



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Miguel Ferreira da Silva

**SOLDADURA POR EXPLOSÃO ENTRE LIGAS DE
ALUMÍNIO E COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS
REFORÇADOS COM FIBRAS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, do ramo
de Produção e Projeto, orientada pelos Professores Doutores Altino de Jesus
Roque Loureiro e Ana Paula Bettencourt Martins Amaro
e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de
Ciências e Tecnologia.**

Outubro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Soldadura por explosão entre ligas de alumínio e compósitos termoplásticos reforçados com fibras

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Explosion welding between aluminum alloys and fiber- reinforced thermoplastic composites

Autor

Miguel Ferreira da Silva

Orientadores

Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro

Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Júri

Presidente **Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador **Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro**
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de
Lisboa

Vogais **Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal**
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Coimbra, outubro de 2020

"Whenever you find yourself on the side of the majority, it is time to pause and reflect. "

Mark Twain

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas e instituições, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro, por me ter orientado ao longo de todo o trabalho, por me ter ajudado em todos os momentos e por toda a dedicação neste projeto.

À Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro, pelo cuidado e atenção prestados na revisão deste documento.

Ao Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal, pela boa disposição e pela ajuda prestada em todo o processo prático ao longo destes meses.

Ao Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes, pela disponibilidade durante realização dos ensaios explosivos e na construção das sondas.

Ao Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão, pela ajuda prestada em diversas ocasiões.

Ao Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão, pela disponibilidade em diversas ocasiões.

Ao LEDAP, ao DEM e ao IPN pela disponibilização dos equipamentos e estruturas que foram fundamentais a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, por todo o apoio e amizade que foram fundamentais ao longo destes cinco anos.

Quero também agradecer aos meus pais e irmã por todo o apoio dado ao longo destes cinco anos. Eles para além de me proporcionarem o ensino numa faculdade de excelência, deram-me a oportunidade de viver aqueles que provavelmente foram os melhores anos da minha vida.

Resumo

A utilização de materiais leves com boas propriedades mecânicas tem ganhado cada vez mais importância a nível industrial. Dessa forma, a procura por estruturas híbridas constituídas por alumínio e compósitos reforçados com fibras, tem aumentado de forma significativa nas últimas décadas.

Já existem vários processos que permitem a ligação destes dois materiais tão dissimilares, contudo a maioria das técnicas apresenta várias limitações. Neste trabalho propõem-se a utilização do processo de soldadura por explosão, para ligar uma chapa de alumínio AA6082-T6, a uma chapa de material compósito de matriz poliamida reforçado com fibras de vidro.

Foram realizados quatro ensaios experimentais, onde se variaram parâmetros como, o suporte da chapa base; o tipo de explosivo; o rácio de explosivo e a chapa base e voadora. Em nenhum dos ensaios se obtiveram ligações soldadas. Contudo, em dois dos ensaios explosivos, verificou-se que houve adesão do material polimérico e das fibras de vidro à chapa de alumínio.

Com a realização deste trabalho percebeu-se que parâmetros como o rácio de explosivo e a velocidade de impacto têm bastante influência na ligação entre estes dois tipos de material, visto que a adesão das fibras e do material polimérico ao alumínio, é tanto maior quanto maior forem estes dois parâmetros. Por outro lado, também se verificou que a degradação do compósito aumenta com o aumento do rácio e da velocidade de impacto, pelo que é necessário chegar a um meio termo, de forma a que o material polimérico e as fibras de vidro adiram ao alumínio sem que a degradação seja excessiva. Verificou-se, ainda, que a utilização de uma chapa de proteção por cima da chapa voadora é de extrema importância, e que a utilização de suportes da chapa base com capacidade para absorver o impacto, resultam numa menor degradação das chapas de material compósito.

Palavras-chave: Soldadura por explosão; Estruturas híbridas; Alumínio; Compósito reforçado com fibras de vidro; Materiais leves.

Abstract

The use of lightweight materials with good mechanical properties has gained increasing importance at an industrial level. Thus, the demand for hybrid structures made of aluminium and fiber-reinforced composites has increased significantly in recent decades.

There are already several processes that allow the connection of these two dissimilar materials, however, most techniques have several limitations. In this work we propose the use of the explosion welding process, to connect an aluminium plate AA6082-T6 to a sheet of composite material of polyamide matrix reinforced with glass fibers.

Four experimental tests were carried out, where parameters were varied, such as the base plate support; the type of explosive; the explosive ratio and the base and flying plate. In none of the tests were welded connections obtained. However, in two of the explosive tests, it was found that there was adhesion of the polymeric material and glass fibers to the aluminium plate.

With the realization of this work it was realized that parameters such as the explosive ratio and the impact speed have a lot of influence on the connection between these two types of material. The higher are these two parameters, the higher the adhesion of fibers and polymeric material to aluminium. On the other hand, it was also found that the degradation of the composite increases with the increase in the ratio and impact velocity, so it is necessary to reach a middle ground, so that the polymeric material and the glass fibers adhere to the aluminium without degradation being excessive. It was also found that the use of a protective plate over the flying plate is extremely important, and that the use of base plate supports with the capacity to absorb the impact, results in less degradation of the composite material plates.

Keywords Explosive welding; Hybrid structures; Aluminium; Fiber glass reinforced composite; Light materials.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. Introdução.....	1
2. Caracterização do estado de arte	3
2.1. Ligas de alumínio e materiais compósitos	3
2.1.1. Ligas de alumínio	3
2.1.2. Materiais compósitos.....	4
2.2. Técnicas de ligação metal-polímero	6
2.2.1. Ligações adesivas	7
2.2.2. Fixação mecânica	7
2.2.3. Soldadura - bases tecnológicas	10
2.2.4. Tecnologias híbridas.....	16
2.3. Soldadura por explosão.....	18
2.3.1. Enquadramento Histórico	18
2.3.2. Processo de Soldadura por Explosão.....	18
2.3.3. Parâmetros do Processo	22
3. Procedimento experimental	27
3.1. Nomenclatura.....	27
3.2. Materiais utilizados.....	27
3.3. Parâmetros e Montagem Experimental.....	29
3.4. Velocidade de detonação	31
3.5. Rastreabilidade das amostras	32
3.6. Caracterização das soldaduras	33
3.6.1. Microscopia	33
3.6.2. Ensaio Mecânicos	35
4. Resultados experimentais	37
4.1. Análise dos materiais base	37
4.2. Análise macroscópica	38
4.3. Análise dos parâmetros de processo	39
4.4. Microscopia	41
4.4.1. Microscopia ótica	41
4.4.2. SEM/EDS	46
4.5. Microdureza	51
5. Conclusões.....	55
5.1. Propostas de continuidade de investigação.....	56
Referências bibliográficas	57

APÊNDICE A	65
APÊNDICE B	67
APÊNDICE C	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação de um material compósitos. Adaptado de [8].	5
Figura 2.2. Diagrama de técnicas de união entre materiais metálicos e compósitos reforçados com fibras. Adaptado de [14].	6
Figura 2.3. Tipos de rotura da ligação adesiva: (a) falha de coesão; (b) falha adesiva; (c) falha mista; e (d) falha do aderente. Adaptado de [16].	7
Figura 2.4. Etapas do <i>FricRiveting</i> ; (a) posicionamento das duas placas; (b) aproximação do rebite à parte polimérica; (c) introdução forçada do rebite no polímero; (d) consolidação da junta. Adaptado de [28].	9
Figura 2.5. <i>Injection Clinching Joining</i> ; (a) Aquecimento através de fonte de energia elétrica; (b) Aquecimento por fricção. Adaptado de [24].	10
Figura 2.6. Soldadura por ultrassons. Adaptado de [34].	11
Figura 2.7. Princípio da soldadura por indução. Adaptado de [36].	12
Figura 2.8. Soldadura por fricção. Adaptado de [41].	13
Figura 2.9. Soldadura por resistência. Adaptado de [44].	14
Figura 2.10. Soldadura LAZER de metal a polímero. Adaptado de [45].	15
Figura 2.11. Processo de soldadura por explosão com configuração paralela, em que V_D - velocidade de detonação; V_C - velocidade do ponto de colisão; V_P - velocidade de impacto; STD – <i>stand of distance</i> ; e β - angulo de colisão. Adaptado de [60].	19
Figura 2.12. Variação da interface da soldadura Níquel-Níquel, em função da velocidade: a) $V_C=1365$ m/s; b) $V_C=1790$ m/s; c) $V_C=2800$ m/s. Retirado de [70].	20
Figura 2.13. Interface da ligação Titânio-Aço. Retirado de [70].	20
Figura 2.14. Mecanismo de indentação do jato. Retirado de [50].	21
Figura 2.15. Mecanismo de ondas de tensão. Adaptado de [59].	22
Figura 2.16. Configuração oblíqua do processo de soldadura por explosão. Adaptado de [48].	26
Figura 2.17. Esquematisação em corte da configuração cilíndrica do processo soldadura por explosão, com (a) O explosivo colocado por fora do cilindro de maior diâmetro; (b) O explosivo colocado por dentro do cilindro de menor diâmetro...	26
Figura 3.1. Representação dos pinos encastrados e soldados: (a) pinos de alumínio soldados na chapa voadora do ensaio explosivo 59; (b) pinos de aço encastrados na chapa voadora do ensaio explosivo 61.	30
Figura 3.2. A figura (a) representa a montagem experimental na camara de detonação; e a figura (b) representa a vista em corte da montagem experimental.	30
Figura 3.3. Osciloscópio para medição do tempo de detonação	32

Figura 3.4. Localização das amostras nas chapas provenientes dos ensaios explosivos; (a) EW59; (b) EW60; (c) EW61; e (d) EW62.....	33
Figura 3.5. A figura (a) representa as amostras que foram colocadas em resina epóxi e polidas; (b) representa as amostras que foram cortadas de forma a observar a superfície de contacto.....	34
Figura 4.1. Material base dos ensaios explosivos, (a) microestrutura do material base AA6082-T6; e (b) secção transversal do material compósito, poliamida 6 reforçada com fibra de vidro.....	37
Figura 4.2. Chapa de proteção, voadora e base dos ensaios explosivos: (a) EW59; (b) EW60; e (c) EW61	38
Figura 4.3. Chapa voadora e chapa base do ensaio explosivo EW62.....	39
Figura 4.4. Macrografias na espessura de chapas de alumínio após ensaio: (a) EW59P-L1; (b) EW59V-L1; (c) EW60P-L1; (d) EW60B-L1; (e) EW61P-L1; e (f) EW61V-L1.....	41
Figura 4.5. Chapa voadora do ensaio explosivo 59; (a) Presença de ondas na superfície superior; (b) interface plana na superfície inferior.....	42
Figura 4.6. Chapa base do ensaio explosivo 60 em (a) visualiza-se a interface ondulada e a presença de fibras em EW60B-L1; e (b) visualiza-se um pedaço de compósito que ficou agarrado à chapa de alumínio em EW60B-L1.....	44
Figura 4.7. Chapa EW61V-L1; (a) Presença de ondas na interface da chapa voadora com a chapa de proteção; (b) interface ondulada e presença de fibras na superfície de contacto da chapa voadora com a chapa base.....	45
Figura 4.8. Microestrutura da amostra EW59P-T1.....	46
Figura 4.9. Visualização de fibras de vidro impregnadas no alumínio, (a) amostra EW60B-L1 e (b) amostra EW60B-T1.....	47
Figura 4.10. Análise química à amostra EW60B-L1.....	47
Figura 4.11. Figura correspondente às amostras (a) EW59B-LN1 e (b) EW60V-LN1.....	48
Figura 4.12. Zona de transição da amostra EW59V-F1.....	49
Figura 4.13. Presença de fibras de vidro nas amostras (a) EW60B-F1 e (b) EW61V-F1...	50
Figura 4.14. Superfície da amostra EW59B-F1.....	50
Figura 4.15. Metalografia das superfícies das chapas: (a) EW62V-F1 e (b) EW62B-F1...	51
Figura 4.16. Perfil de microdureza do ensaio explosivo 59.....	52
Figura 4.17. Perfil de microdureza do ensaio explosivo 60.....	53
Figura 4.18. Perfil de microdureza do ensaio explosivo 61.....	54
Figura A.1. Suporte das sondas.....	65
Figura A.2. Caixa para o ensaio explosivo 59.....	65
Figura A.3. Caixa para o ensaio explosivo 60.....	65

Figura A.4. Caixa para o ensaio explosivo 61.....	66
Figura A.5. Caixa para o ensaio explosivo 62.....	66
Figura C.1. Evolução da dureza nas chapas voadoras e base, em função do rácio de explosivo.	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais elementos de liga de alumínio de cada série [6].	4
Tabela 2.2. Principais tratamentos das ligas de alumínio [6].	4
Tabela 3.1. Composição química em %peso das ligas AA5356 e AA6082-T6.	28
Tabela 3.2. Composição química do aço do elétrodo utilizado em espigões.	28
Tabela 3.3. Propriedades mecânicas dos materiais metálicos utilizados.	28
Tabela 3.4. Propriedades do compósito laminado reforçado com fibra de vidro. Adaptado de [97].	29
Tabela 3.5. Parâmetros experimentais dos ensaios explosivos.	31
Tabela 4.1. Resultados experimentais dos ensaios explosivos.	40
Tabela B.1. Ficha técnica EW59	67
Tabela B.2. Ficha técnica EW60	68
Tabela B.3. Ficha técnica EW61	69
Tabela B.4. Ficha técnica EW62	70

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

- β – Angulo de Colisão
- C – Massa do explosivo
- h – Espessura da placa voadora
- M – Massa da placa voadora
- R – Rácio de Explosivo
- Re – Número de Reynolds
- V_C – Velocidade do ponto de Colisão
- V_D – Velocidade de detonação
- V_P – Velocidade de impacto

Siglas

- DEM – Departamento de Engenharia Mecânica
- Eex – Emulação explosiva
- EDS – *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*
- EPS – *Expanded polystyrene*
- EW – *Explosive welding*
- FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- ICJ – *Injection Clinching Joining*
- IPN – Instituto Pedro Nunes
- LEDAP - Laboratório de Energética e Detónica
- MD – Modelo Dinâmico
- MEOV – Microesferas de vidro
- MEOP – Microesferas ocas poliméricas
- MDF - *Medium density fibreboard*
- PA6 – Poliamida 6
- SEM – Scanning Electron Microscopy – Microscopia Eletrónica de Varrimento

STD – *Stand-off distance*

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico as exigências da sociedade moderna foram sendo alteradas. Nesta era digital, os continentes estão cada vez mais interligados, dessa forma, com a necessidade de viagens e exportações de bens ou serviços em todo o mundo, o transporte rápido tornou-se um requisito obrigatório. Com o objetivo de tornar a locomoção mais célere, tem se procurado reduzir cada vez mais o peso dos materiais utilizados na construção de automóveis, barcos aviões, bem como de outros meios de transporte. Para além de possibilitar que os transportes se desloquem mais depressa, a utilização de estruturas leves permite aumentar a eficiência dos veículos, reduzindo a emissão de gases poluentes para a atmosfera e contribuindo para a sustentabilidade do planeta.

A necessidade de utilizar materiais leves e com boas propriedades mecânicas, levou a que se começasse a ligar materiais poliméricos a materiais metálicos. Começaram a ser produzidas estruturas híbridas constituídas por alumínio e compósitos reforçados com fibras, uma vez que são estruturas mecanicamente fortes, leves e confiáveis. Já existem várias técnicas de ligação destes dois materiais, no entanto, técnicas clássicas como a colagem, rebiteagem ou aparafusamento, apresentam várias limitações. As tecnologias de soldadura, em particular no estado sólido, têm aqui uma janela de oportunidade de aplicação. Dessa forma, o processo de soldadura por explosão tem potencial para se tornar uma técnica de ligação destes dois materiais. Para além de ser um processo de soldadura no estado sólido, este processo permite soldar superfícies, o que o torna um processo de excelência.

O processo de soldadura por explosão tem uma vasta gama de aplicações, e caracteriza-se por ser uma técnica que permite ligar materiais com propriedades mecânicas muito diferentes. Contudo, a ligação de dois materiais tão dissimilares como o alumínio e o compósito reforçado com fibras de vidro representa um desafio científico enorme. Assim sendo, com a realização deste trabalho pretende-se estudar pela primeira vez, de acordo com o conhecimento do autor, a ligação destes dois materiais recorrendo a soldadura por explosão. O principal objetivo é começar a quebrar barreiras e analisar a viabilidade deste processo.

O corpo deste relatório está dividido em cinco capítulos, sendo eles introdução, caracterização do estado de arte, procedimento experimental, resultados experimentais e conclusões.

No segundo capítulo, caracterização do estado de arte, são abordados três temas. Primeiro é feita uma análise sumária aos materiais que são utilizados neste trabalho; de seguida, analisam-se as principais técnicas que são atualmente utilizadas para ligar materiais compósitos reforçados com fibras de vidro a alumínio, sendo esboçadas as principais vantagens e desvantagens de cada processo; para finalizar é feita uma análise ao processo de soldadura por explosão, onde são descritas as principais características, mecanismos e variações desta técnica. No capítulo três são detalhados todos os parâmetros experimentais, são identificadas as amostras que vão ser analisadas, e são descritos os ensaios que foram realizados. No capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados experimentais, e para finalizar no capítulo cinco são esboçadas as principais conclusões deste trabalho experimental e indicadas sugestões para trabalhos futuros.

2. CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE ARTE

Neste capítulo são apresentados conceitos que permitem ao leitor uma melhor compreensão do estudo realizado, bem como familiarização com os materiais, técnicas e termos usados.

2.1. Ligas de alumínio e materiais compósitos

2.1.1. Ligas de alumínio

O alumínio e as suas ligas caracterizam-se por ser um metal leve, não magnético, dúctil, não tóxico, com elevada condutividade térmica e elétrica e baixo ponto de fusão. É um metal que oxida muito facilmente, dessa forma, quando exposto ao ar cria uma camada fina de alumina que o protege da corrosão [1][2]. Para além disso, o alumínio é um material que pode ser reciclado pelo que contribui para a sustentabilidade do planeta [3].

As ligas de alumínio são classificadas em função da composição química (alumínio puro, e as ligas de alumínio), do tratamento térmico (ligas que são tratadas termicamente, e ligas que não são tratadas termicamente), e modo de processamento (ligas forjadas, e ligas fundidas) [1]. As ligas de alumínio são identificadas pelo acrónimo AA na norma ASTM B209M, seguido de quatro dígitos. O primeiro deles identifica o principal elemento da liga. Na Tabela 2.1 estão identificados os principais elementos de várias ligas de alumínio. O segundo identifica as modificações que foram feitas na liga, sendo que se este dígito for zero trata-se da liga original. Os últimos dois dígitos são referentes à pureza da liga, por exemplo, a liga AA1145 tem uma pureza de 99,45% [4].

Relativamente ao tratamento, as ligas da série 2XXX, 6XXX e 7XXX são tratáveis termicamente, enquanto as ligas 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX não são tratáveis termicamente [5]. Na Tabela 2.2 são apresentados os diferentes tipos de tratamento que podem ser aplicados às ligas de alumínio.

Tabela 2.1. Principais elementos de liga de alumínio de cada série [6].

Liga	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	5XXX	6XXX	7XXX	8XXX
Principal elemento de liga	Alumínio Comercial puro ($\geq 99\%$)	Cobre	Manganês	Silício	Magnésio	Magnésio e Silício	Zinco	Lítio e outros

Tabela 2.2. Principais tratamentos das ligas de alumínio [6].

Designação	Tratamento
F	- Como fabricado
O	- Recozido e recristalizado
H	1 Encruamento
	2 Encruamento e recozimento parcial
	3 Encruamento e estabilização
	4 Endurecimento a frio seguido de recozimento determinado pela cura da camada de tinta
T	1 Estabilização parcial e envelhecimento parcial
	2 Arrefecimento e recozimento
	3 Solubilização a trabalho frio
	4 Solubilização e envelhecimento natural
	5 Envelhecimento artificial
	6 Solubilização e envelhecimento artificial
	7 Solubilização e estabilização
	8 Solubilização, encruamento e envelhecimento artificial
	9 Solubilização, envelhecimento artificial e encruamento
	10 Arrefecimento, encruamento e envelhecimento artificial

2.1.2. Materiais compósitos

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais materiais não solúveis. Estes, quando conjugados, proporcionam propriedades que não podem ser obtidas

pela soma individual de cada um. Os materiais compósitos são constituídos pela matriz e pelo reforço. A matriz tem a função de manter ligados os vários materiais que constituem o compósito, e o reforço, proporciona a resistência mecânica ao material [7]. Na Figura 2.1 encontra-se representada a matriz e o reforço (fibras) de um material compósito.

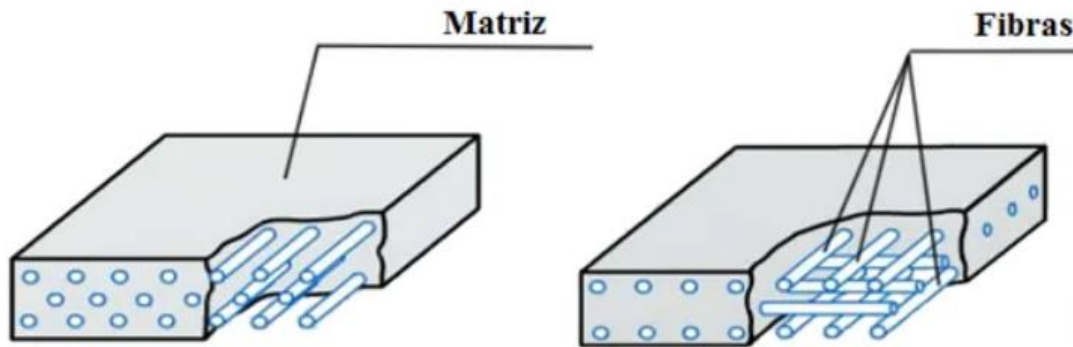


Figura 2.1. Representação de um material compósitos. Adaptado de [8].

As matrizes poliméricas dividem-se em dois grupos: as termoplásticas e as termoendurecíveis. Ao contrário dos termoendurecíveis, os polímeros termoplásticos ficam plásticos quando aquecidos. O aumento da temperatura quebra temporariamente as ligações intermoleculares, o que confere mobilidade às moléculas, e estas ao arrefecerem estabelecem novas ligações químicas adquirindo rigidez. Para além de resistirem a temperaturas mais elevadas do que os polímeros termoendurecíveis, os polímeros termoplásticos geralmente são mais tenazes [7][9].

O material compósito é também classificado em função do reforço, este pode ser em fibras ou em partículas. Atualmente, os compósitos mais relevantes são os compósitos fibrosos que, por sua vez, são classificados em função do número de camadas, do comprimento e orientação das fibras. As fibras podem ser naturais ou sintéticas. As fibras sintéticas são as mais utilizadas atualmente, uma vez que têm melhor comportamento mecânico que as fibras naturais [7]. As fibras de vidro desempenham um papel fundamental a nível industrial, pois estas possuem boas propriedades mecânicas, são leves, fáceis de moldar e têm baixo custo de aquisição [7][10]. As fibras de carbono e de aramida são também fibras muito utilizadas a nível industrial, uma vez que algumas das suas propriedades mecânicas são melhores que as fibras de vidro, o que, associado à baixa densidade, as torna um reforço de excelência. Contudo, estes reforços incrementam o preço dos compósitos.

