2,1	1,11	2,92	2,88	2,58

Através da análise dos resultados contidos na tabela 14 verifica-se que o uso de um tempo de soldadura de referência 3 (2 ciclos) não é apropriado para a execução da soldadura pretendida. O tempo de soldadura referido, associado às três intensidades de corrente analisadas, não permite a fusão de parte da interface da rede de cobre estanhada com a placa de metalização, ocorrendo somente uma ténue adesão entre estes dois elementos. Deste modo, os valores de força máxima alcançados para as combinações de parâmetros contendo um tempo de soldadura de referência 3 revelam-se bastante reduzidos. Assim, para a combinação de parâmetros 1 (I=56; t=3), não foi possível a realização dos ensaios de tração devido ao descolamento da rede da placa de metalização aquando da fixação do provete ao equipamento de testes. Para a combinação de parâmetros 3 (I=64; t=3) obteve-se um valor médio de forças máximas alcançadas de, aproximadamente, 5,67 N, constatando-se a ocorrência de soldaduras de má qualidade para todas as amostras testadas, segundo o critério da força de ligação mínima

definido previamente. Para a combinação de parâmetros 5 ($I=72$; $t=3$), o resultado obtido foi similar, sendo a média das forças máximas alcançadas equivalente a 9,72 N. Em ambos os ensaios experimentais e, para a totalidade das amostras testadas, a rutura observada ocorreu no ponto de soldadura, por separação da rede de cobre estanhada da placa de metalização. A figura 61 exhibe a tipologia de rutura referida neste parágrafo para a amostra 3 da combinação de parâmetros 3 e para a amostra 4 da combinação de parâmetros 5.

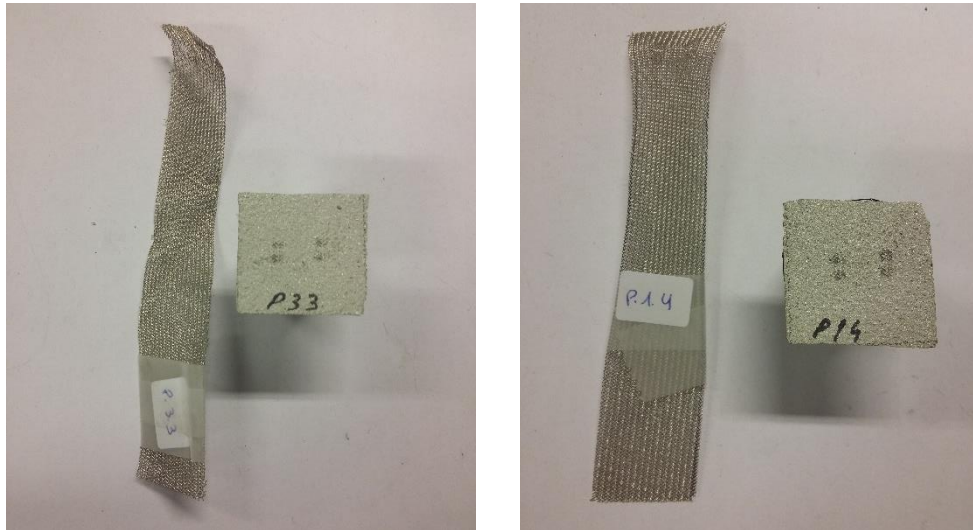


Figura 61 - Tipo de rutura observada nos ensaios realizados às ligações soldadas por pontos segundo a combinação de parâmetros 3 (amostra 3) e a combinação de parâmetros 5 (amostra 4), respetivamente.

Para a combinação de parâmetros 2 ($I=56$; $t=4$) verificou-se a ocorrência de rutura no ponto de soldadura por separação da rede de cobre estanhada da placa de metalização. A média das forças máximas alcançadas para as cinco amostras testadas foi de 14,88 N, sendo o valor máximo registado de, aproximadamente, 16,68 N, valor bastante reduzido. Deste modo, esta combinação de parâmetros não possibilita a obtenção de soldaduras de boa qualidade.

Para a combinação de parâmetros 4 ($I=64$; $t=4$) obteve-se um valor médio de forças máximas alcançadas para as cinco amostras testadas de 22,17 N, sendo o menor valor registado equivalente a 19,79 N (amostra 4) e o maior de, aproximadamente, 26,58 (amostra 3). Estes valores encontram-se na fronteira do valor utilizado como critério de distinção de uma soldadura boa/má ao nível da sua resistência mecânica (aproximadamente 20 N). Na totalidade das amostras testadas, a rutura ocorreu por separação da rede de cobre estanhada da placa de metalização.

Relativamente à combinação de parâmetros 6 ($I=72$; $t=4$), os resultados foram similares aos obtidos para a combinação 4, sendo a média das forças máximas alcançadas para as cinco amostras submetidas a ensaio equivalente a 23,68 N. Tal como aconteceu no caso anterior, este valor é bastante próximo do limite definido para caracterizar qualidade da soldadura consoante a sua resistência mecânica. Nas cinco amostras testadas, verificou-se a ocorrência de pequenas ruturas na rede devido à fusão do revestimento de metalização que, no ponto de soldadura, envolve a rede. Contudo, nas ligações realizadas entre a rede de cobre estanhada e os elementos condensadores segundo esta combinação de parâmetros, constatou-se um excesso de indentação causada pela elevada intensidade de corrente, que pode resultar na danificação da metalização e comprometer o funcionamento do condensador. Na figura 62 encontra-se exposta a rutura observada nos ensaios realizados para análise da combinação de parâmetros 6, assim como a indentação excessiva verificada na soldadura da rede aos elementos condensadores.

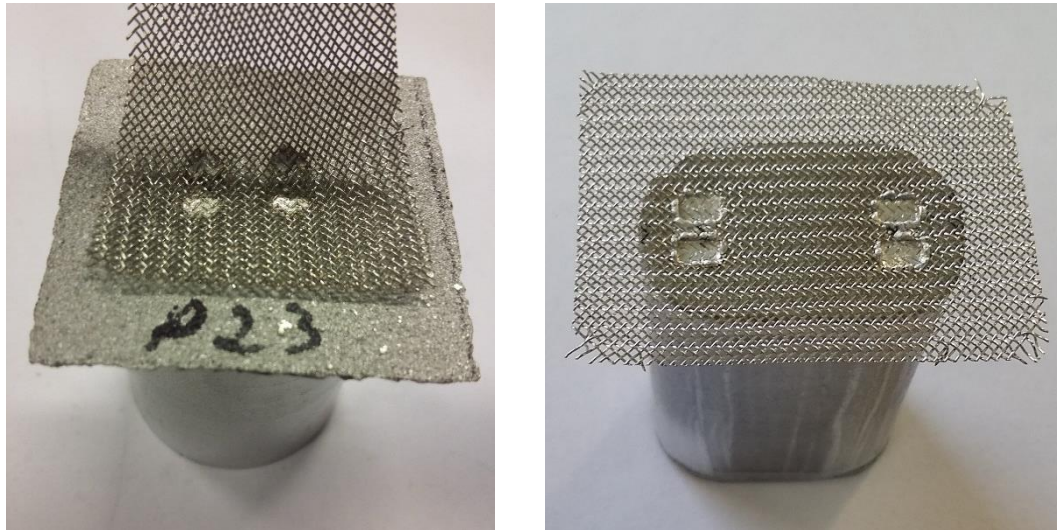


Figura 62 - Rutura observada nos ensaios realizados às ligações soldadas por pontos segundo a combinação de parâmetros 6 (à esquerda) e indentação excessiva verificada nas soldaduras executadas segundo a mesma combinação de parâmetros (à direita).

Tendo em conta as evidências explanadas ao longo dos últimos parágrafos, a combinação de parâmetros testada que possibilita o melhor resultado para o processo de soldadura por pontos é a combinação 4 ($I=64$; $t=4$). Ainda assim, segundo o critério de força de ligação mínima estabelecido, esta combinação não garante a obtenção de uma soldadura de boa qualidade, dado que os valores obtidos nos ensaios são bastante próximos do limite mínimo identificado (20 N). Apesar da combinação 6 ($I=72$; $t=4$) apresentar melhores resultados em termos de força de tração máxima, esta melhoria é bastante reduzida (aumento de 6,82 %), não justificando o excesso de indentação verificado e possível dano da célula condensadora. Uma das soluções evidentes para elevar a força de tração obtida e, deste modo, obter um resultado mais satisfatório seria aumentar o número de pontos efetuados por amostra, o que poderá diminuir a cadência de produção deste tipo de componentes, ou utilizar elétrodos com uma secção de ponta superior, de maneira a aumentar a área de soldadura.

O gráfico 2 exibe a variação da força de tração máxima em função da intensidade de corrente usada na soldadura por pontos, para cada um dos tempos (referência) utilizados. Na sua elaboração foram consideradas as médias obtidas para as cinco amostras testadas para cada combinação de parâmetros. Através da sua observação, é possível a comparação dos resultados obtidos para as diversas combinações estudadas, já analisados nos parágrafos anteriores.

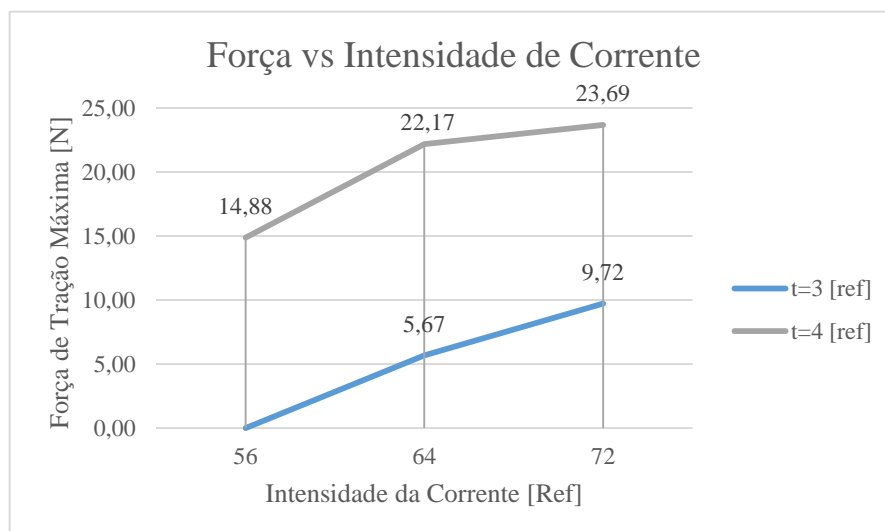


Gráfico 2 - Evolução da Força de Tração Máxima em Função da Intensidade da Corrente.

As curvas relativas aos ensaios de tração, efetuados para análise do processo de soldadura por pontos, para a totalidade das combinações de parâmetros referidas, podem ser visualizadas através da consulta do anexo K.

Embora na produção dos provetes de ensaio se tenha tentado alcançar áreas de soldadura semelhantes, no caso da brasagem torna-se difícil, em termos práticos, controlar a área de soldadura, uma vez que a temperatura afeta diretamente a molhabilidade do material de adição, resultando na obtenção de áreas distintas. Deste modo, a análise detalhada dos dois processos estudados só estará completa efetuando-se a comparação dos resultados obtidos em termos de tensão, através da recolha das áreas de soldadura de cada amostra, por tratamento de imagem, e da divisão dos resultados obtidos para a força máxima pelas mesmas ($\sigma=F/A$). Ainda assim, as forças máximas alcançadas em ambos os processos estão em concordância com o estudo analisado na secção 3.6, relativa à comparação dos diversos processos abordados na síntese bibliográfica, sendo as forças obtidas para a tecnologia de soldadura por pontos bastante inferiores às conseguidas para o processo de brasagem faca.

Análise em Tensão

A determinação das áreas de soldadura para as ligações efetuadas segundo a tecnologia de brasagem fraca foi realizada recorrendo ao *software IMAGEJ*®. Deste modo, este processo compreendeu as seguintes etapas:

- Fotografia do ponto de soldadura com uma escala associada;
- Fotografia do ponto de soldadura com a mesma ampliação que a primeira, sem necessidade de colocação da escala;
- Análise da imagem com escala através do *software IMAGEJ*® e definição de uma escala genérica para as fotografias de todos os provetes submetidos a ensaio;
- Após definição da escala, medição da área através da criação de um contorno envolvendo o ponto de soldadura visualizado;
- Para a fotografia de cada provete, execução do processo de medição cinco vezes e determinação do valor médio das medições realizadas.

A figura 63 exhibe o método utilizado na determinação das áreas de soldadura dos provetes ligados pelo processo de brasagem. Nesta ilustração, é possível observar a criação do contorno em redor do ponto de soldadura e a repetição deste processo cinco vezes para cada amostra.

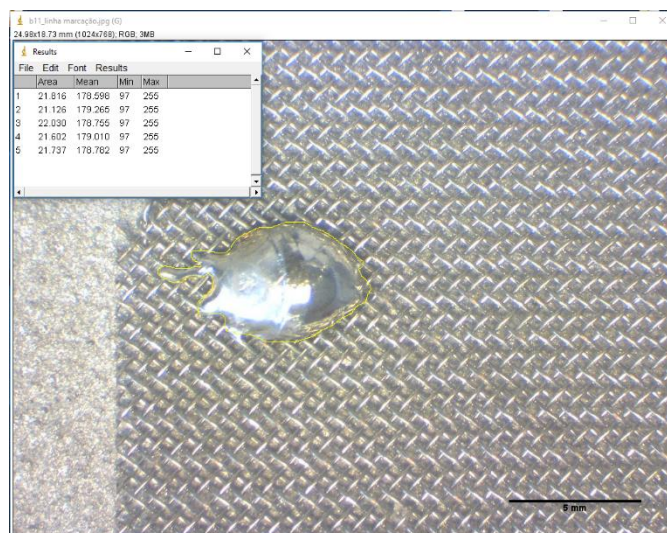


Figura 63 - Determinação das Áreas de Soldadura dos Provetes Ligados Segundo o Processo de Brasagem Fraca.

Na tabela 15 encontram-se expostos os valores de área de soldadura determinados, pelo procedimento acima explanado, para as ligações efetuadas recorrendo à tecnologia de brasagem, segundo as diversas combinações de parâmetros estudadas.

Tabela 15 – Área de Soldadura Determinada para as Ligações Efetuadas pelo Processo de Brasagem Fraca.

Amostra	Área de Soldadura [mm ²]					
	T=320 °C; t=3 s	T=320 °C; t=5 s	T=360 °C; t=3 s	T=360 °C; t=5 s	T=400 °C; t=3 s	T=400 °C; t=5 s
n=1	21,662	20,641	21,840	29,874	22,697	19,766
n=2	22,380	20,023	23,092	28,385	24,709	31,958
n=3	20,590	20,120	20,986	31,150	19,451	29,962
n=4	20,994	19,677	22,643	24,302	26,766	32,633
n=5	23,682	24,800	28,803	20,070	21,111	28,544
Média	21,862	21,052	23,473	26,756	22,947	28,573
Desvio Padrão	1,224	2,123	3,086	4,539	2,887	5,183

Relativamente ao processo de soldadura por pontos, as áreas das diferentes amostras foram determinadas a partir da área dos elétrodos utilizados. Assim, para cada amostra, foram utilizados dois elétrodos paralelos de ponta retangular (área de secção: 2,08x3,35 mm²), executando-se a ligação duas vezes, o que perfaz uma área total de 27,872 mm².

Nas tabelas 16 e 17 encontram-se apresentados os resultados relativos à tensão alcançada nas diferentes amostras ensaiadas na análise das ligações “placa de metalização/ rede de cobre estanhada”, efetuadas recorrendo ao processo de brasagem fraca e de soldadura por pontos, respetivamente. Estes valores foram obtidos através da divisão dos resultados constantes das tabelas 13 e 14, referentes às forças máximas alcançadas nos ensaios de tração, pelas áreas determinadas para cada amostra.

Tabela 16 - Tensão Alcançada para o Processo de Brasagem Fraca.

Amostra	Tensão [MPa]					
	T=320 °C; t=3 s	T=320 °C; t=5 s	T=360 °C; t=3 s	T=360 °C; t=5 s	T=400 °C; t=3 s	T=400 °C; t=5 s
n=1	0,568	2,123	0,016	1,579	2,447	2,882
n=2	2,270	2,033	1,979	1,831	1,959	1,764
n=3	0,688	2,635	1,341	1,550	2,988	1,798
n=4	2,352	2,558	1,482	1,976	1,922	1,926
n=5	2,333	1,805	1,426	2,571	1,752	2,201
Média	1,642	2,231	1,557*	1,901	2,214	2,114
Desvio Padrão	0,927	0,354	0,287*	0,414	0,504	0,462

* Valores de média e desvio padrão calculados desprezando a amostra 1 para a combinação de parâmetros 3 (considerando as cinco amostras: Média = 1,249 MPa; Desvio Padrão = 0,733 MPa).

Através da análise dos resultados presentes na tabela 16, constata-se que a tensão alcançada, nas amostras ligadas pelo processo de brasagem, não segue a mesma tendência verificada nos resultados relativos à força de tração máxima. Enquanto que para a força de tração, o valor médio de força aumentava com o aumento de temperatura, para cada *reflow time*

utilizado (gráfico 1), no caso da tensão verifica-se um comportamento distinto. Assim, para cada *reflow time* aplicado, verifica-se uma diminuição do valor da tensão para a variação da temperatura entre os 320 °C e os 360 °C e um aumento do seu valor no intervalo compreendido entre os 360 °C e os 400 °C. Este comportamento pode ser facilmente verificado através da visualização do gráfico 3, concernente à evolução do valor médio das tensões obtidas para as cinco amostras, testadas para cada combinação de parâmetros, em função da temperatura de soldadura, para cada um dos *reflow times* utilizados.

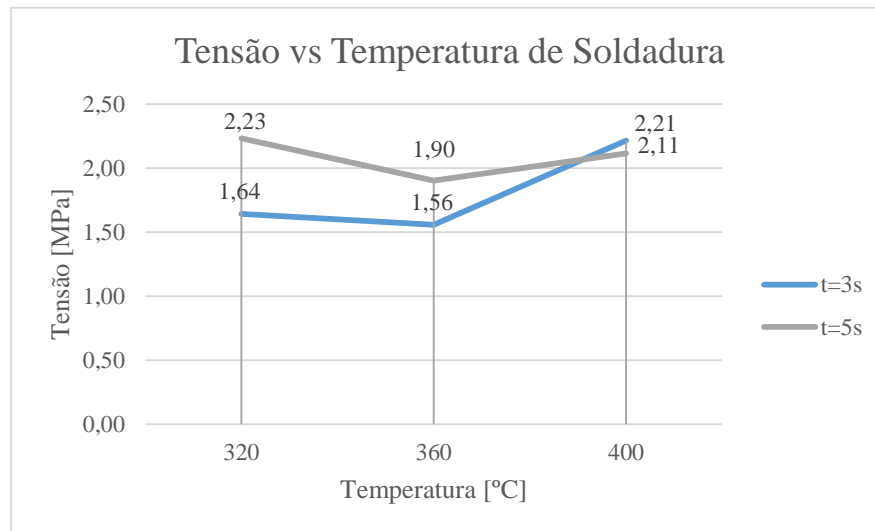


Gráfico 3 - Evolução da Tensão em Função da Temperatura.

Para um *reflow time* de 5 s, a obtenção de um valor de tensão elevado para a temperatura de soldadura equivalente a 320 °C explica-se pelo facto de uma temperatura reduzida promover uma menor propagação do material de adição pelo revestimento metálico, originando uma maior concentração deste material numa área mais diminuta. Deste modo, a área de soldadura vai ser menor e, embora a média das forças de tração seja inferior à obtida para as temperaturas de 360 °C e 400 °C, a tensão alcançada é superior. Assim, o efeito de concentração de tensões tem uma contribuição preponderante nos resultados obtidos para a temperatura de 320 °C. Em oposição, para a combinação de parâmetros 6 (T=400 °C; t=5 s), o incremento do valor de tensão observado deve-se, sobretudo, aos resultados obtidos em termos de força de tração, sobrepondo-se ao aumento da área de soldadura com a temperatura.

Relativamente aos resultados alcançados para o *reflow time* de 3 s, verifica-se que a utilização de um *reflow time* curto origina áreas de soldadura sensivelmente menores, dada a dificuldade de propagação do material de adição pela superfície do revestimento metálico, já que a sua solidificação ocorre mais rapidamente. Esta evidência explica o facto de, para uma temperatura de 400 °C, os resultados de tensão obtidos para um *reflow time* de 3 s superarem os conseguidos para um *reflow time* de 5 s. Embora a média das forças de tração máximas seja inferior para a combinação de parâmetros 5 (T=400 °C; t=3 s), o facto da área de soldadura ser consideravelmente mais reduzida do que a verificada para a combinação de parâmetros 6 (22,947 mm² e 28,573 mm², respetivamente), origina valores de tensão moderadamente superiores ($\sigma=F/A$).

Os resultados de tensão verificados não invalidam as conclusões retiradas na análise dos resultados em termos de forças de tração máximas obtidas para as ligações efetuadas segundo o processo de brasagem fraca, contribuindo, somente, para a sua melhor compreensão. Deste modo, tendo em consideração, simultaneamente, os resultados de força e de tensão, as combinações de parâmetros que potenciam a otimização do processo de brasagem fraca, em termos de propriedades mecânicas conferidas às juntas soldadas, são a 4 (T=360 °C, t=5 s), a 5

($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=3\text{ s}$) e a 6 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{ s}$), sendo que a escolha desta última deve ser acautelada devido à ocorrência de uma elevada transferência de calor para o interior do elemento condensador, no caso da ligação real entre a rede de cobre estanhada e o elemento condensador.

Tabela 17 - Tensão Alcançada para o Processo de Soldadura por Pontos.

Amostra	Tensão [MPa]					
	I=56; t=3	I=56; t=4	I=64; t=3	I=64; t=4	I=72; t=3	I=72; t=4
n=1	-	0,538	0,218	0,735	0,238	0,892
n=2	-	0,597	0,224	0,727	0,248	0,834
n=3	-	0,598	0,230	0,954	0,406	0,935
n=4	-	0,521	0,134	0,710	0,476	0,892
n=5	-	0,414	0,208	0,852	0,375	0,697
Média	-	0,534	0,203	0,796	0,349	0,850
Desvio Padrão	-	0,075	0,039	0,105	0,103	0,093

No que diz respeito aos resultados de tensão obtidos para as amostras ligadas pelo processo de soldadura por pontos, uma vez que a área de soldadura é equivalente para todas as amostras, estes são similares aos resultados alcançados em termos de força de tração máxima, estando apenas multiplicados por uma constante de proporcionalidade ($1/\text{Área}$).

Deste modo, para cada um dos tempos utilizados, a tensão obtida aumenta com o aumento da intensidade de corrente. Esta variação pode ser visualizada através da análise do gráfico 4, relativo à evolução da tensão em função da intensidade de corrente aplicada na soldadura por pontos. Na sua elaboração foram consideradas as médias dos valores obtidos para as cinco amostras testadas para cada combinação de parâmetros. Através da sua observação, é possível a comparação dos resultados obtidos para as diversas combinações analisadas.

Tal como se constatou na análise em termos de força de tração máxima, verifica-se uma diferença elevada nos resultados obtidos para os dois tempos de soldadura aplicados. Assim, um tempo equivalente a 3 (referência do equipamento) origina tensões de reduzido valor, não sendo adequado para este tipo de soldadura. O valor médio de tensão mais elevado foi alcançado para a combinação de parâmetros 6 ($I=72$; $t=4$), sendo este de, aproximadamente, 0,85 MPa, ainda assim, resultado bastante diminuto.

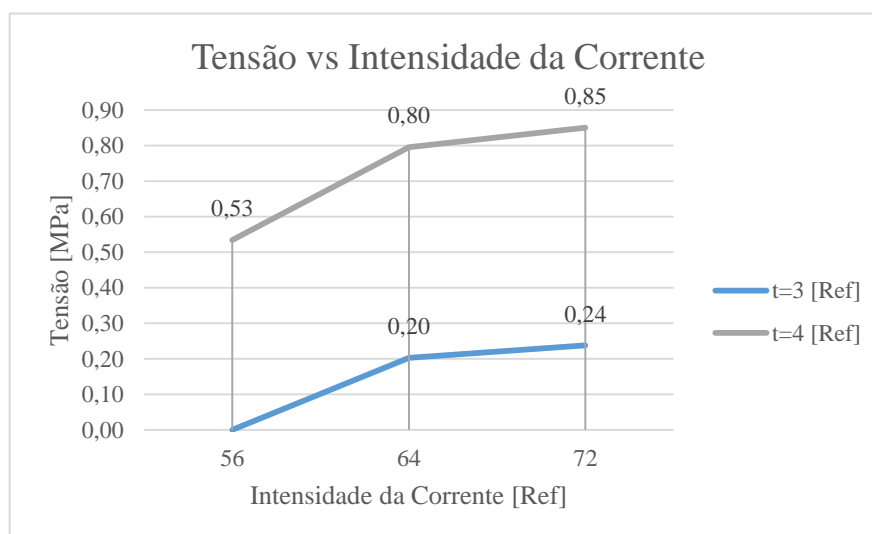


Gráfico 4 - Evolução da Tensão em Função da Intensidade da Corrente.

Em suma, através da comparação dos resultados de tensão alcançados para os processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos, é possível concluir que a tecnologia de brasagem origina ligações soldadas com melhores propriedades mecânicas, conduzindo a resultados de tensão consideravelmente superiores. Esta confirmação está em concordância com os resultados obtidos em termos de força de tração.

É de salientar que as tensões calculadas para ambos os processos não representam as tensões máximas obtidas na ligação, para cada combinação de parâmetros, sendo estas bastante superiores aos valores obtidos. Nas amostras em que se verificou rutura pela rede de cobre estanhada, a área calculada não representa a área real de ligação, dado que a secção onde ocorreu a rutura não é equivalente à secção do ponto de soldadura. Deste modo, a área real de ligação, de valor reduzido quando comparado com o determinado, deveria ser calculada através da determinação da secção resistente intrínseca a cada filamento da rede de cobre estanhada, o que na prática não é exequível. Assim, as tensões calculadas possibilitam apenas a comparação dos diferentes processos analisados e das combinações de parâmetros inerentes aos mesmos, não constituindo um valor máximo de tensão associado a cada combinação.

5.1.2 Análise de Variâncias

Tendo em consideração os resultados alcançados em termos de tensão máxima, para as amostras efetuadas segundo as diferentes combinações de parâmetros, inerentes aos processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos, efetuou-se uma análise de variâncias, para cada um dos processos referidos, recorrendo ao *software Minitab®*.

Este teste estatístico é aplicado tendo por base um plano experimental e tem como intuito estabelecer a influência dos fatores de entrada na resposta alcançada. O significado de cada fator é determinado analisando o “valor F” (*Fisher-Snedecor*), que representa a relação entre a média de quadrados do fator e a média de quadrados do erro ($F = QM_{\text{Fator}}/QM_{\text{Erro}}$). Este valor é calculado em função de um nível de confiança em concreto, expresso pelo “Valor-P”. A contribuição de um fator é determinada através da divisão da soma dos quadrados (SQ) associada a esse fator pela soma dos quadrados do modelo total.

Na presente análise, o valor de prova (Valor-P) utilizado foi de 0,05, correspondendo a um intervalo de confiança de 95 %. Assim sendo, se este valor, associado a um fator de entrada, for inferior a 0,05, o fator é considerado significativo, caso contrário, considera-se que estatisticamente não tem influência na resposta.

Para o processo de brasagem fraca, foi estabelecido um plano experimental (*Design of Experiments*) fatorial completo, possuindo 2 fatores (variáveis de entrada). Cada um dos fatores considerados contém um número de níveis de variação distintos, sendo que o fator “Temperatura” possui 3 níveis (320 °C, 360 °C e 400 °C) e o fator “*reflow time*” possui 2 níveis (3 s e 5 s). O número de réplicas definido para cada combinação foi igual a 5. A resposta estudada foi a tensão alcançada. A tabela 18 apresenta os resultados da análise de variância efetuada para o processo de brasagem.

Tabela 18 - Resultados da Análise de Variância para a Tensão Obtida (Brasagem Fraca).

