



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Paulo Ricardo da Silva Guedes

**ANÁLISE DA SOLDABILIDADE POR EXPLOSÃO
DE COBRE A AÇO INOXIDÁVEL E MAGNÉSIO A
TITÂNIO E ALUMÍNIO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, do ramo
de Produção e Projeto orientada pelos Professores Doutores Ricardo António
Lopes Mendes e Rui Manuel Ferreira Leal e apresentada ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciência e Tecnologias.**

Julho de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Análise da soldabilidade por explosão de cobre a aço inoxidável e magnésio a titânio e alumínio

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

Analysis of the explosion weldability of copper to stainless steel and magnesium to titanium and aluminium

Autor

Paulo Ricardo da Silva Guedes

Orientadores

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal

Júri

Presidente Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Lisboa

Coimbra, Julho, 2022

Tudo é orgulho e inconsciência. Tudo é querer mexer-se, fazer cousas, deixar rastro.

Fernando Pessoa

Aqueles que procuram as leis da natureza como suporte para suas novas obras
colaboram com o Criador.

Antoni Gaudí

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado só foi possível graças ao apoio e empenho de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes pela sua dedicação neste trabalho e orientação ao longo deste, conhecimento transmitido e disponibilidade na realização dos ensaios experimentais.

Ao Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal por toda a orientação nas análises efetuadas, estado de espírito característico e suporte permanente nesta dissertação de mestrado.

Aos Professores Doutores Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão e Carlos Miguel Almeida Leitão por todo o auxílio no laboratório e amizade ao longo desta etapa.

Ao engenheiro João Pimenta na construção das sondas, transmissão de técnicas e disponibilidade na realização dos ensaios experimentais.

Ao Senhor Fernando Bernardes pela ajuda infatigável na preparação das amostras e dos provetes ensaiados.

Aos Doutores Hélio Miranda e David Andrade pela amizade e auxílio prestado diariamente, contribuindo deste modo para a execução deste trabalho.

Aos meus colegas de investigação por toda a partilha de sentimento e cooperação nas mais diversas tarefas.

Ao LEDAP e ao CEMMPRE pela disponibilização das infraestruturas e meios para realização dos ensaios de soldadura por explosão.

Aos meus amigos que é um privilégio ter a presença deles nesta etapa inesquecível.

Aos meus pais por me terem proporcionado estes cinco anos magníficos, pelo seu apoio permanente e incansável.

Por fim, mas não menos importante à minha namorada Joana pelo apoio e ternura diária.

RESUMO

A evolução tecnológica levou à necessidade de obter ligações de materiais com propriedades distintas. A sua obtenção só é possível através de processos alternativos, como a soldadura por explosão, que não dependem da fusão dos materiais para efetuar a sua união.

Este trabalho é constituído pela análise da soldabilidade por explosão de titânio a magnésio, alumínio a magnésio e de cobre a aço inoxidável. Para tal, foram realizados no total 4 ensaios, dos quais os dois primeiros com recurso à liga de magnésio AZ31 e à liga de titânio Ti6AL4V, tendo sido utilizado como explosivo ANFO. Uma vez que os resultados obtidos nos dois primeiros ensaios não foram bem-sucedidos, realizou-se um terceiro ensaio entre a liga de magnésio e a liga de alumínio AA6082-T6, com o intuito de entender o comportamento do magnésio quando se pretende soldar por explosão com um material possuidor de propriedades mecânicas não tão distintas, como as observadas entre o titânio e o magnésio. Para a sua execução foi utilizada uma emulsão explosiva com 2 % de EPS. O último ensaio foi realizado entre a liga de cobre Cu-DHP e a liga de aço inoxidável AISI 316L, tendo sido executado com uma emulsão explosiva com 3 % de EPS.

A ligação de cobre a aço inoxidável foi bem-sucedida, apresentando uma tendência de endurecimento dos materiais após a execução do ensaio. Este aumento de dureza é mais significativo quando na amostra transversal nos deslocamos para a zona mais periférica das placas, uma vez que a deformação plástica sofrida nestas regiões é superior. Em comparação com as soldaduras efetuadas em anos anteriores, esta apresenta um comprimento e uma amplitude de onda de menor dimensão originado pela alteração do tipo de explosivo. Os ensaios de tração ao corte apresentaram elevada consistência no seu comportamento, tendo a falha ocorrido na região de cobre, ou seja, no material com menor resistência mecânica e não na soldadura.

Palavras-chave: Soldadura por explosão, Janela de soldabilidade, Perfil de dureza, Magnésio, Cobre, Aço inoxidável.

ABSTRACT

Technological evolution has led to the need to obtain connections between materials with different properties. This is only possible through alternative processes, such as explosion welding, which do not depend on the fusion of materials to make the union.

This work consists of the analysis of the explosion weldability of titanium to magnesium, aluminium to magnesium and copper to stainless steel. For this purpose, a total of 4 tests were performed, of which the two first ones with magnesium alloy AZ31 and titanium alloy Ti6AL4V were performed, using as explosive ANFO. Since the results obtained in the first two tests were not successful, a third test was performed between magnesium alloy and aluminium alloy AA6082-T6, in order to understand the behaviour of magnesium when it is intended to perform explosion welding with a material having mechanical properties not so different, as those observed between titanium and magnesium. For its execution an explosive emulsion with 2% of EPS was used. The last test was performed between Cu-DHP copper alloy and AISI 316L stainless steel alloy, and was performed with an explosive emulsion with 3% of EPS.

The bonding of copper to stainless steel was successful, showing a tendency of hardening of the materials after the execution of the test. This increase in hardness is more significant when in the transverse sample we move to the most peripheral zone of the plates, since the plastic deformation suffered in these regions is higher. In comparison with the welds made in previous years, this one presents a smaller length and wave amplitude caused by the change in the type of explosive. The shear tensile tests showed high consistency in their behaviour, with failure occurring in the copper region, i.e., in the material with lower mechanical strength and not in the weld.

Keywords: Explosive welding, Weldability window, Hardness profile, Magnesium, Cooper, Stainless steel.

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Contextualização Histórica	3
2.2. Aplicações Industriais do Processo de Soldadura por Explosão	4
2.3. Combinações de Materiais Realizadas pelo Processo de Soldadura por Explosão	4
2.4. Princípios de Funcionamento do Processo	5
2.4.1. Etapas do Processo	5
2.4.2. Parâmetros Cinemáticos do Processo	6
2.4.3. Seleção do Explosivo	9
2.4.4. Distância Entre as Placas (STD).....	11
2.4.5. Características da Interface	12
2.4.6. Compostos Intermetálicos	13
2.4.7. Mecanismos de Formação de Ondas	14
2.5. Trabalhos Anteriores.....	14
2.5.1. Ligação Alumínio-Titânio-Aço Inoxidável	14
2.5.2. Ligação Alumínio-Magnésio.....	16
2.5.3. Ligação Cobre-Aço Inoxidável	17
2.6. Janela de Soldabilidade.....	18
2.6.1. Formação de Onda (Limite à Esquerda ou Limite de Cowan).....	19
2.6.2. Formação de Jato (Limite à Direita ou Limite de Walsh).....	19
2.6.3. Velocidade Mínima de Soldadura (Limite Inferior ou Limite de Zakharenko).....	20
2.6.4. Fusão por Uso de Velocidade Excessiva (Limite Superior ou Limite de Wittman).....	20
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1. Nomenclatura.....	23
3.2. Material Base	24
3.3. Preparação dos Ensaios.....	26
3.4. Medição da Velocidade de Detonação.....	28
3.5. Realização dos Ensaios de Soldadura	30
3.6. Rastreabilidade das amostras	31
3.7. Análise Metalográfica	32
3.7.1. Preparação das Amostras.....	32
3.7.2. Ataque Químico.....	32
3.7.3. Análise Microestrutural	33
3.8. Análise Mecânica.....	34

3.8.1.	Microdureza	34
3.8.2.	Ensaio de tração ao corte	35
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	37
4.1.	Determinação das Condições Cinemáticas dos Ensaio Realizados e da Janela de Soldabilidade.....	37
4.1.1.	Determinação da velocidade de detonação	37
4.1.2.	Determinação da Velocidade de Projeção.....	38
4.1.3.	Determinação do ângulo de colisão	38
4.1.4.	Construção da janela de soldabilidade e enquadramento dos ensaios realizados.....	38
4.2.	Análise Macroscópica.....	41
4.2.1.	EW63.....	41
4.2.2.	EW64.....	42
4.2.3.	EW65.....	43
4.2.4.	EW66.....	44
4.3.	Análise Microscópica	45
4.3.1.	Perfis de microdureza.....	45
4.3.2.	Discussão dos resultados da microdureza	48
4.3.3.	Análise da interface	50
4.3.4.	SEM/EDS	53
4.3.5.	Ensaio de tração ao corte.....	56
5.	CONCLUSÕES.....	59
5.1.	Propostas Para Trabalhos Futuros	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	APÊNDICE A	65
	APÊNDICE B	67
	APÊNDICE C	71
	APÊNDICE D	73
	APÊNDICE E.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Compatibilidade de materiais aplicando o processo de soldadura por explosão[6].	5
Figura 2.2. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão.	6
Figura 2.3. Representação esquemática do processo de soldagem por explosão (V_p), (V_d) e (β), adaptada de [9]......	7
Figura 2.4. Influência do aumento do rácio de explosivo na interface Al-Cu [18].	11
Figura 2.5. Efeito do aumento da STD na morfologia da interface na soldadura por explosão [19]......	12
Figura 2.6. Morfologias típicas da interface: (a) interface plana; (b) interface ondulada; (c) interface com região de material fundido [22].	13
Figura 2.7. Microscopia ótica de cortes longitudinais à direção de soldadura das soldaduras: (a) utilização de ANFO; (c) utilização de uma emulsão explosiva com 2% de EPS [24]	15
Figura 2.8. Diagrama de fases titânio-alumínio [26]......	15
Figura 2.9. Condição experimental para soldagem A1100 a AZ31 e a resistência ao cisalhamento resultante [26]......	16
Figura 2.10. Micrografias da interface de solda das amostras (a) #3, (b) #7, adaptado de [26].	16
Figura 2.11. Microestrutura da amostra longitudinal [26].	17
Figura 2.12. Janela genérica de soldabilidade com a respetiva definição de limites [9].....	18
Figura 3.1. Microestrutura das placas de material base: (a) Cu-DHP; (b) AZ31; (c) AISI 316L; (d) AA6082-T6.	25
Figura 3.2. Montagem do ensaio experimental EW63 no interior da câmara de explosão.	28
Figura 3.3. Conjunto de sondas fixas ao suporte em MDF.	29
Figura 3.4. Cronómetros HP 5334B Universal Counter usados nos ensaios.	29
Figura 3.5. Placas com as respetivas zonas de análise marcadas: (a) EW63V; (b) EW65; (c) EW66.....	31
Figura 3.6. Amostra de EW63MBB envolvida em resina (aspeto final): (a) vista de topo; (b) vista de perfil.	32
Figura 3.7. Distribuição das indentações referentes aos perfis de dureza: (a) material base; (b) EW66L1.....	34
Figura 3.8. Montagem do equipamento e do provete para execução do ensaio de tração ao corte. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	35
Figura 4.1. Janela de soldabilidade magnésio-titânio: (a) placa AZ31 como placa voadora e a placa Ti6Al4V como placa base e enquadramento do ensaio EW63 (b) placa	

Ti6Al4V como placa voadora e a placa AZ31 como placa base e enquadramento do ensaio EW64.	39
Figura 4.2. Janela de soldabilidade alumínio-magnésio e enquadramento do ensaio EW65 (placa AA6082-T6 como placa voadora e a placa AZ31 como placa base).	40
Figura 4.3. Janela de soldabilidade cobre-aço inoxidável e enquadramento do ensaio EW57 e EW66 (placa Cu-DHP como placa voadora e a placa AISI 316L como placa base).	41
Figura 4.4. Materiais após a execução do ensaio EW63: (a) vista de topo; (b) vista de perfil.	42
Figura 4.5. Materiais após a execução do ensaio EW64: (a) vista de topo; (b) EW64V vista de perfil e EW64B vista de topo.	43
Figura 4.6. Materiais após a execução do ensaio EW65: (a) EW65V; (b) região de análise da placa EW65V; (c) EW65B; (d) região de análise da placa EW65B.	44
Figura 4.7. Materiais após a execução do ensaio EW66.	45
Figura 4.8. Perfil de dureza traçado para a amostra EW63L1 com a representação da dureza média do AZ31 MB.	46
Figura 4.9. Perfil de dureza traçado para a amostra EW66T1 com a representação da dureza média do Cu-DHP MB e AISI 316L MB.	47
Figura 4.10. Distribuição das indentações efetuadas na análise transversal da microdureza do ensaio EW66.	47
Figura 4.11. Perfil de dureza traçado para a amostra EW66L1 com a representação da dureza média do Cu-DHP MB e AISI 316L MB.	48
Figura 4.12. Microestrutura da amostra EW66T1: a) placa base b) placa voadora c) macro da soldadura EW66T1.	50
Figura 4.13. Microestrutura da amostra EW66L1: a) placa base b) placa voadora c) ampliação de 20 x de uma zona ondulada.	51
Figura 4.14. SEM da amostra EW65: (a) placa base (Mg) espectro A e espectro B; (b) placa voadora (Al) espectro C.	53
Figura 4.15. Secção da amostra EW66L1 submetida a análise EDS.	55
Figura 4.16. Análise da variação de composição da amostra EW66L1: (a) linha analisada; (b) gráfico de variação de composição.	55
Figura 4.17. Curvas Força/Alongamento do ensaio EW66.	56
Figura 4.18. Mapa de deformações locais dos provetes do ensaio EW66: (a) P1; (b) P2; (c) P3.	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química da liga AZ31 (%peso).....	24
Tabela 3.2. Composição química da liga Ti6AL4V (%peso).....	24
Tabela 3.3. Composição química da liga AA6082 – T6 (%peso).....	24
Tabela 3.4. Composição química da liga Cu-DHP (%peso).	25
Tabela 3.5. Composição química da liga AISI 316L (%peso).	25
Tabela 3.6. Propriedades físicas do material base utilizado.	26
Tabela 3.7. Propriedades mecânicas do material base utilizado.....	26
Tabela 3.8. Tipo de explosivo utilizado nos diferentes ensaios.	27
Tabela 3.9. Parâmetros dos ensaios de soldadura realizados.	30
Tabela 4.1. Determinação das velocidades de detonação.....	37
Tabela 4.2. Velocidade de projeção de cada ensaio realizado.....	38
Tabela 4.3. Ângulo de colisão de cada ensaio realizado.	38
Tabela 4.4. Valores referentes ao comprimento de onda EW65.	44
Tabela 4.5. Compilação de parâmetros determinados para o ensaio EW63 com recurso à microdureza.	48
Tabela 4.6. Compilação de parâmetros determinados para o ensaio EW66 e EW57 com recurso à microdureza.	49
Tabela 4.7. Valores referentes ao comprimento de onda EW66L1 e EW57.....	52
Tabela 4.8. Valores referentes à altura de onda EW66L1 e EW57.	52
Tabela 4.9. Espectros das amostras do ensaio EW65 [at. %].....	54
Tabela 4.10. Compilação de valores máximos no ensaio de tração ao corte da soldadura EW66.....	56