2.2. Técnicas de ligação metal-polímero

Desde os primórdios da sua existência, o Homem utiliza componentes constituídos por mais do que um material, por exemplo, fazia lanças com cabo em madeira e ponta de pedra, reforçava tijolos de argila com fibras vegetais (palha), entre muitas outras aplicações [11]. A utilização de vários materiais num único componente, permite explorar as melhores propriedades de cada um, “*right material at the right place*” [12], dessa forma, são concebidas estruturas híbridas com propriedades superiores às dos materiais base.

Com o passar dos anos e com a evolução da indústria, as estruturas híbridas constituídas por metais e compósitos reforçados com fibras têm ganhado cada vez mais importância a nível industrial [13]. A Figura 2.2 esquematiza as várias técnicas de ligação destes dois materiais.

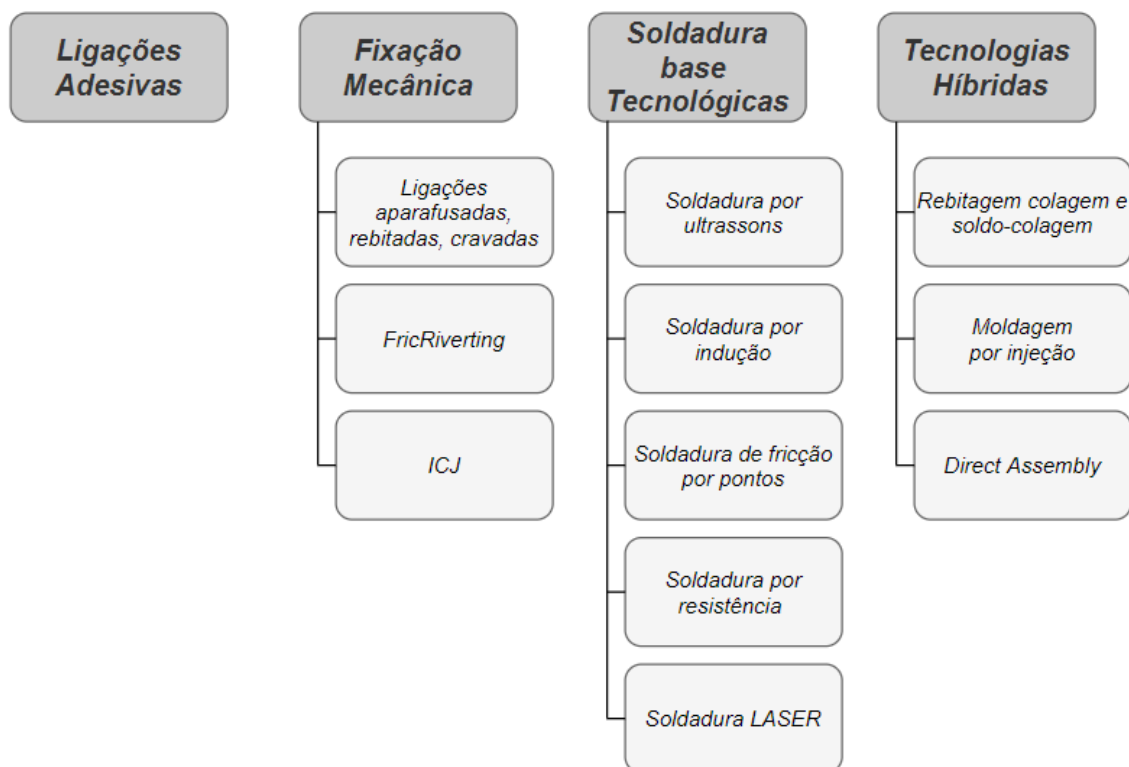


Figura 2.2. Diagrama de técnicas de união entre materiais metálicos e compósitos reforçados com fibras. Adaptado de [14].

2.2.1. Ligações adesivas

A ligação adesiva, ou colada, é uma técnica tradicional que consiste na ligação de dois materiais com recurso a um adesivo, ou a cola. As ligações coladas têm uma vasta gama de utilizações. São utilizadas em componentes para aviões militares e comerciais, na indústria naval, automóvel, entre muitas outras aplicações [15].

Na ligação adesiva os elementos que vão ser colados são designados de aderente, enquanto o elemento que os vai colar é designado de adesivo. Existem várias formas de falha nas ligações coladas, a Figura 2.3 esquematiza as diferentes roturas que podem ocorrer.

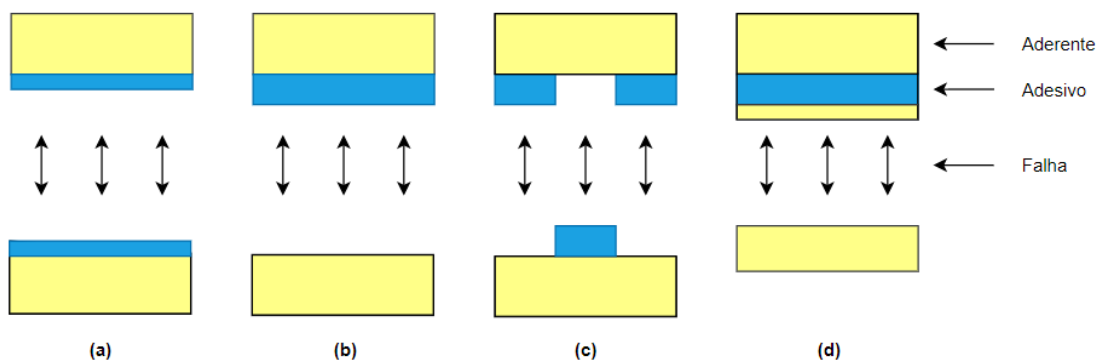


Figura 2.3. Tipos de rotura da ligação adesiva: (a) falha de coesão; (b) falha adesiva; (c) falha mista; e (d) falha do aderente. Adaptado de [16].

As ligações coladas permitem unir materiais diferentes, não requerem furos (o que não danifica as fibras do compósito), apresentam baixo custo de mão de obra quando comparada a outras técnicas de fixação (soldadura, rebitagem entre outras), a carga é distribuída por toda a área colada, o adesivo é leve, e é excelente isolador térmico e elétrico. Por outro lado, a ligação adesiva é fortemente influenciada pela geometria do aderente, pré tratamento da superfície, processo de cura e condições ambientais, tais como a humidade e temperatura e dificuldade na desmontagem [17][18][19].

2.2.2. Fixação mecânica

A união de componentes por fixação mecânica é bastante recorrente nos dias de hoje. Devido a poderem ser utilizadas em aplicações que requerem força e reutilização (permitem que um componente seja desmontado e volte a ser montado) [20], estas estão presentes em praticamente todos os objetos do quotidiano. Desde um simples secador de cabelo até às maiores pontes já construídas, nos navios ou carros, todos estes aparelhos têm elementos que são ligados mecanicamente entre eles (componentes rebitados, aparafusados, entre outros) [21][22].

Relativamente à união de materiais metálicos a materiais poliméricos como compósitos reforçados com fibras, técnicas como o *FricRiverting* e *Injection Clinching Joining* são as técnicas mais utilizadas.

2.2.2.1. Ligações aparafusadas, rebitadas e cravadas

As ligações aparafusadas, rebitadas e, cravadas representam a grande generalidade das ligações mecânicas que estão presentes no dia a dia. No entanto, quando se trata de unir dois materiais diferentes como um metal com um compósito reforçado com fibras, esta pode não ser a solução mais eficaz. De facto, estas técnicas apresentam diversas vantagens, mas também alguns inconvenientes. As principais vantagens são as seguintes [23][24][25]:

- Não necessita de preparação da superfície;
- Permite desmontar e montar os componentes sempre que necessário;
- Elevada resistência mecânica;
- Baixo custo de equipamentos.

Por outro lado, os inconvenientes podem resumir-se no seguinte [23][24][25]:

- Existe a necessidade de criar entalhes ou orifícios, o que origina concentração de tensões nas matrizes poliméricas reforçadas com fibras; este fator é agravado pelo corte de fibras;
- Peso extra devido aos elementos de união;
- Possíveis vazamentos nas juntas.

2.2.2.2. FricRiveting

FricRiveting é uma nova tecnologia com grande potencial para unir materiais metálicos a materiais poliméricos, como os compósitos reforçados com fibras [26]. O processo de união consiste na ancoragem das duas peças através de um rebite. O rebite é aplicado de forma giratória no componente polimérico, devido à velocidade de rotação e à força axial (esta força é necessária para introduzir o rebite dentro do polímero), é gerado calor. Com o aumento da temperatura, o polímero que envolve a ponta do rebite é fundido e a ponta do rebite é plastificada. Nesta fase, devido à presença da força axial, a ponta do rebite é deformada consolidando se assim a união dos dois componentes. [27] [28]. A Figura 2.4 esquematiza este processo.

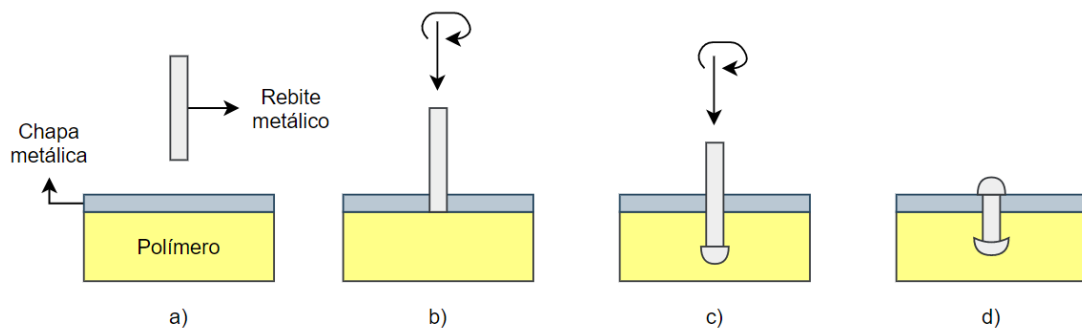


Figura 2.4. Etapas do *FricRiveting*; (a) posicionamento das duas placas; (b) aproximação do rebite à parte polimérica; (c) introdução forçada do rebite no polímero; (d) consolidação da junta. Adaptado de [28].

As principais vantagens desta técnica são [23][29]:

- Processo muito rápido;
- Não é necessário perfurar o material previamente (com exceção de materiais metálicos);
- Ampla gama de materiais que podem ser unidos;
- Não necessita de preparação ou limpeza da superfície;
- Elevado desempenho mecânico.

No entanto apresenta as seguintes limitações [23][29]:

- A desmontagem das peças é complicada;
- A fixação mecânica é descontínua;
- No caso da união metal compósito o metal tem de ser previamente perfurado, o que torna o processo demorado e caro.

2.2.2.3. Injection Clinching Joining

Injection Clinching Joining, ICJ, é um aprimoramento da técnica empilhamento (*stacking*) que serve para unir materiais diferentes. Este processo também consiste na ancoragem dos dois componentes. Inicialmente o componente termoplástico é produzido com uma saliência (normalmente um pino), que encaixa no componente adjacente previamente furado (a cavidade tem a forma do entalhe, deste modo os dois componentes encaixam perfeitamente). Uma fonte de energia e uma força axial são utilizadas para deformar o pino, e, desta forma, consegue-se a união das duas partes [24][30].

Existem duas variantes deste processo. Na primeira é utilizada uma fonte de energia elétrica para aquecer o pino. No entanto eram necessários ciclos de união muito

longos. De forma a encurtar este tempo, surgiu uma nova vertente que se baseia na produção de calor por fricção. A Figura 2.5 esquematiza estas duas variantes do processo.

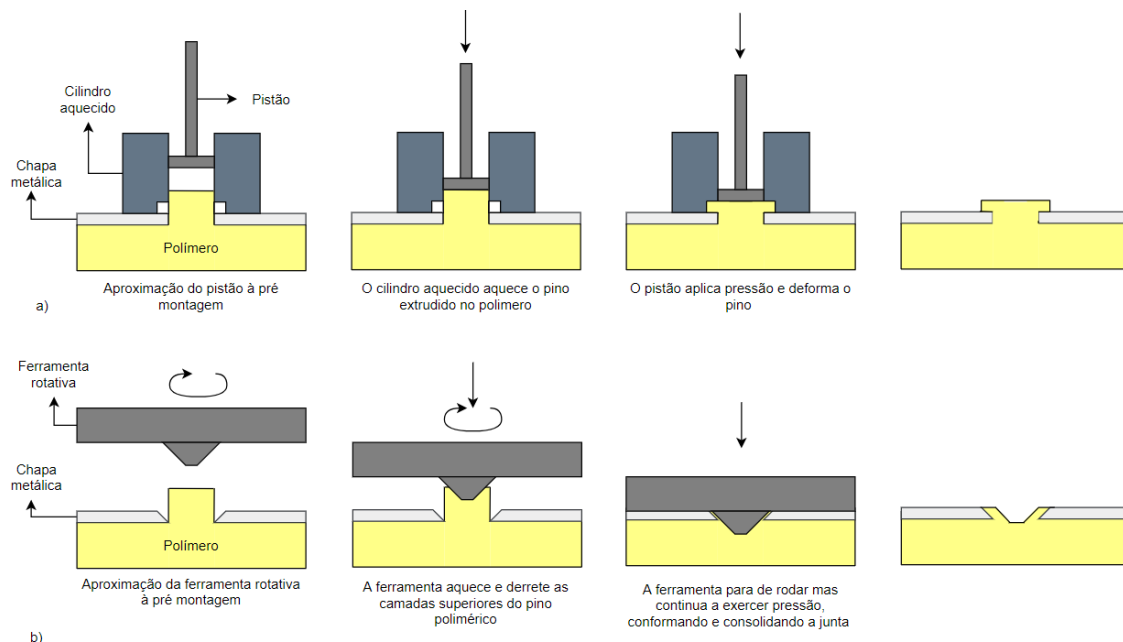


Figura 2.5. Injection Clinching Joining; (a) Aquecimento através de fonte de energia elétrica; (b) Aquecimento por fricção. Adaptado de [24].

Algumas das vantagens deste processo são [24]:

- Processo rápido (quando o calor é gerado por fricção);
- Não necessita de limpeza da superfície;
- Elevado desempenho mecânico.

Contudo, apresenta as seguintes limitações [24]:

- É necessário furar a chapa previamente;
- A concentração de tensões ao redor do perno pode levar à falha prematura das uniões;
- Não é um processo adequado para unir compósitos laminados.

2.2.3. Soldadura - bases tecnológicas

A união de metais a compósitos reforçados com fibras através de soldadura é uma técnica relativamente recente [24]. Atualmente os processos de soldadura são bastante fiáveis, no entanto, quando se trata de soldar plásticos e compósitos, a soldadura só pode ser aplicada em termoplásticos (isto acontece porque o processo de soldadura é baseado na fusão de material e os plásticos termoendurecíveis não podem ser fundidos).

Para o caso de soldadura de polímero a metal, não é possível, na generalidade, aplicar a soldadura convencional por arco elétrico, uma vez que os dois materiais apresentam propriedades físicas muito diferentes [23]. No entanto, existem vários processos de soldadura que permitem unir estes dois materiais [31] e, recentemente, têm sido desenvolvidas novas técnicas como a soldadura por infravermelhos, a extrusão mista forçada e a soldadura por fricção para o mesmo efeito[32][33].

O processo de soldadura por explosão para união de chapas metálicas a compósitos reforçados com fibras é algo novo, e que será experimentado pela primeira vez, segundo o conhecimento do autor, neste trabalho, pelo que este tema será abordado detalhadamente mais à frente.

2.2.3.1. Soldadura por ultrassons

A soldadura por ultrassons une os dois materiais através do calor produzido pelo atrito de fricção entre as duas peças a soldar. O processo consiste na conversão da tensão principal de 50 Hz em uma saída de tensão alternada de alta frequência de 20 kHz. No conversor esta oscilação é transformado em oscilações mecânicas de mesma frequência e amplitude diferente [34][35], Figura 2.6.

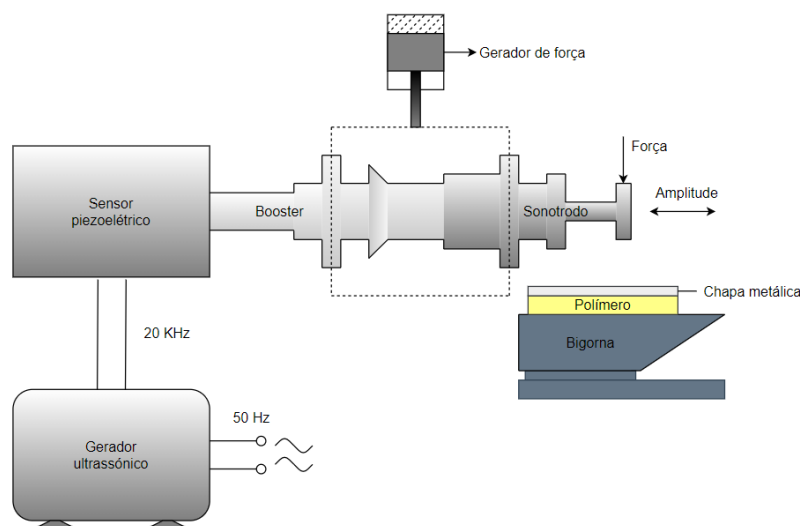


Figura 2.6. Soldadura por ultrassons. Adaptado de [34].

As principais vantagens deste processo são [14] [32]:

- Altas taxas de produção;
- Facilidade de montagem;
- Processo limpo;

- Não requer materiais de adição ou preenchimento;
- Não requer pré-tratamento de superfícies;
- Processo energeticamente eficiente.

Por outro lado, tem as seguintes limitações [14][32]:

- O processo só é fiável para placas de espessura reduzida;
- Ruídos audíveis elevados;
- Custos de aquisição de equipamentos elevados;
- Dificuldade em processos de inspeção e reparação.

2.2.3.2. Soldadura por indução

Esta técnica consiste na utilização de um campo magnético que promove o aquecimento do sistema. A variação do campo magnético induz calor na superfície das duas peças acabando por as fundir, para finalizar, os componentes são transportados para uma prensa onde é exercida pressão de forma a consolidar a união dos dois componentes, conforme se representa de forma esquematizada na Figura 2.7.

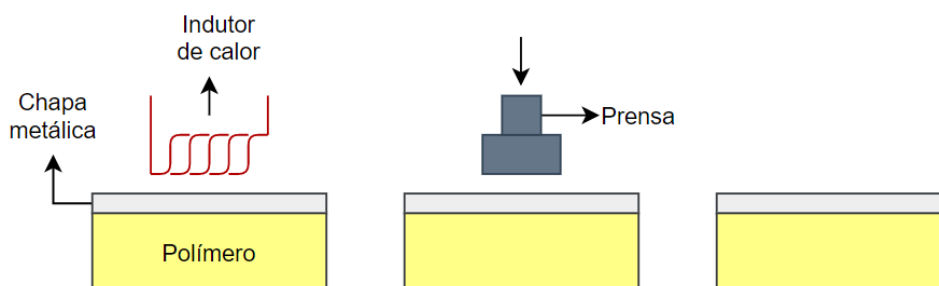


Figura 2.7. Princípio da soldadura por indução. Adaptado de [36].

As principais vantagens do processo são [37] [38]:

- Altas taxas de produção;
- Juntas de elevada resistência mecânica;
- Vedação hermética;
- Controlo preciso do aquecimento;
- Não é necessário material de adição.

No entanto, apresenta as seguintes desvantagens [37][38]:

- Operações de montagem complicadas;
- Concentração de tensões;

- Elevado investimento em máquinas;
- O campo magnético pode aquecer outros elementos da máquina que não tenham o isolamento adequado;
- A utilização de insertos pode diminuir a resistência da junta.

2.2.3.3. Soldadura de fricção por pontos

O processo de soldadura de fricção por pontos foi originalmente desenvolvido para soldar metais [33]. Posteriormente, foram desenvolvidos estudos para união de polímeros [39], e atualmente já se começou a unir compósitos reforçados com fibras a materiais metálicos como o alumínio [24][40]. A ferramenta tem duas mangas, uma rotativa, e um pino rotativo. A manga exterior serve para fixar as peças. Quando a manga interior baixa e o pino recua o material é empurrado para a cavidade deixada pelo pino. Quando o pino baixa e a manga rotativa recua para a posição inicial o material é empurrado para a cavidade deixada pela manga. O processo encontra-se esquematizado na Figura 2.8.

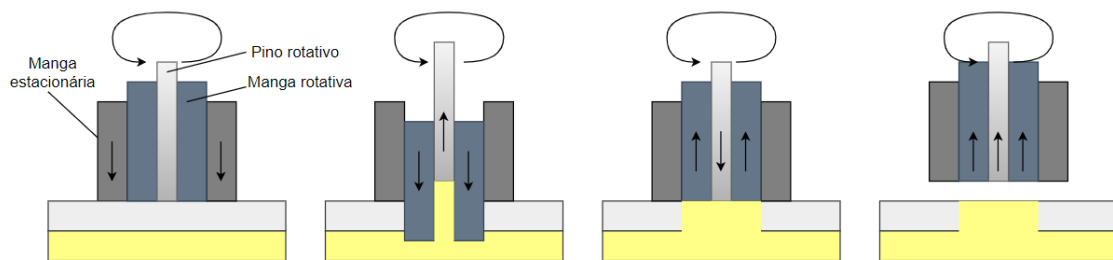


Figura 2.8. Soldadura por fricção. Adaptado de [41]

As principais vantagens deste processo são [33]:

- Baixos custos de produção;
- Concentração de tensões reduzidas;
- Não necessita de preparação das superfícies.

No entanto, apresenta as seguintes desvantagens [33]:

- Projeto da soldadura complexo,
- Estimar e controlar o nível de fibras danificadas devido à rotação da ferramenta;
- Tempo de produção longo.

2.2.3.4. Soldadura por resistência

Esta técnica de soldadura tem uma vasta gama de aplicações. Tem inúmeras vantagens quando se trata de soldadura de compósitos reforçados com fibras [42], uma vez que se o reforço forem fibras de carbono, estas são excelentes condutoras.

O processo de soldadura por resistência é o mesmo tanto para soldadura de compósitos, como para metal e compósitos [42]. A técnica consiste na colocação de um elemento de aquecimento na interface entre as peças a serem unidas, esse elemento é aquecido através da passagem de corrente elétrica, por fim é aplicada pressão sobre as peças a soldar. O elemento resistivo fica a pertencer à junta [43]. A Figura 2.9 representa o processo de soldadura por resistência.