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Temperatura	2	1,7635	14,26 %	1,7635	0,8818	2,41	0,110
Reflow time	1	1,0874	8,79 %	1,0874	1,0874	2,97	0,097
Erro	26	9,5152	76,95 %	9,5152	0,3660		
Total	29	12,3661	100,00 %				

*Onde: GL – Grau de Liberdade; SQ – Soma de Quadrados; QM – Média de Quadrados.

Os resultados da análise de variância alcançados para a tecnologia de brasagem, possibilitam constatar que ambos os fatores estudados (temperatura e *reflow time*) não possuem significância estatística na resposta para um intervalo de confiança de 95 %, uma vez que os valores de prova associados a cada fator são superiores a 0,05.

As contribuições na resposta dos parâmetros temperatura e *reflow time* são, respectivamente, 14,26 % e 8,79 %, o que comprova a reduzida influência destes fatores na resposta em tensão. Sendo o erro obtido bastante elevado (contribuição de 76,95 %), esta informação revela que os parâmetros não controlados nesta análise apresentam uma relevância estatística muito superior aos parâmetros em estudo.

Estes resultados vão de encontro à análise efetuada, anteriormente, relativa à evolução da tensão alcançada para as diferentes combinações de parâmetros estudadas (Gráfico 3 – página 93), tendo a área de soldadura uma influência primordial nos resultados conseguidos em termos de tensão. Para além desta verificação, fatores como a repetibilidade do processo manual, a janela de parâmetros adotada e a concentração de tensões nos filamentos da rede em redor do ponto de soldadura poderão, efetivamente, apresentar maior influência do que os fatores em estudo.

Para o processo de soldadura por pontos, o plano experimental utilizado foi semelhante ao estabelecido para o caso anterior (fatorial completo), possuindo 2 fatores de entrada. Deste modo, o fator “Intensidade de Corrente” contém 3 níveis de variação (56, 64 e 72) e o fator “tempo” possui 2 níveis (3 e 4). O número de réplicas definido para cada combinação foi igual a 5, sendo a resposta estudada em termos de tensão. A tabela 19 exhibe os resultados da análise de variância efetuada para o processo de soldadura por pontos.

Tabela 19 - Resultados da Análise de Variância para a Tensão Obtida (Soldadura por Pontos).

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Tempo	1	2,20788	74,85 %	2,20788	2,20788	357,27	0,000
Intensidade	2	0,58122	19,70 %	0,58122	0,29061	47,03	0,000
Erro	26	0,16067	5,45 %	0,16067	0,00618		
Total	29	2,94977	100,00 %				

*Onde: GL – Grau de Liberdade; SQ – Soma de Quadrados; QM – Média de Quadrados.

Os resultados da análise de variância obtidos para a tecnologia de soldadura por pontos permitem verificar que ambos os fatores estudados (intensidade de corrente e tempo de soldadura) influenciam a resposta em termos de tensão, dado o valor de prova (Valor-P) ser inferior a 0,05 para os dois parâmetros em análise. Deste modo, os fatores de entrada apresentam efeitos estatisticamente relevantes na resposta alcançada.

As contribuições na resposta em tensão dos fatores tempo e intensidade de corrente são, respectivamente, 74,85 % e 19,7 %, sendo o tempo de soldadura o parâmetro com maior influência. Estes resultados estão em concordância com as elações retiradas, anteriormente, na análise dos resultados em tensão, onde se verificava uma diferença elevada nos valores de tensão obtidos para os dois tempos de soldadura aplicados. Deste modo, um tempo equivalente a 3 (referência do equipamento) originava tensões bastante reduzidas, não sendo adequado para aplicação nas soldaduras pretendidas.

5.1.3 Testes às Propriedades Elétricas

Tal como foi mencionado na secção 4.2.2, os ensaios às propriedades elétricas consistiram na medição da resistência óhmica (em DC) existente entre uma das extremidades da rede de cobre estanhada e a metalização que reveste o topo do elemento condensador. Esta medição foi efetuada antes e após um envelhecimento artificial com duração de 10 dias (ciclos de 30 minutos com temperatura inferior de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e temperatura superior de $125\text{ }^{\circ}\text{C}$) com o intuito de se apurar se havia degradação das propriedades elétricas da ligação soldada.

Na tabela 20 encontram-se apresentados os resultados relativos à resistência elétrica obtida nos testes efetuados para análise das ligações “elemento condensador/rede de cobre estanhada”, executadas segundo o processo de brasagem fraca, consoante as combinações de parâmetros definidas anteriormente. Para cada combinação são, também, expostos os indicadores estatísticos “média” e “desvio padrão”.

Tabela 20 – Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Brasagem Fraca.

Amostra	Resistência Elétrica ($\text{m}\Omega$)					
	T=360 °C; t=3 s		T=360 °C; t=5 s		T=400 °C; t=5 s	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
n=1	0,4782	0,4730	0,4728	0,4702	0,4632	0,4694
n=2	0,4698	0,4702	0,4744	0,4713	0,4633	0,4705
n=3	0,4684	0,4690	0,4784	0,4718	0,4607	0,4721
n=4	0,4701	0,4743	0,4761	0,4724	0,4635	0,4732
n=5	0,4749	0,4644	0,4715	0,4715	0,4683	0,4687
Média	0,4723	0,4702	0,4746	0,4714	0,4638	0,4708
Desvio Padrão	0,0041	0,0039	0,0027	0,0008	0,0028	0,0019

A realização de alguns ensaios primários permitiu constatar que não se verificavam alterações significativas do valor de resistência elétrica medida para as diferentes combinações de parâmetros. Deste modo, apenas se executaram os ensaios relativos às combinações de parâmetros 3 (T=360 °C; t=3 s), 4 (T=360 °C; t=5 s) e 6 (T=400 °C; t=5 s). Através da análise dos resultados presentes na tabela 20 é possível confirmar esta constatação, sendo o valor médio da resistência elétrica medida nas cinco amostras testadas, para cada combinação de parâmetros referida, antes do envelhecimento artificial, equivalente a 0,4723 $\text{m}\Omega$, 0,4746 $\text{m}\Omega$ e 0,4638 $\text{m}\Omega$, respetivamente, sendo a diferença máxima entre os valores registados da ordem da centésima de Ohm (diferença relativa de 2,33 %).

Após a submissão das amostras aos ciclos de envelhecimento artificial previamente explicado, a média das resistências óhmicas medidas foi de 0,4702 $\text{m}\Omega$ (combinação 3), 0,4714 $\text{m}\Omega$ (combinação 4) e 0,4708 $\text{m}\Omega$ (combinação 6), sendo a diferença máxima entre estes valores da ordem da milésima de Ohm (diferença relativa de 0,26 %). Assim sendo, não se observaram diferenças significativas para as combinações de parâmetros analisadas, nem se verificou a ocorrência de degradação das propriedades elétricas no final do envelhecimento, mantendo-se os valores de resistência elétrica coincidentes com os alcançados anteriormente. A maior variação observada após a aplicação dos ciclos de envelhecimento artificial deu-se para a combinação de parâmetros 6, havendo um aumento de 0,007 $\text{m}\Omega$ (1,5 %), ainda assim, valor bastante reduzido.

No gráfico 5 encontram-se ilustrados os valores médios de resistência elétrica, obtidos para as cinco amostras ensaiadas, para cada uma das combinações de parâmetros analisadas,

antes e após o envelhecimento artificial. A partir da análise deste gráfico é possível confirmar as conclusões expostas nos parágrafos anteriores.

Embora a combinação 6 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=5\text{ s}$) apresente um valor de resistência ôhmica mais reduzido, comparativamente às restantes combinações, antes do envelhecimento artificial, esta diferença revela-se pouco expressiva face aos resultados obtidos, dada a sua ordem (diferença relativa de 2,33 %). Após envelhecimento, esta situação também não é verificada.

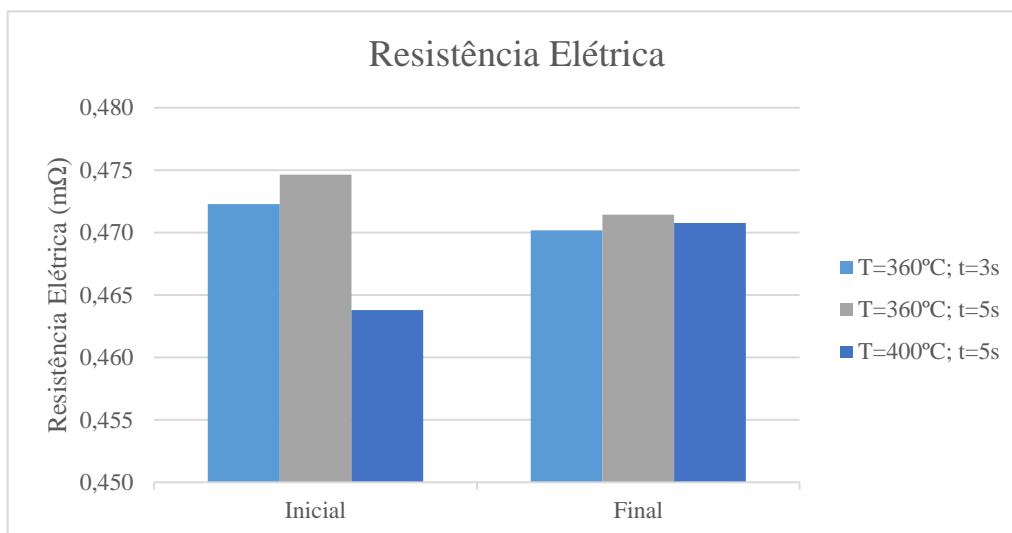


Gráfico 5 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Brasagem Fraca, Antes e Após Envelhecimento Artificial.

Na tabela 21 encontram-se expostos os resultados referentes à resistência elétrica obtida nos testes realizados para análise das ligações “elemento condensador/rede de cobre estanhada”, executadas segundo o processo de soldadura por pontos, consoante as combinações de parâmetros definidas anteriormente. Para cada combinação são, também, expostos os indicadores estatísticos “média” e “desvio padrão”.

Tabela 21 - Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Soldadura por Pontos.

Amostra	Resistência Elétrica (mΩ)					
	I = 64; t = 3		I = 64; t = 4		I = 72; t = 4	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
n=1	0,5063	0,4834	0,5036	0,4871	0,4750	0,4776
n=2	0,5178	0,4786	0,4725	0,4789	0,4774	0,4745
n=3	0,5153	0,4841	0,4939	0,4890	0,4877	0,4766
n=4	0,4932	0,4784	0,4714	0,4784	0,4951	0,4802
n=5	0,4972	0,4749	0,4744	0,4760	0,4846	0,4820
Média	0,5060	0,4799	0,4832	0,4819	0,4840	0,4782
Desvio Padrão	0,0108	0,0038	0,0147	0,0058	0,0081	0,0030

Na análise da tecnologia de soldadura por pontos foram submetidas a ensaio as combinações de parâmetros 3 ($I=64$; $t=3$), 4 ($I=64$; $t=4$) e 6 ($I=72$; $t=4$). Para os casos mencionados, a média das resistências elétricas para as cinco amostras testadas, previamente ao envelhecimento artificial, foi equivalente a 0,5060 mΩ, 0,4832 mΩ e 0,4840 mΩ,

respetivamente. Assim, a diferença absoluta máxima observada foi de, aproximadamente, 0,023 m Ω (diferença relativa de 4,72 %), não havendo disparidades significativas entre as diversas medições realizadas.

Após a aplicação dos ciclos de envelhecimento artificial, o valor médio das resistências ôhmicas alcançadas foi de 0,4799 m Ω (combinação 3), 0,4819 m Ω (combinação 4) e 0,4782 m Ω (combinação 6), sendo a diferença absoluta máxima entre estes valores de, aproximadamente, 0,004 m Ω (diferença relativa de 0,77 %). Deste modo, não se constataram desigualdades expressivas nos resultados obtidos para as combinações de parâmetros analisadas, nem se verificou a deterioração das propriedades elétricas posteriormente ao envelhecimento artificial, mantendo-se os valores de resistência elétrica semelhantes aos alcançados anteriormente. A maior variação observada após a aplicação dos ciclos de envelhecimento deu-se para a combinação de parâmetros 3, ocorrendo uma diminuição de 0,026 m Ω (5,16 %).

No gráfico 6 encontram-se apresentados os valores médios de resistência ôhmica, obtidos para as cinco amostras testadas, para cada uma das combinações de parâmetros estudadas, antes e após o envelhecimento artificial. A sua visualização permite confirmar as conclusões evidenciadas ao longo dos parágrafos anteriores.

Numa primeira análise, a combinação de parâmetros 3 (I=64; t=3) parece conduzir a valores de resistência elétrica bastante superiores, antes do envelhecimento artificial, quando comparada com as demais. Este resultado pode ser explicado pela ausência de fusão da rede com o revestimento metálico que se verifica utilizando um tempo de referência 3, na soldadura por pontos. Contudo, esta afirmação deve ser acautelada dada a ordem da diferença observada, cerca de 0,02 m Ω (diferença relativa de 4,72 %), e devido à sensibilidade do equipamento face às condições de medição. Após a submissão das amostras aos ciclos de envelhecimento artificial, esta situação também não é verificada.

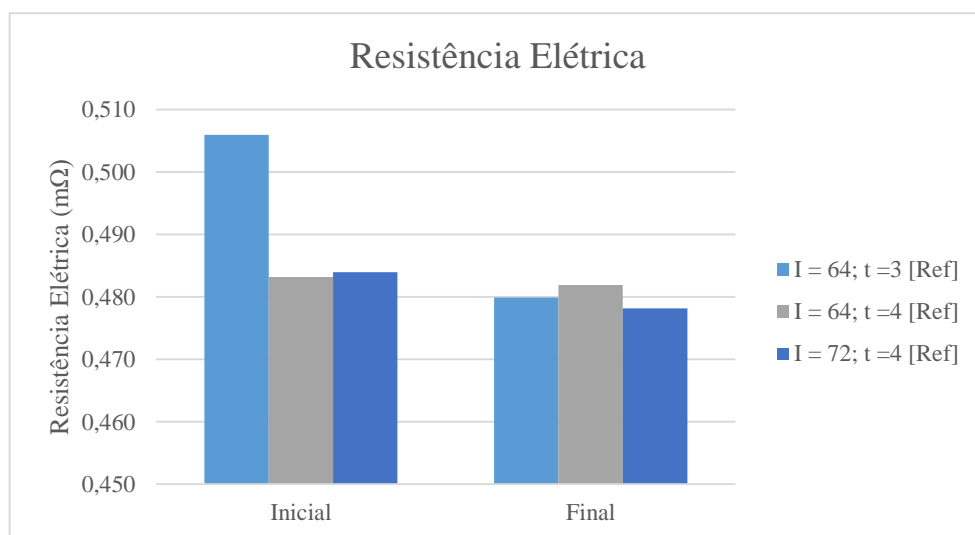


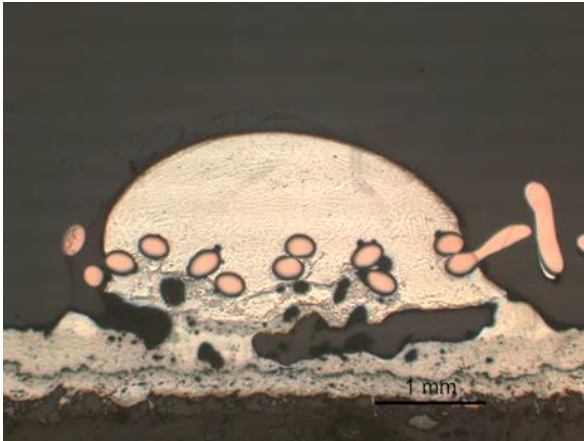
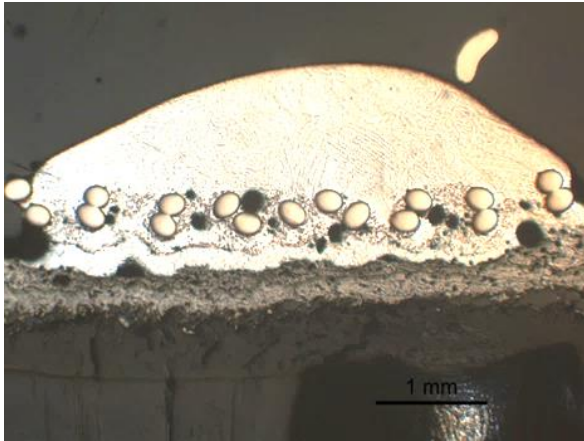
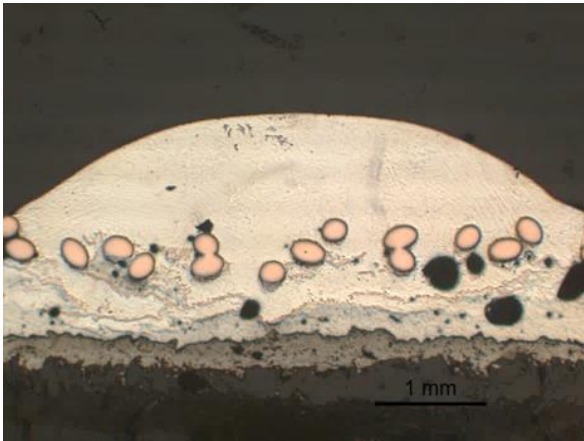
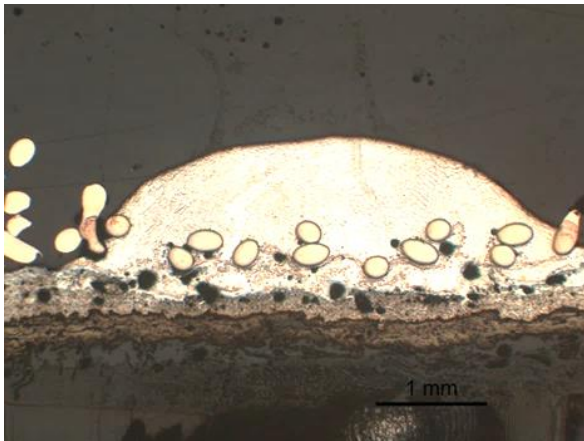
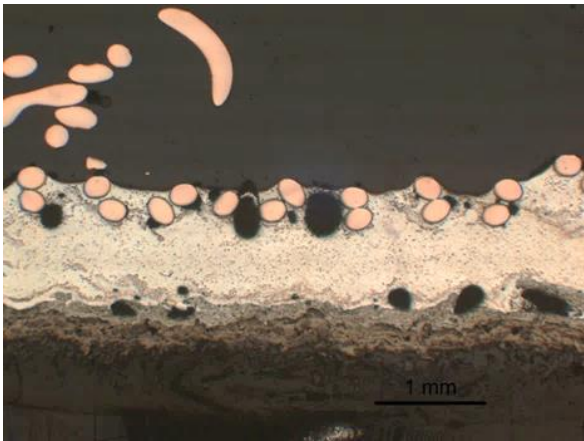
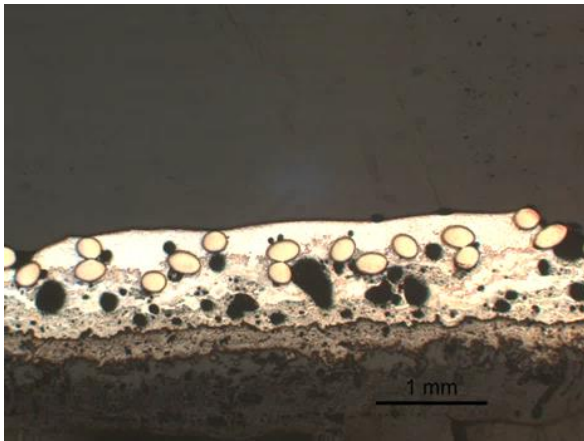
Gráfico 6 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Soldadura por Pontos, Antes e Após Envelhecimento Artificial.

Os resultados de resistência elétrica alcançados para os processos de brasagem fraca e soldadura por pontos são bastante similares, notando-se, ainda assim, um ligeiro aumento desta propriedade nas ligações efetuadas segundo a tecnologia de soldadura por pontos (cerca de 4,42 % antes do envelhecimento artificial e de 1,95 % após submetidas aos ciclos de envelhecimento). Deste modo, os resultados alcançados encontram-se em concordância com o estudo examinado na secção 3.6, relativa à comparação dos diversos processos abordados na síntese bibliográfica.

5.1.4 Análise Metalográfica

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados conseguidos na observação em microscopia ótica, dos cortes transversais aos pontos de soldadura, para cada uma das combinações de parâmetros estudadas, inerentes aos processos de brasagem fraca e soldadura por pontos.

Tabela 22 - Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Brasagem Fraca.

Resultados da Análise Metalográfica (Brasagem Fraca)	
Combinação de Parâmetros 1 (T=320 °C; t=3 s)	Combinação de Parâmetros 2 (T=320 °C; t=5 s)
	
Combinação de Parâmetros 3 (T=360 °C; t=3 s)	Combinação de Parâmetros 4 (T=360 °C; t=5 s)
	
Combinação de Parâmetros 5 (T=400 °C; t=3 s)	Combinação de Parâmetros 6 (T=400 °C; t=5 s)
	

Na tabela 22 encontram-se expostas as imagens dos cortes metalográficos efetuados para a zona de soldadura das ligações realizadas pelo processo de brasagem fraca, segundo as combinações de parâmetros referidas anteriormente.

Assim, para a combinação de parâmetros 1 ($T=320\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=3\text{ s}$), é possível observar a deposição de material de adição numa área reduzida, observando-se uma diminuta propagação deste pela superfície da metalização. Para esta combinação, visualiza-se, também a presença de um enorme vazio (de comprimento $2188,6\text{ }\mu\text{m}$) entre o material de adição e a camada superior da metalização (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn), sendo a área real de ligação bastante diminuta. Este resultado deve-se, em parte, ao reduzido *reflow time* imposto que, associado a uma temperatura pouco elevada, dificulta a ligação da solda ao revestimento metálico. Numa porção muito localizada da área de soldadura verifica-se a diluição da camada superior de metalização no material de adição. Deste modo, a zona termicamente afetada é reduzida, envolvendo somente a superfície da segunda camada de metalização (camada superior).

Na figura presente na tabela 22, relativa à combinação de parâmetros 1, é possível verificar a presença de poros como defeitos de soldadura, para além da porosidade natural do revestimento metálico. Estes poros são visíveis em todas as imagens metalográficas referentes às restantes combinações de parâmetros, sendo que a sua quantidade e dimensões variam consoante os parâmetros de tempo e temperatura utilizados. A porosidade natural das camadas de metalização e a aglomeração das partículas destas pode ser visualizada na figura 64, relativa às imagens metalográficas das camadas de metalização na região exterior à zona de soldadura, obtidas para a combinação de parâmetros 2.

Para a combinação de parâmetros 2 ($T=320\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=5\text{ s}$), observa-se uma propagação do material de adição, relativamente à segunda camada de metalização, bastante superior do que a visualizada no primeiro caso analisado. Consequentemente, a área real de ligação é consideravelmente maior do que a obtida segundo a combinação de parâmetros 1. Assim, verifica-se a diluição da camada de Zn-Sn no material de adição em toda a extensão da área de soldadura. A zona termicamente afetada envolve apenas a camada superior de metalização, não havendo o perigo de danificação do elemento condensador. Apesar de se verificar a presença de alguns poros como defeitos de soldadura evidentes, do ponto de vista metalográfico, a ligação efetuada segundo esta combinação de parâmetros evidencia-se como tendo maior robustez do que a ligação alcançada segundo a combinação de parâmetros 1.

Em suma, para uma temperatura de soldadura de $320\text{ }^{\circ}\text{C}$, um *reflow time* de 5 s, comparativamente a um *reflow time* de 3 s, permite alcançar uma soldadura de qualidade superior, já que permite uma solidificação menos abrupta do material de adição, diminuindo a formação de vazios e poros de elevadas dimensões.

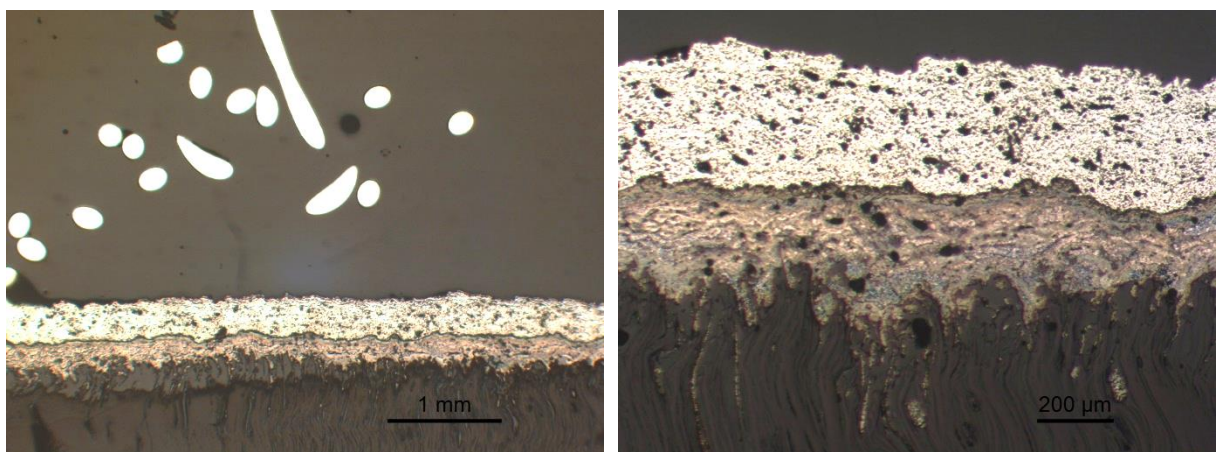


Figura 64 – Imagens Metalográficas das Camadas de Metalização na Região Exterior à Zona de Soldadura.

Relativamente à combinação de parâmetros 3 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=3\text{ s}$), observa-se a deposição do material de adição numa área ampla, tal como acontecia no caso anterior, havendo uma elevada propagação deste relativamente à metalização no topo do elemento condensador. Deste modo, verifica-se a diluição dos constituintes da segunda camada de metalização no material de adição, ao longo de toda a área de soldadura. A zona termicamente afetada apenas evolve a segunda camada de metalização, não se verificando a danificação do filme metalizado. Adicionalmente, na imagem do corte metalográfico presente na tabela 22, relativa à amostra ligada segundo a combinação de parâmetros 3, visualiza-se uma quantidade de material de adição excessiva, podendo este fator induzir a alguns erros na interpretação dos resultados.

Para a combinação de parâmetros 4 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=5\text{ s}$), o resultado da análise metalográfica é semelhante ao obtido para a combinação de parâmetros anterior. Assim sendo, o material de adição deposita-se envolvendo a rede, originando uma ampla área de ligação. Para esta combinação, verifica-se a ocorrência de diluição dos elementos que constituem a camada superior de metalização (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn) no material de adição. A zona termicamente afetada apenas evolve a segunda camada de metalização, salvaguardando-se a integridade do filme metalizado.

A desigualdade considerável entre os resultados alcançados para as combinações 3 e 4 relaciona-se com a formação de poros nas juntas de soldadura. Para a primeira combinação referida, visualiza-se a presença de poros de elevadas dimensões, sendo que para a combinação 4 os poros apresentam dimensões reduzidas. Assim, a utilização de um *reflow time* curto, para a mesma temperatura de soldadura, pode originar poros de maiores dimensões nas ligações efetuadas.

Genericamente, a presença de poros nas ligações efetuadas pelo processo de brasagem pode dever-se à utilização de uma solda SAC 305 fluxada (*Alpha Telecore® HF-850* com 2,2 % de fluxo), cujo fluxo interno evapora durante o processo de brassagem, originando poros nas juntas soldadas. As propriedades do fluxo referido podem ser consultadas através da visualização do anexo M, relativo à sua ficha técnica. Neste anexo, é referido que a temperatura de brasagem deverá ser $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior à temperatura de fusão do material de adição ($217\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $221\text{ }^{\circ}\text{C}$), sendo este o limite aconselhado para vaporização do fluxo. É de realçar que para *reflow times* curtos, o fluxo evapora ficando aprisionado no interior do material de adição, originando uma quantidade superior de poros. Contrariamente, para *reflow times* longos, os poros tendem a abandonar a zona de soldadura. Outra causa para a existência de poros como defeito de soldadura poderá ser a coalescência das porosidades naturais do revestimento metálico, formando poros de dimensões superiores.