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

β – Ângulo de colisão [rad]

β_c – Ângulo de colisão crítico [rad]

ρ_{expl} – Densidade do explosivo [kg/m³]

ρ_b – Densidade da placa base [kg/m³]

ρ_f – Densidade da placa voadora [kg/m³]

τ – Constante de tempo

C – Massa de explosivo [kg]

C_0 – Velocidade de propagação do som no material [m/s]

$C_{b,f}$ – Velocidade de propagação do som no material da placa voadora [m/s]

$C_{p,f}$ – Calor específico a pressão constante do material da placa voadora [J·kg⁻¹·K⁻¹]

h_{expl} – Espessura de explosivo utilizado [m]

h_f – Espessura da placa voadora [m]

$\sqrt{2E_K}$ – Energia específica de Gurney [m/s]

K_1 – Coeficiente adimensional para a limpeza de superfície de materiais

K_f – Condutibilidade térmica do material da placa voadora [W·m⁻¹·K⁻¹]

M – Massa da placa voadora [kg]

N – Constante empírica para o cálculo do limite superior

R – Rácio de explosivo

$H_{V,b}$ – Dureza Vickers da placa base [Pa]

$H_{V,f}$ – Dureza Vickers da placa voadora [Pa]

p_{cj} – Pressão de Chapman-Jouguet [GPa]

$Recr$ – Número de Reynolds crítico

t – Tempo [s]

$T_{m,f}$ – Temperatura de fusão do material da placa base [°C]

$t_{v, cal}$ – Tempo para que a velocidade de projeção de calibração seja atingida [s]

t_0 – Instante de tempo inicial [s]

V_c – Velocidade no ponto de colisão [m/s]

$V_{c,min}$ – Velocidade no ponto de colisão mínima [m/s]

$V_{c,tr}$ – Velocidade de colisão de transição para interface ondulada [m/s]

V_d – Velocidade de detonação [m/s]

V_p – Velocidade de projeção [m/s]

$V_{p,cal}$ – Velocidade de projeção de calibração [m/s]

$V_{p,Gurney}$ – Velocidade de projeção de Gurney [m/s]

Siglas

ANFO – *Ammonium Nitrate Fuel Oil*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EDS - *Energy dispersive X-ray spectroscopy*

EEx – Emulsão Explosiva

EPS – *Expanded Polystyrene*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MDF - *Medium Density Fiberboard*

SEM – *Scanning Electron Microscopy*

STD – *Stand-off Distance*

XRD - *X-ray diffraction*

1. INTRODUÇÃO

A soldadura por explosão é um processo que recorre a uma detonação controlada, com o intuito de que após o súbito aumento de volume dos produtos da detonação, no momento da explosão, o processo de expansão dos produtos da detonação gasosos acelere uma placa voadora e a faça colidir com uma placa base. Nesse impacto, a alta velocidade, é desenvolvida uma deformação plástica dos materiais e conseqüentemente uma adesão entre estes. Como tal, a soldadura por explosão é classificada como um processo de soldadura em estado sólido, uma vez que não necessita da prévia fusão dos materiais, permitindo combater as limitações impostas pelos tais ditos processos convencionais.

O intuito deste trabalho é analisar a soldabilidade por explosão de titânio a magnésio, de alumínio a magnésio e de cobre a aço inoxidável, compreender a influência da alteração dos parâmetros cinemáticos, assim como a alteração do tipo de explosivo e o seu rácio.

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos sendo o primeiro a introdução, seguido do estado da arte, procedimento experimental, apresentação e discussão dos resultados e por último as conclusões.

No capítulo seguinte, estado da arte, é feita inicialmente uma contextualização do aparecimento do processo, das suas aplicações e das combinações estudadas, seguido de uma explicação do funcionamento do processo, dos fenómenos ocorrentes na interface, uma breve exposição de trabalhos anteriores sobre alguns dos materiais utilizados e por último os limites teóricos para a construção da janela de soldabilidade. No capítulo três são abordados todos os procedimentos executados para a realização dos ensaios, assim como a execução dos passos para os diferentes testes ao quais cada amostra foi submetida. O capítulo quatro compreende os resultados obtidos e discussão dos mesmos. Por último, no quinto capítulo são explanadas as principais conclusões sobre o trabalho realizado e propostas para a realização de trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Contextualização Histórica

A soldadura por explosão, resultou da observação de um fenómeno durante a 1ª guerra mundial, no qual por vezes os estilhaços provenientes das explosões, ou seja, animados de elevada velocidade, ao embaterem em superfícies metálicas ficavam soldados [1]. Contudo, só em plena 2ª guerra mundial, no ano de 1944 é que o fenómeno anteriormente observado assumiu um carácter científico, através do ensaio em laboratório por L. R. Carl. A experiência realizou-se com a utilização de dois discos de latão ligados a um detonador, com o intuito de elevar o procedimento ao nível industrial. Após a realização dos testes observou que não existia uma zona fundida entre as placas metálicas, concluindo que o processo utilizado para a união das mesmas tratava-se de um processo de soldadura em estado sólido [2].

O êxito do trabalho não foi o esperado, existindo uma dificuldade associada à inserção da descoberta num mercado que conduzisse retorno económico, sendo esta a principal razão a parar os testes. Porém, como referenciado por Crossland, em 1957 o método de soldadura por explosão despertou um enorme interesse na comunidade científica, após o cientista V. Filipchuk ter descoberto que através desta tecnologia seria possível soldar de forma consistente um perfil em U de alumínio numa matriz de aço [3]. Com o avanço dos ensaios chegou a elaborar um artigo referente ao método que seguiu para obter a união de alumínio ao aço, advindo o seu patenteamento. Uma vez mais, existia uma grande dificuldade para esta tecnologia, a falta de conhecimento dos parâmetros que influenciam o processo de soldadura por explosão, levava o método a apresentar resultados negativos demonstrados pela enorme dificuldade de conversão da onda de choque em tempo suficiente para que fosse possível atingir uma soldadura com sucesso [4].

Deribas refere que durante a década de 60, Arnold Holtzman conseguiu desenvolver os parâmetros da soldadura por explosão utilizados e definidos anteriormente por V. Filipchuk, chegando a um novo processo que seria patenteado no ano de 1964 [4].

O processo de soldadura por explosão encontra-se em atual expansão de mercado, sendo alvo de forte investigação devido às vantagens que se pode retirar da sua aplicação a nível industrial. Podemos contar com mais de 260 combinações de materiais [5].

2.2. Aplicações Industriais do Processo de Soldadura por Explosão

Na atualidade, a aplicação dos produtos obtidos através do processo de soldadura por explosão está em permanente expansão. O mercado alvo visa o fabrico de superfícies com capacidade de resistir a ambientes corrosivos, aplicações que necessitem de uma eficaz permuta de calor e a indústria naval [6]:

- Fabrico de reatores nucleares;
- Construção naval;
- Fuselagem de aviões;
- Fabrico de permutadores de calor;
- Fabrico de transformadores elétricos;

2.3. Combinações de Materiais Realizadas pelo Processo de Soldadura por Explosão

A capacidade de unir materiais com propriedades completamente distintas, sem implicar uma mudança nas propriedades dos materiais de base, leva a um crescimento no interesse pela tecnologia de soldadura por explosão. Ao longo do tempo tem sido realizado um esforço na descoberta dos materiais que se podem soldar através deste processo. Na Figura 2.1. encontram-se reunidas algumas dessas ligações, assim como potenciais ligações.

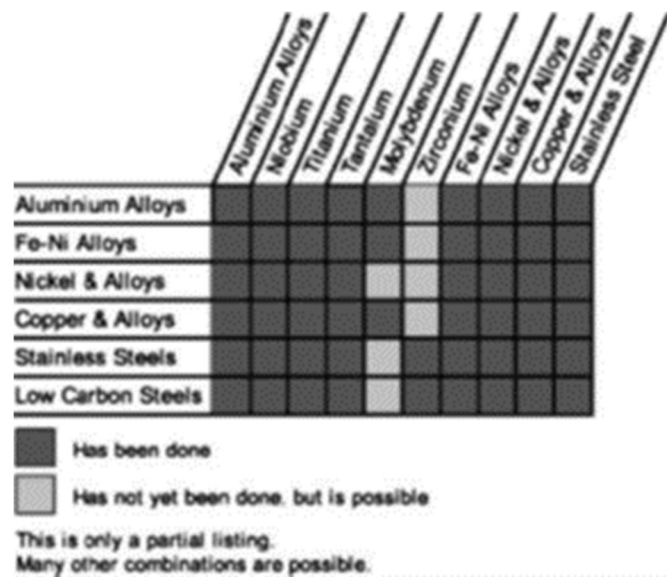


Figura 2.1. Compatibilidade de materiais aplicando o processo de soldadura por explosão[6].

2.4. Princípios de Funcionamento do Processo

Neste subcapítulo, são apresentados os aspetos fundamentais para a compreensão do fenómeno de soldadura por explosão, assim como a possibilidade da observação e análise das soldaduras obtidas em trabalhos anteriores.

2.4.1. Etapas do Processo

De uma forma genérica podemos considerar que o método de soldadura por explosão é constituído por três etapas básicas:

- i. Detonação da carga explosiva;
- ii. Aceleração e deformação da placa voadora;
- iii. Colisão entre a placa voadora e a placa base.

A etapa i. Detonação da carga explosiva, representa o momento no qual a utilização de um explosivo, quando detonado, sofre uma súbita variação de volume, seguida da libertação de energia da carga explosiva, na qual os produtos da explosão apresentam-se maioritariamente no estado gasoso. A expansão de volume apresentará uma frente de propagação da onda gerada, a qual se propagará segundo uma velocidade, sendo esta definida como a velocidade de detonação (V_d). Uma vez que a onda gerada contacta com a placa voadora, a expansão dos produtos da detonação impõe uma aceleração nesta placa permitindo a iniciação da segunda etapa do processo. A etapa ii. Aceleração e deformação da placa voadora compreende o período de aceleração da placa voadora até que seja atingida

uma velocidade de projeção (V_p), numa distância reduzida, sendo representado pela distância inicial estabelecida entre as duas placas a unir, designada por *stand-off distance* (STD). Por fim, a etapa iii. Colisão entre a placa voadora e a placa base, representa o momento da união a nível atômico entre a placa voadora e a placa base. O processo de soldadura por explosão pode apresentar três configurações possíveis: Plana (paralela, ou inclinada) ou cilíndrica. Na Figura 2.2. é possível a observação da montagem inicial das placas, para a realização de um ensaio em configuração plana e paralela, assim como os restantes componentes necessários para a realização do processo de soldadura por explosão. No caso da configuração paralela, a velocidade no ponto de colisão (V_c) assumirá o valor da velocidade de detonação (V_d).

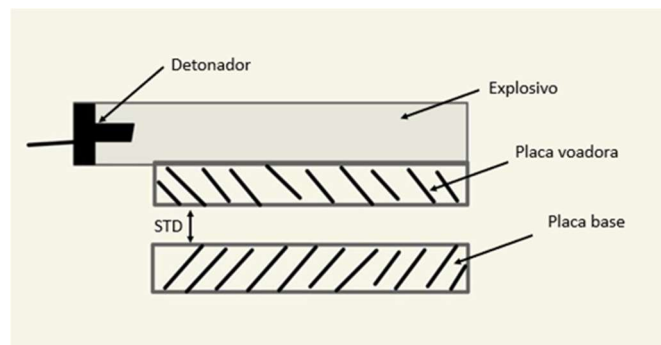


Figura 2.2. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão.

2.4.2. Parâmetros Cinemáticos do Processo

A execução do processo de soldadura por explosão requer a utilização de um explosivo, com o objetivo de impor uma aceleração na placa voadora e conseqüentemente uma colisão de elevada energia entre os materiais que se pretende soldar. Podemos afirmar numa primeira análise que a força de compressão que resulta desta colisão possibilita uma união entre os materiais devido à sua deformação plástica. Embora a libertação de energia seja elevada, o tempo necessário para que se efetue uma soldadura consistente é de curta duração, evitando desta forma uma possível transferência de calor significativa entre os materiais, isto é, entre a placa voadora e a placa base [7].

A placa voadora é animada de velocidade devido à expansão dos produtos da detonação, que por sua vez colidirá com a placa base, sendo a esta última placa transmitida a força do impacto resultante dessa mesma colisão. As duas placas encontram-se separadas

por uma distância inicial que necessita de garantir um valor mínimo que permita à placa voadora atingir uma velocidade que proporcione a união das placas.

A colisão dá-se com um determinado ângulo, denominado por ângulo de colisão (β), desenvolvido no ponto de contacto entre as duas placas. Este contacto existente, no caso de uma soldadura efetuada com sucesso, leva à formação de uma interface ondulada e de um jato que ao ser projetado permitirá a limpeza das superfícies das placas removendo os óxidos e as impurezas no momento de execução do processo de soldadura por explosão [1] [5].