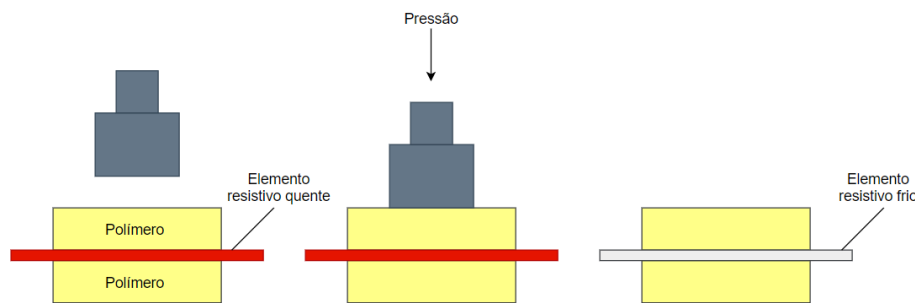


Figura 2.9. Soldadura por resistência. Adaptado de [44]

As principais vantagens deste processo são [32]:

- Processo fácil de trabalhar;
- Baixo risco de contaminação da soldadura;
- Elevada flexibilidade de projeto;
- Baixo investimento na aquisição de equipamento;
- Fácil desmontagem dos elementos soldados devido à possibilidade de reaquecer o elemento de aquecimento retido;
- Possibilidade de unir peças de grandes dimensões.

Por outro lado apresenta as seguintes desvantagens [32]:

- Necessidade de um elemento de aquecimento resistivo;
- Longos tempos de soldadura;
- Limitações na reciclagem do componente devido ao implante (elemento de aquecimento resistivo);
- Formação operacional elevada do operário;

- Processo inadequado para produção em série devido ao elevado tempo de soldadura.

2.2.3.5. Soldadura LASER

A soldadura a LASER surgiu por volta de 1970, no entanto ganhou popularidade nestes últimos anos [33]. Este processo consiste na utilização de um feixe LASER para aquecer e conseqüentemente derreter o material na junta a soldar. No geral, existem duas variações no processo de soldadura a laser para unir materiais metálicos a materiais poliméricos. Na união de materiais poliméricos transparentes, o feixe laser incide no polímero, este passa através do plástico e aquece a superfície metálica. O aumento da temperatura na junta metal/polímero funde o termoplástico que molha a superfície metálica. No caso do material polimérico não ser transparente (como o compósito reforçado com fibras), o laser incide diretamente no metal. O calor é conduzido através da placa metálica até ao compósito levando ao aumento da temperatura da junta [45]. A Figura 2.10 esquematiza estas duas variações.

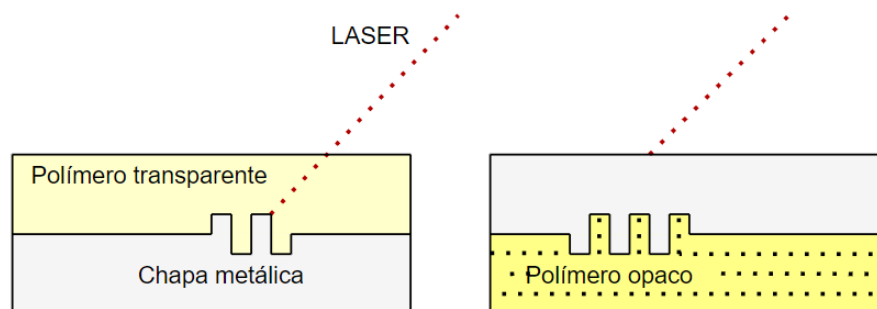


Figura 2.10. Soldadura LAZER de metal a polímero. Adaptado de [45].

O processo de soldadura por laser apresenta as seguintes vantagens [33]:

- Ciclos rápidos de soldadura;
- Tensões residuais relativamente baixas;
- Zona termicamente afetada bem delimitada.

Contudo, apresenta as seguintes desvantagens [33]:

- Custo elevado na aquisição de equipamentos;
- Exige proteção dos operadores;
- Limitações nas geometrias e materiais que podem ser soldados.

2.2.4. Tecnologias híbridas

As tecnologias híbridas consistem na combinação de duas das tecnologias citadas anteriormente. Desta forma conseguem-se juntas de metal a compósito de alto desempenho [14]. As combinações mais frequentes são as que são indicadas na Figura 2.2 e que vão ser discutidas nas próximas secções; no entanto, outras combinações podem ser estabelecidas.

2.2.4.1. Rebitagem-colagem e soldo-colagem

O processo rebitagem-colagem consiste na combinação da ligação colada com a rebitada, enquanto soldo-colagem consiste na combinação da ligação adesiva com a soldadura por pontos ou continua. Nos dois casos, a utilização das duas técnicas em simultâneo permite alcançar uma junção mais robusta. Esta combinação reúne os benefícios das duas técnicas, e minimiza algumas das limitações apresentadas por cada uma individualmente [22].

Algumas das vantagens das técnicas rebitagem-colagem e soldo-colagem são [22]:

- Junta de elevada qualidade;
- Montagem relativamente simples.

No entanto, algumas das desvantagens são [22]:

- O custo inerente a um segundo processo de união;
- Não permite ser desmontada;
- As limitações ambientais do adesivo.

2.2.4.2. Moldagem por injeção

O processo de moldagem por injeção, consiste na colocação de uma placa metálica estampada dentro de um molde de injeção polimérica [46]. O polímero é injetado em torno do perfil envolvendo as bordas da chapa metálica, ou atravessando orifícios previamente feitos [47]. Desta forma, a união das duas peças é obtida por ancoragem após o arrefecimento do polímero.

Algumas das vantagens que esta técnica apresenta são [14][47]:

- Não necessita de operações secundárias;
- Possibilidade de produção de peças complexas;

- Alto grau de automação.

As desvantagens são [14][47]:

- Técnica apropriada apenas para polímeros com boas propriedades de relaxação de tensões;
- Requisitos de projeto podem não permitir a perfuração das peças metálicas impossibilitando a injeção do polímero sobre o molde.

2.2.4.3. Direct Assembly

Este processo consiste na montagem da placa compósita diretamente sobre a placa metálica. A placa metálica contém pequenos orifícios ou reentrâncias que permitem uma melhor união e maior transferência de carga da junta. Este é um processo de elevada qualidade para produzir estruturas híbridas entre materiais metálicos, e compósitos reforçados com fibras de vidro [14]. Os métodos mais comuns, consistem na injeção do material polimérico para um molde sobre a placa metálica previamente colocada. Exemplos destes processos são *vacuum-assisted resin infusion* (infusão de resina assistida por vácuo), *resin transfer molding* (moldagem por transferência de resina) e *prepreg/autoclave assembly* (pré-impregnação/autoclave) [14].

As principais vantagens destes processos são [14][33]:

- Junta de elevada qualidade;
- Processo relativamente automatizado;
- Processo de manuseamento e produção da resina simples;
- Processo ambientalmente limpo.

No entanto apresenta as seguintes limitações [14]:

- Produção do molde é cara;
- Pode não ser fácil de produzir peças complexas devido à fabricação do molde;
- O processo está limitado a resinas de baixa viscosidade;
- No caso do processo de pré-impregnação/autoclave é necessário um elevado investimento inicial.

É importante referir que artigos como [14] consideram a união de componentes por ultrassom como uma técnica *Direct assembly*.

2.3. Soldadura por explosão

2.3.1. Enquadramento Histórico

No decorrer da segunda Guerra mundial, Leroy Carl observou que alguns fragmentos de bombas que explodiam, ficavam ligados a outras superfícies metálicas [48]. Em 1944 publicou “*Brass welds, made by detonation impulse*”, um documento onde descrevia este acontecimento[49][50].

Passados 18 anos, (1962), Philipchuk Vasil e Bois Franklin Le Roy foram os detentores da primeira patente do processo de soldadura resultante da força produzida por explosão [51]. Ainda na década de 60, (1964), mais duas patentes surgiram. A primeira, descrevia os mecanismos de ligação resultantes do processo de soldadura por explosão [52], a segunda foi patenteada pela empresa E. I. du Pont de Nemours & Co, e patenteava a utilização comercial do processo [53].

2.3.2. Processo de Soldadura por Explosão

O processo de soldadura por explosão é considerado, conforme já referido, um processo de soldadura no estado sólido. Este resulta do impacto a alta velocidade de duas chapas, provocado pela detonação controlada e progressiva do explosivo [54][55]. Devido a ser um processo quase instantâneo, o calor produzido é relativamente baixo. Dessa forma, ocorrem apenas pequenos pontos de fusão localizados entre os dois materiais, não sendo considerado um processo de soldadura por fusão [56].

Dadas estas características, o processo de soldadura por explosão, é considerado um processo de excelência para produzir estruturas que métodos convencionais não conseguiriam, devido a possíveis problemas técnicos, como diferentes pontos de fusão entre os materiais [57][58].

Para que exista união entre as chapas, é necessário que a chapa voadora, (chapa que vai ser projetada devido à detonação do explosivo), se encontre a uma determinada distância da chapa base, (chapa estacionária que vai receber o impacto da chapa voadora), sendo essa distância designada de STD – *Stand-of-Distance*. Devido à detonação progressiva do explosivo, a chapa voadora vai atingir a chapa base com uma determinada inclinação, (o ângulo formado entre a chapa voadora e a chapa base é designado de ângulo de colisão - β), com o ponto de colisão a progredir a uma determinada velocidade, velocidade do ponto de

colisão – V_C , [49][59]. A Figura 2.11 representa o processo de soldadura por explosão, e mostra todos os parâmetros mencionados acima.

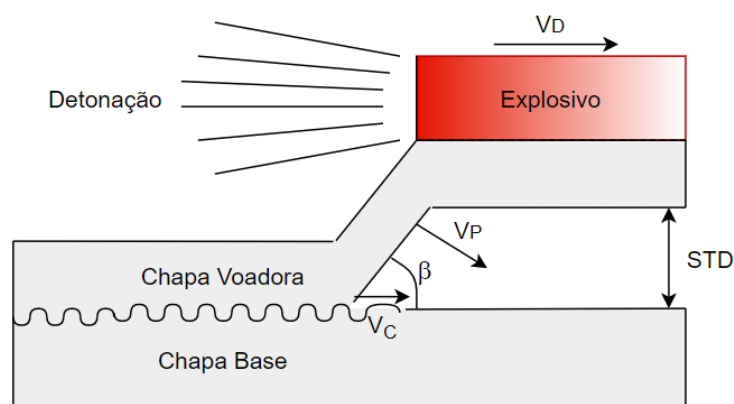


Figura 2.11. Processo de soldadura por explosão com configuração paralela, em que V_D - velocidade de detonação; V_C - velocidade do ponto de colisão; V_P - velocidade de impacto; STD – *stand of distance*; e β - ângulo de colisão. Adaptado de [60].

Quando o ângulo de colisão e a velocidade do ponto de colisão estão na gama necessária para que ocorra união das duas chapas, há a formação de um jato. Esse jato é projetado segundo a direção de detonação, e, é constituído pela camada de óxidos e outras impurezas que os materiais contêm na superfície [61][62], desta forma, a formação do jato é considerada um fenómeno de autolimpeza [49][50]. Com as superfícies limpas e sob o efeito de elevada pressão, ocorre uma soldadura de qualidade [63].

2.3.2.1. Mecanismo de Formação do Jato

Inicialmente, Lavrent'ev e Birkhoff propuseram que o jato de metal poderia ser descrito pelo modelo do fluido ideal [64][65]. Contudo, essa teoria prevê que a velocidade do jato, (no caso de pequenos ângulos de impacto, como na soldadura por explosão), seja o dobro da velocidade no ponto de impacto. Investigações posteriores vieram mostrar que essa previsão nem sempre é válida. Existem determinados regimes de impacto, em que a velocidade do jato é sensivelmente menor que a prevista por esta teoria [66].

Para superar esta limitação foram propostos modelos mecânicos contínuos. No entanto, as altas tensões e temperaturas elevadas que surgem junto ao ponto de impacto, alteram as propriedades físicas e mecânicas dos materiais à medida que se dá a deformação das chapas. Dessa forma estes modelos também podem conduzir a resultados incorretos [64][66].

Recentemente foram propostos modelos moleculares, estes não têm nenhuma das limitações mencionadas acima. Apesar de serem muito fiáveis são aplicados a uma

escala atômica, o que devido à capacidade computacional dos computadores é uma limitação, uma vez que não pode ser aplicado a grandes áreas (tamanho macroscópico) [67] [68]. Contudo, podem ser feitas análises atômicas e extrapoladas para as dimensão pretendidas com relativa fiabilidade [69]

2.3.2.2. Características da interface

A interface das chapas unidas pelo processo de soldadura por explosão revela muito sobre a qualidade da soldadura e os parâmetros utilizados na mesma. Podem ser observados dois tipos de interface, plana Figura 2.12 a), e ondulada Figura 2.12 b) e c). É importante referir que apesar de as condições de união serem bastante severas e violentas, existe um padrão periódico muito regular na formação de ondas [70].

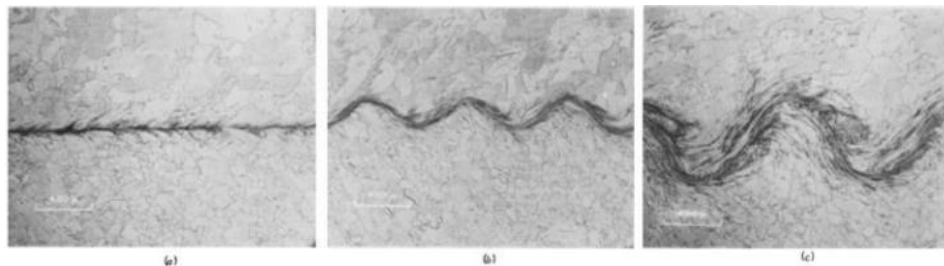


Figura 2.12. Variação da interface da soldadura Níquel-Níquel, em função da velocidade: a) $V_c=1365$ m/s; b) $V_c=1790$ m/s; c) $V_c=2800$ m/s. Retirado de [70].

Cowan e Holtzman, sugeriram que a formação de ondas na zona de ligação, pode ser comparada ao escoamento de um fluido com número de Reynolds superior a 50, quando este atravessa um obstáculo e forma turbilhões [70]. A Figura 2.13 representa este fenómeno.

Alguns autores defendem que a presença de uma interface ondulada representa uma união consistente [71], contudo, também já foram observadas soldaduras de elevada qualidade que continham uma interface plana [59].

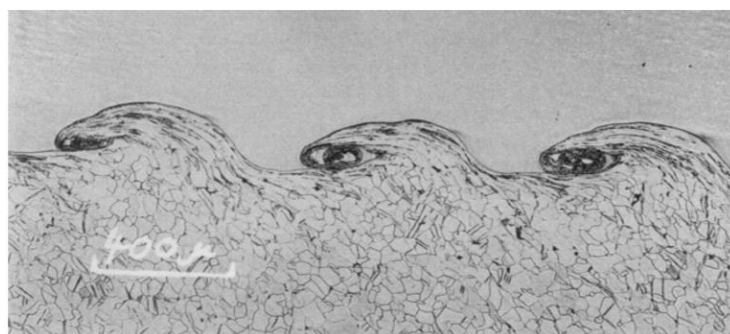


Figura 2.13. Interface da ligação Titânio-Aço. Retirado de [70].

2.3.2.3. Mecanismo de Formação de Ondas

O processo de formação de ondas é quase instantâneo [59], dessa forma é muito complicado de saber o que acontece com exatidão. Não existe consenso científico sobre este fenómeno [50][72], contudo pensa-se que existem quatro mecanismos principais que são responsáveis pela interface ondulada [56] [73].

2.3.2.3.1. Mecanismo de indentação do jato

Neste mecanismo considera-se que o jato, que é formado devido à projeção da chapa voadora na chapa base, é dividido em dois. Uma parte do fluxo move-se para trás do ponto de colisão (jato reentrante) e outra para a frente (jato saliente) [49][50].

O material da chapa voadora vai interagir com uma cavidade formada momentos antes na chapa base, devido à cavidade, o jato formado vai ser desviado para baixo e deformar ainda mais a chapa. Esta deformação vai originar um novo jato a partir do material da chapa base e, este colide com a chapa voadora. Devido à colisão, é formada uma nova depressão na chapa voadora. Este processo vai-se repetindo de forma progressiva, originando sucessivas depressões na chapa base e na chapa voadora de forma alternada. A Figura 2.14 representa este mecanismo.

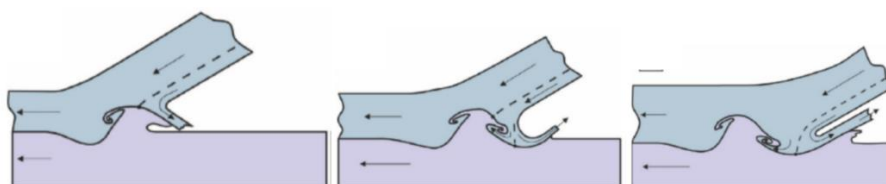


Figura 2.14. Mecanismo de indentação do jato. Retirado de [50].

2.3.2.3.2. Mecanismo de fluxo instável

Neste mecanismo, considera-se que o comportamento das chapas é semelhante ao fenómeno hidrodinâmico que ocorre entre a superfície de contacto de dois fluidos com velocidades horizontais diferentes (conhecido por instabilidade de Kelvin-Helmholz) [73]. Dessa forma, à semelhança do que acontece nos fluidos, a diferença de velocidades entre as superfícies das chapas cria instabilidade e forma ondas [74]. Para que isto aconteça, é necessário atingir uma determinada gama de tensões, sendo que nela o ponto de colisão entrará num regime invíscido [75].

Contudo, mecanismos que têm por base a hidrodinâmica clássica são difíceis de comprovar, uma vez que não existem muitos modelos de formação de ondas para os diversos números de Reynolds – Re [76].

2.3.2.3.3. Mecanismo de formação de vórtices

O mecanismo de formação de vórtices assemelha-se à teoria de von Kármán do escoamento de um fluido viscoso em torno de um obstáculo [73].

Com o aumento da velocidade de colisão, dá se também o aumento da formação de vórtices e, conseqüentemente, da formação de ondas. Inicialmente os vórtices projetam-se apenas para a frente, porém, para velocidades de colisão mais elevadas, projetam-se para trás também.

Em 1974, Reid conclui que de todas as teorias esta era a que se aproximava mais de valores obtidos por resultados experimentais até à data [77].

2.3.2.3.4. Mecanismo de ondas de tensão

Este mecanismo foi proposto por Sobky e Blazynski [78], e considera que as ondas são resultado de sucessivas interferências de ondas de refração projetadas em ambas as chapas [56]. A colisão da chapa voadora na chapa base vai criar uma onda de choque (onda incidente), esta propaga-se até à superfície livre dos materiais submetidos ao impacto. Ao chegar à superfície livre é refletida novamente para a interface. A interação entre as ondas incidentes e as ondas refletidas, deforma periodicamente a interface dos materiais resultando no aparecimento de ondas. A Figura 2.15 representa este mecanismo.

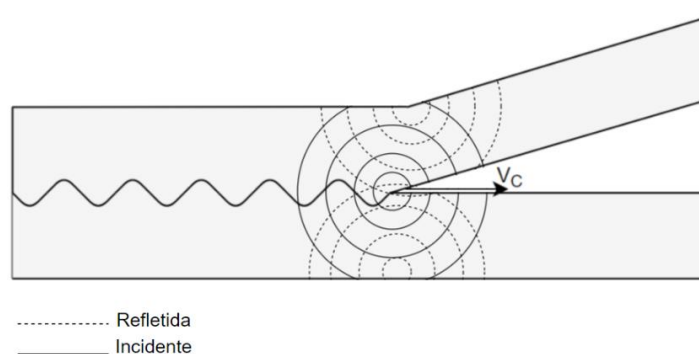


Figura 2.15. Mecanismo de ondas de tensão. Adaptado de [59]

2.3.3. Parâmetros do Processo

A qualidade das ligações depende fortemente dos parâmetros selecionados para o processo. Por essa razão, é necessário fazer um estudo prévio, para que cada um se encontre na gama mais adequada [57]. A sua seleção é baseada nas propriedades mecânicas e físicas de cada um dos materiais, sendo a propagação do som no material, e a densidade duas das mais importantes [71][79][80]. Para facilitar a seleção dos parâmetros, diferentes autores,

propuserem a definição de uma janela de soldabilidade, sendo que esta tem em conta os mesmos, e ajuda a prever se vai haver ligação [81][82][83].

2.3.3.1. Seleção do explosivo

A seleção do explosivo que produzirá a velocidade de detonação – V_D necessária, é o fator mais importante para que se obtenham soldaduras consistentes [57]. Foi demonstrado que a Velocidade do ponto de colisão – V_C , e a Velocidade de impacto – V_P , devem ser menores que a velocidade de propagação do som nas chapas base e voadora. [84]. Dessa forma, a escolha do explosivo bem como a sua constituição, é feita em função da velocidade de detonação – V_D , que normalmente varia entre 1500 m/s e 3500 m/s [59].

Pode considerar-se que existem dois tipos de explosivos, os explosivos fracos e os fortes, cuja diferença é a velocidade de progressão da reação explosiva. Enquanto nos explosivos de fortes existe detonação, (a onda de choque é supersónica), nos fracos tem-se uma deflagração, (a onda de choque é subsónica) [59][85]. Desta forma, para se conseguir obter a velocidade de detonação indicada, são utilizados explosivos fortes.

Dentro dos explosivos fortes existem três categorias, os primários, os secundários e os terciários. Os primários são extremamente sensíveis à fricção, à electrostática, ao calor e ao impacto, sendo utilizados maioritariamente como constituintes de detonadores. Os secundários são muito sensíveis ao calor, um exemplo de um explosivo forte secundário é a dinamite. Por fim existem os terciários, estes necessitam de uma elevada quantidade de energia inicial para detonar, a emulsão explosiva – EEx - e o ANFO são exemplos de explosivos fortes terciários. [59][85].

Devido à baixa sensibilidade do ANFO e da Emulsão, são utilizados explosivos mais sensíveis numa fase inicial. Esses explosivos são denominados de iniciadores, e a sua principal função é iniciar a detonação que posteriormente se propaga para o explosivo. Uma das características da Emulsão é a elevada velocidade de detonação. Uma vez que esta varia na razão direta da densidade, são normalmente utilizados sensibilizantes, (microesferas de vidro – MEOV ou microesferas poliméricas ocas – MOP), estes alteram a densidade da Emulsão, e conseqüentemente a velocidade de detonação [86][87]. Por outro lado, o ANFO é uma mistura de Nitrato de Amónio com uma pequena percentagem de combustível (gasóleo). Trata-se de um explosivo com elevado poder de libertação de energia, que pode atingir velocidades de detonação entre os 2000 m/s e os 3000 m/s [62].

2.3.3.2. Rácio de Explosivo

O Rácio de Explosivo – R, é a razão entre a massa do explosivo - C e a massa da chapa voadora – M, equação (2.1) , esta define a quantidade de explosivo [88].

É um parâmetro que tem elevada importância, uma vez que influencia diretamente a velocidade de detonação, a velocidade de impacto e o ângulo de colisão β [88][89]. O aumento de R leva ao aumento de β e da velocidade de detonação, o que se traduz num aumento da pressão de contacto e, consecutivamente, da deformação plástica das chapas [49][88][89]. Dependendo dos materiais, o aumento de R, pode levar ao desenvolvimento excessivo de temperatura, promovendo a fusão exagerada dos materiais e levando ao aparecimento de compostos intermetálicos no caso de soldaduras dissimilares [90].

$$R = \frac{C}{M}, \quad (2.1)$$

2.3.3.3. Distância entre Placas - STD

Outro dos parâmetros com elevada importância é o Stand-Off-Distance; este representa a distância inicial entre a chapa base e a chapa voadora. O STD depende de vários fatores, no entanto, o que tem mais influência é a espessura da chapa voadora [49][59].