Do ponto de vista metalográfico, as ligações realizadas segundo a combinação de parâmetros 4 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=5\text{ s}$) aparentam possuir excelentes características, corroborando, assim, os resultados alcançados na análise da resistência mecânica. De facto, estes resultados verificam que o fator de concentração de tensões, em cada filamento da rede adjacente ao ponto de ligação, deverá ser um dos parâmetros de maior influência nas propriedades mecânicas.

Relativamente à combinação de parâmetros 5 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=3\text{ s}$), verifica-se uma elevada propagação do material de adição relativamente à camada superior de metalização, havendo uma deposição deste maioritariamente entre a rede e metalização que reveste o topo do elemento condensador, alcançando-se uma área real de ligação ampla. Em toda a extensão da área de soldadura observa-se a existência de diluição dos elementos constituintes da segunda camada (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn) no material de adição. A dimensão da zona termicamente afetada é superior à observada nos casos anteriormente analisados, envolvendo, praticamente, a totalidade da espessura da segunda camada e o início da primeira camada de metalização. Contudo, esta não atinge o filme de polipropileno metalizado, não havendo danificação da célula condensadora.

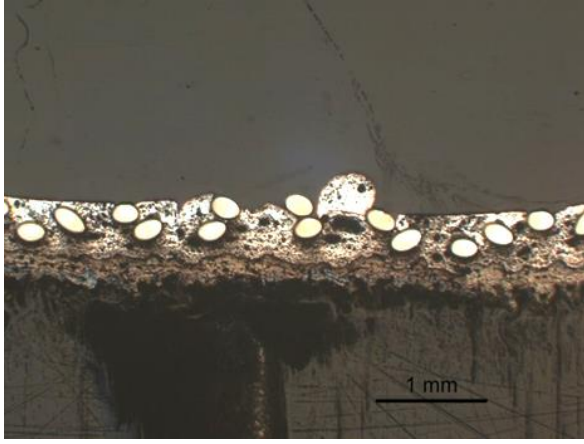
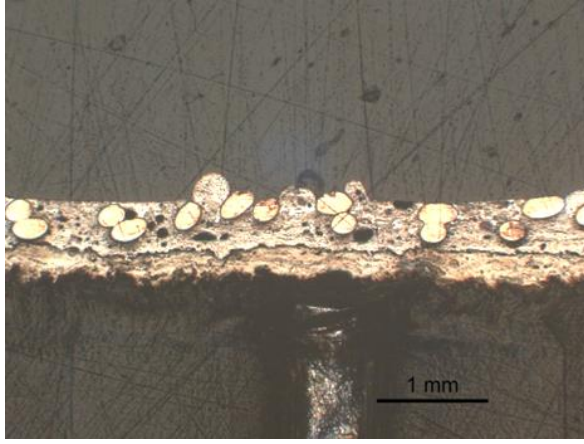
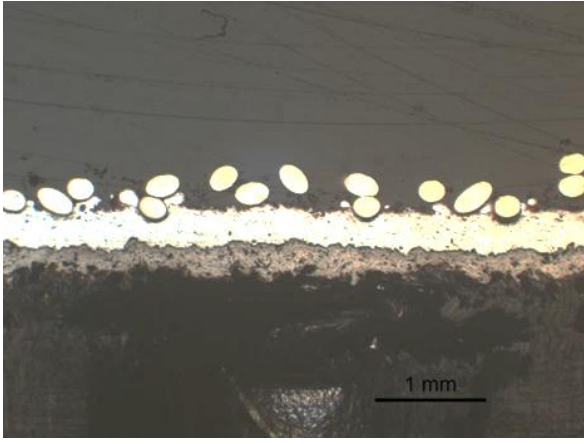
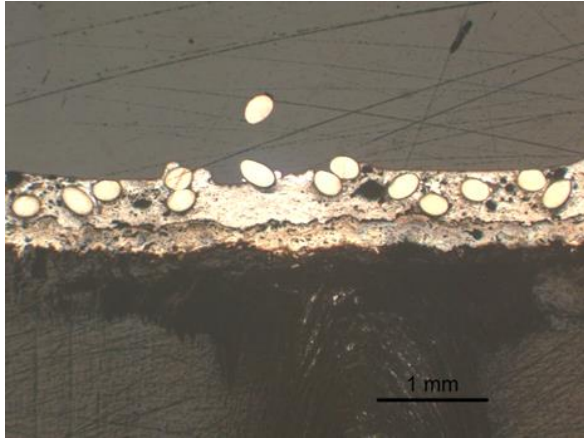
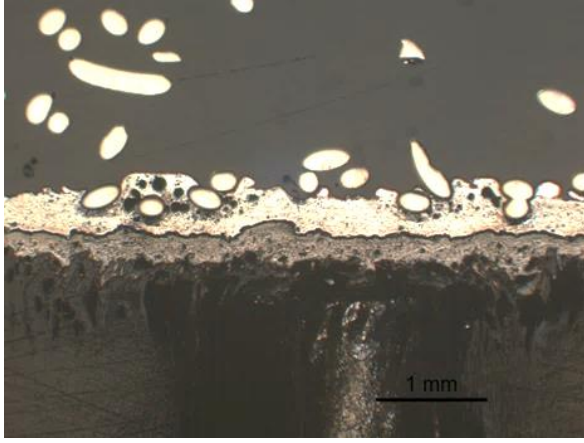
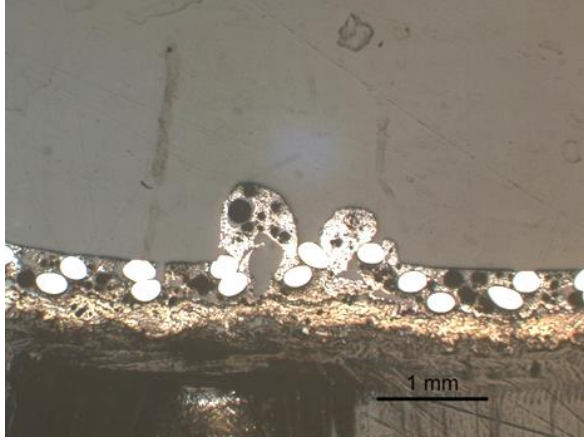
Os resultados alcançados para a combinação de parâmetros 6 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=5\text{ s}$) são similares aos alcançados para a combinação de parâmetros 5, em termos de deposição do material de adição, de ocorrência de diluição do material que constitui a segunda camada de metalização e de dimensão da zona termicamente afetada. Quanto à presença de defeitos de soldadura, observa-se a presença de poros de elevadas dimensões na amostra relativa à combinação 5 e de uma grande quantidade de poros e vazios na zona de soldadura da ligação efetuada segundo a combinação de parâmetros 6. Em suma, para além das causas mencionadas anteriormente, a utilização de uma elevada temperatura de brasagem promove a formação destes defeitos de soldadura. A zona termicamente afetada também será superior, dada a maior transferência de calor durante o processo de ligação.

Tendo em consideração as conclusões apresentadas nos últimos parágrafos, do ponto de vista metalográfico, a combinação de parâmetros que potencia a otimização do processo de brasagem é a combinação 4 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t=5\text{ s}$), dado que permite a obtenção de uma soldadura robusta, com presença de porosidades reduzidas e sem que haja danificação do filme metalizado no interior da célula condensadora.

No anexo L encontram-se apresentados os diagramas de equilíbrio relativos aos sistemas Zn-Al (figura L.1) e Zn-Sn (figura L.2), constituintes da primeira e da segunda camada de metalização, respetivamente. Nos respetivos diagramas, encontra-se evidenciada a composição das ligas utilizadas nas duas camadas de metalização. Deste modo, para uma liga de Zn-Sn com 29 a 30 % de Sn, verifica-se que a temperatura de fusão desta é de, aproximadamente, $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_L=320\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_S=198\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que explica a ocorrência de diluição dos elementos constituintes da segunda camada de metalização no material de adição, dadas as temperaturas utilizadas no processo de brasagem. Por outro lado, para uma liga de Zn-Al com 14 a 16 % de Al, constata-se uma temperatura de fusão de, aproximadamente, $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_L=450\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_S=381\text{ }^{\circ}\text{C}$), superior às temperaturas utilizadas no processo de brasagem, o que justifica a inexistência de diluição dos elementos constituintes da primeira camada de metalização no material de adição.

Na tabela 23 encontram-se patentes as imagens dos cortes metalográficos realizados para a zona de soldadura das ligações executadas pelo processo de soldadura por pontos, segundo as combinações de parâmetros referidas anteriormente.

Tabela 23 – Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Soldadura por Pontos.

Resultados da Análise Metalográfica (Soldadura por Pontos)	
Combinação de Parâmetros 1 (I=56; t=3)	Combinação de Parâmetros 2 (I=56; t=4)
	
Combinação de Parâmetros 3 (I=64; t=3)	Combinação de Parâmetros 4 (I=64; t=4)
	
Combinação de Parâmetros 5 (I=72; t=3)	Combinação de Parâmetros 6 (I=72; t=4)
	

Para a combinação de parâmetros 1 (I=56; t=3), verifica-se a ocorrência de uma penetração da rede na segunda camada de metalização (camada superior) que reveste o topo da célula condensadora. Devido a esta penetração e à ocorrência de fusão parcial da segunda

camada de metalização, ocorre a expulsão de parte desta, numa zona localizada. A zona termicamente afetada envolve somente a camada superior de metalização.

A figura 65 exhibe o fenómeno de expulsão de material constituinte da segunda camada de metalização referido no parágrafo anterior.

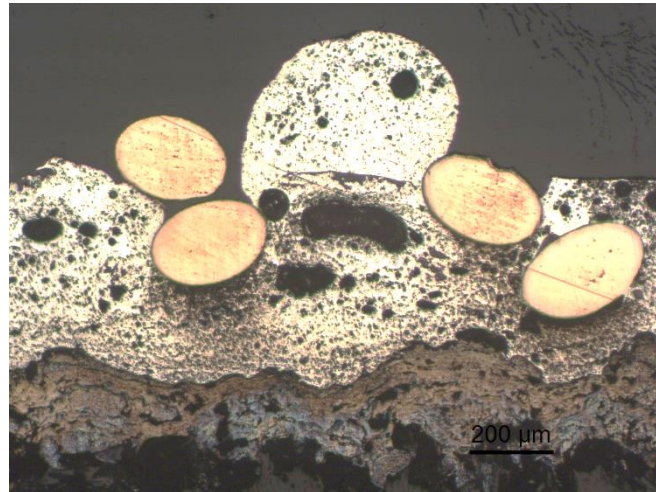


Figura 65 – Fenómeno de Expulsão de Material da Camada Superior de Metalização.

Relativamente à combinação de parâmetros 2 ($I=56$; $t=4$), os resultados obtidos são equivalentes aos alcançados para a combinação analisada anteriormente. Assim sendo, constata-se a ocorrência de penetração da rede na camada superior de metalização e a fusão parcial desta camada, resultando na expulsão de material em zonas localizadas. A zona termicamente afetada é semelhante à visualizada para a combinação de parâmetros 1, incluindo somente a segunda camada de metalização.

Para a combinação de parâmetros 3 ($I=64$; $t=3$), a penetração da rede na camada superior de metalização é, praticamente, inexistente. Associado a este fator, quase não ocorre fusão parcial da segunda camada de metalização, formando-se apenas uma adesão superficial da rede à metalização, o que resulta na ausência de uma zona termicamente afetada bem definida. Ainda assim, em zonas muito localizadas, observa-se uma reduzida “expulsão” de parte da camada superior de metalização, originada pela fusão parcial desta.

Relativamente à combinação de parâmetros 4 ($I=64$; $t=4$), constata-se a existência de penetração da rede na camada superior de metalização (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn), praticamente até à fronteira desta com a primeira camada (inferior), existindo fusão parcial da segunda camada de metalização. A zona termicamente afetada é reduzida, abrangendo apenas a segunda camada de metalização, não existindo, deste modo, perigo de danificação do filme metalizado no interior do elemento condensador. Em semelhança ao sucedido para a combinação de parâmetros 3, verifica-se uma expulsão diminuta, em zonas localizadas, de parte da camada superior da metalização.

No que diz respeito à combinação de parâmetros 5 ($I=72$; $t=3$), os resultados obtidos são semelhantes aos alcançados para a combinação 4, embora a penetração da rede na camada superior de metalização seja menor. Contudo, verifica-se uma maior “expulsão” de parte desta camada em zonas localizadas. A zona termicamente afetada é equivalente à referida para a combinação de parâmetros anterior.

Por fim, para a combinação de parâmetros 6 ($I=72$; $t=4$), verificou-se uma penetração acentuada da rede de cobre estanhada na camada superior de metalização (Zn-Sn), comparativamente com a observada para as combinações analisadas anteriormente, alcançando a interface desta com a camada inferior (Zn-Al com 14 a 16 % de Al). Devido à fusão parcial

da segunda camada de metalização, ocorre uma “expulsão” bastante pronunciada desta, numa zona central da imagem metalográfica presente na tabela 23. Para este caso, a zona termicamente afetada abrange o início da camada inferior de metalização, contudo, não se verifica uma danificação do filme de polipropileno metalizado, encontrando-se a célula condensadora salvaguardada.

No que diz respeito à existência de defeitos de soldadura, em todas as amostras analisadas, ligadas segundo a tecnologia de soldadura por pontos, verifica-se a presença de poros dispersos pela área de ligação, ainda que, de pequenas dimensões. Para a combinação 3, a quantidade de poros é bastante reduzida. Uma das causas para a ocorrência deste defeito poderá ser a coalescência das porosidades naturais do revestimento metálico, aquando do processo de soldadura, formando poros de dimensões superiores. Adicionalmente, verifica-se um aumento da dimensão destas porosidades com o aumento da intensidade de corrente aplicada no processo de soldadura por pontos (valor real em kA). Para as combinações 1, 2, 4 e 5 observa-se a formação de vazios de dimensão reduzida na área de soldadura. Contrariamente, para a combinação de parâmetros 6, constata-se a presença de vazios de dimensão considerável nas zonas contíguas à expulsão de material.

Nas amostras relativas às combinações de parâmetros 2, 4, 5 e 6, verifica-se uma fusão parcial, ainda que pouco pronunciada, entre a rede de cobre estanhada e os constituintes da segunda camada de metalização (Zn-Sn). Este fenómeno pode ser visualizado através da análise da figura 66.

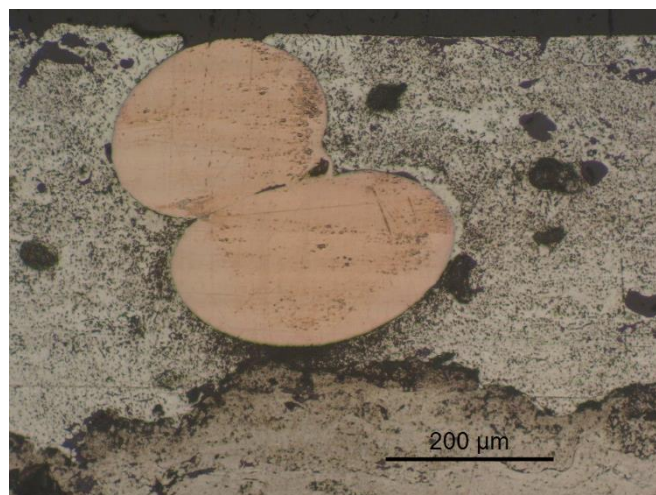


Figura 66 - Fenómeno de Fusão Parcial Existente entre a Rede de Cobre Estanhada e os Constituintes da Segunda Camada de Metalização – Amostra Ligada Segundo a Combinação de Parâmetros 2.

Em suma, a análise metalográfica permitiu confirmar algumas evidências já observadas no estudo das propriedades mecânicas conferidas às juntas de soldadura, executadas pelo processo de soldadura por pontos. O uso de um tempo de soldadura de referência 3 (tabela 11), para qualquer uma das intensidades de corrente examinadas, não garante a ocorrência de uma penetração razoável da rede na segunda camada de metalização, nem a existência de fusão entre os elementos intervenientes na união, conferindo à ligação uma resistência mecânica deficiente. Assim sendo, este tempo não é adequado para a execução das soldaduras pretendidas.

A comparação geral das imagens dos cortes metalográficos efetuados para os processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos demonstra que a utilização de um material de adição possibilita a obtenção de juntas de soldadura bastante coesas, sendo natural visualizar-se melhores propriedades mecânicas nas ligações realizadas pela tecnologia de brasagem manual.

5.2 Resultados Relativos ao Estudo das Novas Geometrias de Terminais

5.2.1 Testes às Propriedades Mecânicas

Tal como foi explanado na secção 4.3.1, relativa à descrição dos testes adotados para avaliação das propriedades mecânicas das novas geometrias de terminais, uma soldadura pode ser considerada “boa” quando a rutura ocorre na primeira ou na segunda camada de metalização e uma “má” soldadura dá-se quando na rutura é visível o filme de polipropileno metalizado (caracterizado por uma tonalidade mais escura quando comparado com a metalização), dado poder existir a danificação da célula condensadora. Adicionalmente, segundo o método 211A da norma MIL-STD-202G [72], a ligação soldada deve aguentar uma força mínima de aproximadamente 20 N, para ser considerada uma “boa” soldadura.

Na tabela 24 encontram-se expostos os resultados respeitantes à força máxima alcançada nos ensaios de tração efetuados para análise das ligações “elemento condensador/terminal”, concretizadas recorrendo ao processo de brasagem fraca. É de relembrar que a única variável em análise é a geometria do terminal, sendo os parâmetros de soldadura utilizados nas diversas ligações constantes. Para cada amostra testada é, ainda, apresentada a respetiva camada visível no arrancamento, sendo que a primeira camada corresponde à inferior (Zn-Al) e a segunda corresponde à superior (Zn-Sn). Nesta tabela, para cada geometria de terminal, são, também, exibidos os indicadores estatísticos “média” e “desvio padrão”. Numa primeira análise, verifica-se que os resultados alcançados para a força de tração máxima são substancialmente superiores aos obtidos nas ligações entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada. Esta diferença ocorre, em parte, devido aos fatores de concentração de tensões associados à área resistente dos filamentos que constituem a rede, e que explicam a rutura da mesma, alcançando-se forças de tração mais reduzidas do que as que se obteriam caso a rutura ocorresse na ligação soldada.

Tabela 24 - Força Máxima Alcançada e Camada Visível após Rutura para o Processo de Brasagem Fraca.

Amostra	Força Máxima [N] e Camada Visível no Arrancamento									
	Geometria 1		Geometria 2		Geometria 3		Geometria 4		Geometria 5	
n=1	79,36	Filme	69,13	1 ^a	109,12	2 ^a	82,77	1 ^a	104,47	Filme
n=2	97,34	1 ^a	77,50	1 ^a	81,22	1 ^a	81,22	1 ^a	71,30	2 ^a
n=3	98,58	2 ^a	82,15	2 ^a	83,39	2 ^a	82,15	2 ^a	79,36	2 ^a
n=4	154,07	2 ^a	63,24	1 ^a	82,15	2 ^a	82,46	1 ^a	82,15	2 ^a
n=5	81,22	1 ^a	72,36	1 ^a	100,75	2 ^a	79,05	2 ^a	116,87	Filme
Média	89,125*		72,876		91,326		81,530		90,830	
Desvio Padrão	10,243*		7,3236		12,794		1,5028		19,056	

* Valores de média e desvio padrão calculados desprezando a amostra 4 para a geometria 1 (considerando as cinco amostras: Média = 102,11 N; Desvio Padrão = 30,369 N).

Para a geometria 1 (secção circular pequena) observou-se a ocorrência de quatro soldaduras de boa qualidade e uma soldadura de “má” qualidade, uma vez que, após rutura, o filme de polipropileno metalizado encontrava-se visível na amostra 1, estando, deste modo, a célula condensadora comprometida. Contudo, este resultado pode ser explicado pela proximidade da junta de soldadura à extremidade do elemento condensador, tendo o material de adição difundido para junto desta e ficado “aprisionado”, resultando numa maior transferência de calor para o interior do elemento condensador. Esta situação pode ser

visualizada na figura 67, na qual é exposta a rutura obtida para a amostra 1 (à esquerda) e para a amostra 4 (à direita).

A média das forças máximas alcançadas para a geometria 1 foi de, aproximadamente, 89,13 N, sendo o valor mínimo obtido equivalente a 79,36 N (amostra 1). Para o cálculo deste valor foi desprezada a influência do resultado da amostra 4, dado o valor medido ser anormalmente elevado (154,07 N). Este resultado deveu-se, sobretudo, a razões relacionadas com a resistência mecânica do terminal e não devido às propriedades mecânicas da ligação. Do ponto de vista do operador, a geometria 1 permite uma execução expedita do processo de brasagem fraca, possibilitando uma fácil deposição do material de adição na zona pretendida.



Figura 67 – Ruturas Observadas para a Amostra 1 (Filme Metalizado Visível) e para a Amostra 4 (Rutura pela Segunda Camada de Metalização), Respetivamente, Relativas à Geometria 1.

Para a geometria 2 (secção reta) verificou-se a ocorrência de cinco soldaduras de boa qualidade, sendo que a maioria das amostras cedeu pela primeira camada de metalização (camada inferior – Zn-Al). Deste modo, o valor médio das forças máximas obtidas foi de, aproximadamente, 72,88 N e o valor mínimo alcançado de 63,24 N (amostra 4). O desvio-padrão associado aos resultados conseguidos para as cinco amostras ensaiadas foi de, sensivelmente, 7,32 N. Do ponto de vista experimental, a geometria 2 induz algumas dificuldades à correta deposição do material de adição na zona de soldadura, notando-se, por vezes, o escorrimento deste pela extremidade do terminal, antes da sua solidificação.

Relativamente à geometria 3 (extremidade com a forma de um garfo), observou-se a rutura de quatro amostras pela segunda camada de metalização (camada superior – Zn-Sn) e de uma pela primeira camada (amostra 2). Assim, a média das forças máximas alcançadas foi de, sensivelmente, 91,33 N, sendo o valor mínimo obtido de 81,22 N, conseguindo-se excelentes propriedades mecânicas com esta configuração de terminais. Do ponto de vista do operador, a geometria 3 possibilita uma fácil concretização do processo de brasagem manual, permitindo uma correta deposição do material de adição na zona de soldadura.

Para a geometria 4 (extremidade com o formato de um “t”) constatou-se a ocorrência de cinco soldaduras de boa qualidade, sendo que três delas cederam pela primeira camada de metalização (amostras 1, 2 e 4) e as outras duas pela segunda camada (amostras 3 e 5). O valor médio das forças máximas obtidas foi de, 81,53 N e o valor mínimo alcançado de 79,05 N (amostra 5). O desvio-padrão associado aos resultados conseguidos para as cinco amostras ensaiadas foi de, sensivelmente, 1,50 N, verificando-se uma variação extremamente reduzida entre os resultados obtidos para esta geometria. Relativamente à execução do processo de brasagem, a geometria 4 permite uma deposição simples do material de adição na zona pretendida, não conferindo dificuldades acrescidas para o operador.

A figura 68 exhibe os dois tipos de rutura obtidos para a geometria 4, arrancamento pela primeira camada de metalização (amostra 2) e pela segunda camada (amostra 5),

respetivamente. Estes tipos de rutura são visualmente semelhantes aos verificados para as geometrias 3 e 4.

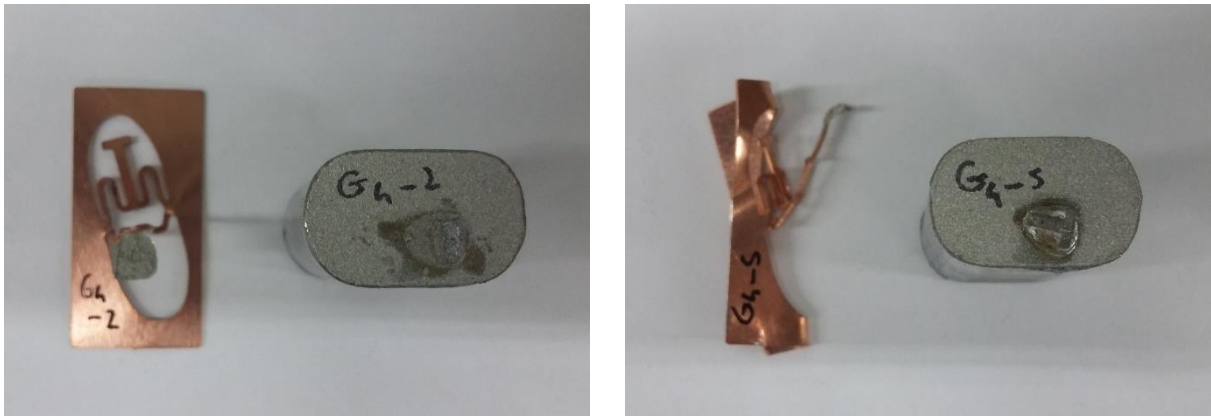


Figura 68 - Tipos de Rutura Observados para a Geometria 4: Arrancamento pela Primeira Camada (Amostra 2) e pela Segunda Camada (Amostra 5), Respetivamente.

Relativamente à geometria 5 (secção circular grande) verificou-se a ocorrência de duas soldaduras de “má” qualidade (amostras 1 e 5), sendo que nas restantes amostras (2, 3 e 4) o ponto de rutura deu-se na segunda camada de metalização (Zn-Sn). Esta configuração, dada a elevada dimensão da zona de ligação quando comparada com as demais, requer uma maior quantidade de material de adição, havendo um aumento da área de soldadura e consequente disseminação do material de adição para junto da extremidade do elemento condensador, resultando num “aprisionamento” da solda nesta região e numa maior transferência de calor para o interior da célula. Deste modo, após a realização dos ensaios de tração, há maior probabilidade de visualização do filme de polipropileno metalizado. Na figura 69 é possível verificar o efeito descrito no presente parágrafo, através da rutura obtida para a amostra 1 (à esquerda). Nesta ilustração encontra-se, também, apresentada a rutura observada para as amostras em que não ocorreu danificação da célula condensadora (à direita).

A média das forças máximas alcançadas para a geometria 5 foi de, aproximadamente, 90,83 N, sendo o valor mínimo observado de 71,3 N. Contudo, os resultados superiores foram conseguidos para as amostras que constituem soldaduras de má qualidade. Devido aos factos explicados no parágrafo anterior, esta configuração induz uma grande variabilidade aos resultados obtidos para a força de tração máxima, sendo o desvio-padrão associado às amostras testadas equivalente a 19,1 N. Do ponto de vista do operador, a geometria 5 acarreta algumas dificuldades acrescidas na realização da ligação pelo processo de brasagem, devido à dimensão da secção circular, maior do que as restantes configurações analisadas, e dada a proximidade desta às restantes partes do terminal.

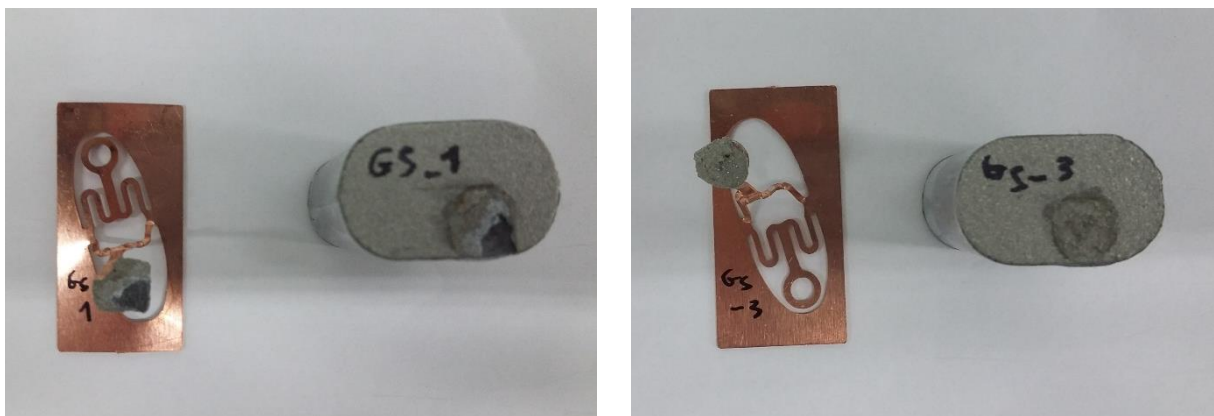


Figura 69 - Tipos de Rutura Observados para a Geometria 5: Filme Metalizado Visível (Amostra 1) e Arrancamento pela Segunda Camada (Amostra 3), Respetivamente.