Numa situação em que a montagem das placas assuma uma configuração paralela, a ocorrência do ângulo de colisão é inevitável devido à forma de propagação da explosão. Esta propaga-se a uma velocidade extremamente elevada, inibindo uma deformação uniforme ao longo da placa voadora, potenciando deste modo a deformação conforme se dá a sua propagação. Como tal, há uma onda de choque oblíqua que promoverá a existência deste mesmo ângulo [8]. O ângulo de colisão, assim como a velocidade de detonação, a velocidade de projeção e a velocidade no ponto de colisão necessitam de estar definidos num intervalo que garantam uma soldadura com sucesso, como será abordado na secção 2.6 Janela de Soldabilidade. Todos os parâmetros deverão ser selecionados com rigor na preparação do processo. A Figura 2.3. permite observar a relação dos parâmetros referidos:

- Velocidade de projeção (V_p);
- Velocidade de detonação (V_d);
- Ângulo de colisão (β);
- Velocidade no ponto de colisão (V_c).

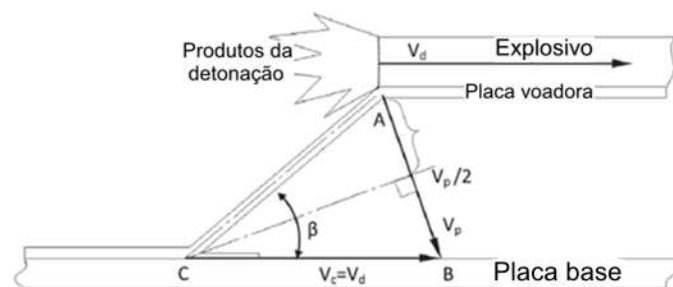


Figura 2.3. Representação esquemática do processo de soldagem por explosão (V_p), (V_d) e (β), adaptada de [9].

A observação da figura anterior possibilita obter a Equação (2.1) que possui a capacidade de relacionar os parâmetros referidos no parágrafo anterior.

$$V_p = 2V_d \cdot \sin \frac{\beta}{2} \quad (2.1)$$

O cálculo da velocidade terminal de fragmentos que sofreram uma aceleração devido à detonação de um explosivo foi apresentada por Gurney [10], relacionando essa velocidade terminal com a energia específica de Gurney ($\sqrt{2E}$) expressa em m/s sendo esta energia conhecida como a energia específica de cada explosivo. Após a exibição deste modelo, Kennedy [11] através da Equação (2.2) apresentou a obtenção da velocidade de Gurney ($V_{p,Gurney}$) em m/s para uma configuração plana.

$$V_{p,Gurney} = \sqrt{2E_k} \cdot \sqrt{\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4}} \quad (2.2)$$

A Energia característica de Gurney poderá ser estimada segundo uma correlação empírica desenvolvida por Cooper P. W. [12] expressa pela Equação (2.3), na qual é relacionada com a velocidade de detonação.

$$\sqrt{2E_k} = \frac{Vd}{2,97} \quad (2.3)$$

O valor de R é determinado pela Equação (2.4), sendo designado como rácio de explosivo.

$$R = \frac{C}{M} \quad (2.4)$$

M representa a massa da placa voadora e C a massa do explosivo ambas expressas em kg.

Após o cálculo da velocidade de projeção de Gurney por intermédio da Equação (2.2), a velocidade de projeção em função do tempo ($V_p(t)$) representada pela Equação (2.5) foi proposta por Chou e Flis [13].

$$V_p(t) = V_{p,Gurney} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right] \quad (2.5)$$

Onde t_0 é o instante inicial em segundos (normalmente igual a zero) e τ uma constante de tempo calculada pela Equação (2.6) [14].

$$\tau = C_1 \cdot \frac{M \cdot V_{p,Gurney}}{p_{cj}} + C_2 \quad (2.6)$$

M como referenciado para a Equação (2.4) assume o valor da massa da placa voadora, p_{cj} representa a pressão de Chapman-Jouguet produzida pelos produtos de detonação em GPa e C_1 e C_2 constantes empíricas de forma que a placa voadora seja acelerada até atingir uma

velocidade de calibração que é 80% da velocidade de Gurney ($V_{p,cal}$), como podemos comprovar o seu valor através da Equação (2.7). É considerado o processo de aceleração da placa voadora até suceder 8 reflexões da onda de choque no interior do material. O tempo de calibração ($t_{v,cal}$) para que a $V_{p,cal}$ seja atingida é calculado por intermédio da Equação (2.8) e assume que a onda de choque se propaga à velocidade do som do material no interior da placa voadora [9].

$$V_{p,cal} = 0,8 \cdot V_{p,Gurney} \quad (2.7)$$

$$t_{v,cal} = 8 \cdot \frac{h_f}{C_{b,f}} \quad (2.8)$$

Na Equação (2.8) a espessura da placa voadora (h_f) é expressa em m e a velocidade de propagação do som na placa voadora ($C_{b,f}$) tem como unidade m/s.

Uma vez determinada a evolução da velocidade de projeção em função do tempo por intermédio da Equação (2.5), a integração desta função permite obter a Equação (2.9) que é representativa da distância percorrida pela placa voadora, em função do tempo.

$$X_p(t) = V_{p,Gurney} \cdot \left[t - t_0 + \tau \cdot \left(\exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) - 1 \right) \right] \quad (2.9)$$

Se a Equação (2.9) for igualada à distância inicial à qual as duas placas estão separadas é calculada a velocidade da placa no momento do impacto.

2.4.3. Seleção do Explosivo

Dos parâmetros mais importantes para a obtenção de uma soldadura com sucesso é a seleção do tipo e da quantidade de explosivo a utilizar no processo de soldadura por explosão. A sua seleção permite a variação dos seguintes parâmetros:

- A velocidade de detonação;
- Velocidade de projeção;
- Velocidade no ponto de colisão;
- O ângulo de colisão.

Segundo Crossland, para a obtenção de uma soldadura consistente a velocidade no ponto de colisão e a velocidade de projeção necessitarão de assumir um valor inferior à velocidade sónica das placas que se pretende soldar [3]. Como tal, a velocidade de detonação de um explosivo utilizado para efetuar um processo de soldadura por explosão deverá ser

inferior à velocidade de sónica das placas utilizadas, permitindo a formação do jato [15]. Os materiais utilizados nos processos de soldadura por explosão possuem uma velocidade de propagação do som na gama dos 4500 m/s a 6000 m/s, o que compromete a utilização de explosivos com aplicação na área militar mais comuns, designados por explosivos plásticos. Este tipo de explosivo, possui uma velocidade de detonação compreendida entre os 6000 m/s e os 8000 m/s, o que comprometeria uma soldadura de qualidade [6]. Por vezes, a sensibilidade dos explosivos utilizados é tão baixa que é necessário recorrer à utilização de um explosivo deste tipo (explosivo plástico) para auxiliar o processo de detonação. Por exemplo, quando é utilizada uma emulsão explosiva a sua capacidade de detonar é tão reduzida que necessitamos de utilizar um sensibilizante para que ocorra a detonação [16]. O acionamento do detonador leva a que seja detonado o sensibilizante em primeiro lugar, permitindo uma frente de detonação mais uniforme quando ocorrer a detonação do explosivo principal e consequentemente que velocidade de colisão também o seja [6].

Para a seleção de um explosivo, com o intuito de proceder à aplicação do método de soldadura por explosão, dá-se prioridade a um explosivo lento, isto é, um explosivo cuja velocidade de detonação esteja compreendida entre os 1500 m/s e os 3500 m/s e que permita uma execução do processo com sucesso. Dentro deste tipo de explosivo os mais comuns são o ANFO (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*) e as Emulsões Explosivas (EEx) TNT-Nitrato de amónio, PETN-Nitrato de amónio e pó à base de glicerina [5]. O ANFO é um explosivo constituído por uma mistura granulada de nitrato de amónio com *fuel oil* em diferentes percentagens, permitindo obter velocidade de detonação entre os 2000 m/s a 3000 m/s, disponibilizando deste modo energia cinética necessária para transformar o processo de soldadura por explosão exequível. Para além da velocidade de detonação, é necessário garantir que o explosivo possua um fácil manuseamento e apresente granulometrias diferentes, permitindo uma densidade uniforme ao longo da sua disposição. Dependendo do tipo de explosivo selecionado, existe uma espessura mínima, designada por espessura crítica, para cada explosivo que deverá ser considerada na preparação do processo de soldadura pois abaixo desta espessura não ocorrerá detonação.

Deve-se atender não só ao tipo, mas também à quantidade de explosivo utilizado. O rácio de explosivo influencia diretamente a velocidade imposta à placa voadora assim como a forma de choque entre esta e a placa estacionária. O mecanismo de formação de ondas é consequência do tipo de explosivo selecionado [17]. Para o mesmo tipo de explosivo, a

variação do rácio influencia fortemente a morfologia apresentada na interface das placas como constatado pela Figura 2.4, onde é visível o aumento da deformação na interface, até ao ponto de se obter a formação de ondas com um comprimento e uma amplitude crescente [18]. Contudo, um rácio de explosivo excessivo levará à formação de compostos intermetálicos na interface que poderá fragilizar a soldadura.

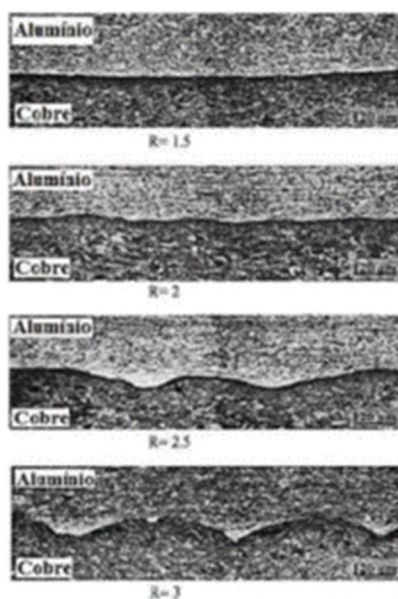


Figura 2.4. Influência do aumento do rácio de explosivo na interface Al-Cu [18].

2.4.4. Distância Entre as Placas (STD)

Um parâmetro importantíssimo a definir na preparação do processo de soldadura por explosão é a distância inicial estabelecida entre as duas placas a unir, designada por *stand-off distance* (STD). Dos vários fatores que influenciam a STD, aquele que mais condiciona é a espessura da placa voadora. A distância inicial entre as placas deverá ser no mínimo igual a metade da espessura, permitindo que a placa voadora atinja a velocidade de projeção necessária para que o processo seja efetuado com sucesso, podendo no seu limite essa mesma distância ser aumentada até três vezes a espessura da placa voadora [19].

A variação deste parâmetro, promove uma alteração da morfologia da interface, ou seja, na forma e na dimensão da região ondulada na interface dos materiais. Nas suas investigações, Durgutlu [19] variou a STD no intervalo de valores supracitados no parágrafo anterior, verificando-se que com o aumento do STD a interface deixara de ser plana e promovia a formação de ondas, assim como um aumento do comprimento e amplitude destas. Na Figura 2.5. é possível observar o efeito do aumento da STD na morfologia da interface da soldadura na qual um aumento da STD levará ao aumento da deformação

plástica das chapas, potenciando o possível aparecimento de compostos intermetálicos que poderão comprometer o sucesso da soldadura [20].

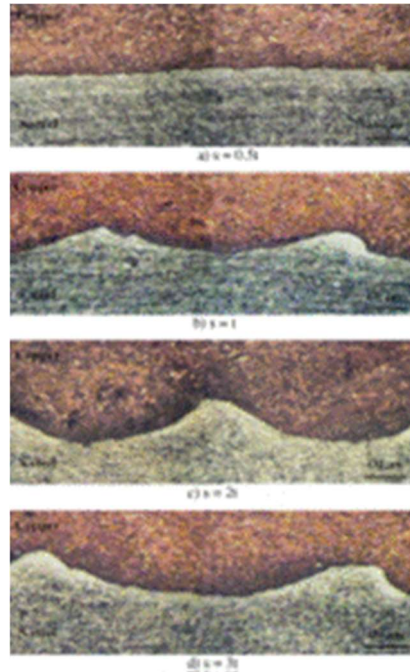


Figura 2.5. Efeito do aumento da STD na morfologia da interface na soldadura por explosão [19].

2.4.5. Características da Interface

Ao recorrer ao processo de soldadura por explosão, as interfaces entre as placas podem apresentar três formas distintas [6]:

- Interface plana;
- Interface ondulada;
- Interface com material parcialmente fundido.

A obtenção de cada morfologia na interface das placas é função da velocidade de detonação, isto é, para o mesmo tipo de material é possível obter as três formas distintas da interface tendo em conta os parâmetros definidos [21]. Na Figura 2.6. é possível observar as três morfologias típicas ocorrentes na interface das placas que foram submetidas ao processo de soldadura por explosão.

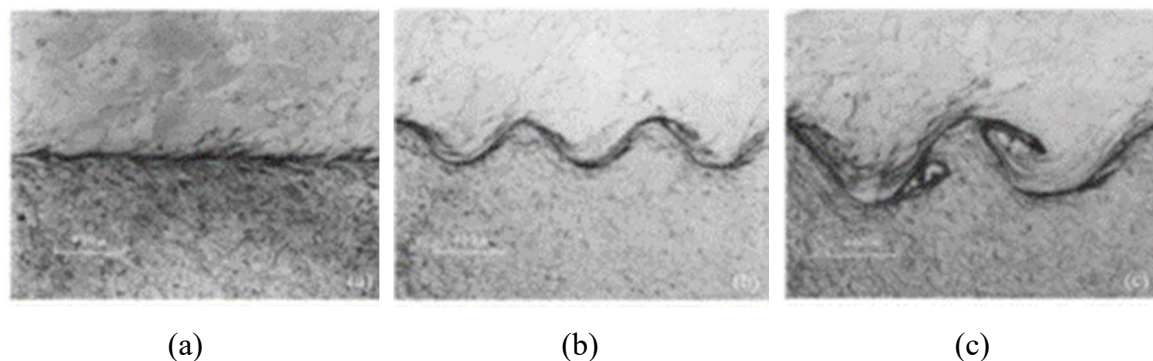


Figura 2.6. Morfologias típicas da interface: (a) interface plana; (b) interface ondulada; (c) interface com região de material fundido [22].