É importante referir que quanto maior o espaçamento entre as chapas, maior será a velocidade com que as duas colidem (uma vez que a chapa voadora tem mais espaço para acelerar até colidir). No entanto, o intervalo de tempo em que os gases de detonação expandem sete vezes a espessura do explosivo, é suficiente para que a placa voadora atinja a velocidade terminal [59][91].

À semelhança do que acontece com o aumento do rácio de explosivo, com o aumento da STD há também o aumento da deformação plástica na interface das chapas, o que potencia o aparecimento de compostos intermetálicos em soldaduras fortemente dissimilares. Estes são prejudiciais, devido às suas más propriedades mecânicas [92].

2.3.3.4. Base da Instalação

A base da instalação desempenha um papel importante no processo de soldadura por explosão. A seleção de uma bigorna adequada resulta numa melhor ligação entre os materiais [69][93].

A utilização de uma bigorna pode reduzir significativamente a influência das ondas de choque, o que contribui para que não exista separação das chapas após a colisão das mesma [69]. Nas soldaduras entre materiais metálicos, a utilização de bigornas de aço é normalmente a escolha mais adequada, uma vez que devido à dureza do material, a bigorna de aço evita que a onda de choque retorne e provoque danos na soldadura [69][94]. Contudo, por vezes a areia é preferida à bigorna de aço, uma vez que esta tem custos mais acessíveis e pode ser nivelada facilmente após cada soldadura [69]. Para além disso, uma cama de areia absorve melhor o impacto que uma base rígida de aço.

2.3.3.5. Possíveis Configurações

Com o evoluir da técnica surgiram várias configurações, que permitem soldar peças com diferentes geometrias e obter soldaduras de qualidade [49][59].

2.3.3.5.1. Configuração Paralela

A configuração paralela ilustrada na Figura 2.11, é a mais usual. Nesta configuração a velocidade do ponto colisão é igual à velocidade de detonação do explosivo. Dessa forma a velocidade da chapa voadora permanece sensivelmente constante ao longo do comprimento de toda a soldadura. Assim sendo, tem bastante aplicabilidade a nível industrial uma vez que permite soldar grandes áreas.

É importante referir que para que exista formação de jato nesta configuração, têm de ser utilizados explosivos com velocidade de detonação inferior à menor velocidade de propagação do som nos materiais a soldar. Dessa forma podem ser utilizados explosivos de baixa velocidade de detonação [48][95].

2.3.3.5.2. Configuração Oblíqua

Na configuração oblíqua, a velocidade do ponto de colisão, V_C , é menor que a velocidade de detonação do explosivo, V_D . Por esse motivo, nesta configuração são normalmente utilizados explosivos cujo a velocidade de detonação é superior à velocidade de propagação do som nos materiais a soldar.

Pode-se observar que devido ao ângulo dinâmico de curvatura (γ), variar no decorrer da explosão, a velocidade de colisão e a velocidade da chapa voadora também variam continuamente. Dessa forma, esta configuração deve apenas ser utilizada quando se

pretende soldar pequenas áreas [48][95]. A Figura 2.16 representa o processo de soldadura por explosão com configuração oblíqua.

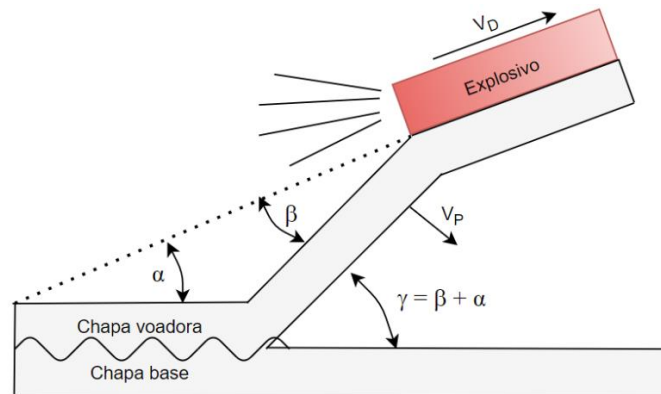


Figura 2.16. Configuração oblíqua do processo de soldadura por explosão. Adaptado de [48].

2.3.3.5.3. Configuração Cilíndrica

Esta configuração é utilizada quando se pretende soldar ou revestir estruturas tubulares. Dentro desta configuração existem duas variantes possíveis na colocação do explosivo. O explosivo pode ser introduzido no interior do tubo de menor diâmetro, D_1 , e à medida que detona provoca a expansão progressiva do tubo e respetiva soldadura. Alternativamente o explosivo pode ser colocado no exterior do tubo de maior diâmetro, D_2 , e a explosão origina a compressão progressiva desse mesmo tubo e respetiva soldadura [49][59][96]. A Figura 2.17 representa as duas variantes desta configuração.

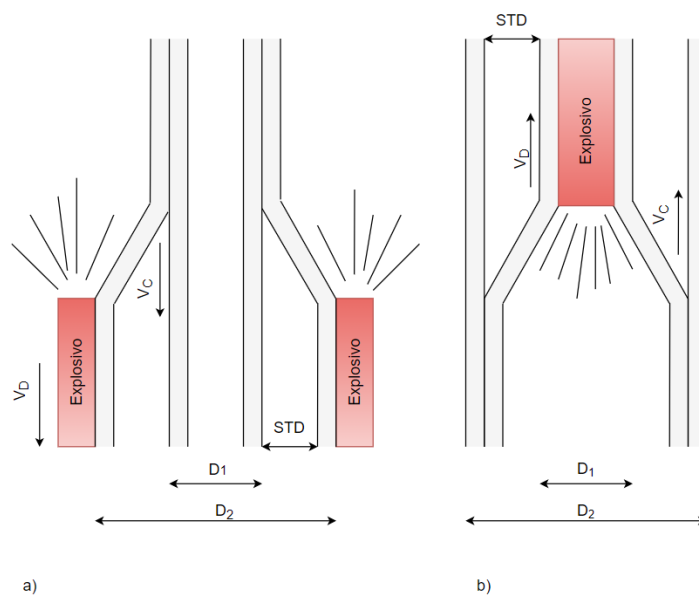


Figura 2.17. Esquematização em corte da configuração cilíndrica do processo soldadura por explosão, com (a) O explosivo colocado por fora do cilindro de maior diâmetro; (b) O explosivo colocado por dentro do cilindro de menor diâmetro.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Nomenclatura

Os ensaios realizados com a finalidade de obter soldaduras foram numerados. Dessa forma, seguido do acrónimo EW (*Explosive Welding*) vem o número que corresponde ao ensaio. Por exemplo EW59, corresponde ao ensaio explosivo número 59. Depois do número pode vir a letra P – Proteção, V – Voadora ou B – Base, que designa a chapa que está a ser referida. Por exemplo EW59V corresponde à chapa voadora utilizada no ensaio 59.

Posteriormente foram retiradas amostras das diferentes chapas de cada ensaio. De forma a identificar cada uma delas, seguido do número do ensaio, e da respetiva sigla que identifica a chapa, segue-se um T – transversal, L - longitudinal ou F – face de contacto entre a chapa voadora e a chapa base, esta identifica a análise que foi feita na mesma. Por exemplo EW59V-L1 refere-se à amostra longitudinal número 1, da chapa voadora cujo ensaio experimental é o número 59. Para finalizar, as amostras longitudinais com o índice N são referentes às amostras partidas em azoto líquido.

3.2. Materiais utilizados

Esta dissertação consiste, conforme já mencionado, no estudo da união de um material metálico a um compósito reforçado com fibras através de soldadura por explosão. Para isso, foi utilizada a liga de alumínio AA6082-T6 como material metálico, e a PA6 (poliamida 6) reforçada com fibras de vidro como material compósito.

De forma a possibilitar ancoragem mecânica entre os dois materiais, foram encastrados nas chapas de alumínio AA6082-T6 pequenos pinos de elétrodo de soldadura de 1,2 mm de diâmetro de AA5356 (ensaios EW59 e EW60) ou de aço, de elétrodo de 1 mm de diâmetro de G2Si (EN 440) (ensaio EW61). A Tabela 3.1e a Tabela 3.2 contêm a composição química em peso das ligas de alumínio e do aço respetivamente, a Tabela 3.3 contêm as propriedades mecânicas dos materiais utilizados

A liga AA6082-T6 foi usado de três maneiras distintas. Foram cortadas chapas voadoras, chapas base e chapas de proteção. A finalidade da chapa de proteção é evitar que o explosivo esteja em contacto direto com a chapa voadora. Uma vez que a detonação poderia degradar a chapa voadora, especialmente nos ensaios em que esta é PA6 reforçado com fibra de vidro. Na Tabela 3.4 encontra-se a composição do PA6 reforçado com fibra de vidro.

Tabela 3.1. Composição química em %peso das ligas AA5356 e AA6082-T6.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA5356	≤0,25	≤0,4	≤0,05	0,15	5	0,13	≤0,1	1,1	Rem.
AA6082-T6	0,7-1,3	0,5	0,1	0,1-0,4	0,6-0,2	0,25	0,2	0,1	Rem.

Tabela 3.2. Composição química do aço do eletrodo utilizado em espigões.

Eléctrodo	C	Si	Mn
G2Si (EN440)	0,1	0,6	1,1

Tabela 3.3. Propriedades mecânicas dos materiais metálicos utilizados.

Material	Limite de elasticidade [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]
AA6082-T6	288	321	8,6
AA5356	120	265	26
G2Si	420	515	26

Tabela 3.4. Propriedades do compósito laminado reforçado com fibra de vidro. Adaptado de [97]

Fibra	Fibra de Vidro
Orientação da fibra	Entrelaçado 2/2
Massa [g/m ²]	600
polímero	Poliamida 6 (PA6)
Porcentagem de fibra em volume [vol.-%]	47
Espessura das camadas [mm]	0,5
Densidade do laminado [g/cm ³]	1,8
Módulo de tração (seco) [GPa]	23
Resistência à tração (seco) [MPa]	390
Alongamento na rotura (seco) [%]	2,2

3.3. Parâmetros e Montagem Experimental

Para a realização dos ensaios experimentais começou por se preparar as caixas de detonação. Pedacos de MDF - *medium density fibreboard* – foram previamente cortados, pelo que foi apenas necessário colar os diferentes componentes.

Foram cortadas chapas de alumínio retangulares com 250 x 70 [mm] e 3 mm de espessura, para chapas voadoras e chapas base. Foram também cortadas chapas de alumínio com 250 x 69 [mm] e 3 mm de espessura para servir de chapa de proteção. Nas chapas EW59V e EW60B foram feitos furos passantes com o diâmetro de 1,2 mm onde foram soldados pinos de alumínio (AA5356) como mostra a Figura 3.1 a). Na chapa EW61V foram feitos furos com diâmetro de 1 mm, e profundidade de 2 mm, onde foram colocados à pressão pinos de aço (G2Si), Figura 3.1 b). A chapa de compósito foi cortada de forma retangular com 250 x 70 [mm] e 2 mm de espessura. Por fim colou-se a chapa voadora à parte inferior da caixa, foram também colocados os respetivos espaçadores que providenciam a STD desejada.

No APÊNDICE A encontram-se os desenhos técnicos das caixas utilizadas nos ensaios explosivos.



Figura 3.1. Representação dos pinos encastrados e soldados: (a) pinos de alumínio soldados na chapa voadora do ensaio explosivo 59; (b) pinos de aço encastrados na chapa voadora do ensaio explosivo 61.

A montagem experimental foi terminada no LEDAP, (Laboratório de Energética e Detónica em Condeixa), onde se colocou uma folha de acetato entre a chapa de proteção e a chapa voadora. O acetato foi colocado de forma a prevenir uma possível soldadura entre estas; posteriormente, foi colocado o explosivo, (na zona inicial foi colocado um explosivo iniciador), e o sistema que permite medir a velocidade de detonação. A Figura 3.2. esquematiza a montagem experimental.

No ensaio EW61 foi utilizado o explosivo ANFO pelo que foi necessário colocar uma chapa de alumínio sobre o explosivo para que este detonasse, e no ensaio EW62 não foi utilizada chapa de proteção significativa. Na Tabela 3.5 encontram-se resumidas as condições dos ensaios experimentais, e no APÊNDICE B encontram-se as fichas técnicas dos ensaios explosivos.

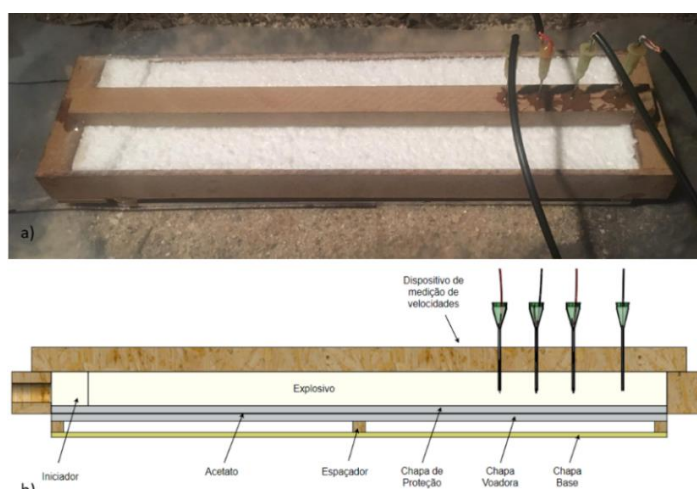


Figura 3.2. A figura (a) representa a montagem experimental na camara de detonação; e a figura (b) representa a vista em corte da montagem experimental.

Tabela 3.5. Parâmetros experimentais dos ensaios explosivos.

	EW59	EW60	EW61	EW62
Chapa de proteção	AA6082-T6	AA6082-T6	AA6082-T6	MDF
Chapa voadora	AA6082-T6	Compósito	AA6082-T6	compósito
Chapa base	Compósito	AA6082-T6	Compósito	Compósito
Base	Cama de areia	Cama de areia	Bigorna de aço	Bigorna de aço
Explosivo (sensibilizante)	EEx (2,5% EPS)	EEx (2,5% EPS)	ANFO	EEx (3% EPS)
Densidade do explosivo [kg/m³]	614,5	614,5	761,3	555,0
Altura do explosivo [mm]	15	15	30	14,5
Rácio	1,03	2,56	2,91	2,33
STD [mm]	4,5	4,5	4,5	4,5

É importante referir que o rácio de explosivo foi calculado tendo apenas em consideração a massa da chapa voadora. Contudo foi utilizada chapa de proteção, pelo que a mesma quantidade de energia (proveniente da detonação) foi utilizada para acelerar uma massa superior à considerada no cálculo.

3.4. Velocidade de detonação

O dispositivo de medição da velocidade de detonação foi preparado no DEM. Foram feitos furos de 1 mm de diâmetro a uma distância previamente definida numa ripa de MDF. Nestes, fixaram-se as sondas de medição de velocidade. Para a fabricação de cada sonda passaram-se dois fios de cobre revestidos por dentro de um tubo de aço, estes foram soldados a fios condutores. Para manter a montagem segura encheu-se a parte superior do tubo com cola epóxi de dois componentes. Na Figura 3.2 é possível visualizar as sondas.

No LEDAP cada uma das sondas foi ligada a um osciloscópio através dos fios condutores. O sistema de funcionamento da sonda é bastante simples, as sondas encontram-se em circuito aberto, os gases de combustão provocados pela detonação do explosivo são condutores, quando estes passam pela sonda curto-circuitam o circuito. A primeira sonda inicia um cronómetro, e à medida que a detonação vai progredindo as restantes param o

mesmo. Com o tempo de progressão dos gases de combustão, e com a distância entre as sondas, calculou-se a velocidade de detonação. Na Figura 3.3 é possível visualizar o osciloscópio de onde foram retirados os tempos de detonação.

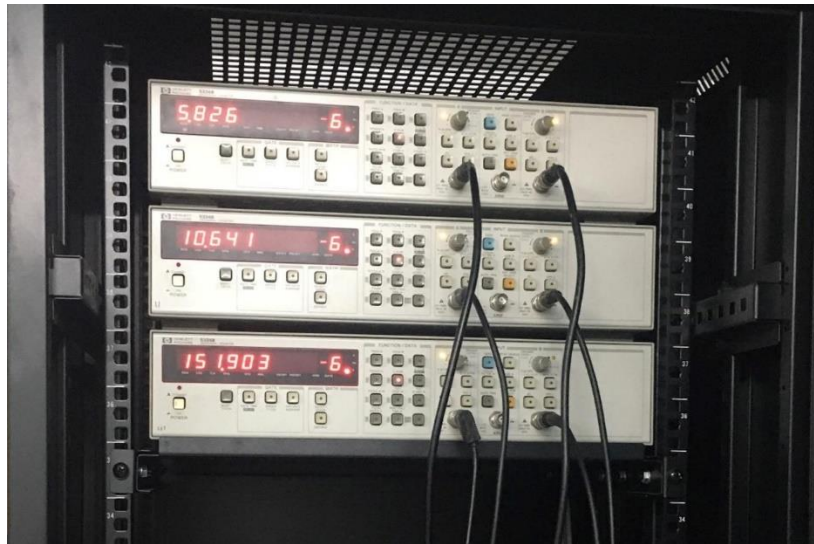


Figura 3.3. Osciloscópio para medição do tempo de detonação

3.5. Rastreabilidade das amostras

Na Figura 3.4 encontram-se localizadas, nas chapas provenientes dos ensaios explosivos, as amostras analisadas. No quadrado que identifica a amostra, a aresta a vermelho localiza a zona observada, quando as quatro arestas estão a vermelho significa que foi observada essa face.

Devido à degradação das amostras, no ensaio explosivo 62 não foi possível determinar o sentido de detonação.

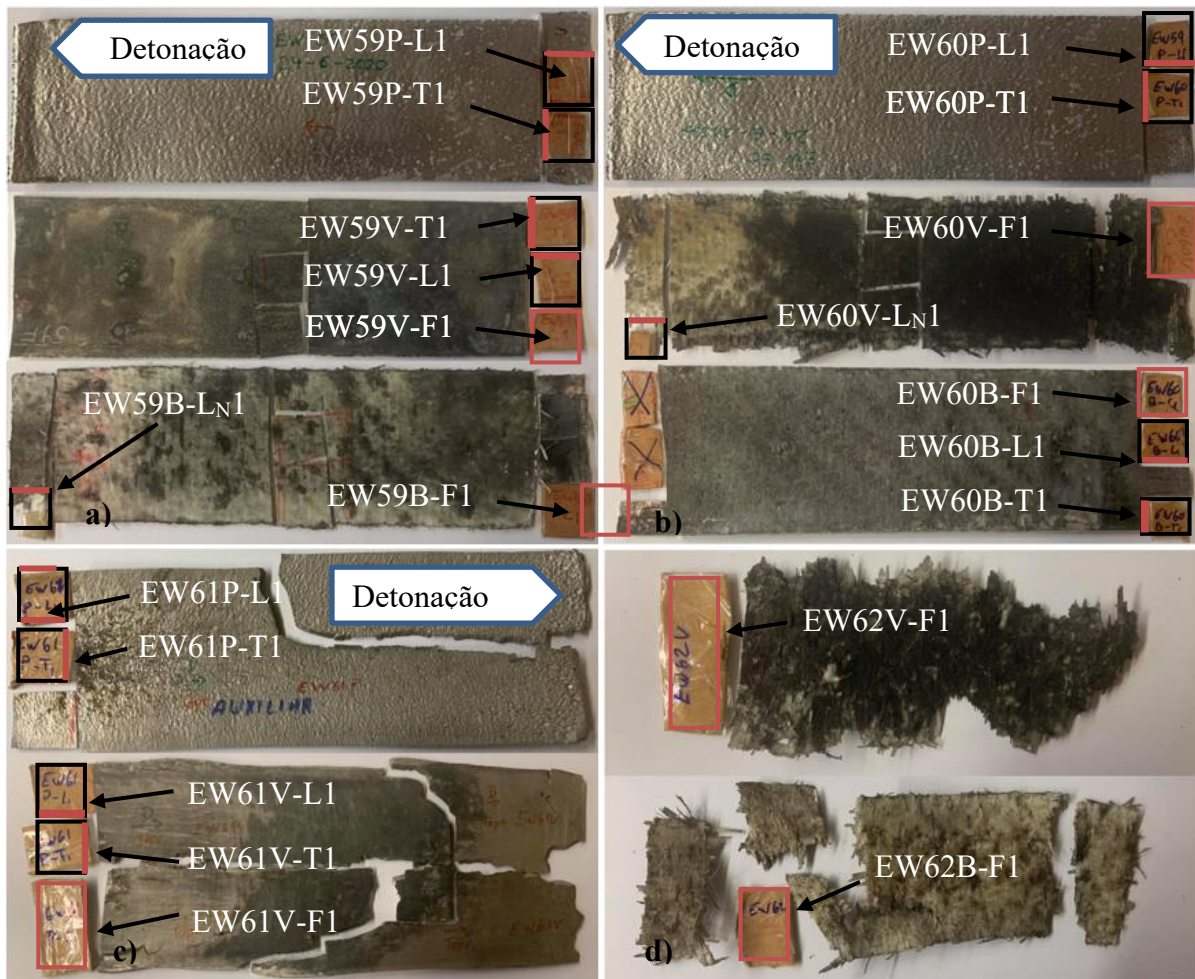


Figura 3.4. Localização das amostras nas chapas provenientes dos ensaios explosivos; (a) EW59; (b) EW60; (c) EW61; e (d) EW62.

3.6. Caracterização das soldaduras

Com o objetivo de compreender os fenômenos que ocorreram durante os ensaios explosivos, foram realizados ensaios metalográficos e ensaios mecânicos. Os ensaios metalográficos permitem observar a microestrutura dos metais, já os ensaios mecânicos permitem uma avaliação das propriedades mecânicas dos materiais.

3.6.1. Microscopia

3.6.1.1. Preparação das amostras

Foram cortadas amostras longitudinais e transversais nas chapas de alumínio, conforme representado na Figura 3.4. Posteriormente, estas foram colocadas em resina epóxida. De forma a obter acabamento polido nas amostras, estas foram passadas em lixas

sucessivamente mais finas (desde a P180 até à P2500), fazendo rotação a 90° entre lixas. Para finalizar as amostras foram passadas em pasta de diamante de 3 µm e 1 µm. Na Figura 3.5 a) é possível visualizar a amostra EW60B-T1 como representação de uma amostra colocada em resina.

Foram também cortadas amostras com a finalidade de observar a superfície de contacto entre a chapa base e a chapa voadora. Na Figura 3.5 b) é possível observar a amostra EW59V-F1 como representação de uma amostra cujo objetivo de estudo foi a face.