No gráfico 7 encontram-se apresentados os valores médios das forças de tração máximas obtidas para cada uma das geometrias ensaiadas, para as ligações efetuadas segundo o processo de brasagem fraca. A sua observação permite a comparação expedita dos resultados alcançados para as diferentes geometrias de terminais analisadas.

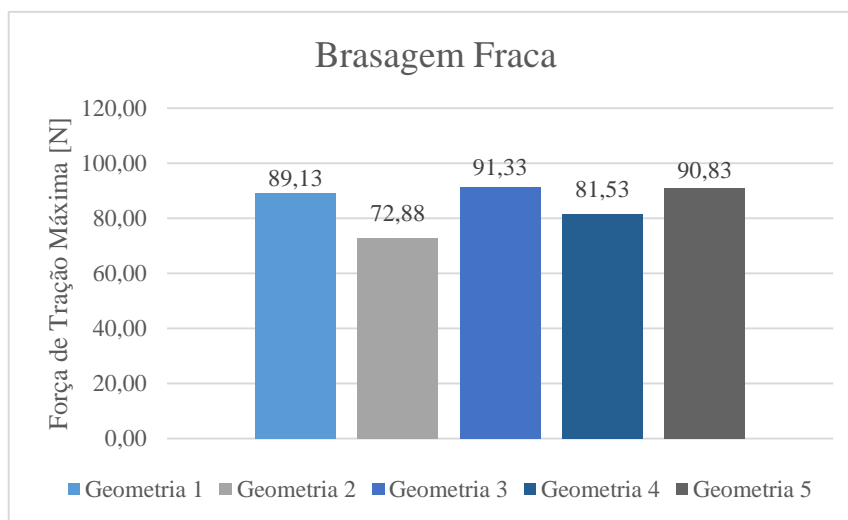


Gráfico 7 – Valor Médio das Forças de Tração Alcançadas para as Diferentes Geometrias Analisadas (Brasagem Fraca).

Segundo o critério da força de ligação mínima, previamente estabelecido, todas as amostras ensaiadas constituíram soldaduras de boa qualidade, dado que as forças obtidas superam os 20 N definidos como limite mínimo. Deste modo, a tecnologia de brasagem fraca revela-se apropriada para execução das ligações entre os terminais e os elementos condensadores, conferindo uma excelente resistência mecânica à junta soldada. Contudo, devido às razões já mencionadas, as geometrias 2 e 5 podem induzir algumas complicações ao processo de ligação. Deste modo, as geometrias de terminais 1, 3 e 4 assumem-se como as alternativas mais viáveis.

Na tabela 25 encontram-se apresentados os resultados relativos à força máxima alcançada nos ensaios de tração efetuados para análise das ligações “elemento condensador/terminal”, executadas segundo a tecnologia de soldadura por pontos. Tal como acontecia na análise do processo anteriormente examinado, a única variável em estudo é a geometria do terminal, sendo os parâmetros de soldadura utilizados nas diversas ligações constantes. Adicionalmente, para cada amostra testada é exposta a respetiva camada visível no arrancamento. Nesta tabela, para cada geometria de terminal, são, também, exibidos os indicadores estatísticos “média” e “desvio padrão”.

Tabela 25 - Força Máxima Alcançada e Camada Visível para o Processo de Soldadura por Pontos.

Amostra	Força Máxima [N] e Camada Visível no Arrancamento									
	Geometria 1		Geometria 2		Geometria 3		Geometria 4		Geometria 5	
n=1	22,01	2 ^a	12,09	2 ^a	9,30	2 ^a	12,02	2 ^a	10,23	2 ^a
n=2	13,02	2 ^a	10,23	2 ^a	8,37	2 ^a	10,23	2 ^a	8,06	2 ^a
n=3	17,05	2 ^a	8,06	2 ^a	9,30	2 ^a	11,16	2 ^a	7,34	2 ^a
n=4	16,12	1 ^a	8,37	2 ^a	8,37	2 ^a	9,30	2 ^a	8,06	2 ^a
n=5	22,01	1 ^a	11,16	2 ^a	9,30	2 ^a	12,09	2 ^a	8,27	2 ^a
Média	18,042		9,982		8,928		10,96		8,392	
Desvio Padrão	3,918		1,745		0,509		1,197		1,086	

Uma análise primária dos resultados presentes na tabela 25 permite constatar que o valor das forças obtidas para a totalidade das geometrias analisadas é bastante diminuto.

Deste modo, os resultados máximos foram obtidos para a geometria 1 (secção circular pequena), sendo a média das forças alcançadas para esta geometria de, aproximadamente, 18,04 N. Para esta configuração, o valor máximo observado foi de 22,01 N (amostras 1 e 5), sendo o valor mínimo equivalente a 13,02 N (amostra 2). Quanto à camada visível no arrancamento, verificou-se a ocorrência de rutura pela primeira camada nas amostras 4 e 5 e de rutura pela segunda camada nas amostras 1, 2 e 3.

A figura 70 expõe as diferentes ruturas mencionadas para a geometria 1, sendo que para as restantes geometrias observou-se o arrancamento pela segunda camada de metalização (camada superior), para todas as amostras submetidas a ensaio. O aspeto visual das ruturas obtidas para estas geometrias é semelhante à presente nesta ilustração (à direita).

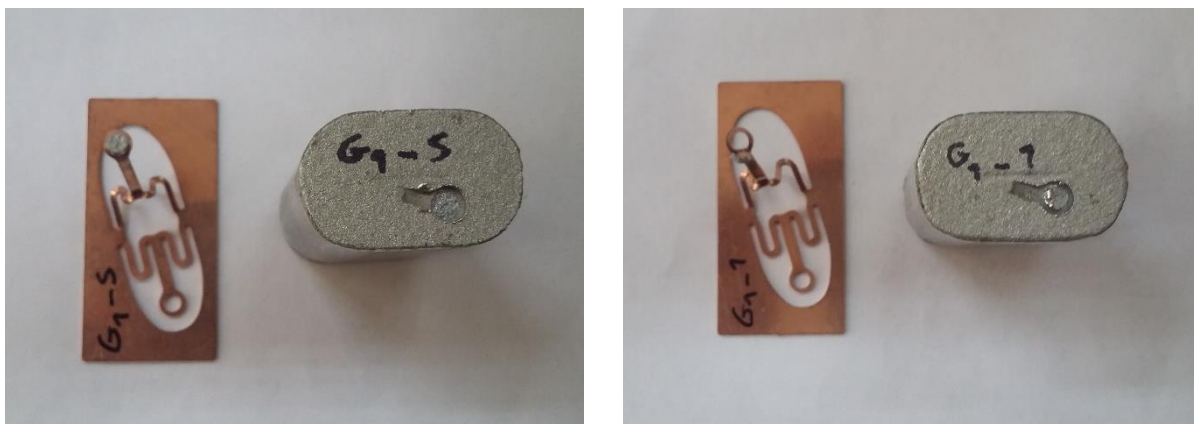


Figura 70 - Tipos de Rutura Observados para a Geometria 1: Arrancamento pela Primeira Camada (Amostra 5) e Arrancamento pela Segunda Camada (Amostra 1), Respetivamente.

Relativamente à geometria 2 (secção reta) o valor médio das forças máximas obtidas foi de, sensivelmente, 9,98 N. Para esta configuração, o valor máximo verificado foi de 12,09 N (amostra 1) e o valor mínimo igual a 8,06 N (amostra 3).

Para a geometria 3, a média das forças máximas alcançadas nas cinco amostras ensaiadas foi de 8,93 N. Deste modo, o valor máximo observado foi equivalente a 9,3 N (amostras 1, 3 e 5) e o valor mínimo 8,37 N (amostras 2 e 4). Nos resultados obtidos para esta configuração verificou-se uma variação bastante reduzida, sendo o desvio-padrão associado às cinco amostras testadas de, aproximadamente, 0,51 N.

Relativamente à geometria 4, o valor médio registado para as forças máximas obtidas nas cinco amostras submetidas a ensaio foi equivalente a 10,96 N. Para esta configuração, o valor máximo verificado foi de 12,23 N (amostra 2) e o valor mínimo igual a 9,3 N (amostra 4).

No que diz respeito à geometria 5, a média das forças máximas alcançadas nas cinco amostras ensaiadas foi de 8,39 N, sendo este o valor mais reduzido observado na totalidade das geometrias analisadas. Assim, para esta configuração, o valor máximo registado foi de 10,23 N (amostra 1), sendo o valor mínimo equivalente a 7,34 N (amostra 3).

No gráfico 8 encontram-se expostos os valores médios das forças de tração máximas obtidas para cada uma das geometrias submetidas a ensaio, para as uniões realizadas segundo o processo de soldadura por pontos. Através da sua visualização é possível uma comparação expedita dos resultados alcançados para as diferentes geometrias de terminais analisadas.

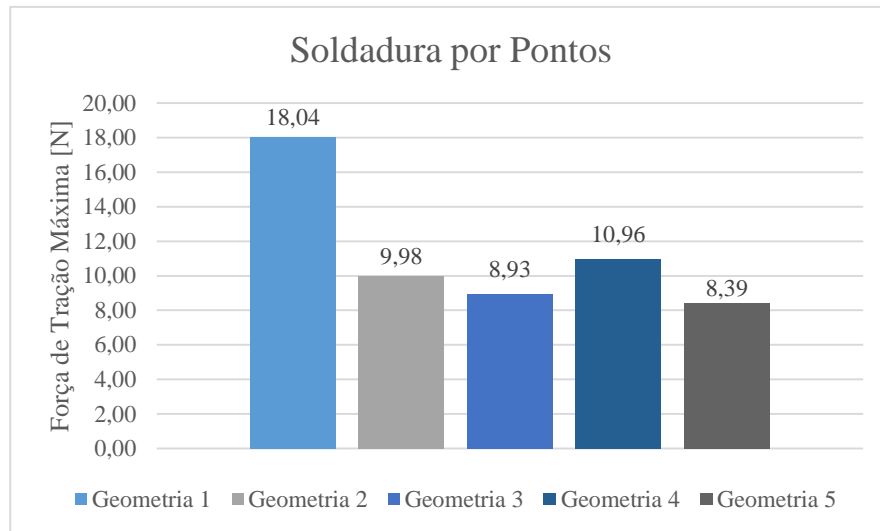


Gráfico 8 - Valor Médio das Forças de Tração Alcançadas para as Diferentes Geometrias Analisadas (Soldadura por Pontos).

Segundo o critério da força de ligação mínima, previamente estabelecido, nenhuma das geometrias garante a obtenção de uma soldadura com boa qualidade, sendo que a única que se aproxima do limite mínimo definido (20 N) é a geometria 1. Deste modo, o processo de soldadura por pontos revela-se incapaz de originar ligações com propriedades mecânicas robustas entre os elementos condensadores e os terminais em cobre. A dimensão dos elétrodos utilizados pode ser um dos fatores que justificam os fracos resultados obtidos, devendo ser analisada a utilização de elétrodos com uma secção de ponta superior. A obtenção de resistências mecânicas reduzidas, nas ligações executadas segundo este processo, poderá ser, também, devido ao facto de o cobre possuir elevada condutividade térmica e elétrica, dificultando o processo de soldadura por pontos, necessitando-se, possivelmente, de intensidades de corrente superiores. Contudo, a utilização de uma intensidade de corrente mais elevada poderá originar uma indentação excessiva do terminal no revestimento metálico, originando, conseqüentemente, a danificação da célula condensadora.

Os resultados de forças de tração alcançados para os processos de brasagem fraca e soldadura por pontos apresentam disparidades expressivas, dado que a tecnologia de brasagem fraca concedeu à ligação soldada propriedades mecânicas bastante superiores. Deste modo, os resultados adquiridos encontram-se em conformidade com a análise desenvolvida na secção 3.6, relativa à comparação dos diversos processos estudados na síntese bibliográfica.

5.2.2 Testes às Propriedades Elétricas

A metodologia dos ensaios às propriedades elétricas, adotados para análise da viabilidade da utilização de novas geometrias de terminais em cobre, foi semelhante à adotada, anteriormente, no estudo das ligações realizadas entre a rede de cobre estanhada e os elementos condensadores. Deste modo, estes testes consistiram na medição da resistência óhmica (em DC) existente entre uma das extremidades do terminal e a metalização que reveste o topo da célula condensadora. Esta medição foi realizada previamente e após a submissão do conjunto soldado a um envelhecimento artificial, com duração total de 10 dias, constituído por ciclos de 30 minutos, com temperatura inferior de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e temperatura superior de $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na tabela 26 são apresentados os resultados referentes à resistência elétrica alcançada nos ensaios concretizados para análise das ligações “elemento condensador/terminal em cobre”, efetuadas segundo o processo de brasagem fraca (Temperatura = $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, *reflow time* = 5 s). Dado que a realização de alguns ensaios primários permitiu constatar que não se verificavam alterações significativas do valor de resistência elétrica medida para as diferentes geometrias, intrinsecamente a cada um dos processos utilizados, somente se executaram os testes relativos às geometrias 1, 3 e 4 (secção circular pequena, garfo e “t”, respetivamente). Nesta tabela, para cada geometria de terminal, são, também, exibidos os indicadores estatísticos “média” e “desvio padrão”.

Tabela 26 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Brasagem Fraca (Geometrias de Terminais).

Amostra	Resistência Elétrica (mΩ)					
	Geometria 1		Geometria 3		Geometria 4	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
n=1	0,7131	0,7262	0,794	0,7348	0,6969	0,712
n=2	0,6908	0,6964	0,6562	0,6872	0,6711	0,708
n=3	0,7015	0,6813	0,6658	0,6724	0,6622	0,6684
n=4	0,6513	0,6755	0,6450	0,6840	0,6539	0,6670
n=5	0,6770	0,6891	0,6757	0,6973	0,6428	0,6711
Média	0,6867	0,6937	0,6873	0,6951	0,6654	0,6853
Desvio Padrão	0,0239	0,0198	0,0607	0,0239	0,0205	0,0226

A análise da tabela 26 permite constatar que o valor médio da resistência óhmica obtida nas cinco amostras submetidas a ensaio, para cada geometria analisada, antes do envelhecimento artificial, foi de $0,6867\text{ m}\Omega$ (geometria 1), $0,6873\text{ m}\Omega$ (geometria 3) e $0,6654\text{ m}\Omega$ (geometria 4), sendo a diferença absoluta máxima entre os valores referidos de, aproximadamente, $0,02\text{ m}\Omega$ (diferença relativa de 3,30 %). Deste modo, verifica-se a inexistência de diferenças significativas entre os resultados alcançados para as geometrias de terminais analisadas. Ainda assim, a geometria 4 origina resistências óhmicas ligeiramente mais reduzidas, quando comparada com as restantes.

Após a submissão das amostras ao envelhecimento artificial previamente explicado, a média das resistências óhmicas medidas foi de $0,6937\text{ m}\Omega$ (geometria 1), $0,6951\text{ m}\Omega$ (geometria 3) e $0,6853\text{ m}\Omega$ (geometria 4), sendo a diferença máxima entre estes valores da ordem da centésima de Ohm (diferença relativa de 1,44 %). Assim sendo, não se visualizaram diferenças consideráveis entre as diversas geometrias analisadas, verificando-se uma tênue tendência para a ocorrência de degradação das propriedades elétricas, embora os resultados sejam praticamente similares aos alcançados anteriormente. A maior variação observada após

a aplicação dos ciclos de envelhecimento artificial sucedeu-se para a geometria 4, havendo um aumento de 0,0199 mΩ (2,99 %), ainda assim, valor bastante reduzido. Para as outras geometrias estudadas, verificou-se um incremento da resistência elétrica em cerca de 1,01 % (geometria 1) e 1,13 % (geometria 3).

No gráfico 9 encontram-se expostos os valores médios de resistência elétrica, alcançados para as cinco amostras ensaiadas, para cada uma das geometrias estudadas, antes e após o envelhecimento artificial. A partir da análise deste gráfico é possível confirmar as conclusões expostas nos parágrafos anteriores.

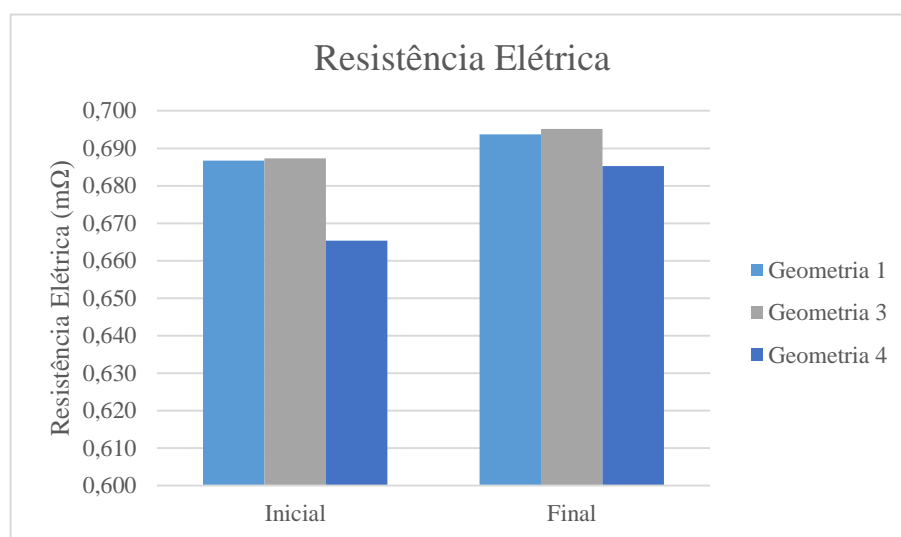


Gráfico 9 - Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Brasagem Fraca, Antes e Após Envelhecimento Artificial (Geometrias de Terminais).

Na tabela 27 encontram-se expostos os resultados relativos à resistência ôhmica obtida nos testes realizados para análise das ligações “elemento condensador/terminal em cobre”, executadas segundo o processo de soldadura por pontos (Intensidade da Corrente = 64 [ref.], tempo = 4 [ref.]). Pelas razões evidenciadas na secção relativa ao processo de brasagem fraca, na análise das ligações obtidas recorrendo à tecnologia de soldadura por pontos somente se executaram os ensaios referentes às geometrias 1, 3 e 4 (secção circular pequena, garfo e “t”, respetivamente). Nesta tabela, para cada geometria de terminal, são, ainda, apresentados os indicadores estatísticos “média” e “desvio padrão”.

Tabela 27 - Resistências Elétricas Obtidas para o Processo de Soldadura por Pontos (Geometrias de Terminais).

Amostra	Resistência Elétrica (mΩ)					
	Geometria 1		Geometria 3		Geometria 4	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
n=1	0,8013	0,9238	0,7909	0,9268	0,7340	0,8753
n=2	0,8462	0,9228	0,8116	1,086	0,6820	0,8142
n=3	0,7954	1,069	0,7216	1,080	0,7243	0,9185
n=4	0,8267	1,015	0,8814	0,9008	0,7422	0,8856
n=5	0,8074	0,9534	0,7420	0,9440	0,7061	0,8958
Média	0,8154	0,9768	0,7895	0,9876	0,7177	0,8779
Desvio Padrão	0,0209	0,0637	0,0629	0,0886	0,0241	0,0390

Anteriormente ao envelhecimento artificial, a média das resistências elétricas medidas para as cinco amostras testadas, para cada geometria de terminal analisada, foi de 0,8154 mΩ (geometria 1), 0,7895 mΩ (geometria 3) e 0,7177 mΩ (geometria 4), sendo a diferença absoluta máxima entre os valores mencionados de, aproximadamente, 0,098 mΩ (diferença relativa de 13,6 %). Deste modo, verificam-se desigualdades consideráveis entre os valores obtidos para a geometria 1 e para a geometria 4, sendo que esta última resulta em resistências elétricas mais reduzidas. Os resultados obtidos para a geometria 3 assemelham-se aos alcançados para a geometria 1, sendo a diferença relativa entre estes de 3,28 %.

Após a aplicação dos ciclos de envelhecimento artificial, o valor médio das resistências ôhmicas obtidas foi de 0,9768 mΩ (geometria 1), 0,9876 mΩ (geometria 3) e 0,8779 mΩ (geometria 4), sendo a diferença máxima entre estes valores da ordem da décima de Ohm (diferença relativa de 12,5 %). Assim, verificam-se disparidades apreciáveis entre os resultados alcançados para as geometrias 1 e 3 e para a geometria 4, tal como acontecia antes do envelhecimento artificial, conduzindo esta última a resultados melhores (resistência elétrica mais baixa). Para todas as geometrias de terminais analisadas, verificou-se uma degradação das propriedades elétricas, observando-se um aumento significativo da resistência ôhmica após a submissão das amostras aos ciclos de envelhecimento artificial. Deste modo, verificou-se um aumento médio de 19,79 % para a geometria 1, de 25,1 % para a geometria 3 e de 22,3 % para a geometria 4. Este aumento acentuado da resistência ôhmica, após envelhecimento artificial, pode dever-se à fragilidade das ligações obtidas pelo processo de soldadura por pontos, referida na secção 5.2.1, sendo estas mais sensíveis às variações de temperatura que ocorrem nos ciclos térmicos que constituem o envelhecimento.

No gráfico 10 encontram-se apresentados os valores médios de resistência ôhmica, obtidos para as cinco amostras ensaiadas, para cada uma das geometrias estudadas, antes e após o envelhecimento artificial, unidas segundo o processo de soldadura por pontos. A partir da análise deste gráfico é possível confirmar as conclusões presentes nos parágrafos anteriores.

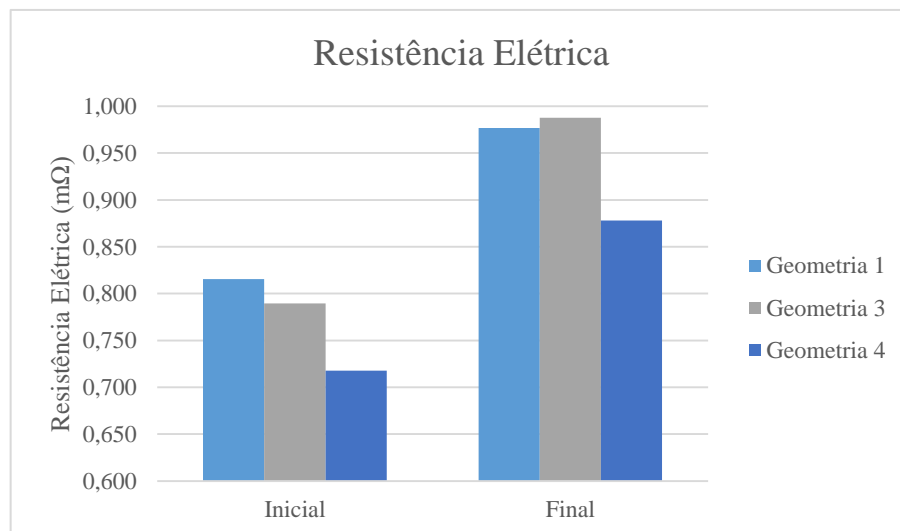


Gráfico 10 - Resistências Elétricas Alcançadas para o Processo de Soldadura por Pontos, Antes e Após Envelhecimento Artificial (Geometrias de Terminais).

Os resultados de resistência ôhmica alcançados para os processos de brasagem fraca e soldadura por pontos apresentam algumas diferenças expressivas, sendo que a tecnologia de brasagem fraca originou propriedades elétricas superiores (resistências elétricas mais reduzidas). Deste modo, os resultados conseguidos encontram-se em concordância com o estudo examinado na secção 3.6, relativa à comparação dos diversos processos abordados na

síntese bibliográfica. Em ambos os processos, a geometria 4 foi a que obteve melhores resultados em termos de propriedades elétricas.

A tabela 28 demonstra a variação verificada entre os resultados obtidos para ambos os processos, para cada uma das três geometrias submetidas a ensaio. A sua visualização permite constatar o aumento significativo dos valores de resistência elétrica nas ligações efetuadas segundo a tecnologia de soldadura por pontos, quando comparados com os resultados alcançados para a brasagem fraca.

Tabela 28 – Comparação dos Resultados de Resistência Elétrica Alcançados para os Processos de Brasagem Fraca e Soldadura por Pontos (Geometrias de Terminais).

	Resistência Elétrica (mΩ)					
	Geometria 1		Geometria 3		Geometria 4	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Brasagem Fraca (Média)	0,6867	0,6937	0,6873	0,6951	0,6654	0,6853
Soldadura por Pontos (Média)	0,8154	0,9768	0,7895	0,9876	0,7177	0,8779
Variação (%)	18,7	40,8	14,9	42,1	7,9	28,1

5.2.3 Análise Metalográfica

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos para as amostra analisadas metalograficamente, para cada geometria de terminal, ligada através dos processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos.

Na tabela 29 (página 118) encontram-se representadas as imagens dos cortes metalográficos realizados para a zona de soldadura das ligações efetuadas pelo processo de brasagem fraca, para as diferentes geometrias de terminais.

Assim, para a geometria 1 (secção circular pequena), verifica-se a deposição do material de adição em redor da secção do terminal, havendo uma propagação deste relativamente à camada superior de metalização. Abaixo da secção do terminal em cobre, observa-se a existência de diluição dos elementos metálicos constituintes da segunda camada de metalização (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn) no material de adição. As causas da ocorrência desta diluição foi anteriormente explanada na secção 5.1.4, relativo à análise metalográfica efetuada para as ligações “elemento condensador/rede de cobre estanhada”. A zona termicamente afetada é bastante reduzida, em parte, devido à condução de calor através do terminal em cobre, envolvendo apenas a segunda camada do revestimento metálico. Deste modo, o filme de polipropileno metalizado encontra-se salvaguardado de danificação.

Relativamente ao resultado da análise metalográfica efetuada para a geometria 2 (secção reta), observa-se a deposição do material de adição numa área ampla, envolvendo a totalidade da secção de terminal, verificando-se a ocorrência de diluição entre os constituintes da segunda camada de metalização (Zn-Sn) e o material de adição. A diluição destes elementos ocorre numa área dilatada, resultando no desaparecimento da segunda camada de metalização na zona abaixo da secção do terminal. Deste modo, a zona termicamente afetada é superior à visualizada no caso anterior, incluindo praticamente a espessura total das duas camadas de metalização. No entanto, o filme metalizado no interior da célula condensadora não se encontra comprometido.

Para a geometria 3 (extremidade com formato de “garfo”) visualiza-se a deposição do material de adição em redor do terminal, verificando-se uma elevada propagação deste relativamente à metalização que reveste a célula condensadora, em semelhança com os

resultados observados, anteriormente, para as geometrias 1 e 2. Assim, na área de ligação, existe a diluição dos elementos constituintes da segunda camada de metalização (Zn-Sn) no material de adição. Contudo, embora a zona termicamente afetada seja ampla em comprimento, apenas abrange a camada superior de metalização, sendo menor do que a observada para a geometria 2.