Para uma velocidade elevada, a obtenção de um número de ondas superior é mais provável quando comparada com uma velocidade mais baixa. Todavia, se a velocidade for excessivamente elevada a interface poderá não apresentar a formação destas. A maioria das soldaduras obtidas por explosão apresentam uma zona ondulada com uma região de material fundido, Figura 2.6. (c). Se a camada da zona fundida assumir uma dimensão reduzida, não comprometerá a integralidade da soldadura. Perante um caso em que a velocidade seja reduzida, formar-se-á uma interface plana que poderá ou não comprometer o êxito da soldadura, dependendo dos materiais utilizados [23].

2.4.6. Compostos Intermetálicos

Como referido anteriormente, se a placa voadora se encontrar animada por uma velocidade excessiva, a velocidade no ponto de colisão será elevada, o que poderá levar a uma fusão parcial dos materiais envolvidos na colisão. Este fenómeno poderá revelar como consequência a impossibilidade de ligação entre os elementos atômicos que constituem as placas. As ligações a nível atômico destes elementos permitirão a formação de compostos intermetálicos, sendo caracterizados pela sua fragilidade e dureza, ameaçam o sucesso da soldadura. A distribuição deste tipo de composto necessita de ser alvo de uma análise delicada para materiais suscetíveis de os formar, na tentativa de perceber se estes influenciam a distribuição interna de tensões de forma a amplificar a probabilidade de sofrerem fissuração. Porém, a presença destes compostos intermetálicos poderá ser um indício de uma ligação consistente pois uma interface sem zonas parcialmente fundidas, dependendo dos materiais que colidiram, poderá representar uma energia de colisão insuficiente para traduzir uma soldadura de qualidade. É necessário garantir uma ausência de camadas contínuas dos

compostos intermetálicos, com o intuito que as tensões e deformações sofridas não sejam suportadas de forma direta por estes componentes [24].

2.4.7. Mecanismos de Formação de Ondas

Os materiais unidos através do processo de soldadura por explosão, apresentam tipicamente uma interface ondulada cujo tamanho é variável. A morfologia ondulada que este método induz na superfície das placas a unir é alvo de investigação ao longo do tempo, existindo algumas teorias para a justificação do seu aparecimento. Uma vez que a detonação é feita a uma velocidade elevada, a observação do mecanismo de formação de onda não é possível, não existindo desta forma uma teoria que seja tomada como consensual por toda a comunidade [15]:

- Mecanismo de indentação do jato [25];
- Mecanismo de fluxo instável [29];
- Mecanismo turbulento [30];
- Mecanismo de tensão de ondas [31].

2.5. Trabalhos Anteriores

2.5.1. Ligação Alumínio-Titânio-Aço Inoxidável

Uma vez que os ensaios envolvendo o titânio são escassos, é de todo o interesse analisar os trabalhos anteriores efetuados através da tecnologia de soldadura por explosão para a ligação alumínio-titânio-aço inoxidável. Dentro destes ensaios, focaremos a análise nos testes efetuados recorrendo a liga AA6082-T6 com 3 mm de espessura, como placa voadora, a liga Ti6Al4V com 1 mm de espessura desempenhando a função de placa intermédia e a liga AISI304 com 3 mm de espessura sendo a placa base. Como explosivo foi utilizado o ANFO e uma emulsão explosiva com 2 % de EPS [26]. Os ensaios efetuados para a ligação entre alumínio e titânio não se enquadraram no interior da janela de soldabilidade. Apesar das ligações revelarem-se consistentes, a análise macroscópica permitiu identificar zonas desconectadas na interface alumínio-titânio e perante o teste em que se utilizou a emulsão explosiva, durante o corte das amostras e dos provetes ocorreu a separação da placa de alumínio da placa de titânio [26].

Relativamente à análise microscópica é possível observar na interface alumínio-titânio uma zona de material fundido, designada como zona intermédia, de morfologia contínua no caso da utilização do ANFO como é visível na Figura 2.7. a) e regiões descontínuas, em forma de bolsas, no caso de a soldadura ser efetuada recorrendo à emulsão explosiva Figura 2.7. c).

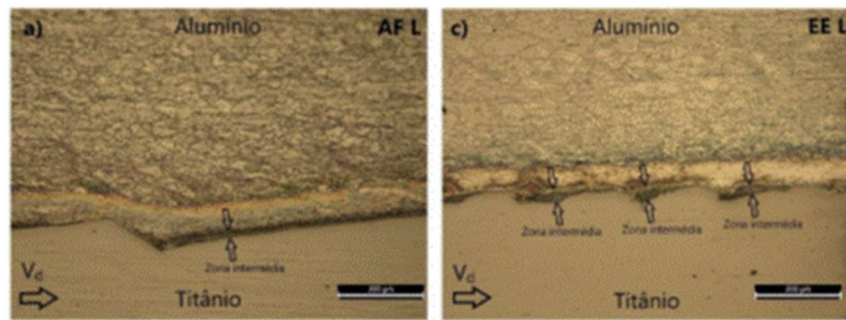


Figura 2.7. Microscopia ótica de cortes longitudinais à direção de soldadura das soldaduras: (a) utilização de ANFO; (c) utilização de uma emulsão explosiva com 2% de EPS [24].

As zonas intermédias são formadas pelos compostos intermetálicos, como os referidos na secção 2.4.6 Compostos Intermetálicos, que através do auxílio da análise EDS é possível a determinação das composições atómicas dos compostos intermetálicos. Consequentemente é exequível a determinação das fases presentes na interface, através da utilização de um diagrama de fases como o representado na Figura 2.8.. No caso do teste em que se utilizou o ANFO as formações de materiais intermédios dentro do alumínio são compostas por 74,5 at. % de alumínio e 25,5 at. % de titânio [26]. Consultando a Figura 2.8 concluiu-se que as fases presentes são: $TiAl$, $TiAl_2$ e $TiAl_3$, existindo a formação de compostos intermetálicos numa matriz de alumínio, ainda que seja de uma forma pontual. A análise EDS ainda permitiu a identificação de elementos como magnésio, silício e vanádio [26].

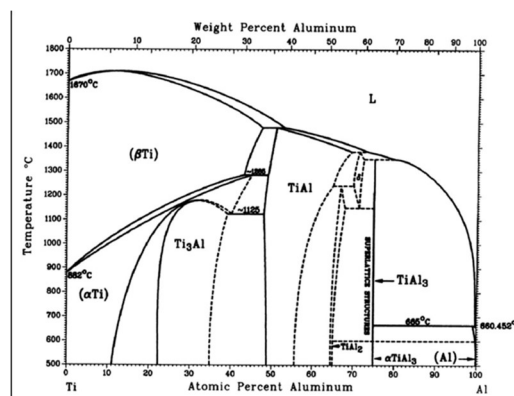


Figura 2.8. Diagrama de fases titânio-alumínio [26].

2.5.2. Ligação Alumínio-Magnésio

Esta ligação foi estudada autores como Ghaderi et. al. [28] que efetuaram vários ensaios em configuração paralela, com placas da liga Al JIS A1100 com 5 mm de espessura, assumindo a função de placa voadora e placas base com 6 mm de espessura da liga AZ31. Como é observável na Figura 2.9. os ensaios de explosão foram realizados com sucessivas variações dos parâmetros experimentais, ou seja, alterando a altura de explosivo, a *stand-off distance* e a velocidade de detonação. Os ensaios #1 e #2 não revelaram uma união das placas uma vez que o ângulo de colisão apresenta um valor muito baixo.

No.	Explosive thickness T_E /mm	Stand-off distance SOD /mm	Detonation velocity D /m·s ⁻¹	Collision angle γ	Flyer velocity V_F /m·s ⁻¹	Flyer kinetic energy E_K /MJ·m ⁻²	Shear strength τ /MPa
#1	15	1.0	1950	7.9°	267	0.48	×
#2	15	2.0	1950	10.2°	345	0.81	×
#3	15	3.0	1950	11.3°	382	0.99	69
#4	15	4.0	1950	11.9°	404	1.10	—
#5	15	5.0	1950	12.3°	418	1.19	71
#6	15	5.5	1950	12.5°	424	1.20	—
#7	15	6.0	1950	12.6°	429	1.24	74
#8	25	5.0	2195	13.3°	508	1.70	70
#9	25	6.0	2195	13.7°	525	1.90	74
#10	30	6.0	2283	14.2°	563	2.10	78
#11	35	6.0	2358	14.5°	596	2.40	72

× No weld, — Not measured.

Figura 2.9. Condição experimental para soldagem A1100 a AZ31 e a resistência ao cisalhamento resultante [26].

A Figura 2.10 ilustra a alteração da interface de ligação com aumento da velocidade de projeção da placa voadora. Na Figura 2.10 (a) a velocidade é inferior quando comparada com a velocidade da Figura 2.10 (b), sendo que o aumento de velocidade proporcionou o aparecimento da interface ondulada como é demonstrada.

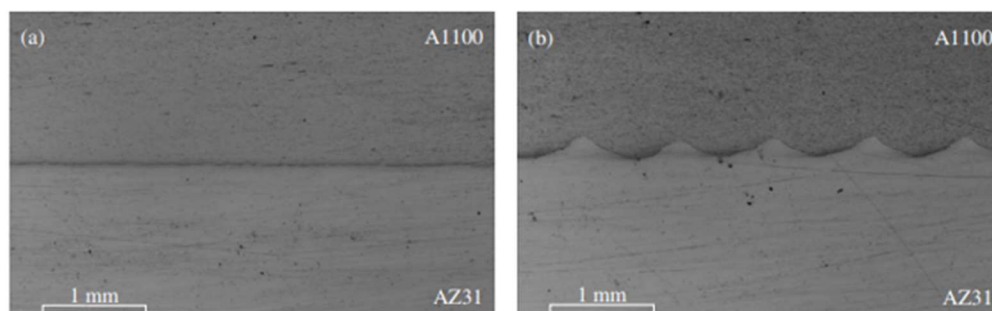


Figura 2.10. Micrografias da interface de solda das amostras (a) #3, (b) #7, adaptado de [26].

Relativamente à formação de compostos intermetálicos durante o processo de soldadura a situação apresentada na Figura 2.10 (a) não revelou qualquer alteração da microestrutura, enquanto em casos de velocidade de projeção mais elevada e com a formação

de vórtices é notável a dispersão de partículas de Al e Mg confinadas em uma matriz fundida provavelmente solidificada [28]. Em análises efetuadas com a tecnologia EDS observou-se uma nova fase com concentração de aproximadamente 70 em % de Al e 30 % de Mg. A obtenção do espectro de XRD, numa zona de vórtice foram detetados picos de difração associados à fase intermetálica Al_2Mg sendo uma fase metaestável.

Na realização dos testes de tração ao corte ao qual as amostras foram submetidas, a falha ocorre dentro da camada de alumínio. A resistência de união foi quase independente da direção da carga aplicada em relação à direção de soldagem. Com o aumento do tamanho da onda, a resistência ao cisalhamento aumenta ligeiramente, presumivelmente devido ao maior endurecimento da interface próxima [28]. Apesar da formação de uma fase intermetálica frágil como Al_2Mg juntamente com as microfissuras formadas, as soldaduras efetuadas exibiram resistências ao cisalhamento desejáveis.

2.5.3. Ligação Cobre-Aço Inoxidável

A ligação dos materiais cobre-aço inoxidável foi analisada no contexto de dissertação de mestrado por intermédio de Miguel Santos [29]. Nos ensaios experimentais executados, utilizaram-se as ligas Cu-DHP e AISI 304SS, tendo sido efetuado um teste com a placa de cobre a desempenhar a função de placa voadora e um segundo teste com a placa de aço inoxidável como placa voadora. Como explosivo foi utilizado o ANFO, com uma altura de explosivo de 30 mm.

Os dois ensaios realizados revelaram uma união consistente, sendo indiferente a função de cada placa, isto é, quer desempenhem a função de placa voadora ou a função de placa estacionária [29]. Relativamente à interface, como é possível observar na Figura 2.11. nas superfícies de contacto das placas revelaram ondas bem definidas e contínuas no sentido longitudinal.

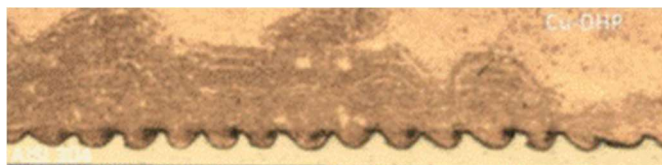


Figura 2.11. Microestrutura da amostra longitudinal [26].

As análises efetuadas às amostras, não revelaram qualquer formação de compostos intermetálicos para além das zonas pontuais comuns às duas placas que apresentam uma composição resultante dos elementos constituintes dos materiais base. Quanto à dureza,

apenas o aço inoxidável revelou um aumento acentuado, enquanto o cobre permaneceu com uma dureza essencialmente igual. As fraturas da ligação destes dois materiais apresentam um comportamento dúctil com falha na secção de cobre [29].

2.6. Janela de Soldabilidade

A janela de soldabilidade é uma ferramenta construída com base em ensaios e fórmulas empíricas, que permite uma orientação na seleção das condições favoráveis à soldadura que se pretende efetuar. Se os parâmetros forem selecionados, de modo a permitir às condições de execução do ensaio localizarem-se no interior da janela traçada, será expectável uma soldadura consistente. Contudo, informação recolhida desta não é uma informação absoluta, pelo que um ponto de ensaio que reúna condições exteriores aos definidos por intermédio dos limites da janela de soldabilidade poderá representar uma união com sucesso, assim como um ponto no interior da janela poderá não traduzir a uma soldadura bem-sucedida. Dentro dos vários critérios possíveis, para a construção desta, os mais utilizados são os que têm por base a velocidade no ponto de colisão e o ângulo de colisão [30]. Como se pode ver pela Figura 2.12. a região onde teoricamente é possível obter uma soldadura com qualidade é limitada por quatro linhas dependentes dos seguintes parâmetros:

- Formação de jato;
- Formação de ondas;
- Velocidade mínima de soldadura;
- Fusão por uso de velocidade excessiva.