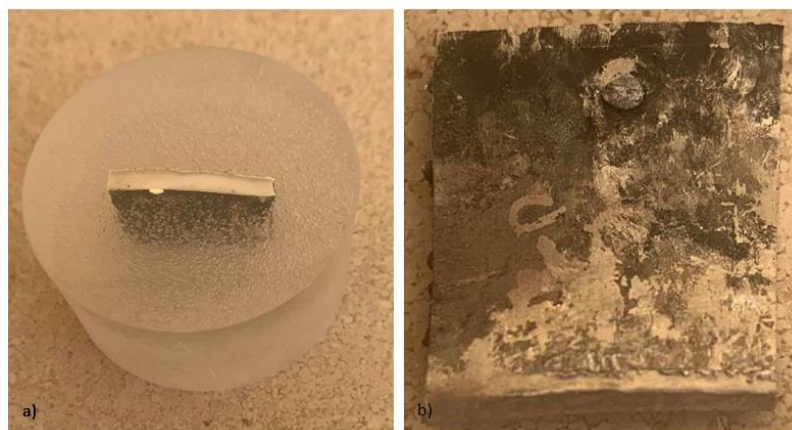


Figura 3.5. A figura (a) representa as amostras que foram colocadas em resina epóxi e polidas; (b) representa as amostras que foram cortadas de forma a observar a superfície de contacto.

3.6.1.2. Ataque químico

Após as amostras serem polidas, foram atacadas quimicamente para evidenciar a microestrutura. Para isso utilizou-se a solução de Weck's, que consiste na dissolução de 1 g de NaOH (hidróxido de sódio) e de 4 g de KMnO_4 (permanganato de potássio) em 100 ml de água destilada [98].

Mergulhou-se a amostra na solução durante 30 segundos, de seguida foi lavada em água corrente e seca. Para finalizar, a amostra foi polida numa solução de sílica coloidal que permite a remoção do queimado excedente.

3.6.1.3. Microscopia ótica

As amostras foram analisadas no laboratório do Grupo de Tecnologia DEMUC. Inicialmente foram observadas no microscópio ótico Zeiss AxioTech, de seguida foram fotografadas no microscópio ótico LEICA DM 400 MLED com câmara incorporada LEICA MC 120 HD.

Foram observadas todas as amostras longitudinais e transversais das chapas de alumínio.

3.6.1.4. SEM/EDS

A microscopia eletrónica de varrimento e a análise da composição química foi feita no microscópio eletrónico ZEISS – GEMINI com software EDS da OXFORD que se encontra no IPN - Instituto Pedro Nunes.

Foram colocadas amostras das chapas de material composto em azoto líquido e fraturadas de seguida. Esperava-se que a fratura destas fosse frágil, dessa forma poderia ser observada e analisada a degradação da secção longitudinal da chapa. Contudo, quando se fraturaram as amostras estas não fraturaram de forma frágil, acabando por se degradar e delaminar em camadas.

Para além das amostras transversais e longitudinais, foram observadas as faces de contacto entre as chapas voadoras e as chapas base. Todas as amostras foram previamente limpas no equipamento de ultrassons BANDELIN SONOREX (35 kHz durante 10 minutos)

Uma vez que o PA6 não é um bom condutor elétrico, as amostras de material composto tiveram de ser previamente revestidas com uma película de ouro para poderem ser observadas. Apesar de revestida, não foi possível observar a amostra EW60V-F1.

3.6.2. Ensaio Mecânicos

3.6.2.1. Microdureza

Para as medições de microdureza foram utilizadas as amostras longitudinais e transversais de alumínio embutidas na resina. Foi utilizado o durómetro SHIMADZU HMV-G, que se encontra no laboratório do GRUPO de Tecnologias. Foi utilizada uma carga de 200 gramas durante 15 segundos num indentedor (pirâmide quadrangular de diamante).

Foram feitas três linhas de indentações através da espessura (uma em cada extremidade da amostra e outra central). Cada linha era composta por cinco ou seis indentações (este número varia devido à deformação que as chapas de alumínio sofreram durante o processo de soldadura), e cada indentação estava separada da seguinte por meio milímetro. Posteriormente foi feita a média de cada linha de indentações, obtendo-se o perfil médio de microdureza de cada amostra.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados.

4.1. Análise dos materiais base

Como se pode verificar na Figura 4.1 a), a liga de alumínio AA6082-T6 apresenta grande dispersão no tamanho de grão; este tem comprimento médio de $47,9 \pm 32,6 \mu\text{m}$, e uma altura média de $21,9 \pm 12,4 \mu\text{m}$ na zona central (será sempre apresentado o valor médio e desvio padrão amostral); e comprimento médio de $45,2 \pm 21,3 \mu\text{m}$, e uma altura média de $19,9 \pm 8,2 \mu\text{m}$ nas extremidades. Estas medidas apresentam grande dispersão justamente devido à grande variabilidade de grão, como é visível na Figura 4.1 a). É possível observar vários precipitados, contudo estes não são precipitados endurecedores. O que se pode notar são impurezas que precipitaram durante o processo de vazamento do alumínio e respetiva solidificação. Observa-se também o alongamento dos grãos no sentido de laminagem. A dureza média da chapa de alumínio é $118,3 \text{Hv}_{0,2}$, este valor foi retirado de ensaios realizados no DEMUC.

Relativamente ao material compósito, verifica-se na Figura 4.1 b) que as fibras de vidro estão agrupadas em camadas e envolvidas em material polimérico. As camadas encontram-se com orientação longitudinal e transversal (90°), alternadamente.

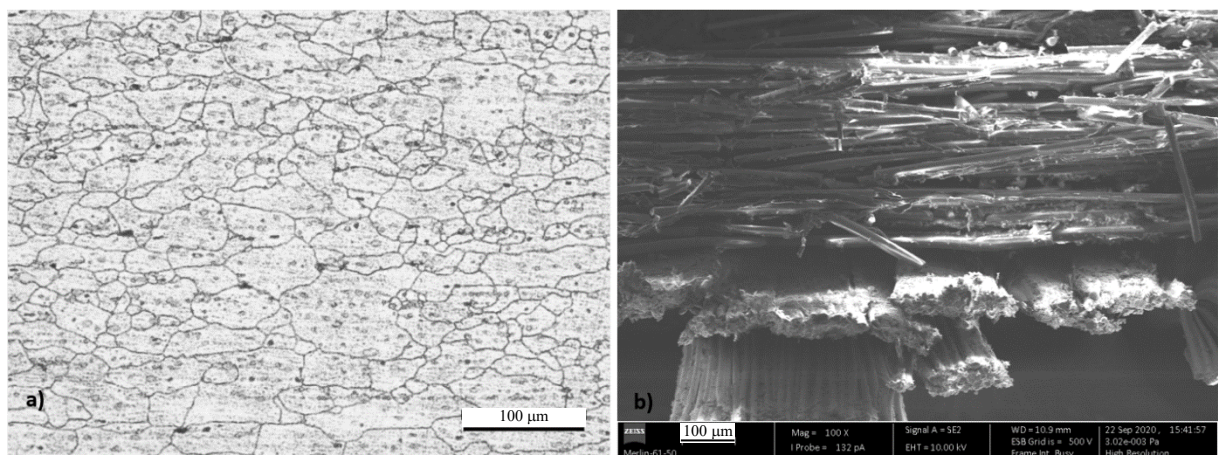


Figura 4.1. Material base dos ensaios explosivos, (a) microestrutura do material base AA6082-T6; e (b) secção transversal do material compósito, poliamida 6 reforçada com fibra de vidro.

4.2. Análise macroscópica

Na Figura 4.2 a) podem ser observadas as chapas resultantes do ensaio explosivo EW59. Verifica-se que apesar de não haver união entre a chapa voadora e a chapa base estas encontram-se pouco afetadas. A chapa de proteção e a chapa voadora (chapas de AA6082-T6) apresentam ligeiras deformações provenientes do impacto. A chapa base (chapa de material compósito) ostenta alguma degradação devido às temperaturas e pressão atingidas. É possível observar marcas dos pinos (provenientes da chapa voadora) na chapa base, e foram também encontrados pinos encastrados na chapa de material compósito.

Na Figura 4.2 b) encontram-se as chapas provenientes do ensaio explosivo EW60. À semelhança do ensaio anterior, as chapas de alumínio (chapa de proteção e chapa base), apesar de apresentarem ligeiras deformações, encontram-se relativamente em bom estado. No entanto a chapa voadora (chapa de material compósito) encontra-se fissurada na zona inicial; esta fissura poderá ter sido causada pelo explosivo iniciador.

O ensaio explosivo EW61 desintegrou por completo a chapa base (chapa compósita), daí ela não aparecer na Figura 4.2 c). As chapas voadora e de proteção (chapas de alumínio) ficaram muito danificadas. Na chapa voadora, a fissura que se propagou longitudinalmente no centro da chapa alastrou através dos furos abertos previamente para fixar os pinos, as restantes surgem em locais aleatórios. A chapa voadora do ensaio explosivo 59 e a chapa base do ensaio explosivo 60 também tinham pinos, contudo estes foram soldados, o que não as fragilizou de forma tão significativa.

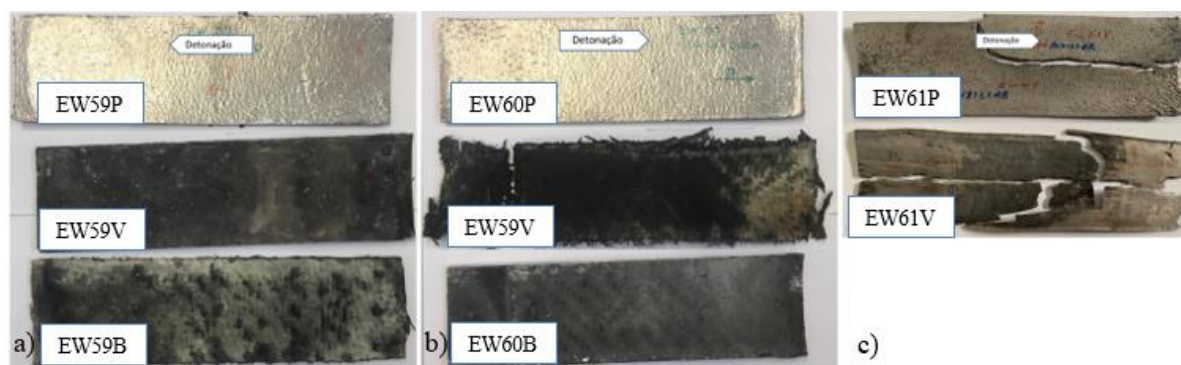


Figura 4.2. Chapa de proteção, voadora e base dos ensaios explosivos: (a) EW59; (b) EW60; e (c) EW61

No ensaio explosivo EW62 nenhuma das chapas ficou intacta. Para além disso, a chapa voadora ficou bastante queimada na superfície superior (superfície mais próxima do explosivo). Na chapa base, a matriz polimérica não ficou tão queimada como na chapa

anterior, o que sugere que a chapa voadora atuou como chapa de proteção à chapa base. Na Figura 4.3 pode-se observar o dano nestas chapas. Esta soldadura foi realizada sem chapa de proteção significativa, (placa de proteção em MDF).



Figura 4.3. Chapa voadora e chapa base do ensaio explosivo EW62.

A utilização da cama de areia (EW59 e EW60) ao invés de uma bigorna de aço (EW61 e EW62), resultou numa menor degradação das chapas. Por outro lado, a utilização de ANFO (EW61), ao invés da emulsão explosiva (EW59, EW60 e EW62), danifica de forma muito mais significativa as chapas. Além disso, no ensaio experimental EW62 não foi utilizada uma chapa de proteção de alumínio, o que resultou na degradação das chapas voadora e base. Dessa forma, verifica-se que a utilização de chapa de proteção de alumínio é de extrema importância.

4.3. Análise dos parâmetros de processo

Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros resultantes de cada ensaio explosivo. A velocidade de detonação apresentada é a média das três velocidades obtidas em cada ensaio explosivo (velocidades calculadas através do tempo de propagação dos gases de detonação entre sondas). No ensaio explosivo EW61 não foi obtida a velocidade de detonação, pelo que todos os parâmetros dependentes desta não foram calculados.

Como se pode observar na Tabela 4.1, no ensaio EW59 é onde ocorre a maior velocidade de detonação, contudo, é onde se utiliza o menor rácio de explosivo, se obtém a menor velocidade de impacto e o menor ângulo β . Isto deve-se ao valor da massa da chapa voadora (chapa em alumínio) ser superior ao das chapas voadoras dos restantes ensaios (com

exceção do EW61 em que esta também é de alumínio). Visto que estes parâmetros estão diretamente relacionados com a massa desta chapa.

No ensaio EW60 foi utilizada a mesma massa de explosivo do ensaio 59, contudo devido à chapa voadora ser de material compósito (chapa mais leve que as chapas de alumínio), o rácio de explosivo é muito mais elevado do que no ensaio anterior. O mesmo se verifica com o parâmetro β e com a velocidade de impacto, que são superiores aos do ensaio explosivo 59.

Apesar do rácio de explosivo ser um dado definido antes dos ensaios experimentais, através deste pode se observar que no ensaio EW61 foi utilizada muito mais massa de explosivo do que nos demais ensaios, uma vez que neste é utilizada uma chapa voadora em alumínio (peso semelhante à do ensaio EW59) e é apresentado o rácio de explosivo mais elevado dos quatro ensaios.

No ensaio explosivo 62 ambas as chapas, voadora e base, são de material compósito. À semelhança do ensaio 60, devido à chapa voadora ser leve, o valor do rácio de explosivo, velocidade de projeção e ângulo β são elevados.

Tabela 4.1. Resultados experimentais dos ensaios explosivos.

	R	V_D [m/s]	V_P [m/s]	β [°]
EW59	1,03	3000,59	676,90	12,95
EW60	2,56	2828,85	1067,41	21,75
EW61	2,91	-	-	-
EW62	2,33	2658,30	962,21	20,85

Verifica-se que a velocidade de impacto, o rácio de explosivo e o ângulo β estão diretamente relacionados com a degradação das chapas, sendo esta maior quanto maior forem os parâmetros acima mencionados. Como se pode verificar no ensaio explosivo 59, há pouca degradação, no entanto o rácio de explosivo, a velocidade de impacto e o ângulo β são baixos. Nos restantes ensaios estes parâmetros são mais elevados e a degradação das chapas é maior. É importante referir que no ensaio explosivo 62 há muita degradação das chapas de material compósito, contudo a conjugação da elevada velocidade de impacto, do

elevado ângulo β com a ausência de chapa de proteção em alumínio e um apoio rígido da chapa base, proporcionam condições severas que justificam esta destruição.

4.4. Microscopia

4.4.1. Microscopia ótica

Na Figura 4.4 estão representadas as chapas de proteção, voadoras e base, dos ensaios explosivos EW59, EW60 e EW61, nas suas posições naturais. As chapas de material compósito não foram colocadas em resina, pois não foram observadas no microscópio ótico.

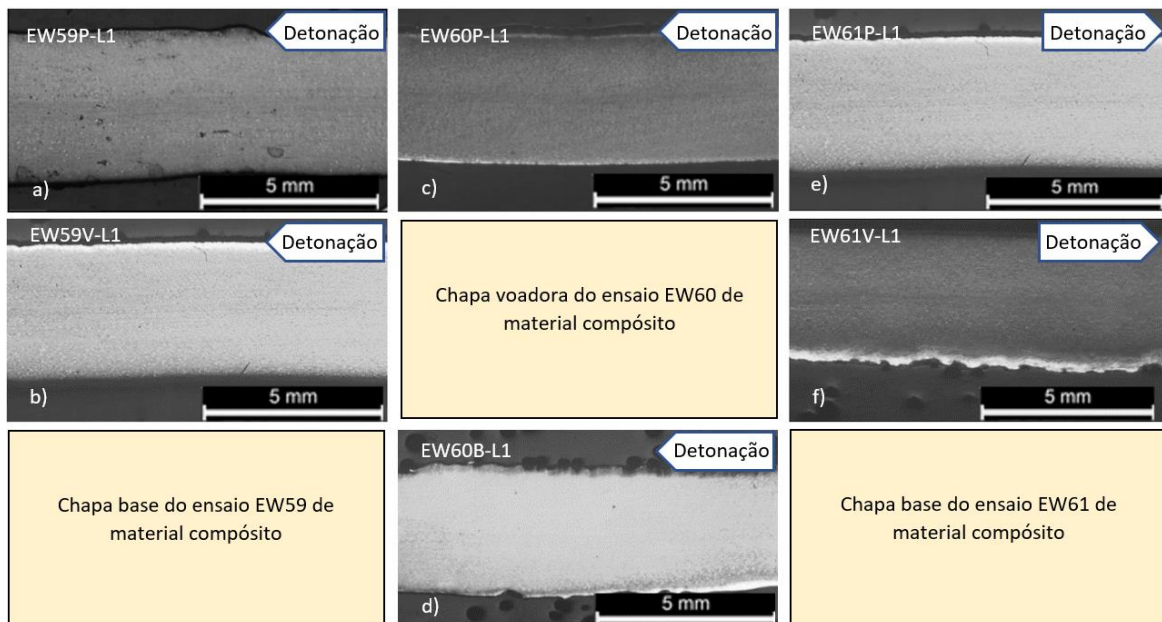


Figura 4.4. Macrografias na espessura de chapas de alumínio após ensaio: (a) EW59P-L1; (b) EW59V-L1; (c) EW60P-L1; (d) EW60B-L1; (e) EW61P-L1; e (f) EW61V-L1.

Na Figura 4.4 a) verifica-se em termos macroscópicos, que no ensaio EW59, na chapa de proteção não houve formação de ondas na superfície que esteve em contacto com a chapa voadora. A interface plana pode ser justificada pela ausência de espaçamento entre estas duas chapas durante o ensaio. O mesmo se verificou na maioria da superfície da chapa voadora que esteve em contacto com a chapa de proteção, contudo, em algumas regiões é possível observar formação de ondas, como se pode verificar, em termos microscópicos, Figura 4.5 a). As ondas são relativamente pequenas, com um comprimento médio de $111,7 \pm 25,6 \mu\text{m}$ e uma amplitude média de $16,7 \pm 7,1 \mu\text{m}$. A interface ondulada nesta superfície poderá ocorrer devido a ondas de compressão que se propaguem através do material da chapa voadora, no entanto, seria de esperar que estas mesmas ondas se propagassem para a chapa

de proteção, uma vez que estas duas chapas estão separadas apenas por um acetato. Desta forma, não foi encontrada uma justificação para a formação de ondas apenas numa das chapas.

Relativamente à superfície de contacto entre a chapa voadora e a chapa base, observa-se na Figura 4.4 b) e em mais detalhe na Figura 4.5 b), que não houve formação de ondas na chapa voadora. Nesta mesma interface também não foram encontradas fibras de vidro. A inexistência de ondas e a ausência de adesão das fibras ao alumínio, poderá ser justificada pela baixa velocidade de impacto neste ensaio explosivo.

Verifica-se também que na chapa de proteção existe uma maior deformação do grão na interface de contacto com a chapa voadora do que na zona central da amostra. Na zona central da amostra o grão da chapa de proteção tem um comprimento médio de $48,3 \pm 26,9 \mu\text{m}$ e altura média de $23,3 \pm 11,8 \mu\text{m}$, enquanto na interface tem um comprimento médio de $33,7 \pm 25,7 \mu\text{m}$ e altura média de $25,3 \pm 12,1 \mu\text{m}$. O mesmo se observa na chapa voadora, o grão está mais deformado nas interfaces de contacto com a chapa de proteção e com a chapa base, do que na zona central da amostra. Na interface de contacto com a chapa de proteção, o grão tem um comprimento médio de $40,8 \pm 24,6 \mu\text{m}$ e uma altura média de $20,7 \pm 9,1 \mu\text{m}$; na zona central tem um comprimento médio de $54,5 \pm 30,3 \mu\text{m}$ e altura média de $23,3 \pm 13,4 \mu\text{m}$; na interface de contacto com a chapa base tem $41,5 \pm 17,6 \mu\text{m}$ e altura $25,3 \pm 12,8 \mu\text{m}$. Dessa forma, quando comparada ao material base, verifica-se que a deformação das chapas é mais significativa nas extremidades do que na zona central. Este facto deve-se à força de impacto ser mais elevada nas superfícies do que no centro das chapas.

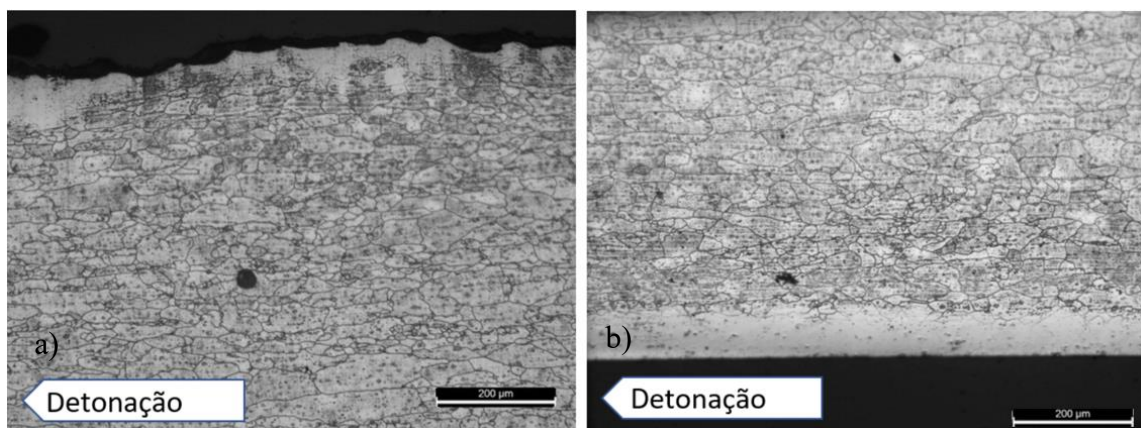


Figura 4.5. Chapa voadora do ensaio explosivo 59; (a) Presença de ondas na superfície superior; (b) interface plana na superfície inferior.

Relativamente à chapa de proteção do ensaio explosivo 60, observa-se que na interface da chapa de proteção com a chapa voadora também não houve formação de ondas, como se pode visualizar na Figura 4.4 c). Verificou-se também que o grão se encontra mais deformado na interface de contacto com a chapa voadora (chapa de material compósito), do que na zona central da amostra. Apresentando comprimento médio de $41,7 \pm 25,4 \mu\text{m}$ e altura média de $22,1 \pm 8,8 \mu\text{m}$ na interface; e comprimento médio de $53,6 \pm 28,2 \mu\text{m}$, e altura média de $25,0 \pm 12,2 \mu\text{m}$ na zona central. Quando comparado com a microestrutura do material base, verifica-se que na zona central houve crescimento do grão, enquanto na interface o grão apresenta-se mais deformado. Este facto deve-se à força de impacto ser mais elevada nas superfícies do que no centro das chapas.

Como se pode verificar na Figura 4.6 a) e b), na chapa base deste mesmo ensaio houve formação de ondas na interface com a chapa voadora. As ondas têm um comprimento médio de $333,3 \pm 187,0 \mu\text{m}$ e uma amplitude média de $53,8 \pm 21,9 \mu\text{m}$. Verifica-se pelo desvio padrão destas medidas, que há uma grande variabilidade no comprimento e na amplitude das ondas, o que pode significar que a velocidade de impacto não foi constante ao longo da detonação. Observa-se também ao longo das amostras longitudinais e transversais da chapa base, que há adesão das fibras de vidro à chapa de alumínio. Na amostra EW60B-L1, existe um fragmento com 2,12 mm de comprimento que pertence à chapa voadora (chapa de material compósito), e que aparenta estar ligado à chapa base, como se pode verificar na Figura 4.6 b).