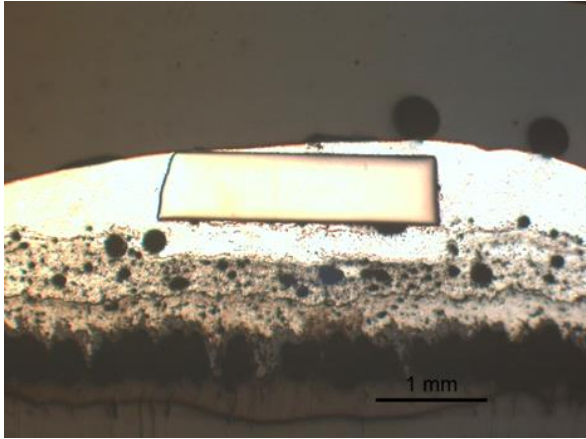
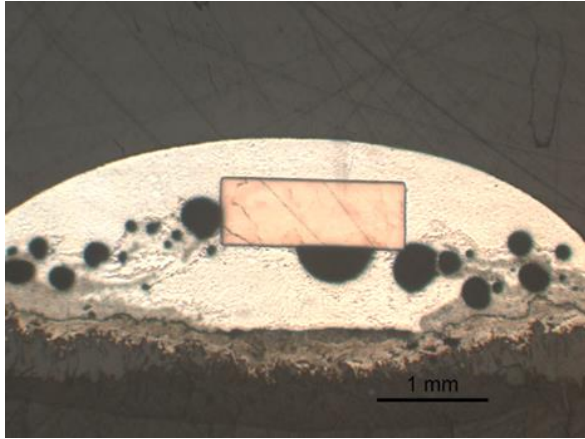
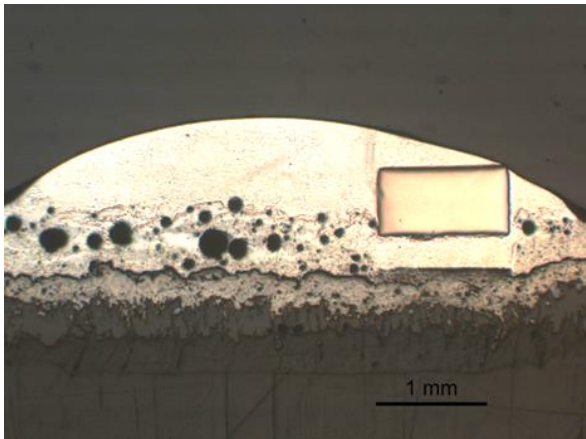
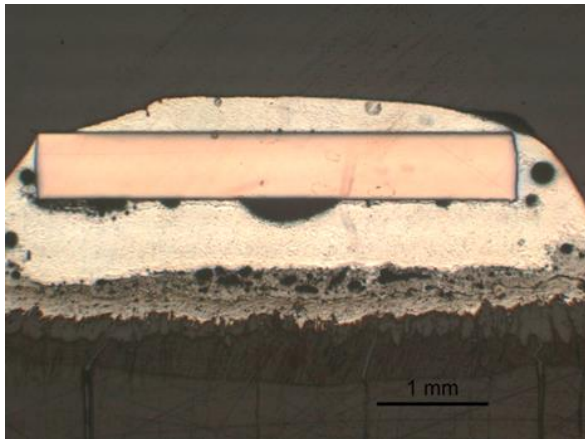
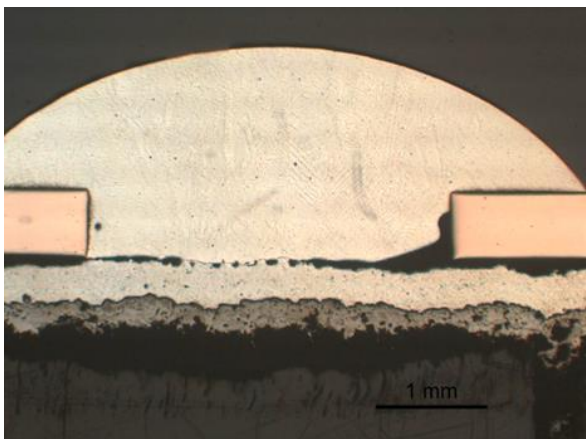
O resultado alcançado na análise metalográfica da amostra relativa à geometria 4 (extremidade com o formato de um “t”) é similar ao obtido para a geometria 1, em termos de deposição do material de adição. Deste modo, abaixo da secção de terminal, verifica-se a ocorrência de diluição entre os elementos metálicos que constituem a segunda camada de metalização (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn) e a solda utilizada. Em semelhança ao sucedido para a geometria 3, a zona termicamente afetada observada abrange apenas a segunda camada do revestimento metálico, não havendo danificação do filme de polipropileno metalizado.

Por fim, para a geometria 5 (secção circular grande) observa-se a deposição do material de adição envolvendo a secção do terminal. Contudo, devido às dimensões desta geometria, o material de adição apresenta algumas dificuldades em penetrar por capilaridade na camada superior do revestimento metálico, não havendo propagação deste pela segunda camada de metalização. Deste modo, a área real de ligação é bastante diminuta, ocorrendo a união do material de adição com os constituintes da segunda camada de metalização somente em zonas muito localizadas. Em consequência, na região inferior adjacente à secção do terminal, verifica-se a formação de vazios. A zona termicamente afetada é praticamente inexistente, envolvendo apenas o início da camada superior de metalização.

No que diz respeito à existência de defeitos de soldadura, verifica-se a presença de uma quantidade considerável de poros de elevadas dimensões nas amostras referentes às geometrias 2 e 3. Nas amostras relativas às geometrias 1 e 4 constata-se, também, a presença de alguns poros, ainda que em menor quantidade e com dimensões mais reduzidas. Tal como foi explanado na análise realizada às amostras concernentes às ligações efetuadas entre a rede de cobre estanhada e os elementos condensadores, a formação de poros na área de soldadura pode resultar da utilização de uma solda SAC 305 fluxada (*Alpha Telecore® HF-850* com 2,2 % de fluxo), cujo fluxo interno se evapora durante o processo de brassagem, originando poros nas juntas soldadas. Outra causa para este defeito de soldadura poderá ser a coalescência das porosidades naturais do revestimento metálico, formando poros de dimensões superiores.

Para além da presença de poros como defeitos de soldadura, nalgumas amostras evidencia-se, ainda, a formação de vazios. Assim, para as amostras relativas às geometrias 1, 2 e 4, denota-se a presença de vazios na periferia do terminal em cobre, sendo as dimensões destes mais consideráveis para as duas últimas geometrias referidas. A formação de vazios na amostra referente à geometria 5 já foi analisada anteriormente.

Tabela 29 - Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Brasagem Fraca (Geometrias de Terminais).

Análise Metalográfica para as Geometrias dos Terminais (Brasagem Fraca)	
Geometria 1	Geometria 2
	
Geometria 3	Geometria 4
	
Geometria 5	
	

Na tabela 30 (página 122) encontram-se representadas as imagens dos cortes metalográficos realizados para a zona de soldadura das ligações efetuadas pelo processo de soldadura por pontos, para as diferentes geometrias de terminais.

Relativamente à análise das ligações efetuadas pelo processo de soldadura por pontos, os resultados obtidos para as diferentes geometrias de terminais são bastante semelhantes.

Assim, para a geometria 1 (secção circular pequena), observa-se uma penetração do terminal na metalização que reveste o topo da célula condensadora, até à primeira camada de metalização (Zn-Al com 14 a 16 % de Al). Como consequência, verifica-se um levantamento da segunda camada relativamente à primeira nas zonas contíguas à secção de terminal penetrada, originando vazios nesta região. Tal como acontece para as ligações relativas às restantes geometrias de terminais, para esta ligação, ocorre uma fusão parcial pouco pronunciada da segunda camada de metalização (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn). A zona termicamente afetada é reduzida, abrangendo a segunda camada de metalização e o início da primeira, não havendo perigo de danificação do filme metalizado no interior do elemento condensador.

Na figura 71 encontra-se exposto o fenómeno de levantamento da segunda camada relativamente à primeira, nas zonas adjacentes à secção de terminal penetrada, visualizado para a amostra relativa à geometria 1.

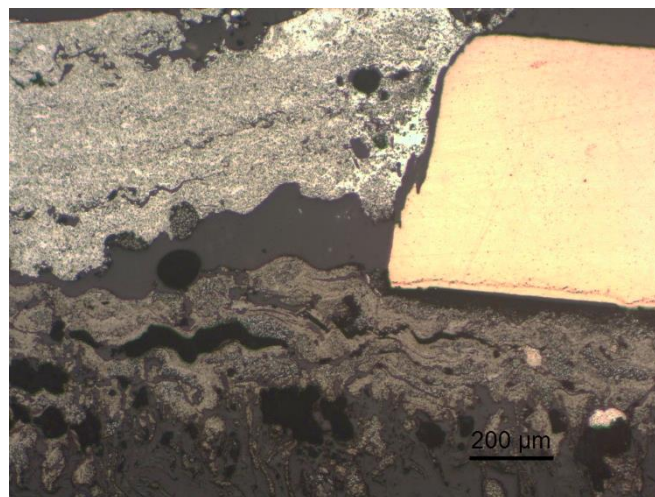


Figura 71 - Fenómeno de Levantamento da Segunda Camada de Metalização Relativamente à Primeira na Região Adjacente à Secção de Terminal Penetrada.

O resultado da análise metalográfica obtido para a geometria 2 (secção reta) é equivalente ao alcançado, anteriormente, para a geometria 1. Deste modo, verifica-se a penetração do terminal na camada superior de metalização que reveste o topo do elemento condensador, até à interface desta com a primeira camada. Como consequência, ocorre um levantamento da segunda camada relativamente à primeira, embora menos acentuado do que o constatado para a geometria 1, causando pequenos vazios nas zonas em redor do segmento de terminal penetrado. A zona termicamente afetada é semelhante à obtida para a geometria 1.

Relativamente à geometria 3 (extremidade com formato de “garfo”), tal como nas geometrias analisadas anteriormente, observa-se a penetração do terminal na camada superior da metalização. Contudo, para esta geometria de terminal verifica-se a ocorrência de uma expulsão pronunciada do material constituinte da segunda camada (Zn-Sn) na região adjacente à porção de terminal penetrado, devido à ocorrência de fusão da segunda camada de metalização durante o processo de soldadura. Em concordância com o sucedido para as geometrias 1 e 2, a

zona termicamente afetada é praticamente inexistente, envolvendo apenas a camada superior de metalização. Assim, o filme metalizado encontra-se intacto.

No que diz respeito aos resultados da análise metalográfica efetuada para a geometria 4 (extremidade com o formato de um “t”), a penetração do terminal na camada superior de metalização é semelhante à observada para a geometria 3. Adicionalmente, para esta geometria, verifica-se, também, a ocorrência de expulsão de material da segunda camada, devido à fusão dos constituintes desta (Zn-Sn com 29 a 30 % de Zn), embora este fenómeno seja menos acentuado que no caso anterior. A zona termicamente afetada é equivalente à registada para a geometria 3, incluindo somente a camada superior de metalização.

Por fim, para a geometria de terminal 5 (secção circular grande) observa-se uma penetração reduzida do terminal em cobre na camada superior da metalização. Uma das causas para esta penetração deficiente está relacionada com as dimensões desta geometria, superiores às das restantes analisadas, já que as dimensões dos elétrodos utilizados mantiveram-se constantes. Como consequência desta penetração, verifica-se, simultaneamente, o esmagamento da camada superior da metalização pelo terminal e um levantamento desta camada relativamente a camada inferior, criando um vazio na zona adjacente ao canto inferior direito do terminal em cobre. A zona termicamente afetada é praticamente inexistente, não havendo danificação do filme metalizado. A ocorrência de fusão dos elementos constituintes da segunda camada de metalização provoca uma expulsão do material desta, ainda que reduzida, junto da face lateral direita da secção de terminal penetrada na metalização.

Para todas as ligações analisadas, relativas as diferentes geometrias de terminais, não se verifica a existência de fusão parcial entre o terminal em cobre e a metalização que reveste o topo do elemento condensador.

A obtenção de uma zona termicamente afetada reduzida, na totalidade das amostras testadas, deve-se, em parte, à dissipação por condução do calor gerado no processo de soldadura pelo terminal em cobre, havendo uma menor transferência de calor para as camadas de metalização.

Na totalidade das amostras analisadas metalograficamente, referentes às ligações efetuadas pela soldadura por pontos, observa-se a formação de poros de dimensões bastante reduzidas nas áreas de soldadura. Estes defeitos podem ser causados pela coalescência das porosidades naturais do revestimento metálico. Ainda assim, devido às suas dimensões diminutas, estes defeitos podem ser desprezados.

Em suma, os resultados obtidos para as diversas análises metalográficas desenvolvidas permitem concluir que o processo de soldadura por pontos não é adequado para realizar as ligações soldadas entre os terminais em cobre e os elementos condensadores, causando somente uma penetração dos terminais na metalização que reveste o topo das células condensadoras. Deste modo não se verifica a ocorrência de um núcleo de material fundido entre os elementos referidos, para nenhuma das geometrias analisadas, resultado espectral já que foram utilizados os mesmos parâmetros de soldadura para todas as configurações analisadas.

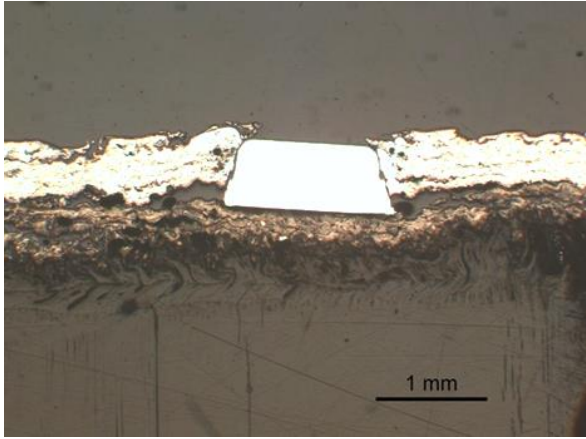
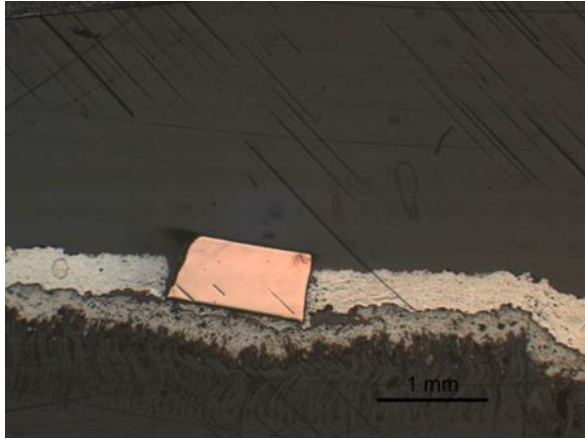
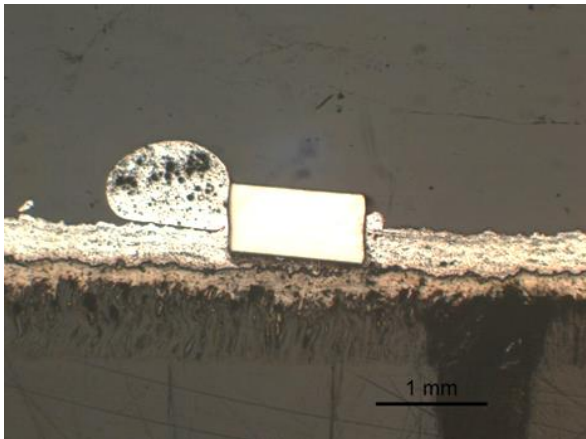
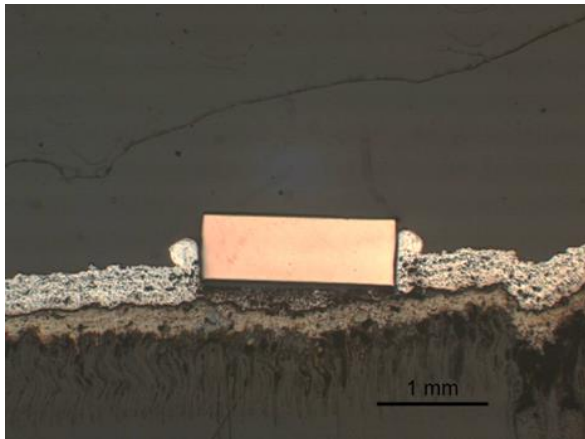
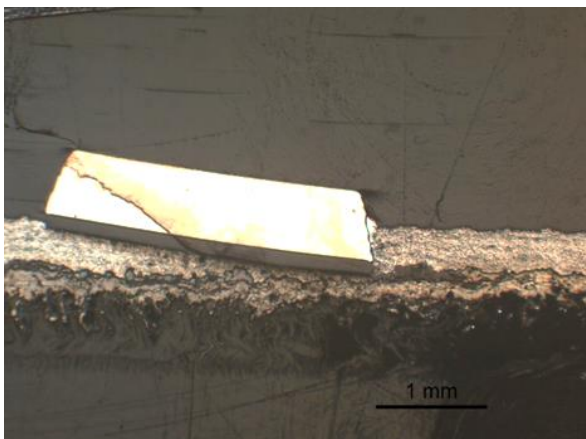
Uma das razões que pode justificar a obtenção de soldaduras de má qualidade através do processo de soldadura por pontos resulta da inadequação dos elétrodos utilizados, devendo estes possuir uma área de ponta superior. Outro fator que pode justificar a fraca ligação dos terminais ao revestimento metálico é o seu material constituinte. O facto de o cobre possuir elevada condutividade térmica e elétrica dificulta o processo de soldadura por pontos, devendo ser aplicadas, porventura, intensidades de corrente superiores. Contudo, a aplicação de uma intensidade de corrente mais elevada poderia causar uma indentação excessiva do terminal no revestimento metálico, originando, conseqüentemente, a danificação da célula condensadora. A utilização de um material de adição, aproveitando como método de aquecimento a resistência

elétrica presente na soldadura por pontos, poderá constituir uma alternativa viável ao processo utilizado, com o intuito de se obterem soldaduras com melhores características mecânicas.

A soldadura por pontos de cobre (temperatura de fusão de, aproximadamente, 1090 °C) a uma liga de Zn-Sn, com 29 % a 30 % de Zn (temperatura de fusão de, aproximadamente, 320 °C) não apresenta as características de uma verdadeira soldadura por pontos, como as referidas na análise bibliográfica, pois não se verifica a formação de uma zona fundida comum (Cu+(Zn+Sn)). No processo efetuado, o ponto de soldadura parece servir somente como elemento de aquecimento, que aumenta a temperatura da interface sem fundir o cobre, fundindo apenas a liga de Zn-Sn. A reduzida resistência mecânica verificada pode ser derivada da falta de revestimento do cobre (terminal) com estanho. Dada a inexistência de fluxo na soldadura por pontos efetuada, comprovou-se que o cobre, sem estar estanhado, dificilmente se irá ligar à camada de metalização de Zn-Sn.

A análise metalográfica possibilita constatar que as ligações obtidas pelo processo de brasagem fraca possuem maior robustez do que as realizadas segundo o processo de soldadura por pontos. Esta constatação é coerente com os resultados alcançados na análise da resistência mecânica, apresentada previamente, gerando-se forças de tração máximas bastante superiores para as ligações efetuadas recorrendo à tecnologia de brasagem.

Tabela 30 - Imagens dos Cortes Metalográficos Efetuados para a Zona de Soldadura das Ligações Realizadas pelo Processo de Soldadura por Pontos (Geometrias de Terminais).

Análise Metalográfica para as Geometrias dos Terminais (Soldadura por Pontos)	
Geometria 1	Geometria 2
	
Geometria 3	Geometria 4
	
Geometria 5	
	

6 Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido ao longo da presente dissertação permitiu alcançar algumas conclusões relevantes no que diz respeito ao estudo das tecnologias de ligação atualmente implementadas no processo produtivo dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado, brasagem fraca e soldadura por pontos, e à análise da viabilidade de utilização de novas geometrias de terminais em cobre diretamente acoplados às células condensadoras, em alternativa à utilização da rede de cobre estanhada. Adicionalmente, a recolha bibliográfica realizada, possibilitou a comparação teórica de diferentes processos de ligação utilizados na indústria de componentes elétricos e eletrónicos, passíveis de serem automatizadas, que poderão constituir soluções para as necessidades existentes atualmente na cadeia produtiva da *Vishay Eletrónica Portugal*.

Nesta fase do projeto gostaria de salientar que os principais objetivos propostos foram alcançados com sucesso. Deste modo, nos próximos parágrafos será exposto um resumo das principais ilações retiradas nas diferentes etapas do trabalho desenvolvido. No final deste capítulo serão apresentadas, ainda, algumas perspetivas de trabalhos futuros, complementares ao projeto realizado.

6.1 Conclusões da Comparação Teórica das Tecnologias de Ligação de Metais Estudadas

Relativamente ao estudo teórico das tecnologias de ligação de metais suscetíveis de serem aplicadas no processo produtivo da empresa, foram analisados quatro processos distintos: brasagem fraca, soldadura por pontos, soldadura por ultrassons e soldadura laser. Cada uma destas tecnologias apresentam vantagens e limitações distintas.

De todos os processos considerados, a brasagem é o que possui maior flexibilidade de aplicação. Contudo, por ser um processo de difícil automatização, realizado usualmente de forma manual, a utilização desta tecnologia conduz a cadências produtivas mais reduzidas. Por outro lado, a realização manual da brasagem dificulta o controlo preciso dos parâmetros associados ao processo, não sendo possível garantir a sua exata repetibilidade para séries elevadas.

As restantes tecnologias estudadas verificam-se relativamente fáceis de automatizar, após estarem otimizadas, permitindo o aumento das taxas de produção. Todavia, estas tecnologias possuem algumas limitações. A soldadura por pontos possui uma reduzida eficiência na união de materiais com elevada condutividade térmica/elétrica, podendo não ser adequada para efetuar a ligação de terminais em cobre aos elementos condensadores. A soldadura por ultrassons, embora potencie a união de materiais com elevada condutividade térmica/elétrica, revela-se inadequada para aplicação na ligação dos terminais ou da rede às células condensadoras, dado que a pressão e a vibração aplicadas podem resultar na danificação da metalização que reveste o topo destes elementos, expondo o filme metalizado. Contudo, esta

tecnologia pode ser aplicada na união dos terminais (*busbars*) à rede de cobre estanhada ou às chapas de cobre. Na soldadura laser, a reflexão do laser incidente deve ser acautelada, podendo esta tecnologia apresentar algumas contrariedades na ligação de materiais com superfícies polidas.

O estudo analisado no final da secção 3.6, relativa à comparação dos diversos processos abordados na ligação entre uma célula de bateria e um terminal, permitiu verificar que a brasagem fraca é o processo que possibilita a minimização da resistência elétrica na zona de contacto entre as duas peças a ligar e que maximiza a resistência mecânica das ligações soldadas. Tanto em termos de propriedades elétricas das ligações obtidas, como em termos de características mecânicas, a soldadura laser obteve também resultados bastante positivos. Esta tecnologia possui uma vantagem relativamente ao processo de brasagem fraca pois possibilita a execução de ligações sem que ocorra uma elevada transferência de calor para o interior das células, garantindo, assim, a integridade destas, salvaguardando-as da danificação. É de se realçar que neste estudo, os piores resultados ao nível da resistência mecânica das ligações foram obtidos para o processo de soldadura por pontos, estando estes muito aquém dos resultados das restantes tecnologias.

Tendo em consideração a investigação desenvolvida na componente teórica deste projeto, a brasagem laser (*laser soldering*) assume-se como uma alternativa viável às tecnologias de ligação atualmente utilizadas pela Vishay®, para a realização das uniões entre os terminais e os elementos condensadores, devendo a sua aplicação ser estudada aprofundadamente, através da realização de um conjunto de ensaios experimentais similar ao definido para as tecnologias de brasagem e de soldadura por pontos.

6.2 Conclusões da Análise dos Processos Atualmente Implementados na Empresa

Relativamente ao estudo das ligações executadas entre os elementos condensadores e a rede de cobre estanhada, segundo os processos de brasagem e de soldadura por pontos, atualmente implementados no processo produtivo dos condensadores *DC-Link*, os resultados obtidos para os ensaios referentes às características mecânicas, elétricas e metalográficas foram bastante elucidativos. É de lembrar que nestes ensaios foram utilizadas diferentes combinações de parâmetros, inerentes a cada processo, para estudar a sua influência nos resultados conseguidos.

Nos ensaios realizados com o intuito de avaliar a resistência mecânica das ligações soldadas, obtiveram-se resultados de força e de tensão bastante superiores para o processo de brasagem fraca, quando comparado com a soldadura por pontos.

Deste modo, a combinação de parâmetros 4 ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{ s}$) evidenciou-se como a solução que potencia a otimização do processo de brasagem, dado promover o alcance de soldaduras de excelente qualidade, segundo o critério de força mínima estabelecido, proporcionando, em simultâneo, uma variação associada aos resultados reduzida e uma transferência de calor controlada. Esta solução permite, deste modo, uma redução significativa das temperaturas utilizadas atualmente no processo de brasagem fraca (*soldering*) implementado pela empresa. Para esta combinação obteve-se um valor médio de força de tração e de tensão de 49,41 N e 1,90 MPa, respetivamente. Embora para as combinações de parâmetros 5 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=3\text{ s}$) e 6 ($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{ s}$) se tenham alcançados resultados de força e de tensão um pouco superiores aos obtidos para a combinação de parâmetros 4, a sua utilização poderá não trazer benefícios relativamente a esta. Por um lado porque a utilização de um *reflow time* reduzido resulta numa maior variação dos resultados alcançados, originando, na prática, uma dificuldade acrescida na repetibilidade do processo, o que justifica a exclusão da utilização da combinação de parâmetros 5. Adicionalmente, a aplicação da combinação de parâmetros 6

poderá resultar numa transferência de calor excessiva para o interior do elemento condensador, promovendo a danificação do filme de polipropileno metalizado.

Para o processo de soldadura por pontos, verificou-se que a utilização de um tempo de soldadura de referência 3 (2 ciclos) não é apropriado para a execução da soldadura pretendida, originando forças de ligação extremamente reduzidas. A combinação de parâmetros que possibilitou o melhor resultado para este processo foi a combinação 4 ($I=64$; $t=4$), alcançando-se valores médios de força de tração e de tensão de 22,17 N e 0,80 MPa, respetivamente, ainda assim, valores bastante reduzidos. Apesar da combinação 6 ($I=72$; $t=4$) ter apresentado melhores resultados em termos de força de tração máxima, esta melhoria foi bastante reduzida (aumento de 6,82 %), não justificando o excesso de indentação verificado e possível dano da célula condensadora. A utilização de eléctrodos com uma secção de ponta superior ou o aumento do número de pontos efetuados são duas soluções evidentes para elevar os resultados de resistência mecânica obtidos para as amostras ligadas segundo a tecnologia de soldadura por pontos.

Nos ensaios realizados com o intuito de analisar as propriedades elétricas das ligações entre a rede de cobre estanhada e os elementos condensadores, não se visualizaram disparidades consideráveis entre os resultados de resistência elétrica alcançados para os processos de brasagem fraca e soldadura por pontos, verificando-se, ainda assim, um ligeiro aumento desta grandeza física nas ligações efetuadas segundo a tecnologia de soldadura por pontos (cerca de 4,42 % antes da submissão das amostras aos ciclos de envelhecimento artificial e de 1,95 % após o mesmo). Os resultados alcançados para as diferentes combinações de parâmetros analisadas, inerentes a cada um dos processos examinados, foram similares, não se constatando desigualdades expressivas.

A comparação geral das imagens dos cortes metalográficos efetuados para ambos os processos demonstrou que a utilização de um material de adição possibilita a obtenção de juntas de soldadura bastante coesas, sendo natural ter-se visualizado melhores propriedades mecânicas nas ligações realizadas pela tecnologia de brasagem manual. Em nenhuma das amostras ligadas segundo este processo se verificou a ocorrência de danificação do filme de polipropileno metalizado no interior da bobine, sendo que, genericamente, a zona termicamente afetada apenas envolveu a camada superior de metalização e, em alguns casos, o início da primeira. Assim, para o processo de brasagem fraca, a combinação de parâmetros 4 ($T=360$ °C, $t=5$ s) permitiu a obtenção de uma soldadura robusta, com presença de defeitos de soldadura reduzidos.

Relativamente ao processo de soldadura por pontos, verificou-se que o uso de um tempo de soldadura de referência 3 não garante a ocorrência de uma penetração razoável da rede na segunda camada de metalização, nem a existência de fusão entre os elementos intervenientes na união, conferindo à ligação uma resistência mecânica deficiente. Deste modo, confirmou-se que este tempo não é adequado para a execução das soldaduras pretendidas. Para este processo, a combinação de parâmetros que permitiu a obtenção de uma ligação com defeitos de soldadura mínimos foi a combinação 4 ($I=64$; $t=4$).