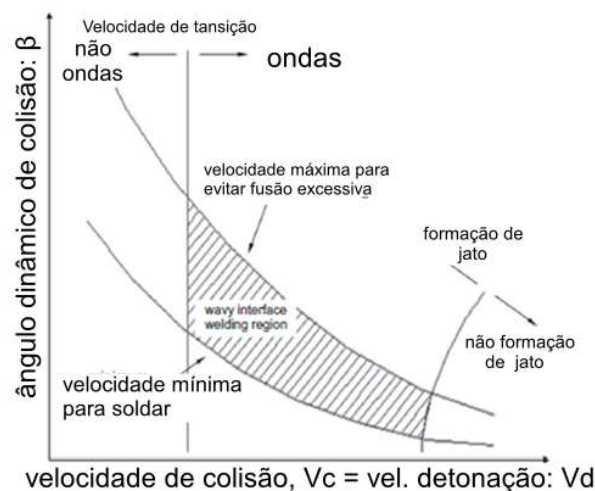


Figura 2.12. Janela genérica de soldabilidade com a respetiva definição de limites [9].

2.6.1. Formação de Onda (Limite à Esquerda ou Limite de Cowan)

O limite à esquerda da janela de soldabilidade relaciona-se com a formação da zona ondulada na interface. Uma vez situado um ponto à esquerda deste limite, no momento de colisão das placas, não se formará uma superfície ondulada na interface dos materiais, o que poderá comprometer o processo de soldadura. Este limite é traçado, pela maioria dos autores recorrendo a uma velocidade de colisão de transição para interface ondulada ($V_{c,tr}$) que é independente do ângulo de colisão. Cowan assumindo de igual modo o limite, ou seja, independente do ângulo de colisão, propôs a Equação (2.10) para o cálculo desta velocidade, de acordo com a seguinte hipótese hidrodinâmica [22].

$$Re_{cr} = \frac{V_c^2}{2} \cdot \frac{(\rho_f + \rho_b)}{(H_{V,f} + H_{V,b})} \leftrightarrow V_{c,tr} = \sqrt{\frac{2 \cdot Re_{cr} \cdot (H_{V,f} + H_{V,b})}{\rho_f + \rho_b}} \quad (2.10)$$

Na equação anterior ($V_{c,tr}$) representa a velocidade de colisão de transição para interface ondulada expressa em m/s em função do Número de Reynolds crítico Re_{cr} calculado de forma empírica, podendo assumir valores entre 8 e 13 (será considerado o valor de 10,6 [31]), da densidade da placa base (ρ_f) e da placa voadora (ρ_b) ambas expressas em kg/m³, assim como das durezas Vickers dos mesmos ($H_{V,f}$; $H_{V,b}$) em Pa. Embora alguns investigadores como Kuzmin e Lysak [32] concluíssem que este limite depende do ângulo de colisão, para efeitos de simplificação optaremos pela Equação (2.10).

2.6.2. Formação de Jato (Limite à Direita ou Limite de Walsh)

O limite à direita da janela da soldabilidade traduz o ângulo crítico para a formação do jato, mecanismo importantíssimo para garantir o sucesso da soldadura. Uma vez ultrapassado os valores críticos, poderão não estar reunidas as condições necessárias para a ligação consistente. Diversos autores como Walsh [33] reconheceram que a formação de jato só ocorre quando a velocidade no ponto de colisão expressa em m/s não ultrapassar a velocidade de propagação do som no material (C_0) igualmente expressa em m/s como indicado pela Equação (2.11).

$$V_c < C_0 \quad (2.11)$$

No entanto, Abrahamson [34] e outros autores propuseram uma teoria diferente para abordar este limite, relacionando o ângulo de colisão crítico em radianos com a velocidade de colisão, sendo expressa essa proposta pela Equação (2.12).

$$\beta_c = 10 \cdot (V_c - 5,5) \quad (2.12)$$

2.6.3. Velocidade Mínima de Soldadura (Limite Inferior ou Limite de Zakharenko)

O limite inferior assegura que a velocidade de projeção assuma um valor, para que a pressão que é desenvolvida quando as duas placas colidem, supere a tensão de cedência dos materiais envolvidos [30]. Se as condições reunidas se encontrarem abaixo do limite definido pela velocidade mínima de soldadura, existe uma elevada probabilidade de não ser gerada energia suficiente para garantir uma soldadura bem-sucedida. A Equação (2.13) permite o cálculo da velocidade mínima no ponto de colisão ($V_{c,min}$) sendo proposta por Zakharenko e Zlobin [35]:

$$V_{c,min} = \frac{K_1}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{H_{V,f}}{\rho_f}} \quad (2.13)$$

Através da Equação (2.13) concluímos que a velocidade mínima no ponto de colisão expressa em m/s é revelada em função de K_1 que representa o coeficiente adimensional de limpeza de materiais podendo tomar o valor de 0,6 para superfícies limpas e 1,2 para superfícies não limpas (no caso de metais é considerado 0,6), β é o ângulo de colisão expresso em rad, $H_{V,f}$ a dureza Vickers do material da placa voadora em que tem como unidade Pa e ρ_f a massa volúmica em kg/m^3 também da placa voadora.

2.6.4. Fusão por Uso de Velocidade Excessiva (Limite Superior ou Limite de Wittman)

O limite superior condiciona a velocidade de projeção, uma vez que as condições pré-definidas deverão localizar-se abaixo deste limite, permitido deste modo uma dissipação da energia cinética no sentido de evitar uma possível fusão parcial dos materiais e consequente formação de intermetálicos [30]. A partir da Equação (2.1) é possível substituir o valor da velocidade de projeção na Equação (2.14) e consequentemente a obtenção da Expressão (2.15). Estas equações foram apresentadas por Wittman [36] e permitem relacionar a velocidade máxima no ponto de colisão com o ângulo de colisão sem a ocorrência de uma camada de fusão na interface dos materiais:

$$V_p = \frac{1}{N} \cdot \frac{(C_{b,f} \cdot T_{m,f})^{1/2}}{V_c} \cdot \left(\frac{K_f \cdot C_{p,f} \cdot C_{b,f}}{\rho_f \cdot h_f} \right)^{1/4} \quad (2.14)$$

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{N} \cdot \frac{(C_{b,f} \cdot T_{m,f})^{1/2}}{2(V_c)^2} \cdot \left(\frac{K_f \cdot C_{p,f} \cdot C_{b,f}}{\rho_f \cdot h_f} \right)^{1/4} \quad (2.15)$$

Nas equações referidas β representa o ângulo de colisão expresso em radianos, N expressa uma constante empírica assumindo dois valores distintos, o valor de 0,11 [31] ou 0,062 [30], $C_{b,f}$ a velocidade de propagação do som no material da placa voadora em m/s, $T_{m,f}$ a temperatura de fusão do material da placa voadora em °C, K_f a condutibilidade térmica com a unidade $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, V_c a velocidade no ponto de colisão em m/s, $C_{p,f}$ o calor específico a pressão contante do material da placa voadora através da unidade $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ρ_f a densidade do material da placa voadora em kg/m^3 e h_f a espessura de material da placa voadora em m. Será expetável uma camada contínua de material fundido para uma soldadura que se encontre acima deste limite.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é abordado o procedimento experimental para a concretização dos testes de soldadura, partindo da preparação das placas até ao momento da sua análise. É igualmente objeto de referência a nomenclatura adotada, o tipo de material base, os testes aos quais as soldaduras foram sujeitas para a análise do seu comportamento, assim como todos os equipamentos utilizados.

3.1. Nomenclatura

A nomenclatura adotada para a caracterização dos ensaios realizados é um seguimento da nomenclatura utilizada nos ensaios realizados em anos anteriores. Cada soldadura efetuada será mencionada pelo com o prefixo “EW”, que advém do termo inglês *Explosive Welding*, seguido do número de identificação correspondente ao ensaio. A identificação das placas intervenientes em cada ensaio será efetuada tendo em conta a função que cada uma desempenhará. Depois do prefixo “EW” e do número correspondente ao ensaio, pode vir acompanhando a nomenclatura a letra V – Voadora ou a letra B – Base, para a identificação da placa que está a ser alvo de análise. Por exemplo, o ensaio referenciado como EW66B, corresponde à identificação da placa base do ensaio explosivo número 66. Para melhor compreensão dos materiais que compõem a soldadura referenciada, será escrito à frente de cada designação o seguinte: (material da placa voadora – material da placa base). Assim sendo, se nos referirmos por exemplo à soldadura por explosão número 66 a sua caracterização será completa do ponto de vista da nomenclatura de acordo com a seguinte designação: EW66 (Cu-AISI).

Quanto à identificação da amostra para a análise metalográfica, esta é acompanhada da letra “L” caso se refira a uma amostra cujo objetivo seja a análise longitudinal da amostra ao sentido de detonação do ensaio efetuado, ou da letra “T” para a análise transversal da amostra ao sentido de detonação do ensaio correspondente. Seguido da letra “L” ou “T” será apresentado a numeração da amostra, ou seja, a amostra “EW66L1” identifica a amostra longitudinal número 1, correspondente à soldadura por explosão número 66.

Relativamente aos provetes retirados das placas soldadas para os ensaios de tração ao corte, a sua identificação será feita através da utilização da letra “P” seguida do número

correspondente a cada provete. Por exemplo, o provete número 1 do ensaio de soldadura por explosão 66 tem como nomenclatura “EW66P1”.

A identificação do material base é feita recorrendo ao prefixo “MB” oriundo de material base, podendo ser seguido pela letra V – Voadora ou a letra B – Base dependendo uma vez mais da placa que está a ser alvo de referência.

3.2. Material Base

O intuito da realização dos ensaios é a análise da soldabilidade através do processo de soldadura por explosão dos seguintes materiais: magnésio-titânio, alumínio-magnésio e cobre-aço inoxidável. Para realização dos testes foram utilizadas as seguintes ligas: a liga de magnésio AZ31, a liga de titânio Ti6AL4V, a liga de alumínio Al6082–T6, a liga de cobre Cu-DHP e aço inoxidável AISI 316L. As composições químicas destes materiais encontram-se representadas na Tabela 3.1., Tabela 3.2., Tabela 3.3., Tabela 3.4. e Tabela 3.5.

Tabela 3.1. Composição química da liga AZ31 (%peso).

Composição química	Al	Zn	Mn	Si	Ca	Cu	Ni	Fe	Mg	Outros
AZ31	2,94	0,79	0,24	0,0016	0,012	0,0023	0,00082	0,0028	95,79	0,2

Tabela 3.2. Composição química da liga Ti6AL4V (%peso).

Composição química	Al	V	O	Fe	C	N	H	Ti	Outros
Ti6Al4V	6,18	4,02	0,159	0,16	0,006	0,002	0,0125	89,3775	0,083
	6,21	3,99	0,167	0,15	0,006	0,002	0,0061	89,3899	0,079

Tabela 3.3. Composição química da liga AA6082 – T6 (%peso).

Composição química	Cu	Fe	Si	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn	Al	Outros
AA6082-T6	---	---	0,7	0,6	---	---	---	0,4	98,25	0,05
	0,1	0,5	1,3	1,2	0,25	0,2	0,1	1,0	95,20	0,15

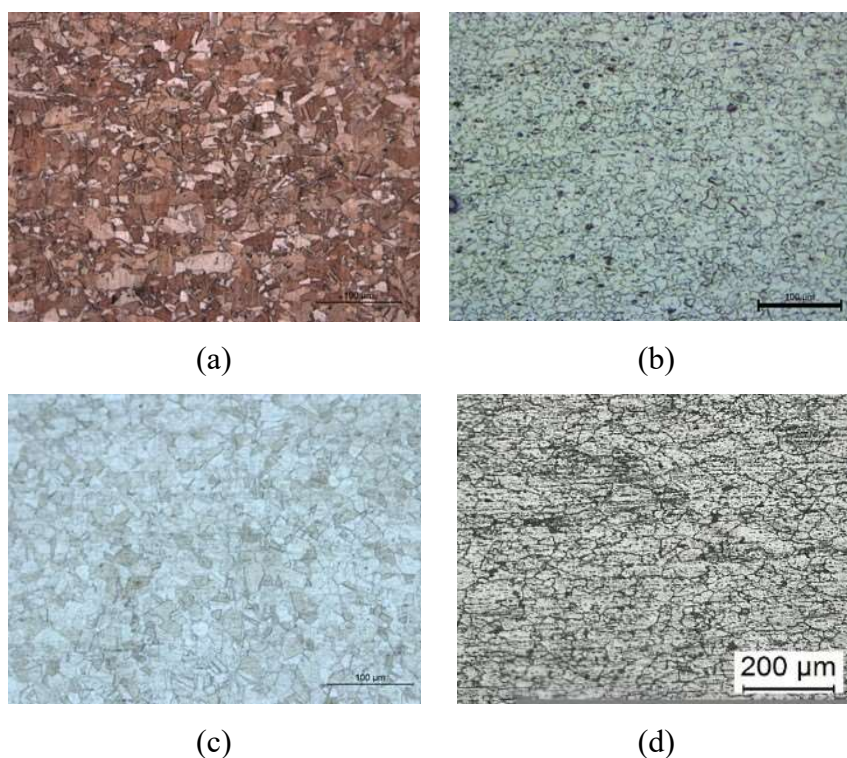
Tabela 3.4. Composição química da liga Cu-DHP (%peso).

Composição química	P	Cu
Cu-DHP	0,015	99,985
	0,040	99,960

Tabela 3.5. Composição química do AISI 316L (%peso).