No que diz respeito à microestrutura da chapa base, verifica-se novamente que o grão está mais deformado junto da interface do que na zona central da chapa, apresentando um comprimento médio de $42,5,8 \pm 21,5 \mu\text{m}$, e altura média de $23,0 \pm 9,3 \mu\text{m}$ na interface; a meia espessura tem um comprimento médio de $53,1 \pm 28,7 \mu\text{m}$ e uma altura de $16,5 \pm 7,3 \mu\text{m}$. Comparativamente com o material base, observa-se que o grão está mais deformado na superfície, fator justificado pela força proveniente do impacto entre a chapa base e voadora. Na zona central da amostra, observa-se que houve crescimento do grão, o que pode ser justificado pelas elevadas temperaturas provenientes da detonação.

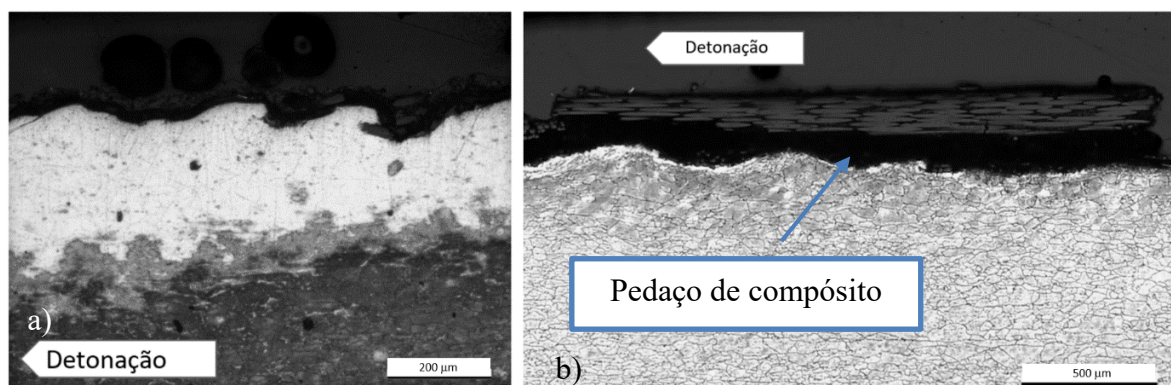


Figura 4.6. Chapa base do ensaio explosivo 60 em (a) visualiza-se a interface ondulada e a presença de fibras em EW60B-L1; e (b) visualiza-se um pedaço de compósito que ficou agarrado à chapa de alumínio em EW60B-L1.

À semelhança dos dois ensaios anteriores, na chapa de proteção do EW61 não houve formação de ondas na interface com a chapa voadora. Este fenómeno pode ser justificado pela ausência de espaçamento entre as chapas. Na chapa voadora, na superfície de contacto com a chapa de proteção, foram novamente observadas ondas em várias regiões, estas são muito maiores do que as encontradas na EW59V, tendo um comprimento médio de $238,7 \pm 32,5 \mu\text{m}$ e altura média de $45,6 \pm 5,5 \mu\text{m}$, como se pode observa na Figura 4.7 a). A interface ondulada nesta superfície pode ser justificada pela propagação das ondas de compressão através do material da chapa voadora.

Relativamente à superfície de contacto entre a chapa voadora e a chapa base, verificou-se a presença de interface ondulada na chapa voadora do ensaio 61, como se pode ver na Figura 4.7 b). As ondas têm um comprimento médio de $276,4 \pm 67,5 \mu\text{m}$ e amplitude média de $51,5 \pm 9,5 \mu\text{m}$. Quando comparadas com as ondas da interface da chapa base do ensaio explosivo 60, as ondas da chapa voadora do ensaio EW61 apresentam uma menor variabilidade tanto no comprimento como na amplitude o que pode significar que a velocidade de impacto foi mais constante neste ensaio do que no ensaio explosivo 60. Na Figura 4.7 b) é ainda possível observar que houve adesão das fibras de vidro à chapa voadora de alumínio.

Verifica-se, ainda, que na interface de contacto das chapas o grão está mais deformado do que na zona central. O grão da interface de contacto entre a chapa de proteção e a chapa voadora tem um comprimento médio de $40,4 \pm 24,5 \mu\text{m}$, e altura média de $15,4 \pm 6,4 \mu\text{m}$ na chapa de proteção, enquanto na zona central tem um comprimento médio de $55,4 \pm 39,5 \mu\text{m}$ e uma altura média de $19,7 \pm 10,8 \mu\text{m}$. Na chapa voadora observa-se que na

interface desta com a chapa de proteção o grão tem um comprimento médio de $37,1 \pm 22,8$ μm , e altura média de $15,1 \pm 8,0$ μm ; na zona central tem um comprimento médio de $46,5 \pm 19,5$ μm , e altura média de $20,1 \pm 8,0$ μm ; para finalizar, na interface da chapa voadora com a chapa base, o grão tem um comprimento médio de $41,6 \pm 28,6$ μm , e uma altura média de $21,1 \pm 12,9$ μm . Quando comparada ao material base, verifica-se novamente que a deformação das chapas é mais significativa nas extremidades do que na zona central. Este facto deve-se à força de impacto ser mais elevada nas superfícies do que no centro das chapas. Observa-se também que na zona central houve crescimento do grão, o que pode ser justificado pelas elevadas temperaturas provenientes da detonação.

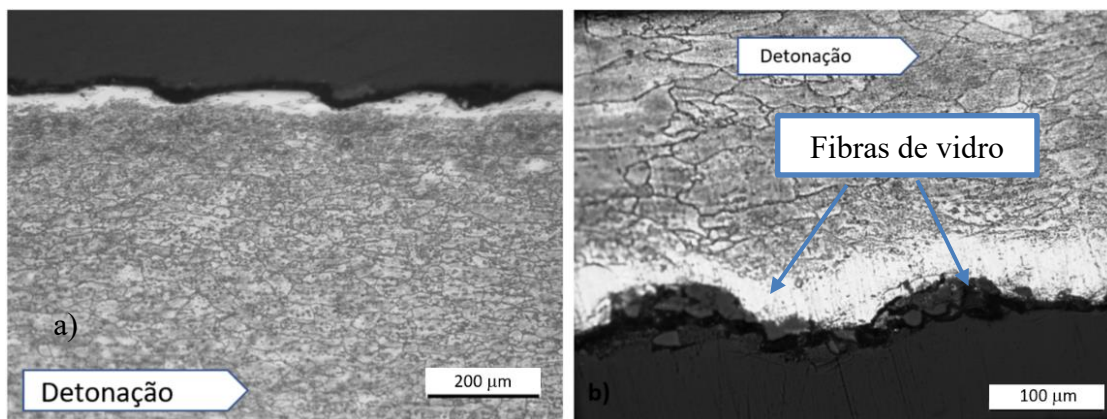


Figura 4.7. Chapa EW61V-L1; (a) Presença de ondas na interface da chapa voadora com a chapa de proteção; (b) interface ondulada e presença de fibras na superfície de contacto da chapa voadora com a chapa base.

Em resumo, verificou-se que na interface entre as chapas de proteção e as chapas voadoras, nas chapas de proteção não houve formação de ondas em nenhum dos ensaios explosivos. Este facto pode dever-se a não existir espaçamento entre as duas chapas durante o ensaio. No entanto, nas chapas voadoras dos ensaios EW59 e EW61, são observadas ondas em várias regiões. Esta interface ondulada poderá ter sido provocada por ondas de compressão que se propagam através do material da chapa voadora.

Relativamente à interface das chapas voadoras com as chapas base, no ensaio explosivo 59 verificou-se uma interface plana na chapa voadora. Para além disso não há adesão das fibras de vidro ao alumínio. A interface plana, e a inexistência de fibras nesta superfície, podem estar relacionadas com a baixa velocidade de impacto característica deste ensaio. Nos ensaios explosivos 60 e 61 verificou-se uma interface ondulada e encontraram-se fibras de vidro impregnadas nas chapas de alumínio, chapa base e chapa voadora respetivamente. Este fenómeno pode significar que para valores de rácio de explosivo e

velocidades de impacto mais elevadas, há formação de ondas e mais adesão das fibras de vidro ao alumínio.

No que diz respeito à microestrutura das chapas, verificou-se que o grão está mais deformado junto da interface e menos deformado no interior da amostra. Este acontecimento deve-se sobretudo às forças provenientes do impacto das chapas. Observou-se também que há uma grande variabilidade no tamanho do grão.

4.4.2. SEM/EDS

Foram analisadas no microscópio eletrónico de varrimento todas as amostras colocadas em resina (vistas previamente no microscópio ótico), a secção transversal das chapas de material compósito (amostras que foram partidas em azoto líquido), e as superfícies de contacto entre as chapas base e voadora.

4.4.2.1. Análise na espessura

As chapas de alumínio foram novamente analisadas em detalhe, como se verifica na Figura 4.8; a utilização do microscópio eletrónico permite ver a microestrutura das chapas com muito mais detalhe que o microscópio ótico. Dessa forma confirmou-se o que tinha sido analisado anteriormente, e verificou-se que o grão se encontra muito mais deformado junto das superfícies de impacto do que na zona central da amostra. Verificou-se também que a interface das chapas de proteção é plana, e que a interface da chapa voadora na superfície que contacta com a chapa de proteção é ondulada. As interfaces de contacto entre as chapas base e voadora também apresentam ondas nos ensaios EW60 e EW61.

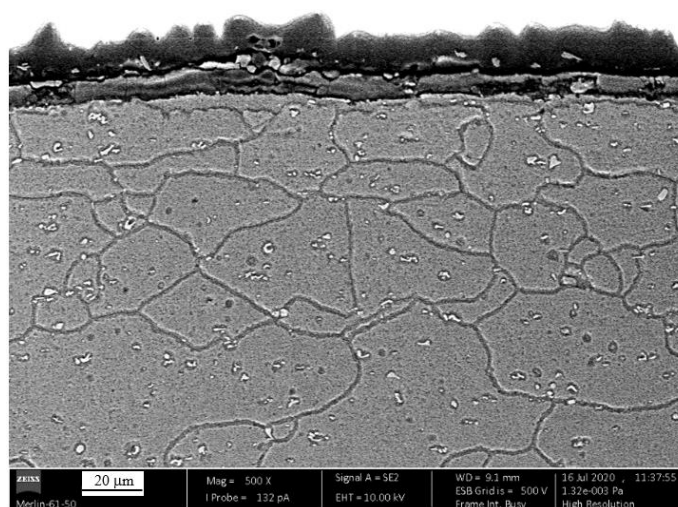


Figura 4.8. Microestrutura da amostra EW59P-T1.

Nas superfícies de contacto entre as chapas voadoras e a chapas base dos ensaios explosivos EW60 e EW61, foram encontradas fibras de vidro provenientes do material compósito, como se ilustra na Figura 4.9. Há uma grande diversidade na quantidade de fibras ao longo da interface, desde zonas com vários aglomerados até zonas sem a presença de nenhuma fibra. Contudo, podem ser encontradas fibras tanto nas amostras longitudinais como transversais. Apesar de haver fibras nas amostras correspondentes aos dois ensaios explosivos, nas amostras do ensaio EW60 aparenta haver uma maior concentração das mesmas.

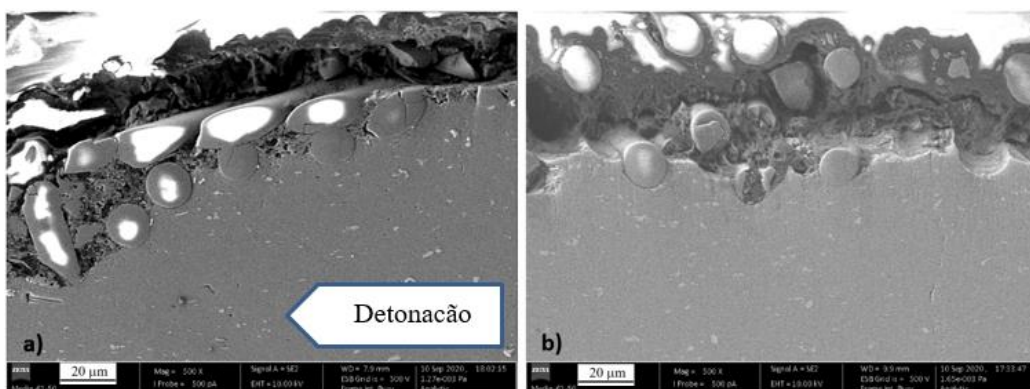


Figura 4.9. Visualização de fibras de vidro impregnadas no alumínio, (a) amostra EW60B-L1 e (b) amostra EW60B-T1.

Na Figura 4.9 é possível observar que o material que envolve as fibras de vidro tem uma aparência esponjosa. Com o intuito de saber de que material se tratava foi feita uma análise química nesta zona (por EDS), e os resultados desta podem ser observados na Figura 4.10.

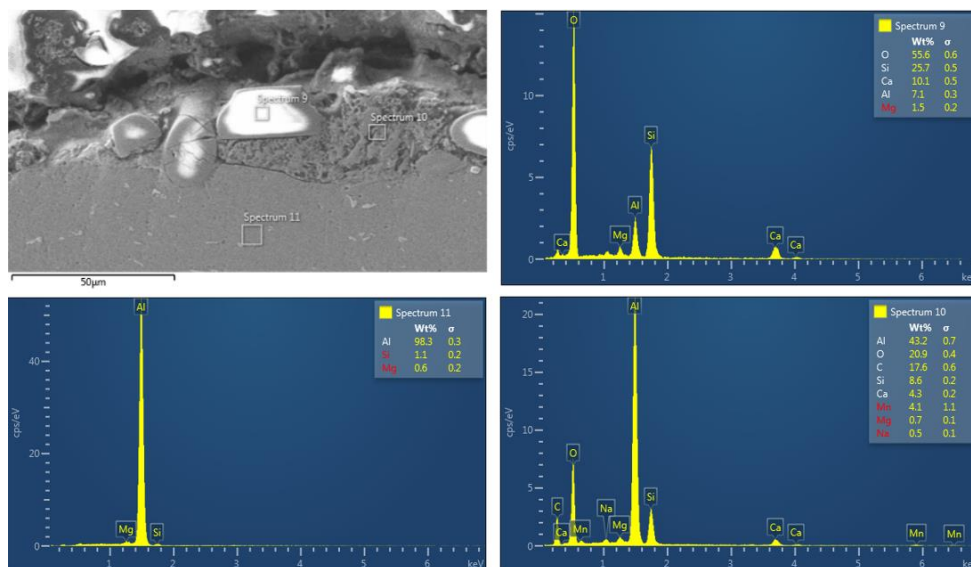


Figura 4.10. Análise química à amostra EW60B-L1.

O espectro 9 vem confirmar que as estruturas circulares observadas são de facto fibras de vidro. O espectro 10, espectro de maior interesse, não é muito conclusivo. Esperava-se que esta zona fosse referente à matriz polimérica do material compósito, no entanto há uma percentagem significativa de alumínio e de silício, o que pode significar que há material proveniente do processo de polimento depositado nestas regiões. O Si pode vir das fibras de vidro e o C e O da contaminação. Por fim, espectro 11 é referente ao material base, alumínio da liga AA6082-T6.

Apesar das amostras longitudinais de material compósito terem ficado degradadas (devido a não ter ocorrido rotura frágil quando foram quebradas), estas foram observadas na mesma. Como se pode verificar na Figura 4.11 a) e na Figura 4.11 b), nas amostras EW59B-L_N1 e EW60V-L_N1 as fibras continuam a estar bem agrupadas e envolvidas em matriz polimérica. Verifica-se, também, que entre camadas existe alguma degradação, no entanto esta será proveniente do processo de fissuração, e não do ensaio explosivo.

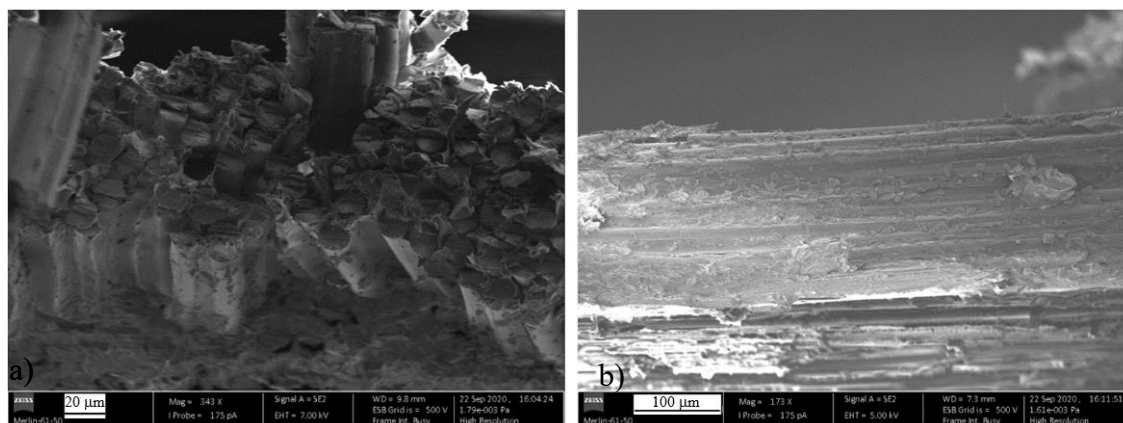


Figura 4.11. Figura correspondente às amostras (a) EW59B-L_N1 e (b) EW60V-L_N1.

4.4.2.2. Análise das superfícies de contacto

Para além da análise ao longo da espessura de cada chapa, foram observadas as superfícies de contacto entre a chapa base e a chapa voadora, (devido a má condutividade não foi possível observar a chapa voadora do ensaio explosivo 60, correspondente à amostra EW60V-F1).

No ensaio EW59 verifica-se que não há adesão de fibras de vidro ao alumínio. Contudo é possível observar na amostra EW59V-F1, uma zona de transição em que não há ligação do material polimérico ao alumínio, para uma zona em que há alguma adesão entre

estes dois materiais, Figura 4.12. Apesar da adesão ser reduzida nesta amostra, a transição pode indicar que outras zonas da chapa voadora tenham mais material polimérico ligado.

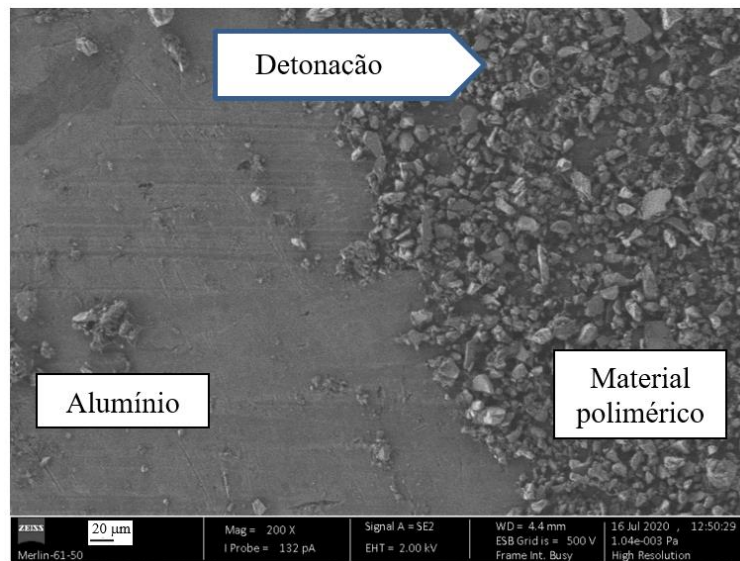


Figura 4.12. Zona de transição da amostra EW59V-F1.

Relativamente aos ensaios explosivos EW60 e EW61, verifica-se que há muita adesão do material polimérico às chapas de alumínio, Figura 4.13. Em ambas as chapas, (base no ensaio explosivo 60 e voadora no ensaio explosivo 61), é possível visualizar a presença de fibras ligadas ao alumínio. No entanto, a maioria destas fibras encontram-se muito degradadas (fraturadas em várias partes), como se encontra assinalado na Figura 4.13 a) e b). Na amostra EW61V-F1 apesar da grande maioria das fibras estarem partidas, observa-se que estas fraturaram em menos partes, resultando em fibras significativamente maiores, como se visualiza na Figura 4.13 b). Nesta mesma figura observa-se que as fibras de vidro estão orientadas perpendicularmente às da amostra EW60B-F1, sendo que esta orientação pode significar que na amostra EW61V-F1 existe mais do que uma camada de fibras ligadas ao alumínio.

Verifica-se que a adesão do material composto às chapas de alumínio é tanto maior quanto maior for o rácio de explosivo e a velocidade de impacto. Uma vez que na chapa voadora do ensaio explosivo 59 não há ligação de fibras de vidro ao alumínio, e a velocidade de impacto e o rácio de explosivo são relativamente baixos; e nas chapas base e voadora dos respetivos ensaios EW60 e EW61, existe bastante adesão de material polimérico e fibras de vidro às chapas de alumínio e o rácio de explosivo e a velocidade de impacto são

relativamente altos. Verifica-se também que há adesão de material polimérico quando o suporte da chapa base é de areia (EW60), e de aço (EW61)

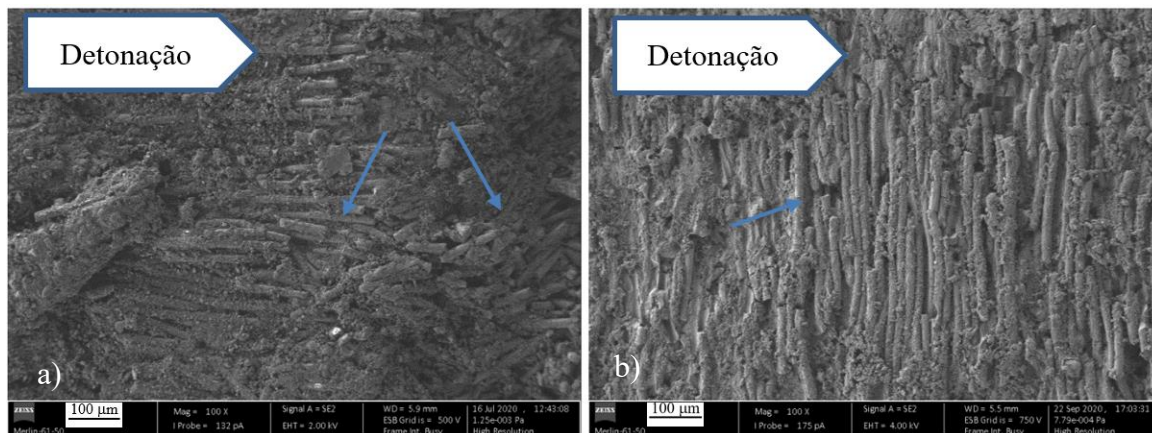


Figura 4.13. Presença de fibras de vidro nas amostras (a) EW60B-F1 e (b) EW61V-F1.