6.3 Conclusões da Análise da Viabilidade de Utilização de Novas Geometrias de Terminais

No que diz respeito à análise da viabilidade de utilização de novas geometrias de terminais, em substituição da rede de cobre estanhada, os resultados alcançados nos diferentes testes permitiram identificar algumas conclusões. Nesta análise, os parâmetros associados ao processo mantiveram-se constantes, variando-se apenas a geometria do terminal.

Tal como se tinha verificado para as ligações “rede de cobre estanhada/elemento condensador”, os resultados dos ensaios relativos às propriedades mecânicas, efetuados para as

diferentes geometrias de terminais, revelaram que o processo de brasagem confere as ligações resistências mecânicas bastante superiores, quando comparado com o processo de soldadura por pontos. Deste modo, o valor médio de força de tração, alcançado para os provetes ligados segundo o processo de brasagem, variou entre os 72,88 N (geometria 2) e os 91,33 N (geometria 3), sendo que, nas amostras unidas através da tecnologia de soldadura por pontos, este valor variou entre os 8,39 N (geometria 5) e os 18,04 N (geometria 1). Assim, o processo de soldadura por pontos revelou-se incapaz de originar ligações com propriedades mecânicas robustas entre os elementos condensadores e os terminais em cobre, para qualquer uma das geometrias testadas, não permitindo a obtenção de soldaduras com boa qualidade.

A reduzida dimensão dos eléctrodos utilizados e o facto de o cobre possuir elevada condutividade térmica e eléctrica, dificultando o processo de soldadura por pontos, são algumas das razões que justificam os resultados obtidos para esta tecnologia. Outra razão poderá ser a ausência de revestimento (estanho) nos terminais em cobre utilizados.

Os resultados dos ensaios de tração possibilitaram concluir que a tecnologia de brasagem é adequada para execução das ligações entre os terminais e os elementos condensadores, conferindo uma excelente resistência mecânica à junta soldada. Contudo, do ponto de vista do operador, as geometrias de terminais 2 (secção reta) e 5 (secção circular grande) podem induzir algumas complicações ao processo de ligação, não sendo as mais apropriadas para as ligações pretendidas. Deste modo, as geometrias de terminais 1, 3 e 4 (secção circular pequena, extremidade em garfo e extremidade em “t”, respetivamente) assumem-se como as alternativas mais viáveis. Os valores médios de forças de tração alcançados para estas geometrias foram de 89,13 N, 91,33 N e 81,53 N, respetivamente. Estes resultados são substancialmente superiores aos obtidos nas ligações entre as células condensadoras e a rede de cobre estanhada. Esta diferença ocorre, em parte, devido aos fatores de concentração de tensões associados à área resistente dos filamentos que constituem a rede, e que explicam a rutura da mesma, alcançando-se forças de tração mais reduzidas do que as que se obteriam caso a rutura ocorresse na ligação soldada.

Os resultados de resistência óhmica alcançados para as ligações “terminal em cobre/elemento condensador”, efetuadas segundo os processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos, apresentaram diferenças significativas entre si, sendo que a tecnologia de brasagem originou propriedades eléctricas superiores (resistências eléctricas mais reduzidas).

Para as amostras ligadas segundo o processo de brasagem, verificou-se a inexistência de diferenças significativas entre os resultados alcançados para as diferentes geometrias analisadas, sendo a diferença relativa máxima entre estes de 3,30 % antes do envelhecimento artificial e de 1,44 % após a aplicação do mesmo. Ainda assim, os menores valores de resistência eléctrica foram alcançados para a geometria 4. Contrariamente, para as amostras ligadas por soldadura por pontos, verificaram-se desigualdades consideráveis entre os resultados obtidos para as geometrias 1 e 3 e para a geometria 4, sendo que esta última apresenta resistências eléctricas menores antes e após a aplicação dos ciclos de envelhecimento artificial. Assim, a diferença relativa máxima registada antes e após a sujeição das amostras a envelhecimento artificial foi de 13,6 % e 12,5 %, respetivamente. Para todas as geometrias de terminais, verificou-se uma degradação das propriedades eléctricas, observando-se um aumento significativo da resistência óhmica após a submissão das amostras aos ciclos de envelhecimento artificial.

Os resultados visualizados na análise metalográfica reiteram algumas das conclusões evidenciadas nos parágrafos anteriores. Deste modo, confirmou-se que o processo de soldadura por pontos não é adequado para realizar as ligações soldadas entre os terminais em cobre e os elementos condensadores, causando somente uma penetração dos terminais na metalização que reveste o topo das células condensadoras. Esta análise evidenciou, também, que as ligações

obtidas pelo processo de brasagem fraca possuem maior robustez do que as realizadas segundo o processo de soldadura por pontos.

Nas amostras ligadas pela tecnologia de brasagem, independentemente da geometria de terminal, não se verificou a danificação do filme de polipropileno metalizado, devido à transferência de calor para o interior da célula condensadora. Consequentemente, a maior zona termicamente afetada foi observada para a geometria 2, incluindo praticamente a espessura total das duas camadas de metalização. Para as restantes geometrias, a zona termicamente afetada envolveu apenas a camada superior de metalização. A geometria 5, devido às suas dimensões, não permitiu a penetração por capilaridade do material de adição na camada superior do revestimento metálico, formando-se vazios na região inferior adjacente ao terminal. A presença destes defeitos foi também visualizada nas amostras relativas às geometrias 1, 2 e 4. Nas amostras referentes às geometrias 2 e 3 verificou-se a existência de uma quantidade considerável de poros como defeitos de soldadura.

A análise conjunta dos diferentes ensaios permite concluir que a geometria de terminal 4 (extremidade com formato de “t”) é aquela que potencia a realização do processo de brasagem, sendo os resultados alcançados para as geometrias 1 (secção circular pequena) e 3 (extremidade com formato de garfo) bastante semelhantes.

6.4 Perspetivas de Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros seria importante a realização de ensaios de tração, segundo a metodologia definida para as ligações “rede de cobre estanhada/elemento condensador”, utilizando chapas contínuas de cobre estanhado, ou de outro material com características elétricas semelhantes, em substituição da rede utilizada, de maneira a ser possível a comparação da resistência mecânica destes elementos. Adicionalmente, seria importante a execução dos ensaios relativos às características mecânicas após a submissão das amostras a ciclos de envelhecimento artificial, com o intuito de se analisar a ocorrência, ou não, de diminuição da resistência mecânica das ligações após a aplicação dos mesmos.

Tendo em consideração o procedimento experimental definido para o estudo dos processos de brasagem fraca e de soldadura por pontos, seria interessante a realização de um conjunto de ensaios experimentais similares aos efetuados, ao nível das características mecânicas, elétricas e metalográficas, com o intuito de se analisar experimentalmente a viabilidade da aplicação da tecnologia de brasagem *laser* como alternativa às tecnologias de ligação atualmente implementadas no processo produtivo dos condensadores *DC-Link* de filme metalizado.

Por fim, sugere-se como trabalhos futuros o estudo da viabilidade de utilização de adesivos com excelentes características elétricas e mecânicas como alternativas às tecnologias de ligação de metais consideradas no presente projeto.

Referências

- [1] Vishay & ITEC. (2018). “Proposta de Candidatura – NextLink, Nova Geração de DC-Links Produzidos através de processos automáticos”. Anexo Técnico.
- [2] Isidoro, P. (2018). “Portugal ultrapassa, em setembro, os 5% de quota de VE.” [23/01/2019]. Disponível em: <https://www.uve.pt/page/portugal-ultrapassa-em-setembro-os-5-de-quota-de-ve/>
- [3] Vishay Intertechnology, Inc. “About Vishay Intertechnology.” [24/01/2019]. Disponível em: <https://www.vishay.com/company/about/>
- [4] Rizzoni, G., & Kearns, J. (2004). “Principles and applications of electrical engineering”. USA: McGraw-Hill Higher Education.
- [5] Maia, M., J. (1989). “Fabricação de Condensadores de Filme Metalizado”. (Relatório de Estágio). Roederstein Eletrónica Portugal, Lda.
- [6] Vishay Intertechnology, Inc. (2008). “Vishay Film Capacitors”. (Revisão: 28-Oct-08). Roeselare, Belgium.
- [7] Kim, M., Sul, S.-K., & Lee, J. (2012). “Condition monitoring of DC-link capacitors in drive system for electric vehicles”. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE.
- [8] Ho, J. (2016). “Effects of dielectric material properties on metalized film capacitor performance”. Dielectrics International Conference (ICD), 2016 IEEE.
- [9] Montanari, D., Saarinen, K., Scagliarini, F., Zeidler, D., Niskala, M., & Nender, C. (2009). “Film capacitors for automotive and industrial applications”. 2009 CARTS Proceedings, April 2009, Jacksonville, FL, USA.
- [10] Parler, S. G., & Leigh, H. D. (2012). “Capacitor Having Zinc Coated Common Edge With Welded Aluminum Terminal”. United States Patent. Patent Number: US 8098479.
- [11] Granta Design Limited. (2018). “Thermal Spraying”. Ces Edupack 2018.
- [12] Fernandes, A. A. (2005). “Soldagem e Brasagem”. Documentos de Apoio à Disciplina de Processos de Fabrico II. (Capítulo VII). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [13] Brand, M. J., Kolp, E. I., Berg, P., Bach, T., Schmidt, P., & Jossen, A. (2017). “Electrical resistances of soldered battery cell connections”. Journal of Energy Storage, 12, 45-54.
- [14] Humpston, G., & Jacobson, D. M. (2004). “Principles of soldering”. Ohio, USA: ASM international.
- [15] Granta Design Limited. (2018). “Brazing”. Ces Edupack 2018.

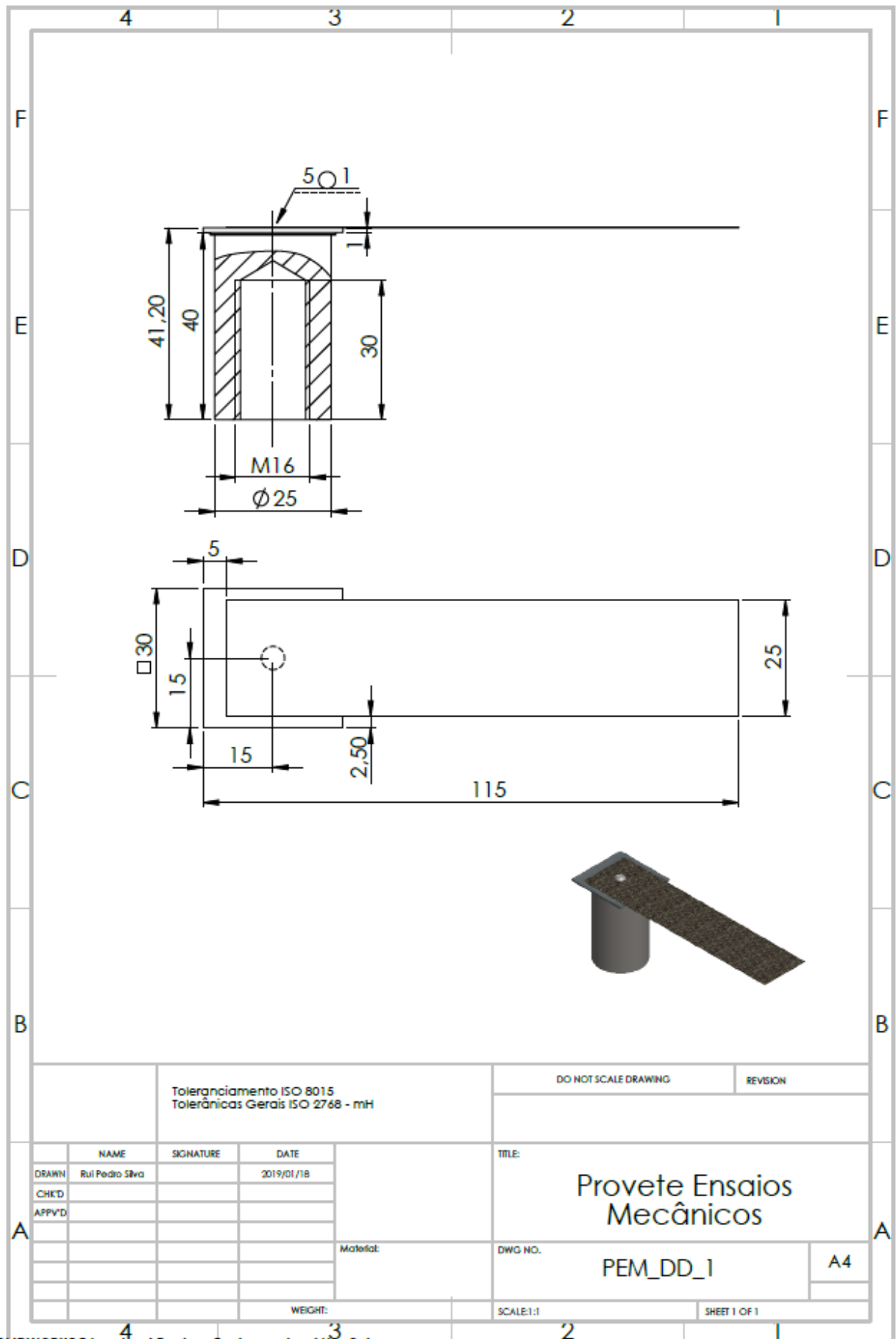
- [16] AWS. (2007). “Brazing handbook”. 5th edition. Miami, Florida: American Welding Society.
- [17] Codrean, C., Buzdugan, D., Radu, B., & Şerban, V. A. (2017). “Induction Brazing of Copper Parts Using Amorphous Brazing Alloys”. *Materials Science Forum*.
- [18] Srivastava, A. K., & Sharma, A. (2017). “Advances in Joining and Welding Technologies for Automotive and Electronic Applications”. *American Journal of Materials Engineering and Technology*, 5(1), 7-13.
- [19] Wassink, R. J. K. (1989). “Soldering in electronics. 2nd edition. A comprehensive treatise on soldering technology for surface mounting and through-hole techniques”. Ayr, UK: Electrochem. Publications.
- [20] Shtennikov, V. (2013). “Improvement of international standards for contact soldering in electronics”. *Welding International*, 27(5), 384-386.
- [21] Granta Design Limited. (2018). “Soldering”. *Ces Edupack 2018*.
- [22] Mirski, Z., Granat, K., Drzeniek, H., Piwowarczyk, T., & Wojdat, T. (2013). “Soldering of aluminium with copper”. *Welding International*, 27(3), 190-195.
- [23] Khaja, A. S., Kaestle, C., Reinhardt, A., & Franke, J. (2013). “Optimized thin-film diffusion soldering for power-electronics production”. 36th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2013 IEEE, 11-16.
- [24] Yang, W., Felton, L. E., & Messler, R. W. (1995). “The effect of soldering process variables on the microstructure and mechanical properties of eutectic Sn-Ag/Cu solder joints”. *Journal of Electronic Materials*, 24(10), 1465-1472.
- [25] “The lead-tin phase diagram”. [Online]. Disponível em: <http://d2vlcm6117u1fs.cloudfront.net/media/3f8/3f8f041e-0861-4a24-98aa-d6d4d799f2f9/phpOhP2Du.png>
- [26] Dimitrijević, S. P., Manasijević, D., Kamberović, Ž., Dimitrijević, S. B., Mitrić, M., Gorgievski, M., & Mladenović, S. (2018). “Experimental Investigation of Microstructure and Phase Transitions in Ag-Cu-Zn Brazing Alloys”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(4), 1570-1579.
- [27] “SAC phase diagram – Sn-4.0 Ag-0.5 bulk phases”. [Online]. Disponível em: <https://semitracks.com/newsletters/images/july/2013-july-newsletter-image-5.png>
- [28] Granta Design Limited. (2018). “Spot Welding”. *Ces Edupack 2018*.
- [29] Fernandes, A. A. (2005). “Soldadura por Resistência”. *Documentos de Apoio à Disciplina de Processos de Fabrico II. (Capítulo VI)*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [30] Zhang, H., Senkara, J. (2012). “Electrothermal Processes of Welding, in Resistance welding: Fundamentals and Applications”. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 53-101.
- [31] Monteiro, H. M. (2000). “Estudo Paramétrico de Optimização de Soldadura por Resistência Eléctrica por Pontos”. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [32] Brand, M. J., Schmidt, P. A., Zaeh, M. F., & Jossen, A. (2015). “Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances”. *Journal of Energy Storage*, 1, 7-14.

- [33] Tan, W., Zhou, Y., & Kerr, H. (2002). “Effects of Au plating on small-scale resistance spot welding of thin-sheet nickel”. *Metallurgical and materials transactions A*, 33(8), 2667-2676.
- [34] Wei, P., & Wu, T. (2012). “Electrical contact resistance effect on resistance spot welding”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11-12), 3316-3324.
- [35] Rogeon, P., Carre, P., Costa, J., Sibilia, G., & Saindrenan, G. (2008). “Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies”. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3), 117-124.
- [36] Thornton, P. H., Krause, A. R. & Davies, R. G. (1996). “Contact Resistances in Spot Welding”. *Welding journal*, 75(12).
- [37] Geslain, E., Rogeon, P., Pierre, T., Pouvreau, C., & Cretteur, L. (2018). “Coating effects on contact conditions in resistance spot weldability”. *Journal of Materials Processing Technology*, 253, 160-167.
- [38] Dickinson, D., Franklin, J., & Stanya, A. (1980). “Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring”. *Welding journal*, 59(6), 170.
- [39] Gould, J. (1987). “An examination of nugget development during spot-welding, using both experimental and analytical techniques”. *Welding journal*, 66(1), S1-S10.
- [40] Han, Z., Orozco, J., Indacochea, J., & Chen, C. (1989). “Resistance spot welding: a heat transfer study”. *Welding journal*, 68(9), 363s-371s.
- [41] Granta Design Limited. (2018). “Ultrasonic Welding”. *Ces Edupack 2018*.
- [42] Marques, T. E. P. (2014). “Desenvolvimento e melhoria dos processos de soldadura por ultrassons de fios de cobre”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [43] Wagner, G., Balle, F., & Eifler, D. (2012). “Ultrasonic welding of hybrid joints”. *Jom*, 64(3), 401-406.
- [44] Satpathy, M. P., Moharana, B. R., Dewangan, S., & Sahoo, S. K. (2015). “Modeling and optimization of ultrasonic metal welding on dissimilar sheets using fuzzy based genetic algorithm approach”. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(4), 634-647.
- [45] Pereira, R. M., Cunha, J. G., & Gomes, J. R. (2006). “Desgaste de ferramentas de soldadura por ultra-sons na produção de cablagens eléctricas para automóveis”. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 18, 65-72.
- [46] Jahn, R., Cooper, R., & Wilkosz, D. (2007). “The effect of anvil geometry and welding energy on microstructures in ultrasonic spot welds of AA6111-T4”. *Metallurgical and materials transactions A*, 38(3), 570-583.
- [47] Connor, L., O’Brien, R., & Oates, W. (2007). “Ultrasonic Welding of Metals”. *Welding Handbook Vol. 3 – Welding Processes Part 2*, 9th ed., Miami, FL, American Welding Society.
- [48] Elangovan, S., Semeer, S., & Prakasan, K. (2009). “Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding—An FEA-based study”. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1143-1150.
- [49] Wu, X., Liu, T., & Cai, W. (2015). “Microstructure, welding mechanism, and failure of Al/Cu ultrasonic welds”. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 515-524.

- [50] Meira, M. S. (2012). “Aplicação de ultrassons durante a soldadura de aços de construção: caracterização microestrutural dos cordões”. (Dissertação de Mestrado). Universidade do Minho, Braga.
- [51] De Vries, E. (2004). “Mechanics and mechanisms of ultrasonic metal welding”. (Tese de Doutorado). The Ohio State University, Ohio.
- [52] Kuttruff, H. (2012). “Ultrasonics: Fundamentals and applications”. USA: Springer Science & Business Media.
- [53] Elangovan, S., Prakasan, K., & Jaiganesh, V. (2010). “Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(1-4), 163-171.
- [54] Shawn Lee, S., Hyung Kim, T., Jack Hu, S., Cai, W. W., Abell, J. A., & Li, J. (2013). “Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(2), 021004-021004-021013.
- [55] Shakil, M., Tariq, N., Ahmad, M., Choudhary, M., Akhter, J., & Babu, S. (2014). “Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints”. *Materials & Design*, 55, 263-273.
- [56] Kumar, J. (2013). “Ultrasonic machining - a comprehensive review”. *Machining Science and Technology*, 17(3), 325-379.
- [57] Katayama, S. (2013). “Introduction: fundamentals of laser welding”. In S. Katayama (Ed.), *Handbook of Laser Welding Technologies* (pp. 3-16): Woodhead Publishing.
- [58] Granta Design Limited. (2018). “Laser Beam Welding”. Ces Edupack 2018.
- [59] Pecas, P., Gouveia, H., Quintino, L., Rasmussen, M., & Olsen, F. (1998). “Soldadura laser de sub-conjuntos para estampagem (Tailored blanks)”. *Revista de Metalurgia*, 34(2), 210-216.
- [60] Vilas, J. P. M. J. (2013). “Otimização de Parâmetros em Soldadura Laser”. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [61] Unitek Myachi Corporation (2003). “Nd:YAG Laser Welding Guide”. [15/12/2018]. Disponível em: <http://www.miyachieurope.com/cmdata/documents/laser-welding-fundamentals.pdf>
- [62] Oliveira, D. F. (2015). “Parâmetros da soldadura LASER pulsado de Nd: YAG em aços avançados de alta resistência”. (Dissertação de Mestrado). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- [63] Furtado, C. A. F. (2014). “Adaptação de robô de soldadura laser”. (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- [64] Vieira, L. M. A. (2010). “Laser welding of shape memory alloys”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [65] Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). “Laser material processing”. London, England: Springer Science & Business Media.
- [66] Schmidt, P. A., Schweier, M., & Zaeh, M. F. (2012). “Joining of lithium-ion batteries using laser beam welding: Electrical losses of welded aluminum and copper joints”. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*.
- [67] Shi, W., Huang, J., Xie, Y., Li, Y., & An, F. (2017). “Laser micro-welding technology for Cu–Al dissimilar metals and mechanisms of weld defect formation”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9-12), 4197-4201.

- [68] Klemens, P. (1976). “Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding”. *Journal of Applied physics*, 47(5), 2165-2174.
- [69] Beckett, P., Fleming, A., Gilbert, J., & Whitehead, D. (1999). “The laser in manufacture - its use in the soldering of electronic assemblies”. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 21(1), 2-7.
- [70] Yang, W., Messler, R. W., & Felton, L. E. (1994). “Microstructure evolution of eutectic Sn-Ag solder joints”. *Journal of Electronic Materials*, 23(8), 765-772.
- [71] Chang, D. U. (1985). “Method of laser soldering”. United States Patent. Patent Number: 4531044.
- [72] Department of Defense of USA (2002). “Test Method Standard – Electronic and Electrical Component Parts”. MIL-STD-202G.

ANEXO A: Desenho de Definição do Provete Projetado para os Ensaios de Tração



ANEXO B: Ficha Técnica do Adesivo HB AS 89/ AW 89

FICHA TÉCNICA

PRODUTO: HB AS 89/ AW 89

Data de emissão Fevereiro 2011

Revisão nr. 01

Código Tradução C009-T



PÁG 1/3

RESINA
HB AS 89

ENDURECEDOR
HB AW 89

PROPORÇÃO DE MISTURA PELO PESO
100:45

APLICAÇÕES:

Ligamento estrutural com resistência térmica. Adesivo para montagem de: Materiais compósitos, metais, componentes automotores, componentes desportivos.

PROCEDIMENTOS:

Aplicação a pincel, espátula, ou com aparelhos de mistura. À temperatura ambiente ou cura a quente. A pós-cura pelo calor é necessária para atingir a resistência térmica indicada na ficha técnica.

DESCRIÇÃO:

Sistema epóxi de dois componentes, sem carga, modificado, tixotrópico. Proporção de mistura de 2:1. Livre de solventes. Resistência à curvatura até 5mm. Elevada dureza. Boa resistência térmica. É aconselhável proceder à cura do sistema a temperaturas não inferiores a 20-25°C.

ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA

Resina

Viscosidade a: 25°C	IO-10-50(EN13702-2)	mPas	300.000	500.000
---------------------	---------------------	------	---------	---------

Endurecedor

Viscosidade a: 25°C	IO-10-95	mPas	170.000	350.000
Tempo em aberto a: 25°C(40mm;100ml)	IO-10-53(*)	min	15	25

CARATERÍSTICAS TÍPICAS DO SISTEMA

Informação relativa ao processo

Cor da resina			Cor de leite	
Cor do endurecedor			Preto	
Proporção de mistura pelo peso	para 100 g resina	g	100:45	
Proporção de mistura pelo volume	para 100 ml resina	ml	100:50	
Densidade a: 25°C Resina	IO-10-51(ASTM D 1475)	g/ml	1,11	1,15
Densidade a: 25°C Endurecedor	IO-10-51(ASTM D 1475)	g/ml	0,95	0,99
Pico exotérmico 25°C (40mm;100ml)	IO-10-53(*)	°C	130	150
Viscosidade da mistura inicial a: 25°C	IO-10-50(EN13702-2)	mPas	100.000	150.000
Tempo Gel 25°C (1 mm)	IO-10-73(*)	h	2,5	3,0
35°C (1mm)		h	1,5	2,0

FICHA TÉCNICA

PRODUTO: HB AS 89/ AW 89

Data de emissão Fevereiro 2011

Revisão nr. 01

Código Tradução C009-T



PÁG 2/3

CARATERÍSTICAS TÍPICAS DO SISTEMA

Tempo de desmoldagem 25°C (0,1 mm)	(*)	h	3,0-4,0
Ciclos de cura sugeridos	(**)		2h a 80°C

CARATERÍSTICAS TÍPICAS DO SISTEMA CURADO

Propriedades determinadas em amostras curadas:

Densidade 25°C	IO-10-54(ASTM D 792)	g/ml	1,04	1,08	
Dureza 25°C	IO-10-58(ASTM D 2240)	Shore D/15	80	85	
Temperatura Transição Vítrea (Tg)	24h RT 2h 80°C	IO-10-69(ASTM D 3418)	°C	54	60
			°C	80	86
Tg máxima	IO-10-69(ASTM D 3418)	°C	84	90	
Resistência ao corte por tensão:					
Colagem aço Inox AISI 316 6h 25°C (testado RT)	IO-10-80(ASTM D 1002)	Mpa	13	17	
Colagem aço Inox AISI 316 24h 25°C (testado RT)		Mpa	19	23	
Colagem aço Inox AISI 316 7dias 25°C (testado RT)		Mpa	21	25	
Colagem aço Inox AISI 316 2h 80°C (testado RT)		Mpa	26	32	
Colagem aço Inox AISI 316 2h 80°C (testado a 80°C)		Mpa	14	18	
Colagem alumínio 2h 80°C (testado RT)		Mpa	26	32	
Colagem alumínio 2h 80°C (testado a 80°C)		Mpa	14	18	
Colagem compósito de carbono 24h 25°C (testado RT)		Mpa	20	25	
Colagem compósito de carbono 2h 80°C(testado RT)		Mpa	32	39	
Resistência flexão	IO-10-66(ASTM D 790)	MN/m2	80	90	
Tensão máxima	IO-10-66(ASTM D 790)	%	5	8	
Tensão na rutura	IO-10-66(ASTM D 790)	%	6	10	
Módulo elasticidade flexão	IO-10-66(ASTM D 790)	MN/m2	1.800	2.200	
Resistência à tensão	IO-10-63(ASTM D 638)	MN/m2	48	54	
Alongamento na rutura	IO-10-63(ASTM D 638)	%	4	6	
Resistência à compressão	IO-10-72(ASTM D 695)	MN/m2	60	70	

IO-00-00= Método de teste da Camattini. O método internacional correspondente é indicado sempre que possível.
 Nd= não determinado na=não aplicável RT=TA=temperatura ambiente do laboratório (23+ 2°C)
 Unidades de conversão: 1 mPas = 1 cPs 1MN/m2 = 10 kg/cm2 = 1 Mpa

(*) para grandes quantidades o tempo de trabalho é mais curto e o pico exotérmico aumenta.