Composição química	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S	Fe
AISI 316L	16,0	10,0	2,0	---	---	---	---	---	72,0
	18,0	14,0	3,0	2,0	1,0	0,045	0,03	0,03	61,9

Na Figura 3.1. é possível observar a microestrutura do material base utilizado nos ensaios de soldadura efetuados.

**Figura 3.1.** Microestrutura das placas de material base: (a) Cu-DHP; (b) AZ31; (c) AISI 316L; (d) AA6082-T6.

Relativamente às propriedades físicas e mecânicas dos diferentes materiais base utilizados para a realização dos ensaios, estas encontram-se expressas na

Tabela 3.6 e Tabela 3.7. respetivamente. O valor da dureza para as ligas utilizadas foi obtido experimentalmente, enquanto o valor de tensão de cedência, tensão de rotura e de deformação na carga máxima foram obtidos do certificado de inspeção da liga utilizada.

Tabela 3.6. Propriedades físicas do material base utilizado.

Propriedades físicas	AZ31	Ti ₆ Al ₄ V	AA6082-T6	Cu-DHP	AISI 316L
Densidade [kg/m ³]	1780 [37]	4420 [37]	2700 [37]	8924[38]	8000
Condutividade térmica [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	84 [37]	5,8 [37]	193 [37]	366 [38]	14,95
Calor específico [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	1000 [37]	610 [37]	897 [26]	385 [38]	500
Temperatura de fusão [°C]	630[26]	1660 [37]	660 [26]	1083 [38]	1387

Tabela 3.7. Propriedades mecânicas do material base utilizado.

Propriedades mecânicas	AZ31	Ti ₆ Al ₄ V	AA6082-T6	Cu-DHP	AISI 316L
Tensão de cedência [MPa]	145	1110 [37]	285 [37]	180	205
Tensão na carga máxima [MPa]	240	1160 [37]	315 [37]	230	515
Deformação na carga máxima [%]	12	10	8,6 [39]	15	60
Dureza [HV _{0,02}]	54	328	108	94	177

3.3. Preparação dos Ensaios

No total procedeu-se à realização de quatro testes de soldadura por explosão, permitindo analisar a soldabilidade entre os materiais referidos na secção anterior. Para levar a cabo a realização destes ensaios, todos os componentes foram previamente preparados no DEM. As placas utilizadas na montagem dos ensaios foram cuidadosamente cortadas com a dimensão de 250 x 70 mm e todas possuíam uma espessura de 3 mm. Após o corte, cada placa foi devidamente lixada segundo a direção de laminagem, com recurso de uma lixa P180 para remover óxidos, impurezas e gorduras presentes nas superfícies. Tendo as placas preparadas, procedeu-se à montagem das caixas que permitiram albergar a carga explosiva,

sendo estas fabricadas em *Medium Density Fiberboard* (MDF). As dimensões das cofragens utilizadas podem ser consultadas no APÊNDICE A. Com a montagem das caixas já efetuada, foi necessário a construção e montagem de um conjunto de sondas que permitissem o cálculo da velocidade de detonação, como será visto em pormenor o seu funcionamento na secção 3.4. Medição da Velocidade de Detonação.

As placas foram posicionadas, uma sobre a outra de modo a assumirem uma configuração paralela e permitindo à placa voadora em cada ensaio efetuado estar em contacto direto com a carga explosiva. A distância inicial entre as duas placas foi garantida pela colagem de 6 espaçadores com uma altura média de 4,5 mm.

Na Tabela 3.8. estão representados os diferentes tipos de explosivos utilizados nos ensaios realizados, assim como a sua densidade teórica.

Tabela 3.8. Tipo de explosivo utilizado nos diferentes ensaios.

	EW63 (Mg-Ti)	EW64 (Ti-Mg)	EW65 (Al-Mg)	EW66 (Cu-SS)
Tipo de explosivo	ANFO	ANFO	EEx (2% EPS)	EEx (3% EPS)
Densidade do explosivo [kg/m³]	943	883	681,3	583,8

A detonação foi promovida por um detonador, acionado por intermédio de uma descarga elétrica. A montagem dos testes foi efetuada no Laboratório de Energética e Detónica, Associação de apoio (LEDAP), situado em Condeixa, Coimbra e providencia câmaras de explosão que permitiram a realização dos testes em segurança. Na Figura 3.2. é possível observar a montagem de uma caixa no interior da câmara de explosão, estando esta assente sobre uma espessa chapa de aço que por sua vez está por cima de uma base de areia que tem com finalidade evitar possíveis deformações.



Figura 3.2. Montagem do ensaio experimental EW63 no interior da câmara de explosão.

3.4. Medição da Velocidade de Detonação

A obtenção das velocidades de detonação, como referido anteriormente tem por base um método cronográfico. Partindo da medição do tempo que a detonação demorou a percorrer uma distância inicialmente definida, foi possível calcular esses os valores da velocidade de detonação. Para a medição do tempo foi necessário a construção de 4 sondas, cada uma constituída por um tubo de aço com 0,9 mm de diâmetro, dois fios de cobre revestidos e dois fios condutores. Os fios de cobre revestidos foram introduzidos no tubo e a película de revestimento que se encontrava à volta do fio não permitiu que se estabelecesse um curto-circuito no momento da preparação das sondas, sendo cada extremidade superior soldada a uma ponta de fio condutor. Após a união dos fios, estes foram fixos com resina epóxi no interior do tubo e posteriormente o conjunto tubo-fios foram fixos ao suporte das sondas que tinha sido previamente furado, a uma distância predefinida como se pode consultar no APÊNDICE A. A fixação dos tubos foi realizada de forma que as ponta inferior dos fios de cobre revestido se encontrassem a 5 mm da face inferior do suporte das sondas para a realização dos ensaios em que o explosivo selecionado foi o ANFO e para os restantes ensaios efetuados, a distância da face inferior à ponta inferior do tubo da sonda foi de 9 mm. A Figura 3.3. ilustra o conjunto de sondas fixas no suporte para um dos ensaios efetuados.

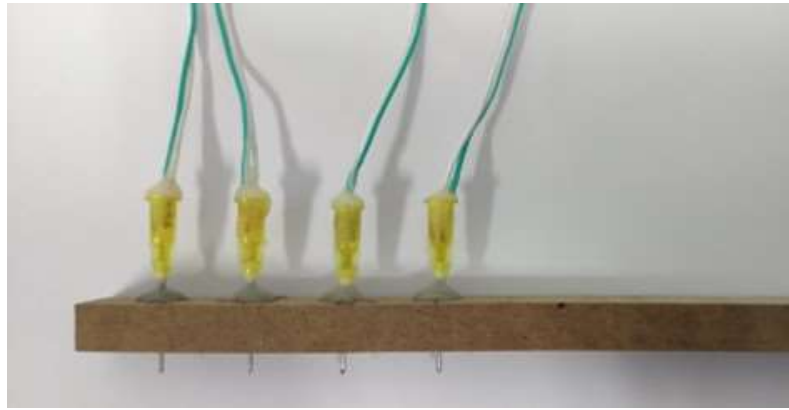


Figura 3.3. Conjunto de sondas fixas ao suporte em MDF.

A detonação do explosivo permitiu que se estabelecesse o curto-circuito nas pontas do fio revestido. Uma vez que estes fios revestidos se encontravam soldados a um fio condutor e as terminações deste fio condutor encontravam-se ligadas a um cronómetro HP 5334B *Universal Counter*, foi possível a medição do tempo entre os curtos-circuitos estabelecidos em cada sonda. Na Figura 3.4. é possível a observação dos aparelhos utilizados para a obtenção dos tempos. Como existem apenas três aparelhos capazes de cronometrar estes tempos, o número máximo de sondas que podemos utilizar será de quatro. Os tempos registados pelo conjunto de cronómetros são cumulativos, isto é, o tempo registado entre a primeira e a quarta sonda é o tempo total que a detonação demorou a percorrer a distância entre a primeira sonda que tem como função dar o *start* da contagem e a última sonda que tem como função parar a contagem. Uma vez determinado o tempo entre estes sinais e as distâncias às quais as sondas se encontravam espaçadas no suporte, obteve-se a velocidade de detonação associada ao explosivo utilizado.

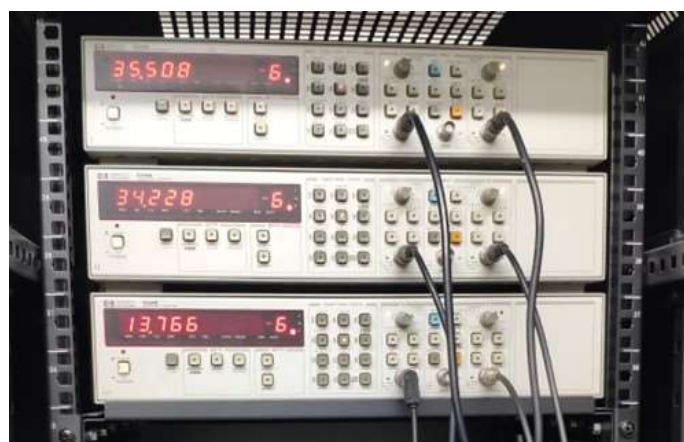


Figura 3.4. Cronómetros HP 5334B Universal Counter usados nos ensaios.

3.5. Realização dos Ensaios de Soldadura

Foram realizados no total quatro ensaios de soldadura, dois deles com a utilização do mesmo explosivo (ANFO) e dois com recurso a emulsões explosivas, todos com uma distância média inicial entre as placas de 4,5 mm. Recorreu-se a um iniciador para que se conseguisse fornecer ao explosivo uma quantidade inicial de energia de ativação com capacidade de promover as reações internas, que permitissem a transformação desse mesmo explosivo em produtos maioritariamente no estado gasoso. Na Tabela 3.9. estão resumidos os principais parâmetros de realização dos ensaios experimentais. A condição de cada ensaio poderá ser consultada com mais pormenor no APÊNDICE B que contém a ficha técnica de cada teste realizado.

Tabela 3.9. Parâmetros dos ensaios de soldadura realizados.

	EW63	EW64	EW65	EW66
Placa voadora	AZ31	Ti6Al4V	Al6082 – T6	Cu-DHP
Placa base	Ti6Al4V	AZ31	AZ31	AISI 316L
Tipo de explosivo	ANFO	ANFO	EEx	EEx
Material de suporte	Aço/Areia	Aço/Areia	Aço/Areia	Aço/Areia
Massa do explosivo [g]	369	349	186	211
Massa do flyer [g]	247	243,5	147,60	485
Rácio do explosivo	3,84	1,43	1,26	0,435
Espessura do flyer [mm]	3	3	3	3
Altura do explosivo [mm]	25	25	15	20
Densidade do explosivo [kg/m³]	943	883	681,3	583,8
Volume de explosivo [mm³]	391324,5	395020,5	273000	361440
Massa de iniciador (PBX) [g]	15	15	12	10
Stand-off distance [mm]	4,5	4,5	4,5	4,5

3.6. Rastreabilidade das amostras

Para iniciação da análise das soldaduras e preparação das amostras, foi necessário a limitação de zonas de análise ou preparação de provetes e amostras que pudessem sofrer uma análise metalográfica e uma análise mecânica. Para tal, foram traçadas essas mesmas zonas ou provetes nas placas resultantes do processo de soldadura por explosão.

A Figura 3.5 é uma compilação das amostras que foram retiradas das diferentes placas sujeitas ao ensaio de soldadura por explosão. A seta branca de contorno preto representa o sentido da detonação.

Na Figura 3.5 (a) está representada a placa EW63V, tendo sido retirado a área correspondente ao quadrado branco com o intuito de analisar a amostra no sentido longitudinal da detonação.

Na Figura 3.5. (b) corresponde à placa EW65V com um quadrado de cor azul que delimita a área de análise e um quadrado verde que permite delimitar a zona de análise da placa EW65B.

A Figura 3.5. (c) representa as chapas soldadas, assim como os provetes e amostras traçadas que posteriormente foram cortadas para serem submetidas a análise.

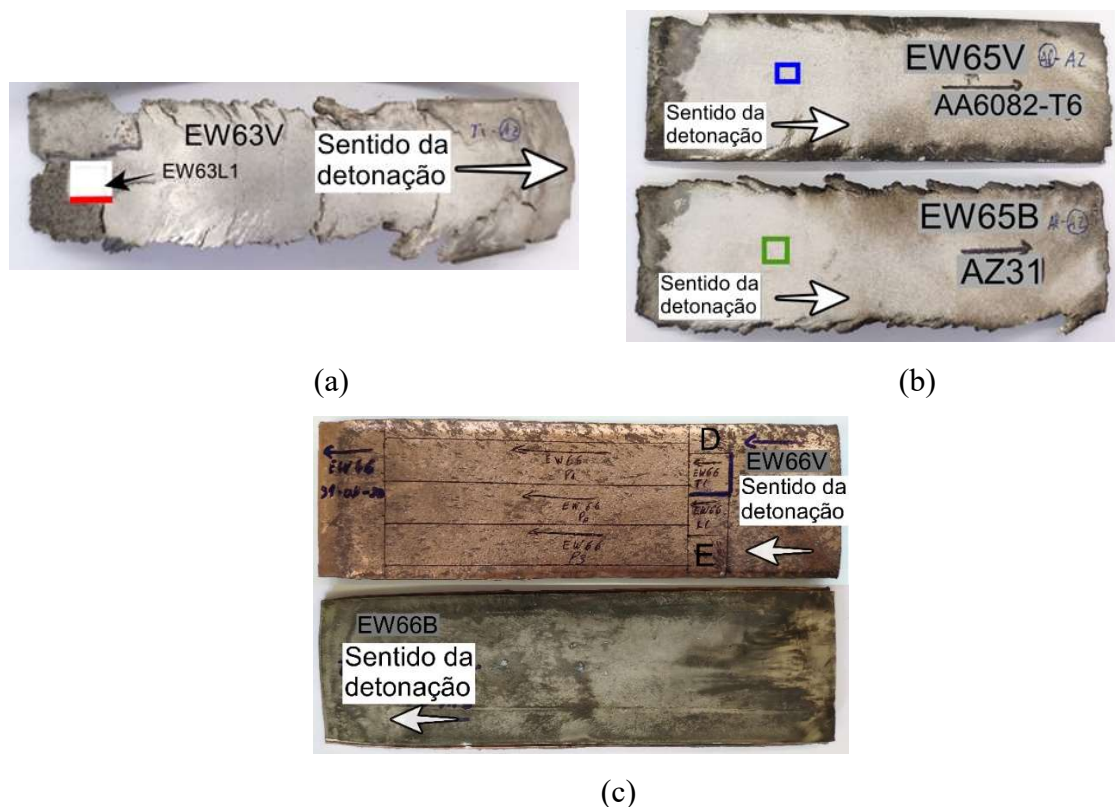


Figura 3.5. Placas com as respectivas zonas de análise marcadas: (a) EW63V; (b) EW65; (c) EW66.