Relativamente à superfície de impacto das chapas de material compósito, verifica-se pela análise da amostra EW59B-F1, que as fibras permanecem intactas e a matriz também não aparenta ter danos significativos, como se observa na Figura 4.14.

Não foi possível analisar a superfície das restantes chapas de material compósito (no ensaio EW60 devido a má condutividade elétrica, e no ensaio 61 devido à destruição da chapa base durante a detonação do explosivo). Pode, contudo, considerar-se que a utilização de uma base como a areia, tem capacidade para absorver parte da energia de impacto, resultando numa menor degradação das chapas de material compósito. Por outro lado, quando mais baixo for o rácio de explosivo e menor a velocidade de impacto menor a deterioração das chapas deste mesmo material.

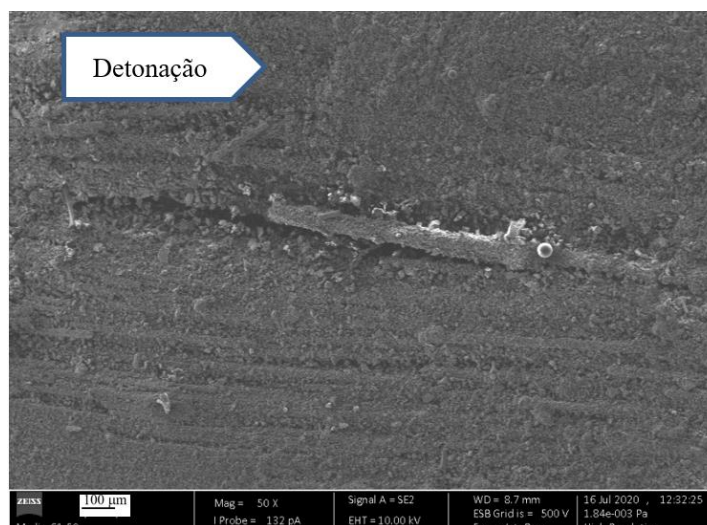


Figura 4.14. Superfície da amostra EW59B-F1.

No ensaio explosivo EW62 ambas as chapas (voadora e de proteção), eram de material compósito. Verificou-se que tanto na chapa base como na chapa voadora, as camadas superficiais das fibras estavam bastante degradadas. Nas duas chapas verificou-se que houve fusão do material polimérico, veja-se na Figura 4.15, o que indicia que as temperaturas atingidas foram elevadas. No entanto, como se observa na Figura 4.15 a) a chapa voadora apresenta maior área de material fundido. Na Figura 4.15 b) é possível observar a degradação das camadas superficiais das fibras. Esta degradação está diretamente relacionada com a não utilização de chapa de proteção em alumínio, a utilização de um suporte da chapa base rígido, elevado rácio de explosivo e elevada velocidade de impacto da chapa voadora na chapa base.

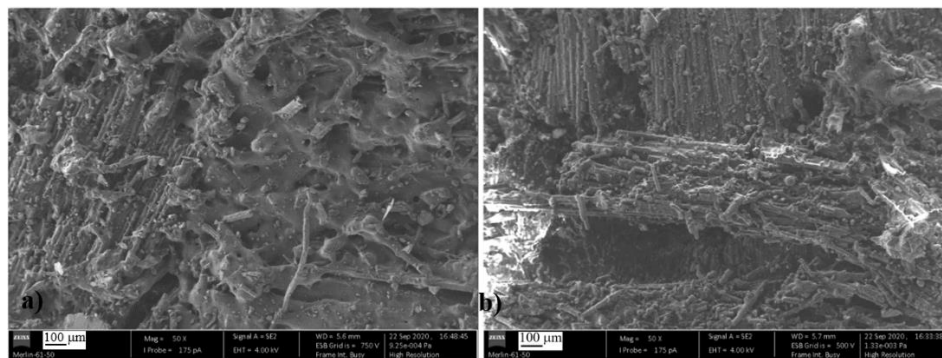


Figura 4.15. Metalografia das superfícies das chapas: (a) EW62V-F1 e (b) EW62B-F1.

Em suma, pode-se considerar que a adesão do material polimérico ao alumínio é tanto maior quanto maior for a velocidade de impacto da chapa voadora na chapa base, e maior for o rácio de explosivo, como se verificou nos ensaios explosivos EW60 e EW61. Por outro lado, a degradação das chapas de material compósito também aumenta com o aumento do rácio de explosivo, e com o aumento da velocidade de impacto. Assim sendo, é necessário otimizar estes parâmetros de forma a conseguir que o material polimérico adira ao alumínio e não haja degradação excessiva destas chapas. Verifica-se também que a utilização de chapa de proteção e de um suporte da chapa base com capacidade para absorver o impacto, resulta na preservação das chapas de material compósito.

4.5. Microdureza

Na Figura 4.16 estão representados os perfis de microdureza das amostras transversais e longitudinais da chapa de proteção e voadora do ensaio explosivo 59. Verifica-se tanto na amostra transversal como na amostra longitudinal, que há um aumento da dureza

pouco significativo na chapa de proteção, sendo este ligeiramente mais acentuado junto às superfícies. Este fenómeno poderá ter sido causado pela deformação da chapa junto da superfície, visto que já tinha sido observado que o grão se encontra mais deformado na interface do que no centro da chapa. Uma vez que o principal mecanismo de endurecimento da liga AA6082-T6 é pela formação de precipitados endurecedores, é natural que apesar de haver deformação da chapa, o aumento de dureza seja pouco significativo.

Relativamente à chapa voadora, observa-se na Figura 4.16, que há uma discrepância média de 20 Hv_{0,2} de dureza entre a amostra longitudinal e a transversal. Verifica-se que na amostra transversal há amaciamento do alumínio, e na amostra longitudinal há um ligeiro aumento de dureza. Uma vez que estas amostras foram retiradas da mesma chapa, este fenómeno pode significar que nesta chapa há zonas com propriedades mecânicas diferentes. O amaciamento do alumínio poderá ser justificado pela dissolução de precipitados endurecedores, devido à elevada temperatura proveniente da detonação. Contudo, como o rácio de explosivo é significativamente baixo neste ensaio e como foi utilizada areia como suporte da chapa base, o amaciamento do material não é muito elevado.

À semelhança da chapa de proteção, na chapa voadora também se verifica que a dureza é ligeiramente mais elevada junto às interfaces, fator justificado pela deformação da chapa na superfície.

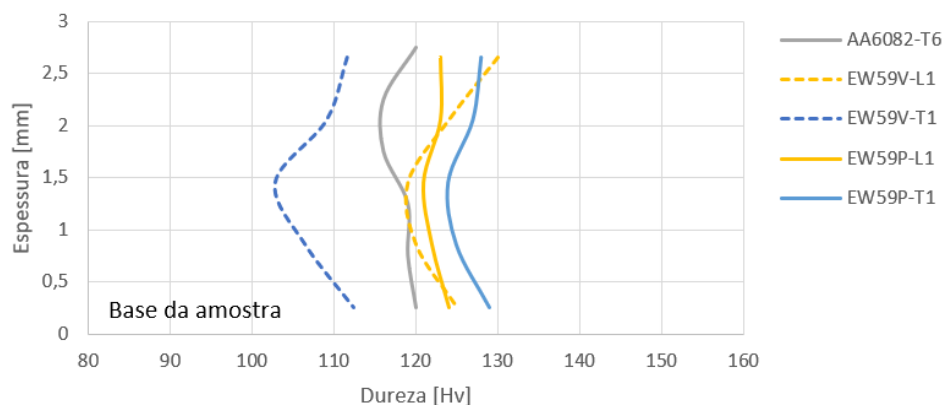


Figura 4.16. Perfil de microdureza do ensaio explosivo 59.

Na Figura 4.17 estão representados os perfis de microdureza das amostras das chapas de alumínio provenientes do ensaio explosivo 60. À semelhança do ensaio anterior, verifica-se através das amostras longitudinais e transversais que há endurecimento das chapas de proteção, sendo este significativamente mais elevado junto das superfícies da chapa. Fator novamente justificado por haver maior deformação junto da superfície do que

no centro da chapa. Relativamente à chapa base, verifica-se tanto na amostra transversal como na longitudinal que houve amaciamento do alumínio, como se observa na Figura 4.17. Este amaciamento pode ser justificado pela dissolução de alguns precipitados endurecedores devido às elevadas temperaturas provenientes da detonação do explosivo. Quando se compara o amaciamento da chapa base do ensaio explosivo 60, com o amaciamento da chapa voadora do ensaio explosivo 59, uma vez que a base da montagem é a mesma nos dois ensaios (cama de areia), seria espectável que o amaciamento fosse mais significativo na chapa voadora, uma vez que a chapa voadora está mais perto do explosivo, ficando dessa forma mais sujeitável à temperatura da detonação. Relativamente à velocidade de impacto, verifica-se também que esta é maior no ensaio explosivo 60, o que deveria contribuir para um maior endurecimento da chapa neste ensaio. Contudo, verifica-se precisamente o contrário, no ensaio explosivo 60 há uma diminuição muito mais significativa de dureza nas amostras analisadas. O principal responsável por este acontecimento deverá ser o rácio de explosivo, uma vez que no EW 59 o rácio é de 1,03 e no EW60 é de 2,56. Dessa forma, a temperatura atingida no ensaio explosivo 60 deverá ter sido suficiente para dissolver mais precipitados endurecedores nesta chapa

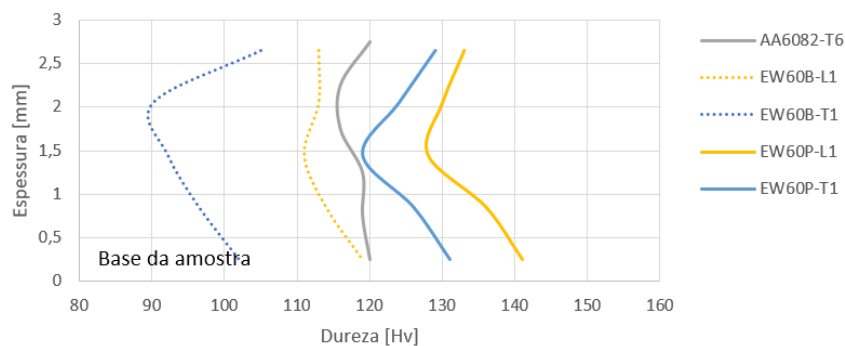


Figura 4.17. Perfil de microdureza do ensaio explosivo 60.

Na Figura 4.18 estão representados os perfis de microdureza das amostras transversais e longitudinais, das chapas de proteção e voadora do ensaio explosivo 61. À semelhança do que aconteceu nos dois ensaios anteriores, verifica-se através das amostras longitudinais e transversais, que houve um aumento de dureza na chapa de proteção. Verifica-se novamente que o aumento de dureza é mais significativo nas interfaces da chapa do que no centro da amostra. Este fenómeno deve-se à deformação plástica ser maior junto à superfície, como já se tinha verificado pela deformação do grão nestas zonas.

Relativamente à chapa voadora, verifica-se através das amostras transversais e longitudinais, que houve aumento de dureza. Apesar do rácio de explosivo ser elevado neste

ensaio, não houve amaciamento do alumínio. Dessa forma, é expectável que que o endurecimento seja provocado pela utilização da bigorna de aço como base do ensaio. Verifica-se também que a dureza é mais elevada na superfície do que no centro da chapa, fenómeno novamente justificado pela maior deformação do grão junto da interface.

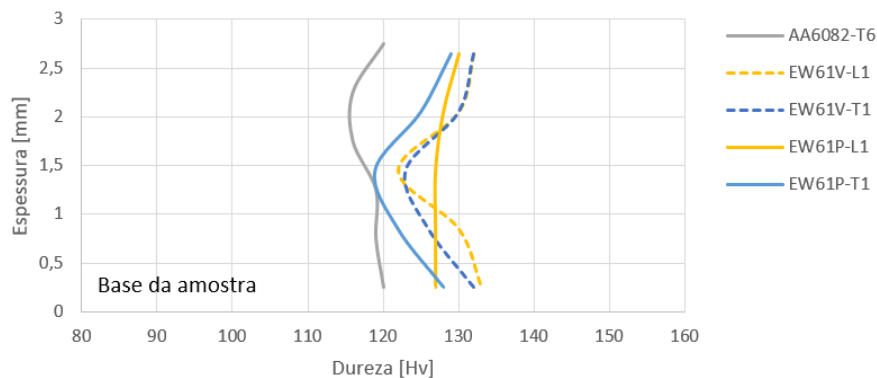


Figura 4.18. Perfil de microdureza do ensaio explosivo 61.

Verifica-se em todas as amostras que a dureza é mais elevada na interface do que no centro, este fenómeno poderá ter sido causado pela deformação da chapa junto da superfície, visto que já tinha sido observado que o grão se encontra mais deformado na interface do que no centro. Contudo, devido à liga 6082-T6 ser uma liga que endurece principalmente através da formação de precipitados endurecedores, é natural que o aumento de dureza seja pouco significativo.

Observa-se em todos os ensaios que houve um aumento de dureza das chapas de proteção, nestas chapas já tinha sido observado o alongamento do grão, pelo que se pode concluir que o aumento de dureza é também devido à deformação plástica.

Relativamente às chapas base e voadora, verifica-se que com o aumento do rácio de explosivo há o aumento do amaciamento do alumínio, fenómeno justificado pelo aumento da quantidade de calor libertado na detonação, o que provoca a dissolução de alguns precipitados endurecedores, levando ao amaciamento do metal. Verifica-se também que a utilização de um suporte rígido da chapa base (bigorna de aço), resulta num maior endurecimento do alumínio. Este acontecimento pode ser justificado pela maior deformação plástica na chapa, uma vez que esta base não tem tanta capacidade para absorver o impacto como uma base de areia. Para finalizar, no Apêndice B apresenta-se um gráfico com a evolução da dureza da chapas voadoras e base, em função do rácio de explosivo.

5. CONCLUSÕES

Pretendia-se unir uma chapa de alumínio a uma chapa de material compósito reforçado com fibra de vidro através do processo de soldadura por explosão. Foram feitos quatro ensaios explosivos, nos quais se variaram parâmetros como o suporte da chapa base, o tipo de explosivo e a chapa base e voadora.

A variação desses parâmetros permitiu retirar algumas conclusões. Relativamente à chapa de proteção, percebeu-se que esta desempenha um papel fundamental, a utilização de uma chapa de alumínio entre a chapa voadora e o explosivo protege de forma significativa a chapa de material compósito. Verificou-se também, que a base da montagem deve ter capacidade para absorver o impacto provocado pela projeção da chapa voadora. Dessa forma, é benéfico utilizar uma cama de areia em vez de uma bigorna de aço. O rácio de explosivo, e a velocidade de impacto, são outros fatores com elevada importância, uma vez que a degradação da chapa de material compósito cresce com o aumento destes parâmetros. Por outro lado, verificou-se que com o aumento da velocidade de impacto, houve também um incremento na quantidade de fibras que aderiram à chapa de alumínio. Assim sendo, é necessário que o valor do rácio de explosivo e da velocidade de impacto seja suficiente para que a chapa de material compósito adira à de alumínio, e não seja elevado ao ponto de a degradar. Constatou-se que a utilização de pinos colocados à pressão fragiliza a chapa de alumínio. Contudo, se a sua utilização for necessária, estes devem ser soldados. Dessa forma minimiza-se os danos que possam ocorrer na chapa metálica. Por fim, verificou-se que há adesão de fibras de vidro à chapa de alumínio, independentemente de a chapa de material compósito ser a voadora ou base. Todavia, se esta for voadora, fica mais sujeita a possíveis danos provocados pela detonação. Para finalizar verificou-se que o aumento do rácio de explosivo provoca o amaciamento do alumínio. Por outro lado, a utilização de um suporte da chapa base rígido, favorece o aumento de dureza das chapas metálicas.

5.1. Propostas de continuidade de investigação

- Estudar a utilização de outros explosivos com menor velocidade de detonação.
- Analisar o efeito de utilizar chapas intermédias.
- Analisar o efeito do aquecimento prévio do compósito
- Analisar a influência de suportes da chapa base com maior capacidade de absorver energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Pereira, “Estudo das ligas de alumínio aplicadas em construção naval nomeadamente na resistência à corrosão em estruturas navais soldadas”, p. 108, 2010.
- [2] A. Astarita, A. Squillace, A. Scala, and A. Prisco, “On the critical technological issues of friction stir welding T-joints of dissimilar aluminum alloys”, *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 21, no. 8, pp. 1763–1771, 2012.
- [3] M. RS and Z. Ma, “MA ZY Friction stir welding and processing”, 2005.
- [4] F. M. F. Nascimento, “Processamento por Fricção Linear - Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6”, *Inst. Super. Técnico Lisboa*, 2007.
- [5] M. Gene, *The Welding of Aluminium and Its Alloys*. 2002.
- [6] N. Manuel, “Friction stir welding de juntas em T em ligas de alumínio dissimilares para aplicações navais”, 2020.
- [7] N. Miguel Bastos Gomes de Almeida, O. na FEUP, and J. Luís Soares Esteves, “Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta”, 2012.
- [8] C. A. Biscainho, “Materiais compósitos: um dos maiores avanços”, 2017. [Online]. Available: <https://betaeq.com.br/index.php/2017/05/19/materiais-compositos/>. [Accessed: 08-Oct-2020].
- [9] M. de Moura, A. de Moraes, and A. de Magalhães, “Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico”, 2005.
- [10] A. Kelly and C. Zweben, “Comprehensive composite materials”, 2000.
- [11] A. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas”, *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, no. 3–4, pp. 10–19, 2009.
- [12] L. Liu, B. M. Zhang, D. F. Wang, and Z. J. Wu, “Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates,” *Compos. Struct.*, vol. 73, no. 3, pp. 303–309, 2006.
- [13] E. M. Rubio, D. Blanco, M. M. Marín, and D. Carou, “Analysis of the latest trends

- in hybrid components of lightweight materials for structural uses”, *Procedia Manuf.*, vol. 41, pp. 1047–1054, 2019.
- [14] E. E. Feistauer, J. F. dos Santos, and S. T. Amancio-Filho, “A review on direct assembly of through-the-thickness reinforced metal–polymer composite hybrid structures”, *Polym. Eng. Sci.*, vol. 59, no. 4, pp. 661–674, 2019.
- [15] A. Higgins, “Adhesive bonding of aircraft structures”, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 20, no. 5, pp. 367–376, 2000.
- [16] J. H. Kweon, J. W. Jung, T. H. Kim, J. H. Choi, and D. H. Kim, “Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding”, *Compos. Struct.*, vol. 75, no. 1–4, pp. 192–198, 2006.
- [17] J. ho choi and D. gil lee, “The Torque Transmission Capabilities of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint and the Double Lap Joint”, *J. Adhes.*, vol. 44, no. 3, pp. 197–212, 1994.
- [18] A. Baldan, “Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment”, *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–49, 2004.
- [19] A. Baldan, “Adhesively-bonded joints in metallic alloys , polymers and composite materials : Mechanical”, *Rev. Lit. Arts Am.*, vol. 9, pp. 4729–4797, 2004.
- [20] J. S. A., *Mechanical Fastening, Joining, and Assembly*, Second. 2017.
- [21] A. Dushyant, “Rapid Strengthening of Reinforced Concrete Bridge with mechanically fastened - fiber reinforced polymer strips”, 2003.
- [22] T. A. Barnes and I. R. Pashby, “Joining techniques for aluminum spaceframes used in automobiles. Part II - adhesive bonding and mechanical fasteners”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 99, no. 1, pp. 72–79, 2000.
- [23] S. T. Amancio-Filho, A. B. Abibe, and J. F. Dos Santos, “Joining: Mechanical Fastening of Polymers, Composites, and Polymer–Metal Hybrid Structures”, *Wiley Encycl. Compos.*, vol. 49, no. 8, pp. 1–11, 2012.
- [24] S. M. Goushegir, “Friction spot joining (FSpJ) of aluminum-CFRP hybrid structures”, *Weld. World*, vol. 60, no. 6, pp. 1073–1093, 2016.
- [25] R. W. Messler, *Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology*. 2004.
- [26] L. Blaga, J. F. Dos Santos, R. Bancila, and S. T. Amancio-Filho, “Friction Riveting

- (FricRiveting) as a new joining technique in GFRP lightweight bridge construction”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 80, pp. 167–179, 2015.
- [27] S. T. Amancio Filho, “Friction Riveting development and analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-material structures”, *Riv. Ital. della Saldatura*, vol. 63, no. 2, pp. 197–208, 2011.
- [28] L. Blaga, R. Bancilă, J. F. dos Santos, and S. T. Amancio-Filho, “Friction Riveting of glass-fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints”, *Mater. Des.*, vol. 50, pp. 825–829, 2013.
- [29] C. F. Rodrigues, L. A. Blaga, J. F. Dos Santos, L. B. Canto, E. Hage, and S. T. Amancio-Filho, “FricRiveting of aluminum 2024-T351 and polycarbonate: Temperature evolution, microstructure and mechanical performance”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 10, pp. 2029–2039, 2014.
- [30] A. B. Abibe, S. T. Amancio-Filho, J. F. Dos Santos, and E. Hage, “Development and analysis of a new joining method for polymer-metal hybrid structures”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 233–249, 2011.
- [31] C. Ageorges, L. Ye, and M. Hou, “Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: A review”, *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 6, pp. 839–857, 2001.
- [32] D. A. Grewell, A. Benatar, and J. B. Park, “Plastics and composites welding handbook”, vol. 25, p. 407, 2003.
- [33] J. Diani and K. Gall, “Joining of Polymers and Polymer–Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends”, *Society*, 2006.
- [34] F. Balle, G. Wagner, and D. Eifler, “Combined Process of Ultrasonic Welding and Precipitation Hardening of Aluminium Alloy 2024 / Carbon Fibre Reinforced Composites Structures”, pp. 856–861, 2010.
- [35] F. Balle and D. Eifler, “Statistical test planning for ultrasonic welding of dissimilar materials using the example of aluminum-carbon fiber reinforced polymers (CFRP) joints”, *Materwiss. Werksttech.*, vol. 43, no. 4, pp. 286–292, 2012.
- [36] P. Mitschang, R. Velthuis, and M. Didi, “Induction spot welding of metal/CFRPC hybrid joints”, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 15, no. 9, pp. 804–813, 2013.
- [37] J. D. Venables, “Adhesion and durability of metal-polymer bonds”, *J. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 8, pp. 2431–2453, 1984.