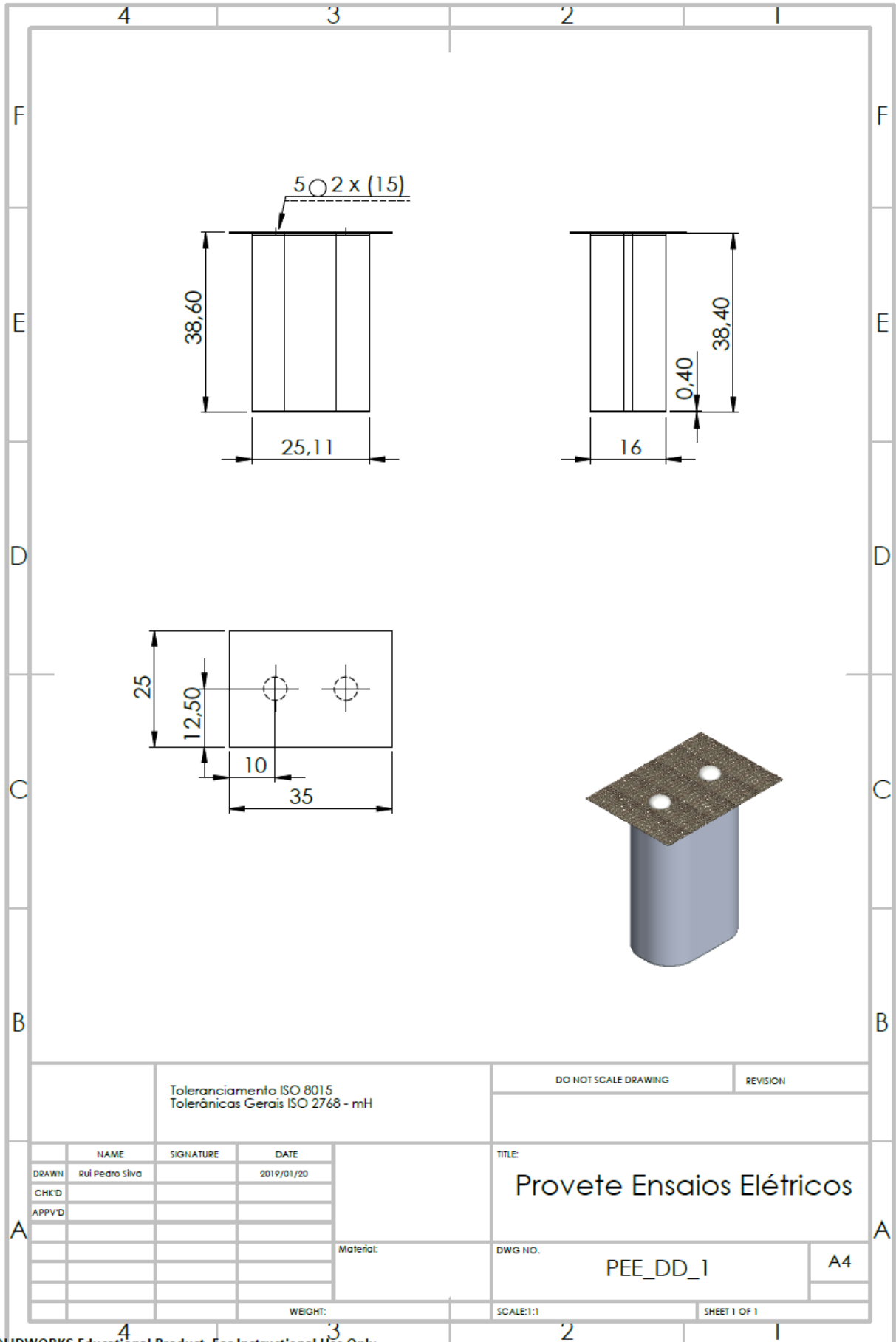
(**) os parênteses significam opcional.

(***) a temperatura máxima recomendada é dada na base da informação laboratorial disponível, dependendo das condições de cura e do tipo de materiais usados. Para mais informações, por favor, consultar o parágrafo Pós-Cura.

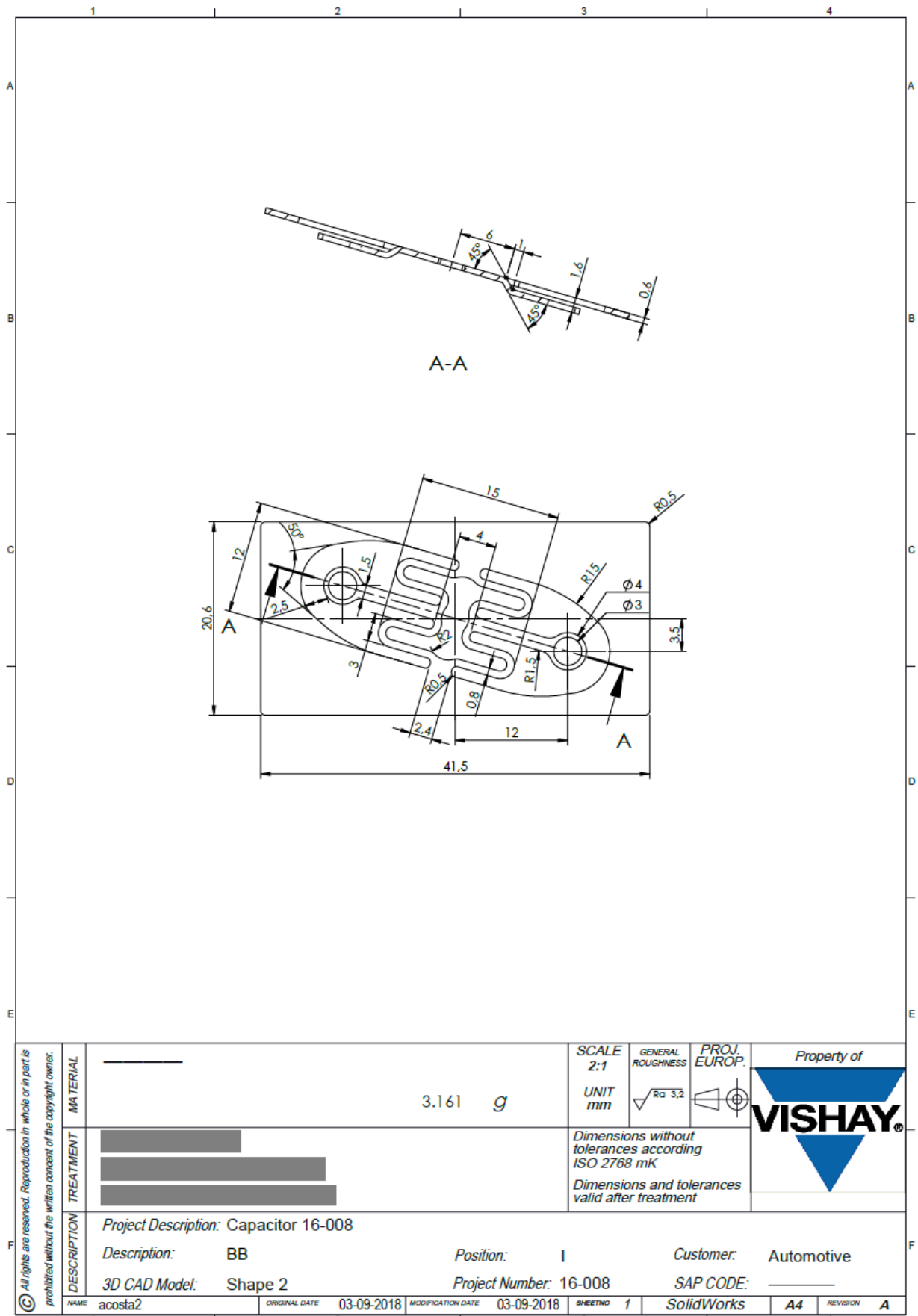
INSTRUÇÕES:

As superfícies devem estar limpas e secas. Normalmente, a abrasão mecânica ou lixamento seguidos de um desengorduramento com solvente(ex. acetona) são suficientes. Adicionar a quantidade adequada do endurecedor à resina, misturar cuidadosamente. Uma vez aplicado, o sistema é sensível à humidade e ao anidrido carbónico: Cobrir, rapidamente, a junção ou curar no forno. A limpeza final do equipamento deve ser efectuada com um solvente normal, como a acetona, nitro, etc..

ANEXO C: Desenho de Definição do Provete Utilizado para os Ensaio Elétricos (Ligação “Elemento Condensador/Rede”)

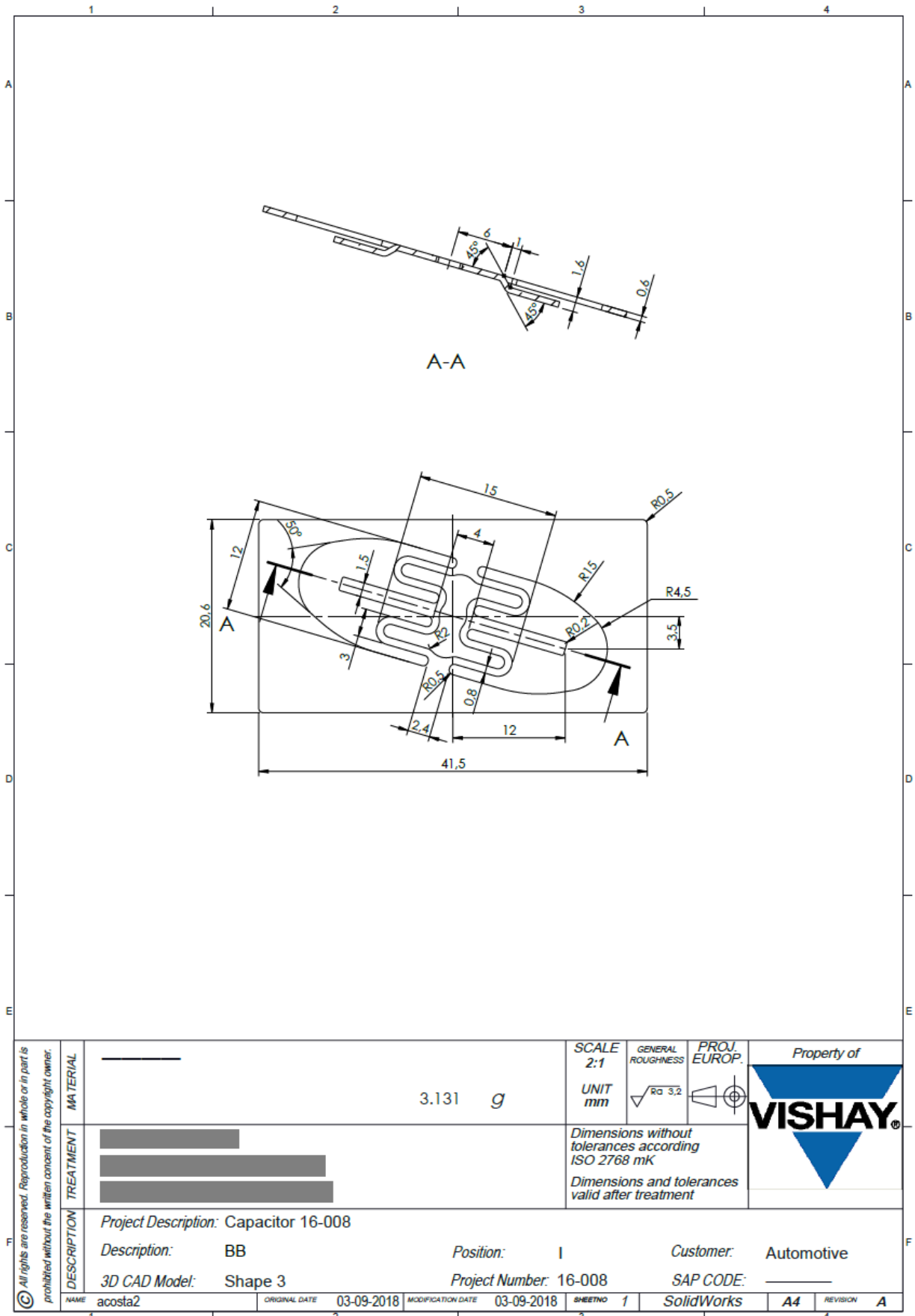


ANEXO D: Desenho de Definição da Geometria de Terminal 1



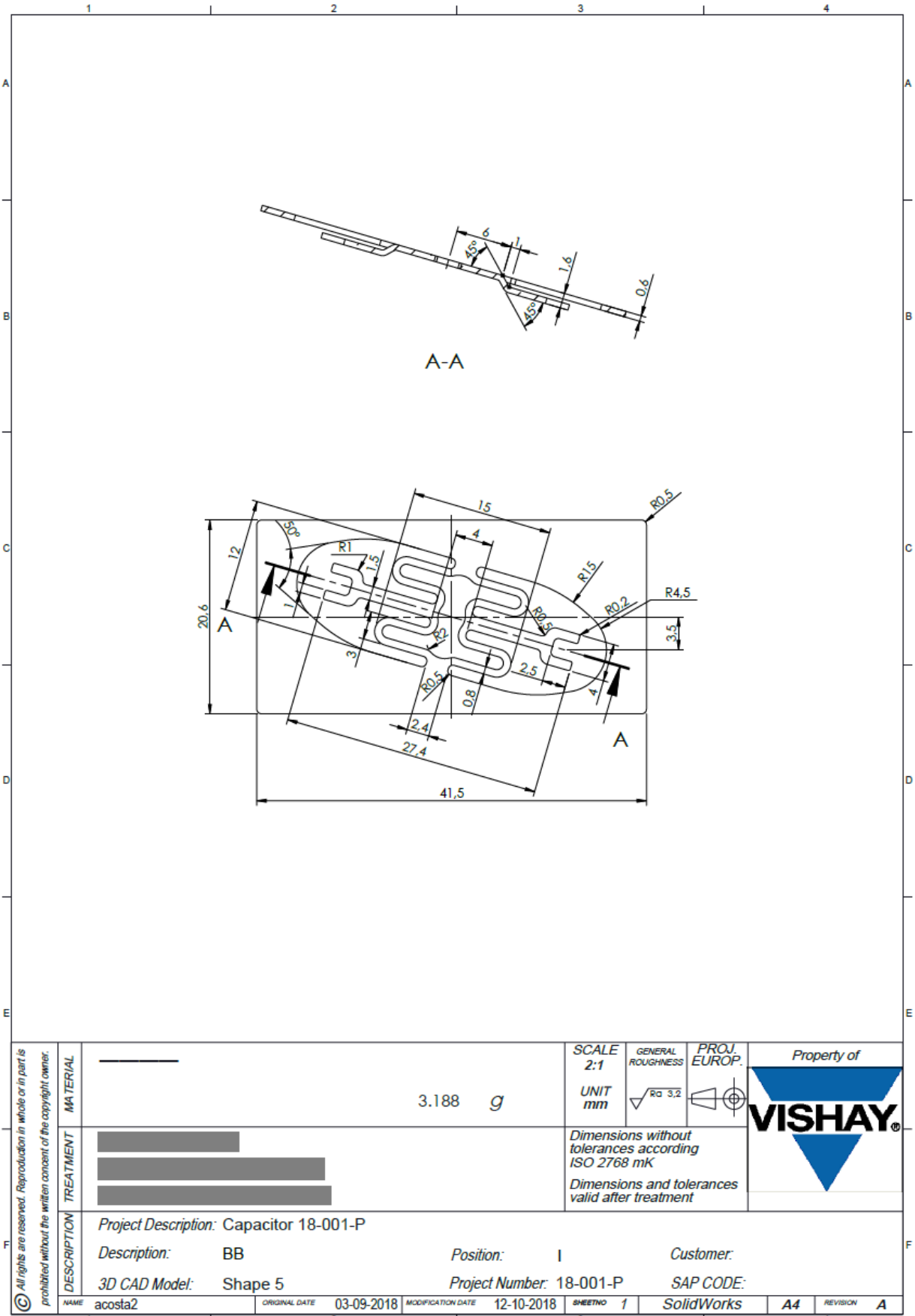
*Conteúdo cedido pela Vishay Eletrónica Portugal, Lda.

ANEXO E: Desenho de Definição da Geometria de Terminal 2



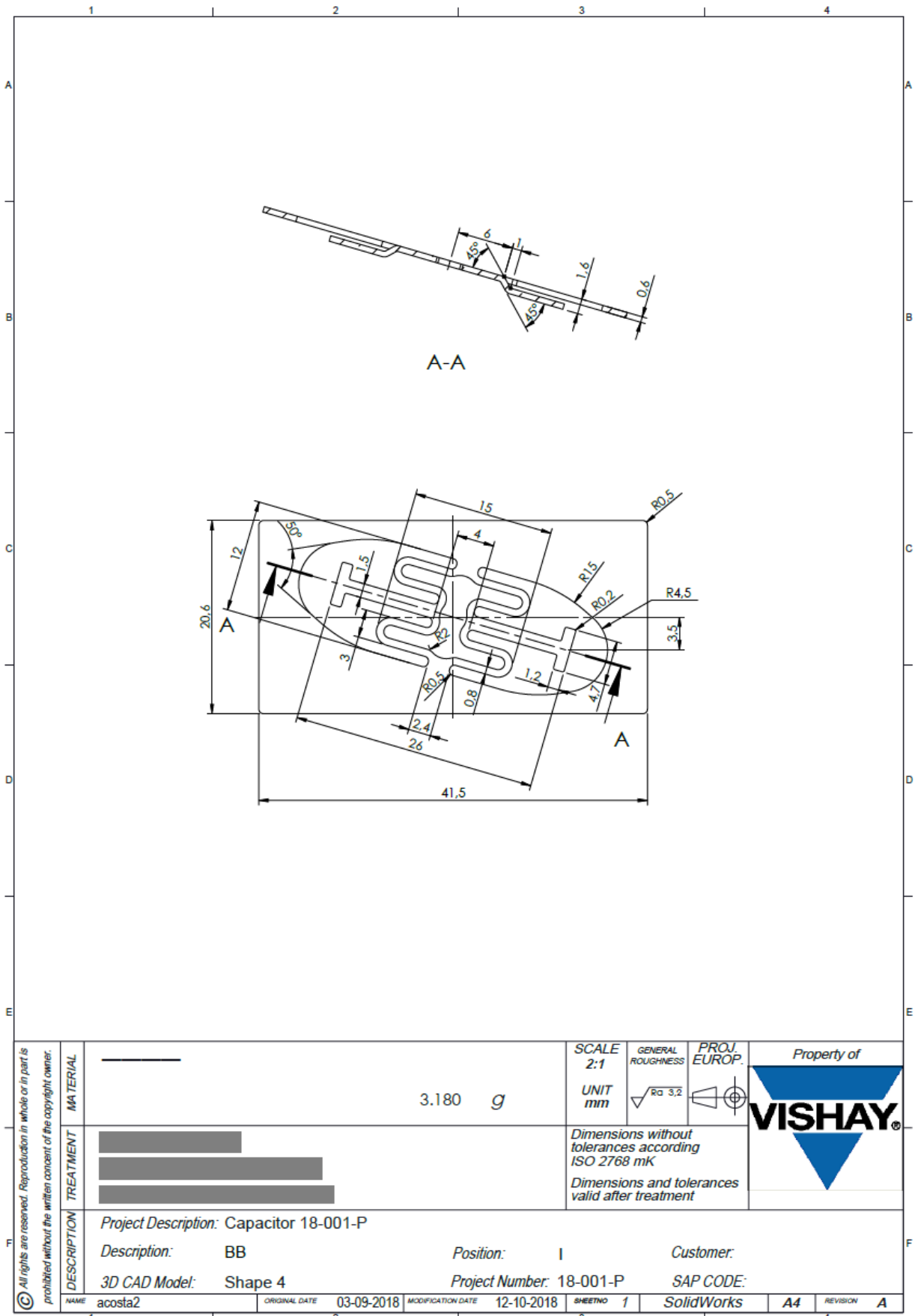
*Conteúdo cedido pela Vishay Eletrónica Portugal, Lda.

ANEXO F: Desenho de Definição da Geometria de Terminal 3



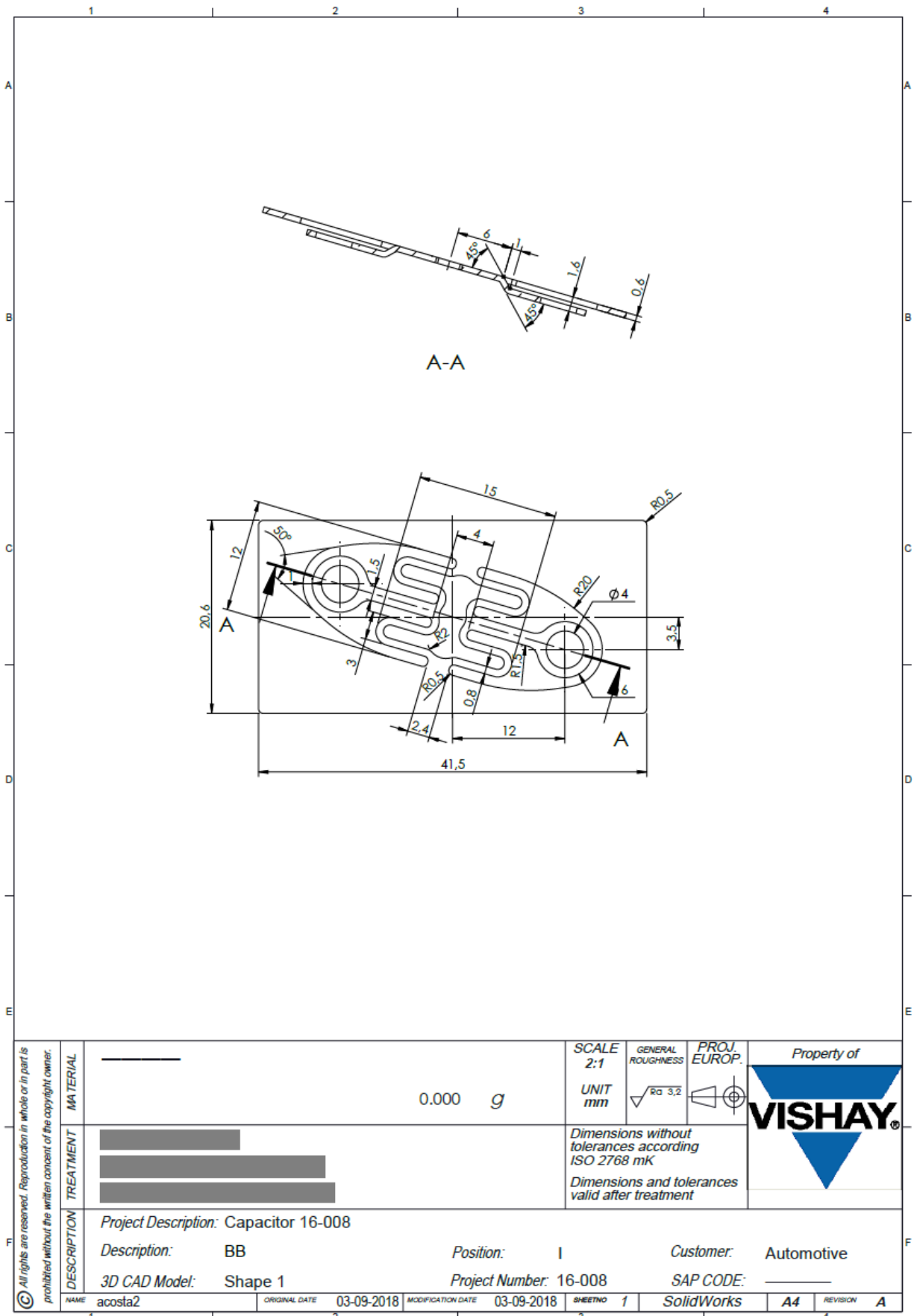
*Conteúdo cedido pela Vishay Eletrónica Portugal, Lda.

ANEXO G: Desenho de Definição da Geometria de Terminal 4



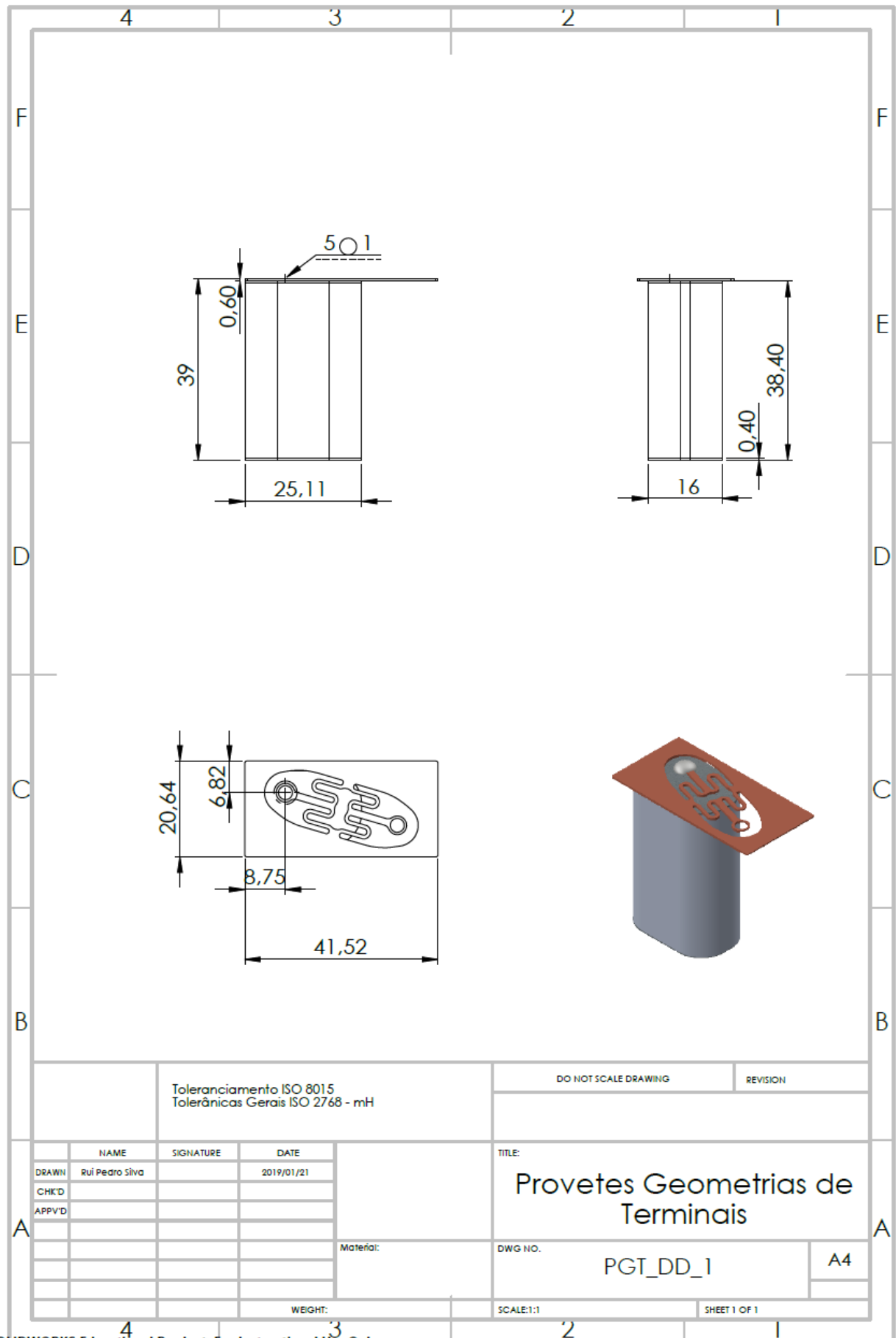
*Conteúdo cedido pela Vishay Eletrónica Portugal, Lda.

ANEXO H: Desenho de Definição da Geometria de Terminal 5



*Conteúdo cedido pela Vishay Eletrónica Portugal, Lda.