3.7. Análise Metalográfica

3.7.1. Preparação das Amostras

Após a realização dos ensaios experimentais, foi necessária a prévia preparação das amostras para se efetuar a análise metalográfica e mecânica das mesmas. As amostras identificadas na secção 3.6. Rastreabilidade das amostras foram cortadas e envolvidas em resina, sendo posteriormente submetidas a um polimento com lixas de granulometrias diferentes, começando com a lixa P320 seguida da lixa P500, P600, P1000 e P2500, ou seja, com uma ordem decrescente de tamanho do grão. Por fim, para se obter o polimento final foi utilizado um pano com uma suspensão de diamante de 6 μm de diâmetro, seguida da utilização de uma suspensão de diamante com 3 μm de diâmetro. Sempre que se utilizou o pano com uma suspensão, independentemente do seu diâmetro, esta foi acompanhada com um lubrificante, neste caso água destilada que permitiu diminuir o atrito entre a amostra e o pano, obtendo desta forma uma superfície espelhada como a Figura 3.6. ilustra.



Figura 3.6. Amostra de EW63MBB envolvida em resina (aspeto final): (a) vista de topo; (b) vista de perfil.

3.7.2. Ataque Químico

Para evidenciar a microestrutura das amostras preparadas, recorreu-se à execução de ataques químicos às amostras de material preparadas. As amostras do material base de magnésio e as resultantes dos ensaios de explosão EW63V e EW64V, foram imersas numa solução constituída por: 5 ml de $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ (ácido acético), 6 g de $\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$ (ácido pícrico), 10 ml de água destilada e 100 ml de $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (etanol) em períodos de 20 segundos sendo posteriormente lavadas em água corrente, pulverizada com etanol e secas. Repetiu-se o processo até à formação de um filme castanho à superfície da amostra.

Para efetuar a revelação da microestrutura da amostra da liga AA6082-T6 foi utilizado o reagente de Poulton modificado: 30 ml de HCl (ácido clorídrico), 25 ml de HNO₃ (ácido nítrico), 25 ml de água destilada, 2,5 ml de HF (ácido fluorídrico) e 12 g de CrO₃ (trióxido de crómio). Embebeu-se um pedaço de algodão com o reagente e de seguida passou-se esse mesmo algodão sobre a amostra durante 15 segundos. Posteriormente a amostra foi passada por água corrente, pulverizada com etanol e seca.

Para evidenciar a microestrutura das amostras de Cu-DHP foi elaborada uma solução constituída pelos seguintes componentes: 10 ml de água destilada, 10 ml de HNO₃ (ácido nítrico) e 0,2 ml de HF (ácido fluorídrico). O procedimento consistiu em mergulhar as amostras em períodos de cinco segundos, passar por água corrente, pulverizar com etanol e secar. Este processo foi repetido até perfazer vinte segundos de imersão

A revelação da microestrutura do aço inoxidável foi conseguida recorrendo à imersão da amostra de aço inoxidável numa solução composta por: 30 ml de água destilada, 20 ml de HCl (ácido clorídrico) e 15 ml de HNO₃ (ácido nítrico). As amostras foram imersas um período de trinta segundos, passadas por água corrente para parar o ataque químico, pulverizadas com etanol e por fim secas.

3.7.3. Análise Microestrutural

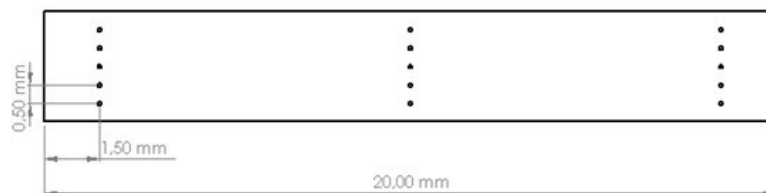
A análise microestrutural efetuada às amostras dos ensaios realizados foi garantida pela utilização de um microscópio ótico cujo modelo é o *Leica DM4000 M LED*, com uma ampliação no intervalo de 12,5 x a 200 x, combinado com uma câmara *Leica MC 120HD* que permitiu fazer registo fotográfico da morfologia e da microestrutura das soldaduras. Este registo é suportado pelo *software LAS (Leica Application Suite)*.

Algumas amostras não foram inseridas em resina tendo sido apenas polidas, depositadas num recipiente com acetona e este colocado no interior de uma máquina de banho ultrassónica, modelo Sonorex, que continha água destilada. Este processo, com um tempo de duração de 10 minutos permitiu a remoção de óxidos presentes nas amostras deixando-as preparadas para a observação *Scanning Electron Microscopy (SEM)* que possuía acoplado uma unidade de Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS). Estas análises foram efetuadas com recurso ao equipamento máquina SU3800 para análise da composição química na interface das soldaduras, assim como as zonas mistas.

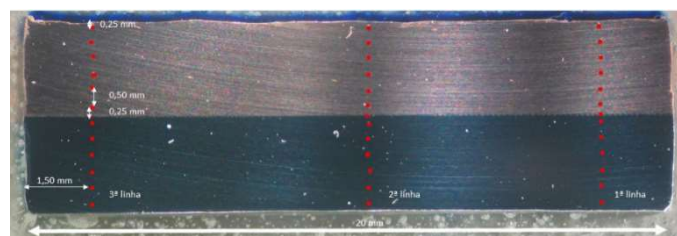
3.8. Análise Mecânica

3.8.1. Microdureza

Para a realização das medições da microdureza, foram utilizadas as amostras submetidas à preparação descrita na secção 3.7.1 Preparação das Amostras, utilizando para fazer a indentação um equipamento SHIMADZU HMV-G para efetuar o cálculo da dureza em Vickers. As medições referentes ao material base foram realizadas nas amostras correspondentes em três linhas distintas, segundo a sua espessura, sendo feita uma linha em cada extremidade da amostra e a terceira linha no centro. Cada linha continha 5 pontos como é possível observar na Figura 3.7. (a), tendo sido efetuadas a 0,5 mm de distância uma das outras com uma carga de 200 gf e a duração de 15 s. O perfil de indentação para o caso de soldaduras consistentes está demonstrado na Figura 3.7. (b), sendo as condições de carga e duração de indentação as mesmas que as utilizadas nas indentações do material base. As recolhas das medições permitiram a construção de perfis de dureza ao longo da espessura das amostras. As condições de carga e tempo de duração da indentação para a medição da dureza do material base foram as mesmas para que fosse possível uma comparação com as amostras recolhidas após a realização dos ensaios experimentais.



(a)



(b)

Figura 3.7. Distribuição das indentações referentes aos perfis de dureza: (a) material base; (b) EW66L1.

3.8.2. Ensaio de tração ao corte

Para a realização do ensaio de tração ao corte foi necessário cortar três provetes longitudinais à direção de soldadura das chapas que apresentaram uma soldadura bem-sucedida, utilizando uma serra alternativa. Após o corte, cada provete foi maquinado de modo a ficarem com as dimensões representadas no APÊNDICE C. Tendo as dimensões desejadas, os provetes foram pintados num dos lados com tinta de *spray* de cor branca e posteriormente salpicados com tinta preta. A utilização desta técnica permitiu que durante a execução do ensaio fosse possível a formação de uma malha através do *software* utilizado e conseqüentemente uma medição da deformação. A velocidade do ensaio foi de 1 mm/minuto tendo sido utilizada uma máquina de ensaios de tração SHIMADZU AGS-X em conjunto com o equipamento *ARAMIS optical 3D deformation & strain measurement system* para a criação da malha e observação das zonas de deformação. A Figura 3.8. representa a montagem do equipamento e o posicionamento do provete entre as amarras para a execução do ensaio.

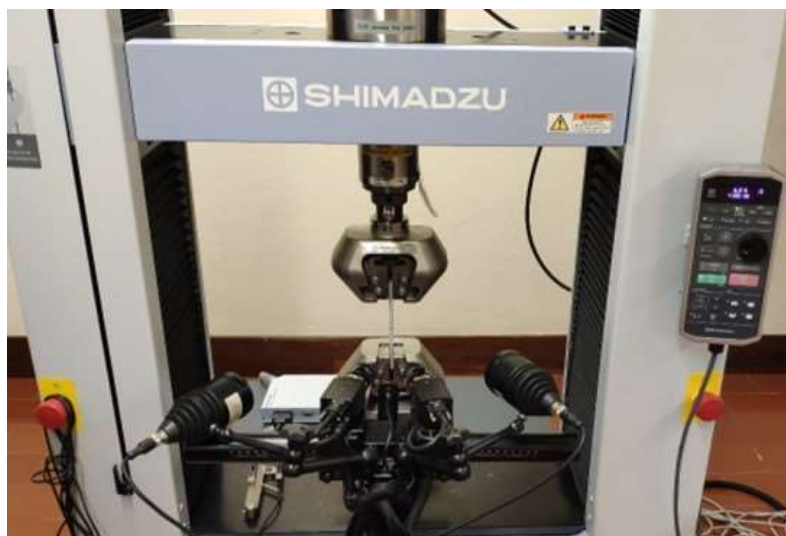


Figura 3.8. Montagem do equipamento e do provete para execução do ensaio de tração ao corte.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Determinação das Condições Cinemáticas dos Ensaios Realizados e da Janela de Soldabilidade

4.1.1. Determinação da velocidade de detonação

Através do mecanismo descrito na secção 3.4 Medição da Velocidade de Detonação foi possível o cálculo da velocidade de detonação para os diferentes ensaios explosivos realizados. Antes da realização do ensaio, as distâncias entre cada sonda foram medidas e a utilização dos cronómetros permitiram o registo temporal da ativação de cada uma. A Tabela 4.1. é uma compilação dos registos temporais, das distâncias entre sondas e do cálculo da velocidade de detonação para cada ensaio realizado.

Tabela 4.1. Determinação das velocidades de detonação.

	EW63 (Mg-Ti)		EW64 (Ti-Mg)		EW65 (Al-Mg)		EW66 (Cu-SS)	
	Distância [mm]	Tempo [μ s]	Distância [mm]	Tempo [μ s]	Distância [mm]	Tempo [μ s]	Distância [mm]	Tempo [μ s]
Sonda 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sonda 2	20,65	---	20,76	---	19,70	5,696	20,38	6,218
Sonda 3	39,60	---	40,16	---	20,74	11,724	19,02	11,833
Sonda 4	58,70	---	58,72	---	19,74	---	21,12	18,263
V_d (m/s)	2100*		2100*		3380		3317	

*Estes valores foram considerados tendo por base ensaios anteriores

Dos ensaios efetuados, não foi possível efetuar o registo dos sinais referentes à soldadura EW63 (Mg-Ti) e EW64 (Ti-Mg) devido a falhas no sistema de medição aquando da execução do ensaio explosivo. Por essa mesma razão, apoiado em resultados de ensaios executados em anos anteriores, em condições semelhantes, considerou-se o valor da velocidade de detonação 2100 m/s nos ensaios EW63 (Mg-Ti) e EW64 (Ti-Mg). Na realização da soldadura EW65 (Al-Mg), o valor correspondente ao tempo da sonda número 4 não foi possível de registar, mas os valores de passagem na sonda 2 e 3 permitem o cálculo da velocidade de detonação nesse mesmo ensaio. Os gráficos de medição da velocidade de detonação para o ensaio EW65 (Al-Mg) e EW66 (Cu-SS) podem ser consultados no APÊNDICE D.

4.1.2. Determinação da Velocidade de Projeção

O cálculo do valor da velocidade de projeção é efetuado através das Equações (2.2), (2.3) e consultando a Tabela 3.9. A Tabela 4.2. compila os resultados da velocidade de projeção calculados para os diversos ensaios.

Tabela 4.2. Velocidade de projeção de cada ensaio realizado.

	EW63 (Mg-Ti)	EW64 (Ti-Mg)	EW65 (Al-Mg)	EW66 (Cu-SS)
V_p [m/s]	764*	483*	735	334

*Estes valores foram calculados tendo em contas os valores da velocidade de detonação considerados.

4.1.3. Determinação do ângulo de colisão

Para realizar o enquadramento das condições do ensaio na janela de soldabilidade procedeu-se ao cálculo, para os diferentes ensaios realizados, do ângulo de colisão formado entre a placa voadora e a placa base. Para tal, com recurso à Equação (2.1), à velocidade de projeção calculada anteriormente e admitindo que a velocidade no ponto de colisão assume o valor da velocidade de detonação de cada ensaio, uma vez que a configuração do processo adotada é uma configuração paralela, concluíram-se os valores destes mesmos ângulos. Na

Tabela 4.3. encontram-se compilados os valores dos ângulos de colisão determinados para cada ensaio realizado.

Tabela 4.3. Ângulo de colisão de cada ensaio realizado.

	EW63 (Mg-Ti)	EW64 (Ti-Mg)	EW65 (Al-Mg)	EW66 (Cu-SS)
β [°]	20,95*	13,20*	12,24	5,76

*Estes valores foram calculados tendo em contas os valores da velocidade de detonação considerados.