- [38] P. Mitschang, R. Velthuis, S. Emrich, and M. Kopnarski, “Induction heated joining of aluminum and carbon fiber reinforced nylon 66”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 767–801, 2009.
- [39] P. H. F. Oliveira, S. T. Amancio-Filho, J. F. Dos Santos, and E. Hage, “Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA”, *Mater. Lett.*, vol. 64, no. 19, pp. 2098–2101, 2010.
- [40] H. Karami Pabandi, M. Movahedi, and A. H. Kokabi, “A new refill friction spot welding process for aluminum/polymer composite hybrid structures”, *Compos. Struct.*, vol. 174, pp. 59–69, 2017.
- [41] J. Y. Cao, M. Wang, L. Kong, and L. J. Guo, “Journal of Materials Processing Technology Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-T6”, vol. 230, pp. 254–262, 2016.
- [42] C. Ageorges and L. Ye, “Resistance welding of thermosetting composite/thermoplastic composite joints”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 14, no. 6, pp. 449–475, 2001.
- [43] S. H. Mcknight, S. T. Holmes, J. W. Gillespie, C. L. T. Lambing, and J. M. Marinelli, “Scaling issues in resistance-welded thermoplastic composite joints”, *Adv. Polym. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 279–295, 1997.
- [44] D. Stavrov and H. E. N. Bersee, “Resistance welding of thermoplastic composites- an overview”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, no. 1, pp. 39–54, Jan. 2005.
- [45] J. P. Bergmann and M. Stambke, “Potential of Laser-manufactured Polymer-metal hybrid Joints”, *Phys. Procedia*, vol. 39, pp. 84–91, 2012.
- [46] “O.J. Zoellner and J.A. Evans, Plastic-Metal Hybrid. A New Development in the Injection Molding Technology, ANTEC 2002 Annual Technical Conference, San Francisco, CA, 1-4, 2002.”
- [47] M. Grujicic *et al.*, “The potential of a clinch-lock polymer metal hybrid technology for use in load-bearing automotive components”, *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 18, no. 7, pp. 893–902, 2009.
- [48] Anon, “Explosion Welding.”, *Mech. Eng.*, vol. 100, no. 5, pp. 28–35, 1978.
- [49] N. D. E. P. Interm and D. N. A. Soldabilidade, “Soldadura Por Explosão Alumínio - Aço Inoxidável Influência De Placas Intermédias Na”, 2019.

-
- [50] I. A. Bataev *et al.*, “Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study”, *Mater. Des.*, vol. 169, p. 107649, 2019.
- [51] P. Vasil and B. F. Le Roy, “US3024526A Explosive welding”, 31-Aug-1962.
- [52] R. Cowan Etal, J. J. Douglass, and A. H. Holtzman, “US3137937A Explosive bonding”, 26-Oct-1964.
- [53] A. H. Hoitzman and C. H. Township, “US3140539A Process for bonding metals by explosive means,” 28-Jun-1964.
- [54] V. Linse, P. T.-A. welding handbook, and undefined 1991, “Explosion welding.”
- [55] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Explosive welding of aluminium to stainless steel”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 262, no. March, pp. 340–349, 2018.
- [56] R. Mendes, J. B. Ribeiro, and A. Loureiro, “Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration”, *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 182–192, Oct. 2013.
- [57] S. A. A. Akbari Mousavi and P. Farhadi Sartangi, “Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel”, *Mater. Des.*, vol. 30, no. 3, pp. 459–468, 2009.
- [58] I. Rosenthal, A. Miriyev, E. Tuval, A. Stern, and N. Frage, “Characterization of Explosion-Bonded Ti-Alloy/Steel Plate with Ni Interlayer”, *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 3, no. 2, pp. 97–103, 2014.
- [59] L. Manuel and D. Machado, “Efeito da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável”, 2018.
- [60] Q. Chu, M. Zhang, J. Li, and C. Yan, “Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding”, 2017.
- [61] J. Kaur, V. Mangla, J. Singh, S. Kumar, and N. Srivastava, “Cladding of stainless steel (SS304) on aluminium alloy (AA1100) by explosive welding”, in *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 9, pp. 19136–19139.
- [62] M. M. Hoseini Athar and B. Tolaminejad, “Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding”, *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 516–525, Dec. 2015.

- [63] G. R. Cowan and A. H. Holtzman, “Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding”, *J. Appl. Phys.*, vol. 34, p. 928, 1963.
- [64] S. P. Kiselev and V. I. Mali, “Numerical and experimental modeling of jet formation during a high-velocity oblique impact of metal plates”, *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 48, no. 2, pp. 214–225, 2012.
- [65] M. A. Lavrentev, B. V. Shabat, M. A. Lavrentev, and B. V. Shabat, “Hydrodynamics problems and their mathematical models /2nd edition/”, *MolIzN*, 1977.
- [66] S. K. Godunov, A. A. Deribas, and V. I. Mall, “Influence of material viscosity on the formation process during collisions of metal plates”, 1975.
- [67] J. B. Adams, S. M. Foiles, and W. G. Wolfer, “Self-diffusion and impurity diffusion of fcc metals using the five-frequency model and the Embedded Atom Method”, *J. Mater. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 102–112, 1989.
- [68] M. A. Karolewski, “Tight-binding potentials for sputtering simulations with FCC and BCC metals”, *Radiat. Eff. Defects Solids*, vol. 153, no. 3, pp. 239–255, 2001.
- [69] J. R. Feng, P. W. Chen, K. Da Dai, E. F. An, and Y. Yuan, “Numerical study on the influence of different anvils on explosive welding”, *Mater. Sci. Forum*, vol. 767, pp. 114–119, 2013.
- [70] G. R. Cowan, O. R. Bergmann, and A. H. Holtzman, “Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals”, *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 2, no. 11, pp. 3145–3155, 1971.
- [71] T. Z. Blazynski, *Explosive Welding, Forming and Compaction*. 1983.
- [72] V. G. Petushkov, V. F. Nesterenko, and G. V. Stepanov, “Behavior of metals at high-rate strains and wave generation in explosion welding”, *Strength Mater.*, vol. 44, no. 4, pp. 456–464, 2012.
- [73] A. Mousavi, S. A.-H.-J. of the M. and P. of, and undefined 2005, “Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding”, *Elsevier*.
- [74] D. Jaramillo, A. Szecket, and O. T. Inal, “On the transition from a waveless to a wavy interface in explosive welding”, *Mater. Sci. Eng.*, vol. 91, no. C, pp. 217–222, Jul. 1987.
- [75] J. R.-P. 5th int conf high ener rate form phil mag and undefined 1975, “A fluid

- model of impact welding.”.
- [76] D. R. Hay, “Explosive Welding: Applications and Techniques”, in *High-Pressure Science and Technology*, Springer US, 1979, pp. 1813–1836.
- [77] S. R. Reid, “A discussion of the mechanism of interface wave generation in explosive welding”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 16, no. 6, pp. 399–400, Jun. 1974.
- [78] H. El-Sobky, T. B.-C. on “High E. R. fabrication”, undefined Denver, and undefined 1975, “Experimental investigation of the mechanics of explosive welding by means of a liquid analogue.”.
- [79] A. Mousavi, S. Burley, S. A.-H.-I. journal of impact, and undefined 2005, “Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives”, *Elsevier*.
- [80] B. Crossland, *Explosive Welding Of Metals And Its Application*. 1982.
- [81] S. Stivers and R. W. Denver, “Computer selection of the optimum explosive loading and weld geometry”, 1975.
- [82] A. Loyer, M. Talerman, D. Hay, and G. G. Prop, “Explosive welding: the weldability window for dissimilar metals and alloys”, 1976.
- [83] A. Deribas, V. Simonv, and I. Zakchareko, “Investigation of explosive welding parameters for arbitrary combinations of metals and alloys”, in *University of Denver Denver, CO*, 1975.
- [84] G. Birkhoff, D. P. Macdougall, E. M. Pugh, and G. Taylor, “Explosives with Lined Cavities”, *J. Appl. Phys.*, vol. 19, no. 6, p. 563, 1948.
- [85] P. Dozolme, “Different Types of Explosives Used in Mining”, 2019. [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/explosives-used-in-mining-an-overview-2367467>. [Accessed: 07-Jul-2020].
- [86] “Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric micro-balloons - IOPscience.” [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/500/5/052030/meta>. [Accessed: 07-Jul-2020].
- [87] V. V Sil’vestrov and A. V Plastinin, “Investigation of Low Detonation Velocity Emulsion Explosives”, 2009.
- [88] A. Loureiro, R. Mendes, J. B. Ribeiro, R. M. Leal, and I. Galvão, “Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminium”, *Mater.*

- Des.*, vol. 95, pp. 256–267, 2016.
- [89] F. Findik, “Recent developments in explosive welding”, *Materials and Design*, vol. 32, no. 3. Elsevier, pp. 1081–1093, 01-Mar-2011.
- [90] B. Gulenc, “Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method”, *Mater. Des.*, vol. 29, no. 1, pp. 275–278, Jan. 2008.
- [91] T. B. Z., *Explosive welding, forming and compaction*. 1983.
- [92] M. Prażmowski, “Mechanical properties of zirconium/steel bimetal fabricated by means of explosive welding at varied detonation velocities,” 2014.
- [93] M. Acarer, B. Gülenç, and F. Findik, “Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength”, *Mater. Des.*, vol. 24, no. 8, pp. 659–664, 2003.
- [94] B. Wronka, “Testing of explosive welding and welded joints. Wavy character of the process and joint quality”, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, no. 5, pp. 309–313, May 2011.
- [95] S. H. Carpenter, “Explosion Welding: A Review.,” in *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1981, pp. 941–959.
- [96] X. Sun, J. Tao, and X. Guo, “Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding”, 2011.
- [97] LANXESS Deutschland GmbH, “Tepex ® MATERIAL DATA SHEET Tepex ® dynalite 102-RG600(x)/47% Roving Glass-PA6 Consolidated Composite Laminate” ,vol. 600, no. x, pp. 6–7, 2017.
- [98] W.-U. Kopp and M. Rückert, *Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing Kay Geels In collaboration with Daniel B.* 2007.

APÊNDICE A

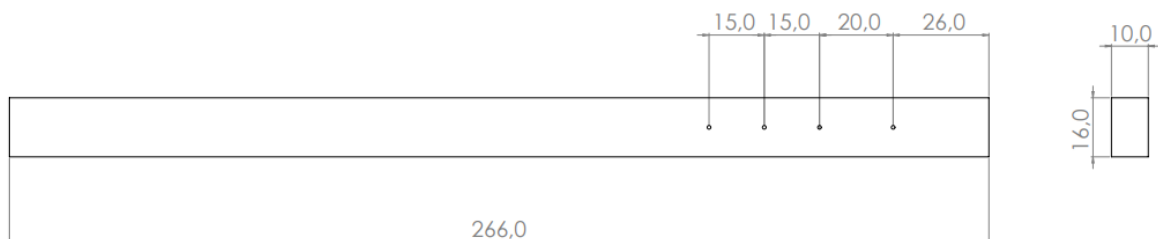


Figura A.1. Suporte das sondas.

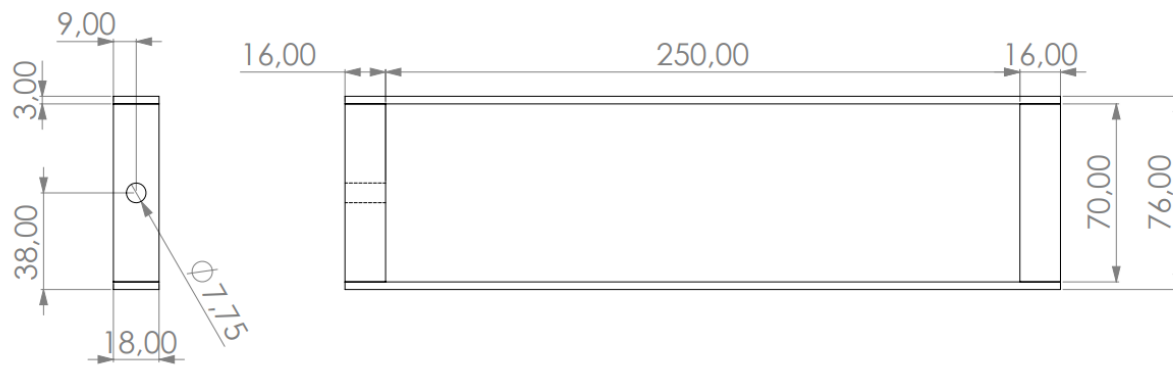


Figura A.2. Caixa para o ensaio explosivo 59.

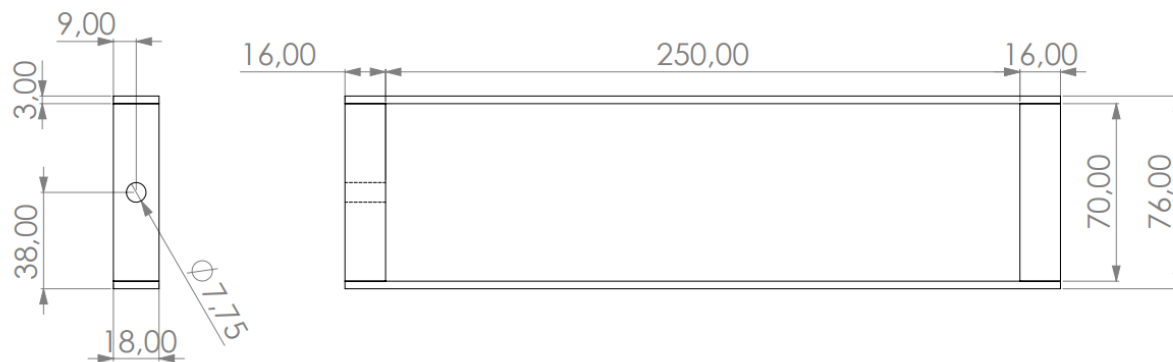


Figura A.3. Caixa para o ensaio explosivo 60.

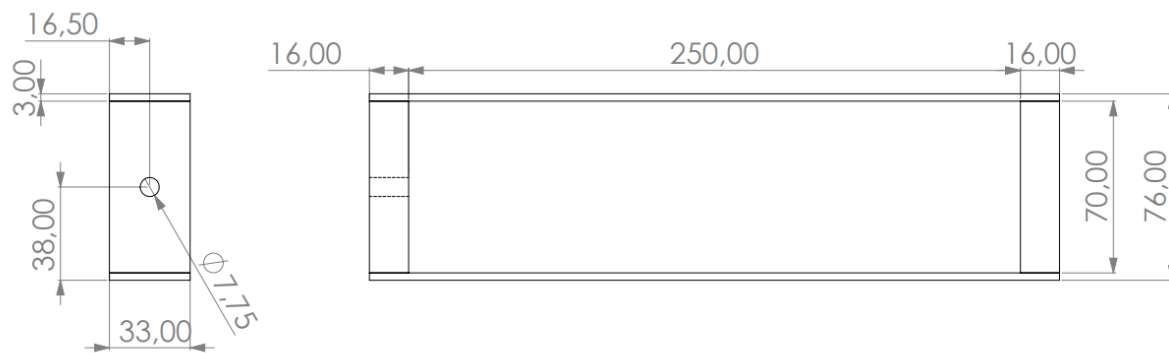


Figura A.4. Caixa para o ensaio explosivo 61.

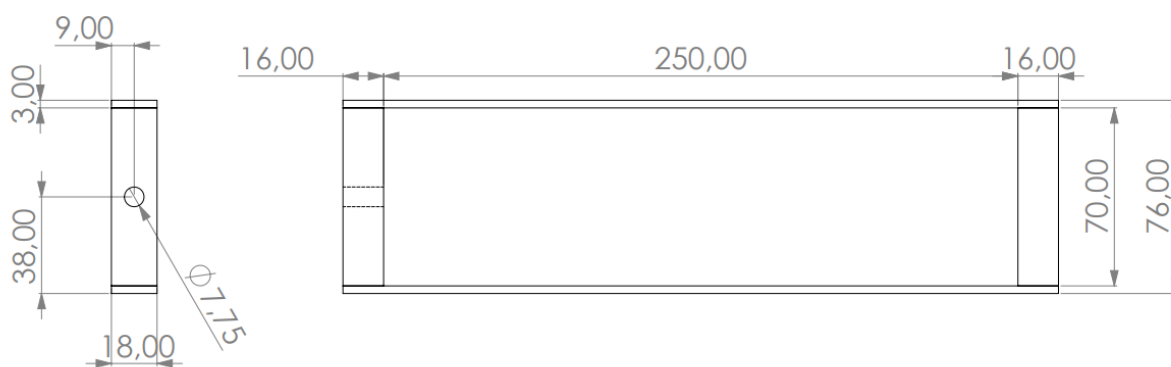


Figura A.5. Caixa para o ensaio explosivo 62.

APÊNDICE B



Tabela B.1. Ficha técnica EW59

Ficha técnica

Soldadura por explosão: AA6082-T6 – PA6 reforçado com fibra de vidro

Data: 24-06-2020

Identificação Soldadura: EW_59

Responsáveis:

		Dimensões [mm]			Dist. Entre placas [mm]	Massa [g]	Explosivo				
	Material	Comp.	Largura	Esp.			Tipo	EEx			
Protection plate	AA6082-T6	250	69	3		140,61					
Flyer plate	AA6082-T6-	250	70	3		144,67	Altura [mm]	15			
Base plate	Compósito	250	70	2	4,5	60,12	Rácio	1,03			
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Volume [mm ³]	267750			
Tipo	EPS (2,5%)	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	RDX	Massa [g]	149,47			
Volume [mm ³]		255	70	15	Volume [mm ³]	-	Densidade [kg/m ³]	[610-619]			
Massa [g]		Diam. Agulha [mm]		1	Massa [g]	10,52					
Cilindro padrão		Resistência [Ω]			Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6
Densidade [kg/m ³]		Díodo			Distância entre seringas	16,66	13,12	18,66			
Volume [mm ³]		Condensador [nF]			Distância (c/ agulhas) [mm]						
Massa [g]		Dif. Potencial [V]			Tempo s/ agulhas [μs]	5,826X10 ⁻⁶	10,641X10 ⁻⁶	-			
File name:											

Tabela B.2. Ficha técnica EW60



Ficha técnica

Soldadura por explosão: PA6 reforçado com fibra de vidro - AA6082-T6

Data: 24-06-2020

Identificação Soldadura: EW_60

Responsáveis:

		Dimensões [mm]			Dist. Entre placas (mm)	Massa [g]	Explosivo				
	Material	Comp.	Largura	Esp.			Tipo	EEx			
Protection plate	AA6082-T6	250	69	3		141,27					
Flyer plate	Compósito-	250	70	2		61,38	Altura [mm]	15			
Base plate	AA6082-T6	250	70	3	4,5	143,92	Rácio	1,03			
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Volume [mm ³]	269850			
Tipo	EPS (2,5%)	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	RDX	Massa [g]	157,36			
Volume [mm ³]		257	70	15	Volume [mm ³]	-	Densidade [kg/m ³]	[610-619]			
Massa [g]		Diam. Agulha [mm]		1	Massa [g]	10,54					
Cilindro padrão		Resistência [Ω]			Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6
Densidade [kg/m ³]		Díodo			Distância entre seringas	14,96	12,96	19,00			
Volume [mm ³]		Condensador [nF]			Distância (c/ agulhas) [mm]						
Massa [g]		Dif. Potencial [V]			Tempo s/ agulhas [μs]	5,593X10 ⁻⁶	-	16,829X10 ⁻⁶			
File name:											

Tabela B.3. Ficha técnica EW61



Ficha técnica

Soldadura por explosão: AA6082-T6 – PA6 reforçado com fibra de vidro

Data: 23-07-2020

Identificação Soldadura: EW_61

Responsáveis:

		Dimensões [mm]			Dist. Entre placas [mm]	Massa [g]	Explosivo						
	Material	Comp.	Largura	Esp.			Tipo	ANFO					
Protection plate	AA6082-T6	250	69	3		141,90							
Flyer plate	AA6082-T6	250	70	3		140,90	Altura [mm]	30					
Base plate	Compósito	250	70	2	4,5	59,80	Rácio	2,91					
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Volume [mm ³]	546000					
Tipo		Comp.	Largura	Esp.	Tipo	RDX	Massa [g]	415,67					
Volume [mm ³]		260	70	30	Volume [mm ³]	-	Densidade [kg/m ³]	761,3					
Massa [g]		Diam. Agulha [mm]		1	Massa [g]	32,08							
Cilindro padrão		Resistência [Ω]				Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	
Densidade [kg/m ³]		Díodo				Distância entre seringas	13,64	13,84	19,62				
Volume [mm ³]		Condensador [nF]				Distância (c/ agulhas) [mm]							
Massa [g]		Dif. Potencial [V]				Tempo s/ agulhas [µs]	-	-	-				
File name:													

Tabela B.4. Ficha técnica EW62



Ficha técnica

Soldadura por explosão: PA6 reforçado com fibra de vidro – PA6 reforçado com fibra de vidro

Data: 23-07-2020

Identificação Soldadura: EW_62

Responsáveis:

		Dimensões [mm]			Dist. Entre placas [mm]	Massa [g]	Explosivo				
	Material	Comp.	Largura	Esp.			Tipo	EEx			
Protection plate	MDF	250	69	2		141,27					
Flyer plate	Compósito-	250	70	2		61,38	Altura [mm]	14,5			
Base plate	Compósito	250	70	2	4,5	143,92	Rácio	2,33			
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Volume [mm ³]	254765			
Tipo	EPS (3%)	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	RDX	Massa [g]	141,39			
Volume [mm ³]		251	70	14,5	Volume [mm ³]	-	Densidade [kg/m ³]	555			
Massa [g]		Diam. Agulha [mm]		0,9	Massa [g]	10,54					
Cilindro padrão		Resistência [Ω]			Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6
Densidade [kg/m ³]		Díodo			Distância entre seringas	14,20	14,00	19,40			
Volume [mm ³]		Condensador [nF]			Distância (c/ agulhas) [mm]						
Massa [g]		Dif. Potencial [V]			Tempo s/ agulhas [μs]	5,890X10 ⁻⁶	11,128X10 ⁻⁶	18,878X10 ⁻⁶			
File name:											

APÊNDICE C

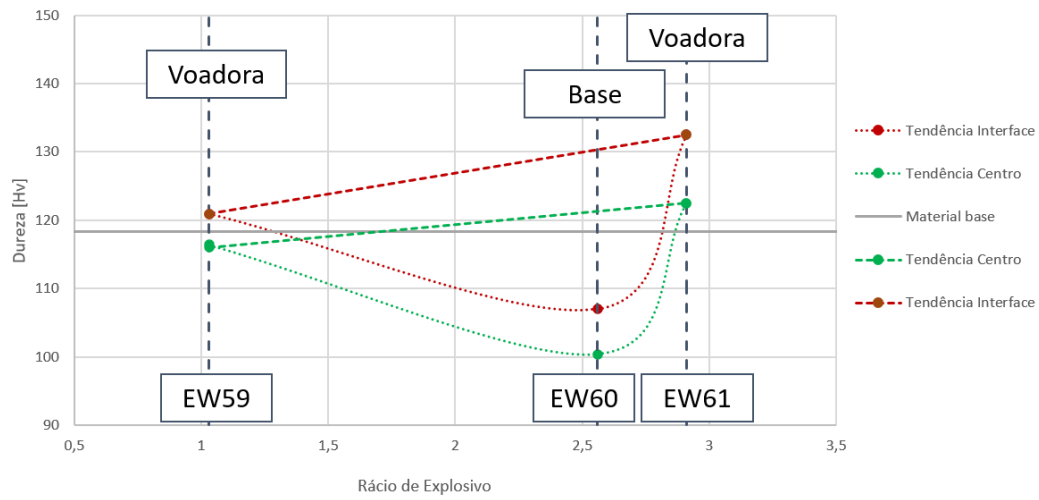


Figura C.1. Evolução da dureza nas chapas voadoras e base, em função do rácio de explosivo.