ANEXO I: Desenho de Definição do Provete Utilizado para os Ensaio Relativos às Geometrias de Terminais



ANEXO J: Resultados dos Testes Mecânicos - Curvas de Tração (Brasagem Fraca)

- Temperatura = 320 °C; *Reflow time* = 3 s:

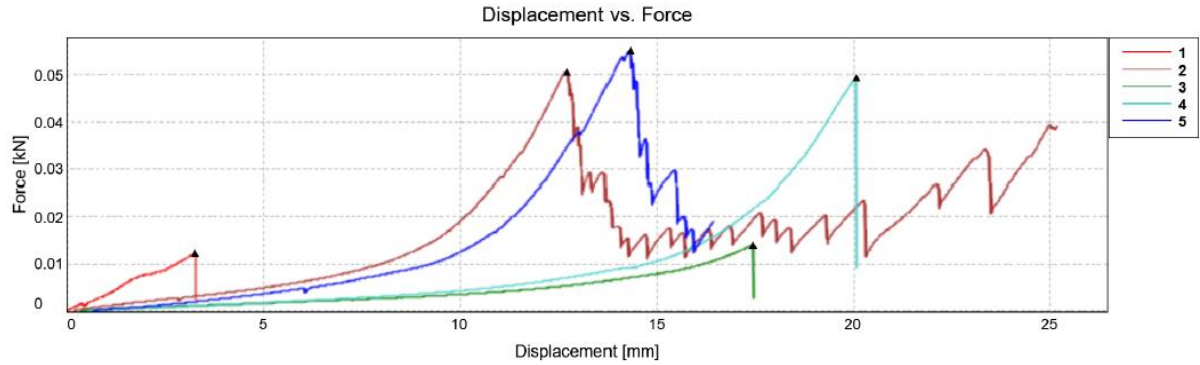


Figura J. 1 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 1 (T=320 °C; t=3 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.

- Temperatura = 320 °C; *Reflow time* = 5 s:

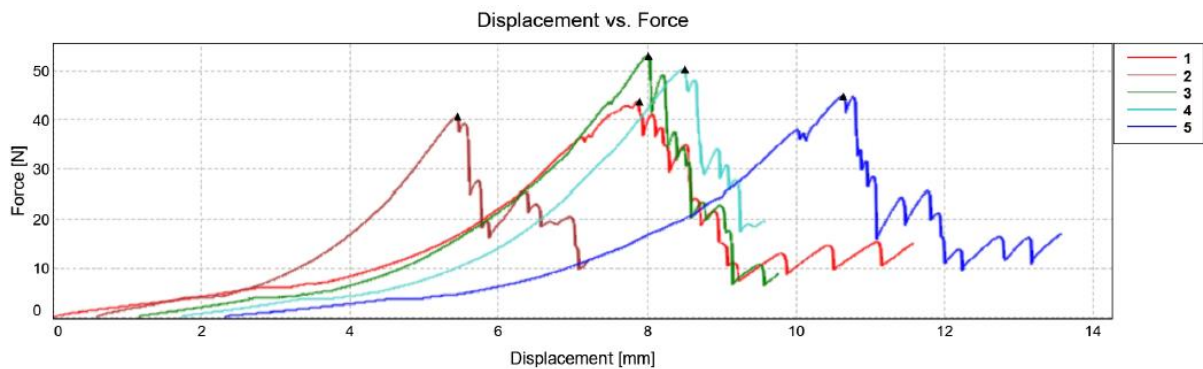


Figura J. 2 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 2 (T=320 °C; t=5 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.

- Temperatura = 360 °C; *Reflow time* = 3 s:

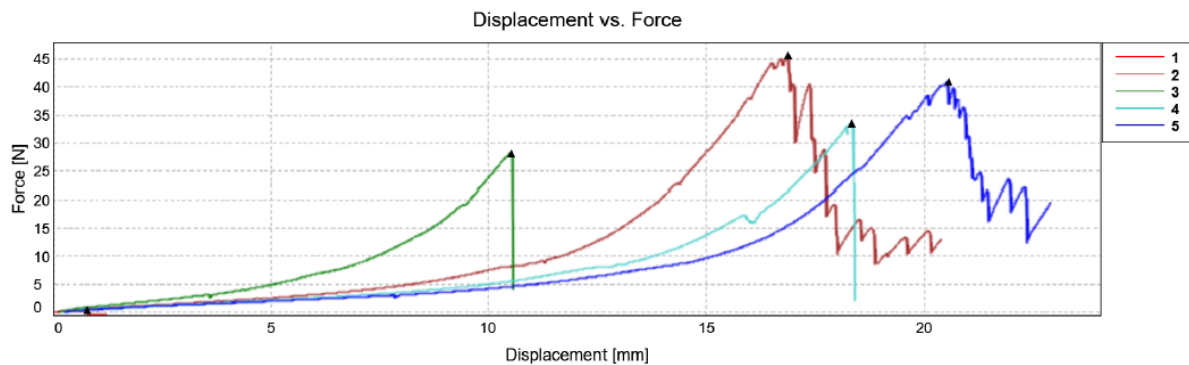


Figura J. 3 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 3 (T=360 °C; t=3 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.

- Temperatura = 360 °C; *Reflow time* = 5 s:

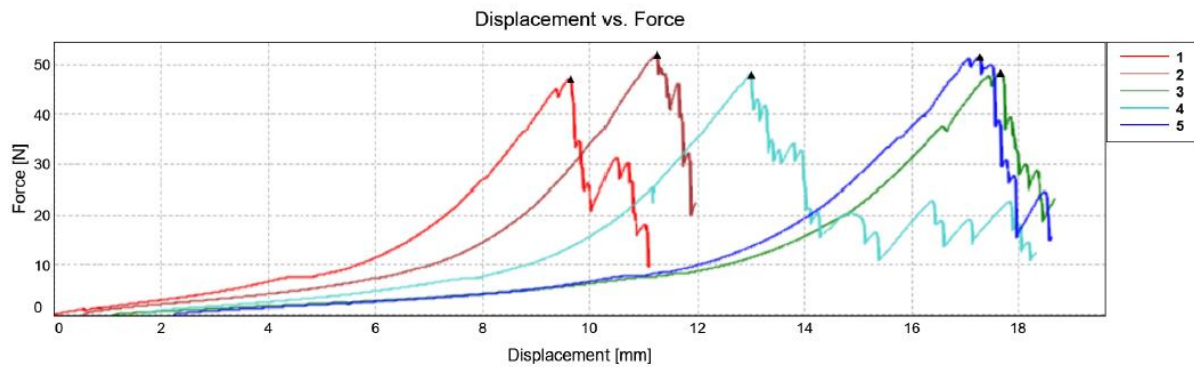


Figura J. 4 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 4 (T=360 °C; t=5 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.

- Temperatura = 400 °C; *Reflow time* = 3 s:

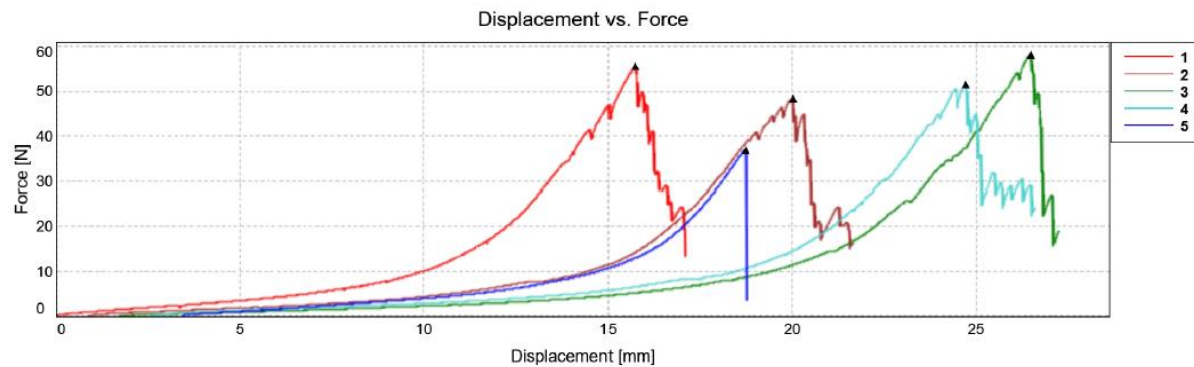


Figura J. 5 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 5 (T=400 °C; t=3 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.

- Temperatura = 400 °C; *Reflow time* = 5 s:

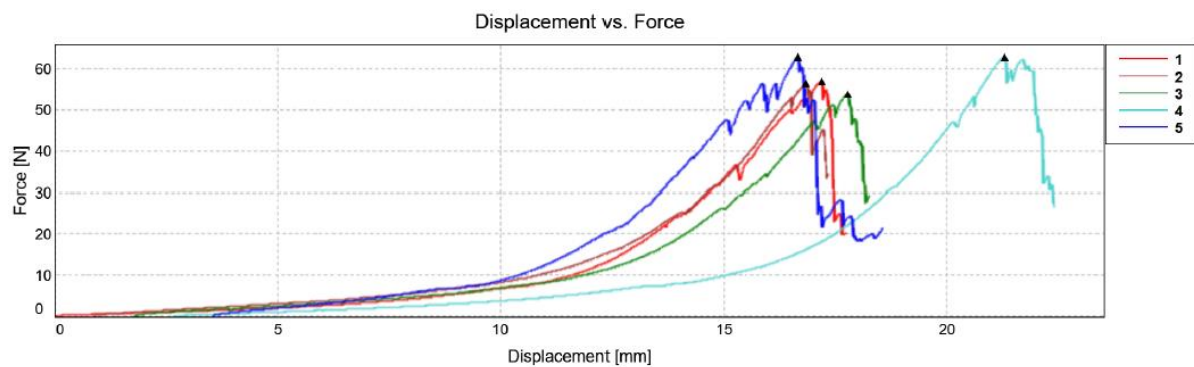


Figura J. 6 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 6 (T=400 °C; t=5 s), pelo Processo de Brasagem Fraca.

ANEXO K: Resultados dos Testes Mecânicos - Curvas de Tração (Soldadura por Pontos)

- Intensidade da Corrente = 56 (ref.); tempo = 4 (ref.):

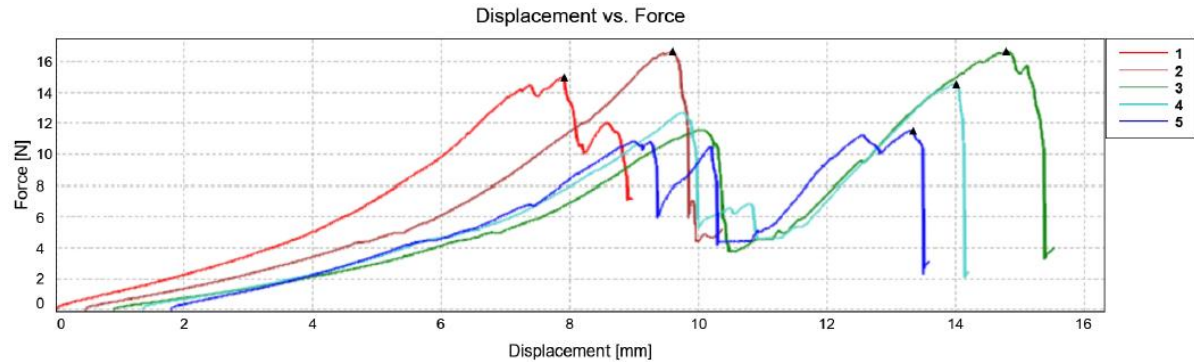


Figura K. 1 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 2 (I=56; t=4), pelo Processo de Soldadura por Pontos.

- Intensidade da Corrente = 64 (ref.); tempo = 3 (ref.):

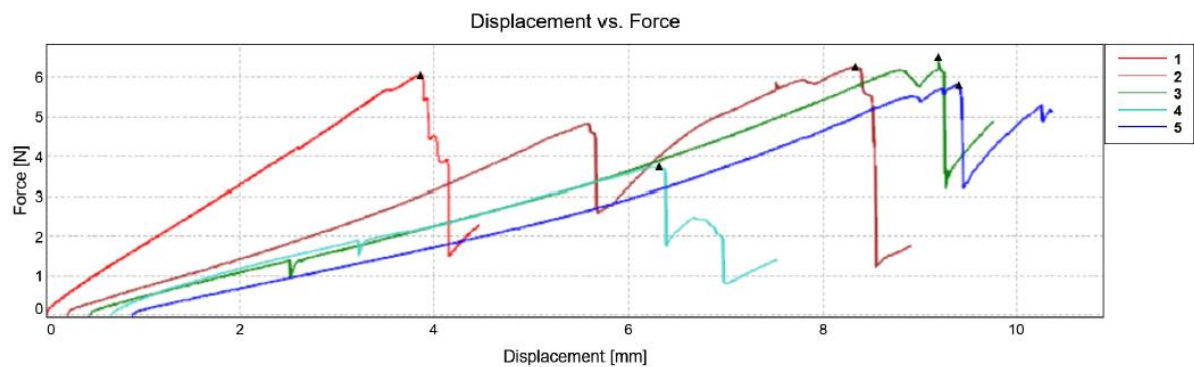


Figura K. 2 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 3 (I=64; t=3), pelo Processo de Soldadura por Pontos.

- Intensidade da Corrente = 64 (ref.); tempo = 4 (ref.):

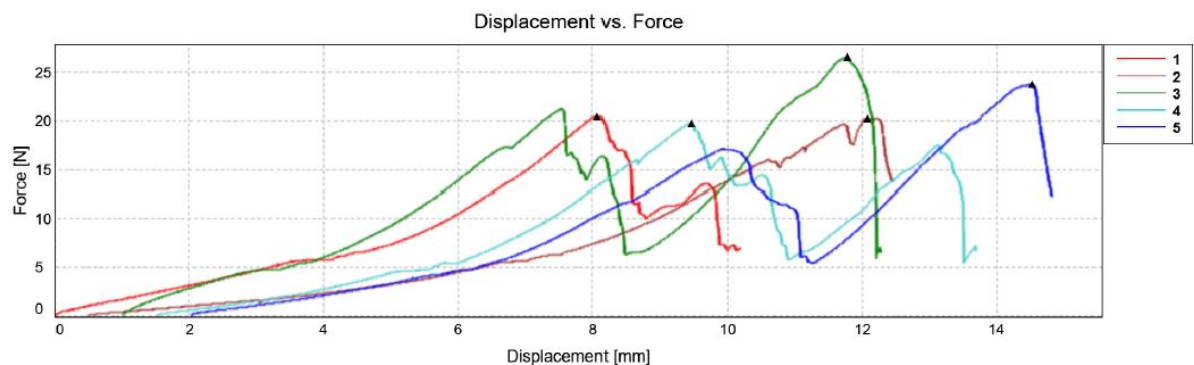


Figura K. 3 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 4 (I=64; t=4), pelo Processo de Soldadura por Pontos.

- Intensidade da Corrente = 72 (ref.); tempo = 3 (ref.):

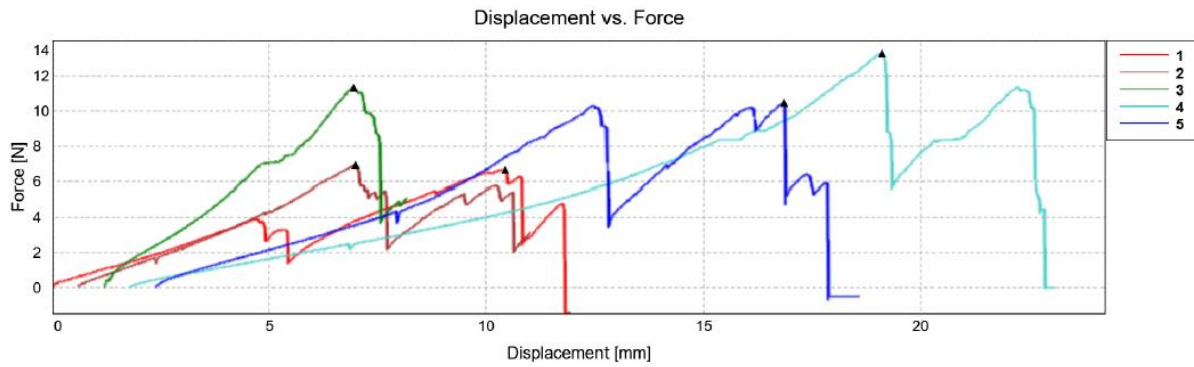


Figura K. 4 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 5 (I=72; t=3), pelo Processo de Soldadura por Pontos.

- Intensidade da Corrente = 72 (ref.); tempo = 4 (ref.):

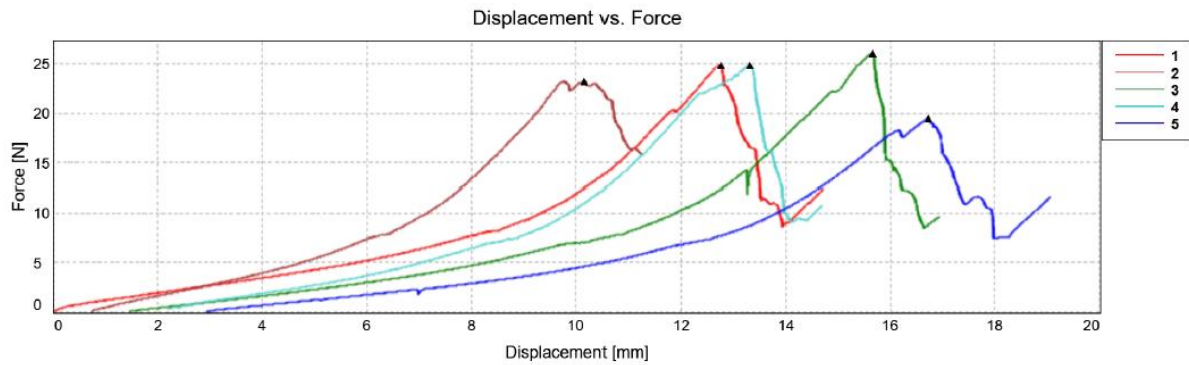


Figura K. 5 - Curvas de Tração Registadas para as Amostras Ligadas Segundo a Combinação de Parâmetros 6 (I=72; t=4), pelo Processo de Soldadura por Pontos.

ANEXO L: Diagramas de Equilíbrio das Ligas Utilizadas na Metalização

- Diagrama de Equilíbrio do Sistema Al-Zn (Primeira Camada de Metalização):

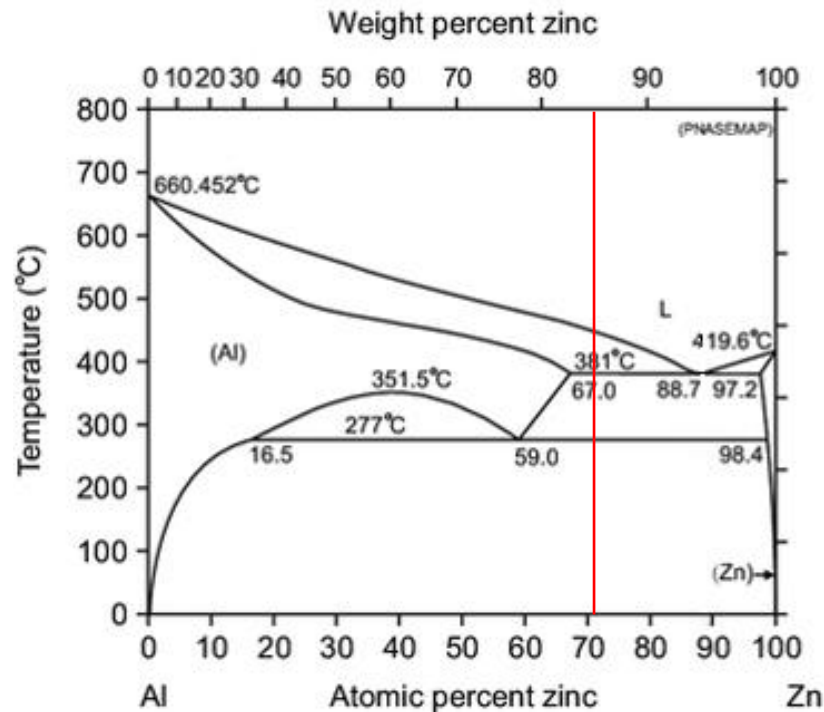


Figura L. 1 - Diagrama de Equilíbrio do Sistema Al-Zn.

- Diagrama de Equilíbrio do Sistema Zn-Sn (Segunda Camada de Metalização):

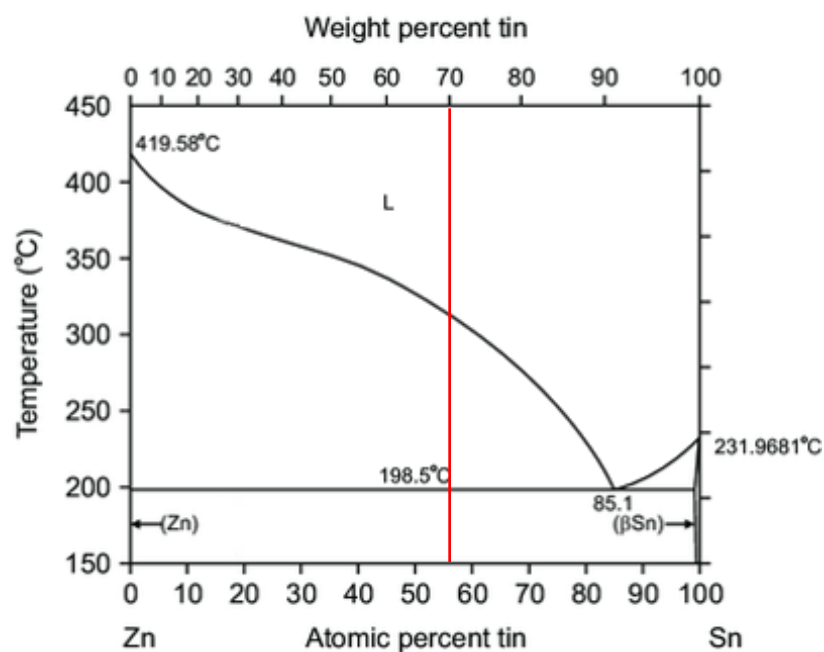


Figura L. 2 - Diagrama de Equilíbrio do Sistema Zn-Sn.

ANEXO M: Ficha Técnica do Fluxo *Alpha Telecore® HF-850*

TECHNICAL BULLETIN

alpha
ASSEMBLY SOLUTIONS™

ALPHA® TELECORE® HF-850

HALOGEN-FREE, HALIDE-FREE, NO-CLEAN, CORED SOLDER WIRE

DESCRIPTION

ALPHA Telecore HF-850 is the fastest wetting and lowest spattering, Halogen Free and Halide Free cored wire offering from **ALPHA**. It performs admirably when benchmarked against Halogen and Halide containing competitive products available in the market and is a viable option to meet environmental requirements.

ALPHA Telecore HF-850's rapid wetting enables its use in drag soldering and minimizes cycle time in robotic and hand soldering applications. Its clear residue allows easy inspection of solder joints and the very low spatter rate ensures board cosmetics and user comfort are maintained. All this translates to a safe and environmentally compliant product that is operator friendly while maintaining high levels of productivity.

FEATURES & BENEFITS


- *Very fast wetting* → *Low Cycle times for component touch-up and manual assembly*
- *Very low flux spatter* → *Safe to use, Operator Friendly, Less Residues on Boards*
- *Good spread characteristics* → *Excellent First Pass Solder Joints. JIS Spread ≥ 80%.*
- *Very low levels of fumes* → *Cleaner Working Environment, Less Extraction Maintenance*
- *Clear non-tacky residue* → *No-Clean Residues, Useful for all Applications*
- *Provides good joint appearance* → *Makes Inspection easy*
- *Halogen and Halide Free* → *Environmental compliance and High Electrical Reliability*

ALPHA Telecore HF-850 is suitable for use in any electronic or industrial no-clean soldering application that specifies compliance to the IPC J-STD-004 ROL0 standard. It is ideal for electronic assemblies used in Automotive, Consumer Electronics, Computer and peripherals, Mobile devices and all types of household appliance applications.

PRODUCT INFORMATION

Standard	Alloy Designation	Melting or Solidus / Liquidus Temp °C	Flux Amount
	InnoLot** Sn90.85/Ag3.8/Cu0.7/Sb1.5/Ni0.15/Bi3.0 (High reliability and high operating temperature)	206 - 218	2.2%
J-STD-006B	SAC305	217 - 221	1.1%, 2.2% & 3.3%
Proprietary	SACX Plus® 0807	217 - 228	2.2% & 3.3%
Proprietary	SACX Plus 0307	217 - 228	2.2% & 3.3%

SM #1097-10 2017-03-24

A MacDermid Performance Solutions Business 
A Platform Specialty Products Company

TECHNICAL BULLETIN

alpha 
ASSEMBLY SOLUTIONS™

ALPHA® TELECORE® HF-850

HALOGEN-FREE, HALIDE-FREE, NO-CLEAN, CORED SOLDER WIRE

Proprietary	SnCX Plus 07	227 – 229	2.2% & 3.3%
J-STD-006B	Sn99.3/Cu0.7	227	2.2% & 3.3%
J-STD-006B	Sn63/Pb37	183	1.1%, 2.2% & 3.3%

* TELECORE HF-850 may also available in other alloys and flux amounts on request.

** All electronic components used with InnoLot solder alloy must be lead-free to eliminate the formation of tin/lead/bismuth intermetallic which has a melting point under 100°C

APPLICATION

A soldered joint is formed by heating the parts to be soldered to a temperature in excess of the melting point of the alloy to be used – in hand soldering this is how a soldering iron is used. By feeding the cored wire onto the parts, the flux is able to flow and remove oxidized metal, while the solder creates a thin inter-metallic bond which becomes the solder joint. Telecore HF-850 is also ideal for robotic soldering applications.

Note the following tips:

- Use a soldering iron tip size and form to suit the operation: small tips for soldering large components may prevent the formation of a joint or slow the process down.
- Select a solder wire diameter to suit both the soldering iron tip and the parts/components to be soldered.
- Soldering iron systems should provide sufficient heat to satisfy the requirements of the points above.
- A typical solder tip temperature would be between 120°C and 160°C above the liquidus temperature of the alloy. The ideal temperature to use is dependent on how thermally demanding the assembly is.
- Cored solder wires can be provided in different grades of alloy so always ensures that you have selected the right grade for the application.
- Do not overheat as this causes an increase in the depth of the inter-metallic layer, which in turn weakens the joint.

If you choose to use a liquid rework flux, NR205 No-Clean Low Residue Flux is recommended to maintain high electrical reliability and halogen-free residues. NR205 is available in Alpha's Write Flux Pens for precision flux application.

CONTINUED ON NEXT PAGE

TECHNICAL BULLETIN



ALPHA® TELECORE® HF-850

HALOGEN-FREE, HALIDE-FREE, NO-CLEAN, CORED SOLDER WIRE

HALOGEN STATUS

ALPHA TELECORE HF-850 is a Halogen Free product and passes the standards listed in the Table below:

Halogen Standards			
Standard	Requirement	Test Method	Status
IEC 612249-2-21	Post Soldering Residues contain < 900 ppm each or total of < 1500 ppm Br or Cl from flame retardant source	TM EN 14582	Pass
JEDEC <i>A Guideline for Defining "Low Halogen" Electronics</i>	Post soldering residues contain < 1000 ppm Br or Cl from flame retardant source		Pass

TECHNICAL DATA

Physical Properties	Typical Values
Rosin Softening Point:	70°C – 80°C
Acid Value:	180 - 200 mg KOH/g flux (IPC-TM-650-2.3.13)
Halide Content:	<500 ppm (IPC-TM-650-2.3.28.1)
Classification:	JIS - 1a3N Grade AA ROLO per IPC J-STD-004A/B

Chemical Reliability Test	Requirements	Results
Copper Mirror Test (JIS)	No complete removal of copper	PASS
Copper Mirror Test (IPC-TM-650- 2.3.32)	No complete removal of copper	PASS
Copper Corrosion Test (JIS)	No evidence of corrosion	PASS
Copper Corrosion Test IPC-TM-650-2.6.15	No evidence of corrosion	PASS