4.1.4. Construção da janela de soldabilidade e enquadramento dos ensaios realizados

As Equações (2.10), (2.11), (2.13) e (2.14) são a base para traçar os limites que possibilitarão a construção de cada janela de soldabilidade. Para cada interface será necessário a construção de uma janela de soldabilidade, uma vez que esta varia com o tipo

de material que se pretende soldar, a espessura das chapas utilizadas e com a função que este desempenha, ou seja, se assume o papel de placa voadora ou de placa base. A

Tabela 3.6. e a Tabela 3.7. reúnem as propriedades físicas e mecânicas necessárias para a construção de cada janela, tendo sido assumido o valor de 0,06 para a determinação do limite de Wittman. A marcação do ponto que reúne as condições de cada ensaio na janela de soldabilidade é efetuado recorrendo à velocidade de colisão que assume o valor da velocidade de detonação e ao ângulo de colisão formado entre as duas placas.

A Figura 4.1. (a) representa a janela de soldabilidade traçada para o caso do ensaio EW63 (Mg-Ti), com a placa da liga de magnésio a desempenhar a função de placa voadora e como consequência a placa de titânio como placa base. Já a Figura 4.1. (b) representa a janela de soldabilidade para o segundo ensaio no âmbito desta dissertação de mestrado, ou seja, a placa de titânio é a placa voadora e a placa de magnésio assume o papel de placa base. Comparando as duas janelas é de fácil observação que o caso da Figura 4.1. (b) apresenta uma maior área e como tal, uma maior probabilidade teórica em apresentar uma soldadura com sucesso. Contudo, após a realização dos ensaios e a determinação das condições que permitissem o enquadramento do ensaio nas janelas de soldabilidade, podemos reparar que ficamos muito aquém das condições teoricamente ideais para obter sucesso nos dois ensaios, uma vez que a velocidade do ponto de colisão é muito inferior à indicada pelo limite esquerdo da janela (Cowan). Não se obteve a união das placas após a realização do ensaio por explosão.

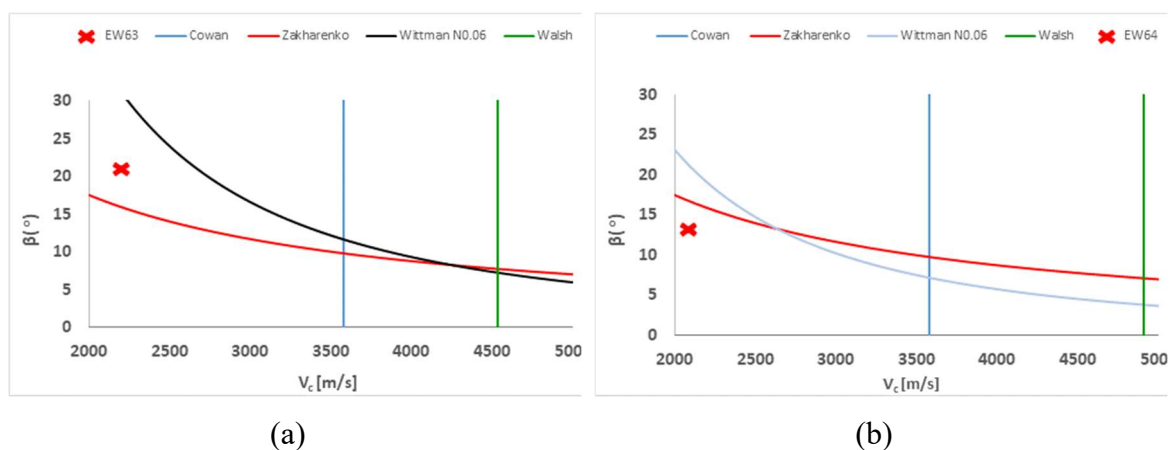


Figura 4.1. Janela de soldabilidade magnésio-titânio: (a) placa AZ31 como placa voadora e a placa Ti6Al4V como placa base e enquadramento do ensaio EW63 (b) placa Ti6Al4V como placa voadora e a placa AZ31 como placa base e enquadramento do ensaio EW64.

Podemos observar na Figura 4.2 a janela de soldabilidade para a soldadura EW65 (Al-Mg). A área que potencia uma soldadura com sucesso é extensa e a gama de velocidade de

colisão é compreendida entre os 2793 m/s e os 5508 m/s. Para a preparação do ensaio, partimos de uma velocidade conhecida para uma certa espessura de explosivo, da densidade da emulsão e do material da placa voadora utilizada, tornando possível aplicar a Equação (4.1) que advém da Equação (2.4):

$$R = \frac{\rho_{expl} \times h_{expl}}{\rho_f \times h_f} \quad (4.1)$$

A aplicação da Equação (4.1) permitirá aplicar a Equação (2.2) para determinar a velocidade de Gurney e posteriormente a utilização da Equação (2.1) com o intuito de determinar o ângulo de colisão. Desta forma, foi possível efetuar um prévio enquadramento do ponto para ensaio EW65 e garantir que a sua posição seria no interior dos limites da janela de soldabilidade traçada.

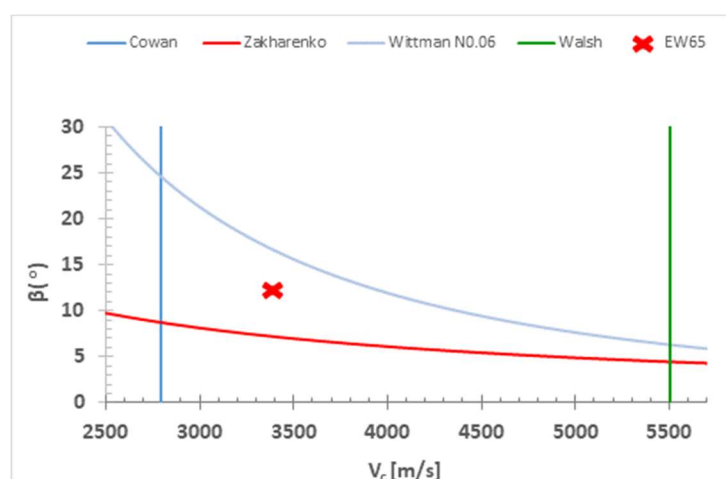


Figura 4.2. Janela de soldabilidade alumínio-magnésio e enquadramento do ensaio EW65 (placa AA6082-T6 como placa voadora e a placa AZ31 como placa base).

Na Figura 4.3 é possível observar a janela de soldabilidade para o material Cu-DHP como placa voadora e a placa de AISI 316L desempenhando a função de placa base. A metodologia para o enquadramento do ensaio foi a descrita no parágrafo anterior para o ensaio EW65 (Al-Mg). No interior da janela de soldabilidade encontram-se dois ensaios enquadrados, o ensaio EW57 (Cu-SS), que foi realizado em anos anteriores, marcado com um ponto cor de laranja e que servirá como comparação com o ensaio EW66 (Cu-SS) que está assinalado com um *check* cor de laranja. Apesar de a placa base do ensaio EW57 ter sido a liga AISI 304 a diferença das propriedades físicas e mecânicas entre os dois aços é praticamente imperceptível, o que podemos assumir uma janela de soldabilidade igual sem cometer um erro relevante. O ensaio EW57 apresenta uma velocidade de colisão de 2420

m/s e um ângulo de colisão com o valor de $10,2^\circ$ tendo sido utilizado ANFO como explosivo para promover a união das placas [29]. Tanto o ensaio EW57 como o ensaio EW66 apresentaram a união das placas como previsto pelo enquadramento das condições do ensaio no interior da janela de soldabilidade, tendo sido a seleção de tipo de explosivos diferentes que leva a que as reuniões de condições dos dois ensaios sejam diferentes.

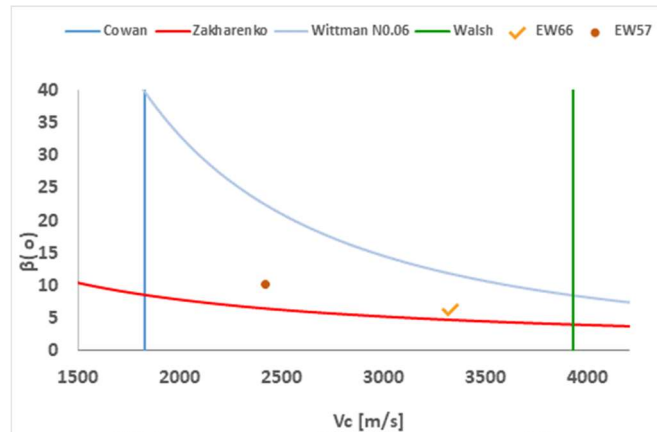


Figura 4.3. Janela de soldabilidade cobre-aço inoxidável e enquadramento do ensaio EW57 e EW66 (placa Cu-DHP como placa voadora e a placa AISI 316L como placa base).

4.2. Análise Macroscópica

4.2.1. EW63

Na Figura 4.4. é possível observar o estado das placas de metal após a realização do ensaio EW63 (Mg-Ti). As placas não soldaram e apesar de não se conseguir calcular o valor da velocidade de impacto, podemos concluir que este foi violento e a quantidade de energia excessiva, uma vez que a placa voadora de magnésio ficou estilhaçada, apresentando fragilidade e em conjunto com a placa base uma curvatura considerável. As fissuras presentes na placa voadora aparentam ser transversais à onda de propagação da detonação, sendo visível nas duas placas os vestígios do impacto, principalmente na parte esquerda destas, onde se iniciou a detonação. O ensaio não se enquadra no interior da janela de soldabilidade.

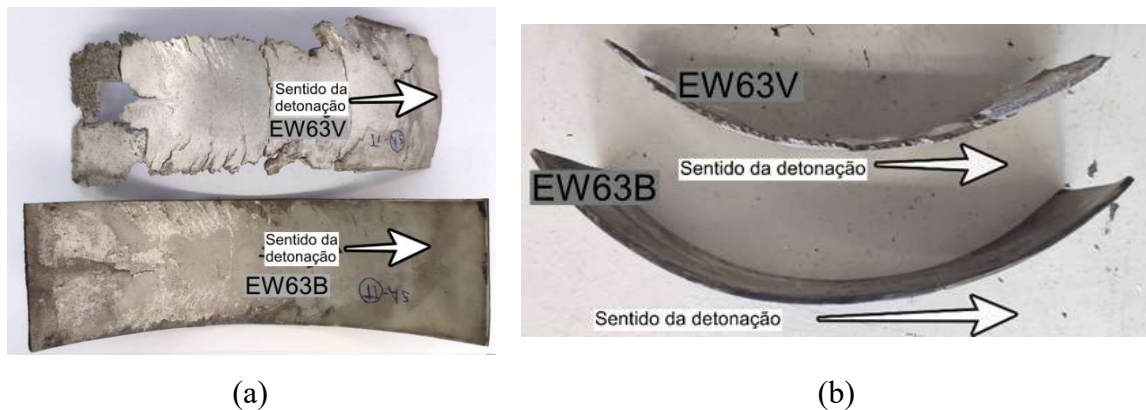


Figura 4.4. Materiais após a execução do ensaio EW63: (a) vista de topo; (b) vista de perfil.

4.2.2. EW64

Na Figura 4.5. está representado o estado das placas utilizadas no ensaio EW64 (Ti- Mg) após a detonação. O estado das placas é semelhante ao das placas no ensaio EW63 (Mg-Ti), a placa voadora apresenta uma curvatura acentuada e a placa base desfeita em pedaços, um comportamento frágil que revela agressividade no momento de colisão. Contudo, a placa base estava apoiada numa chapa de aço, como descrito anteriormente, e no momento da colisão a chapa de aço não permitiu que a placa base atingisse a curvatura que a placa voadora atingiu. Este facto, permite concluir que a formação de curvatura é um comportamento das placas de titânio, uma vez que no ensaio EW63 (Mg-Ti) a placa de titânio estava de igual modo apoiada na chapa de aço e apresentou de igual forma uma curvatura após o ensaio. O ensaio EW64 (Ti-Mg) não se enquadra na janela de soldabilidade, tendo sido utilizado ANFO com uma espessura de explosivo de 25 mm.

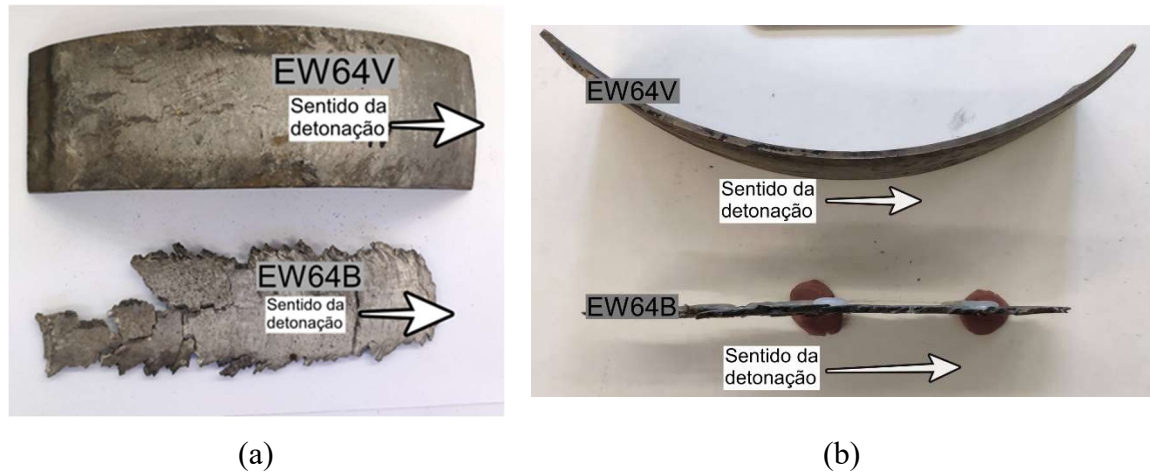


Figura 4.5. Materiais após a execução do ensaio EW64: (a) vista de topo; (b) EW64V vista de perfil e EW64B vista de topo.

4.2.3. EW65

Na Figura 4.6. é visível as placas após a realização do ensaio EW65 (Al-Mg). Apesar das condições do ensaio situarem-se no interior da janela de soldabilidade, o resultado do ensaio foi uma soldadura não consistente. Contudo, as interfaces das placas sugerem que por momentos estiveram soldadas, uma vez que apresentam uma morfologia ondulada nas duas placas, como é observado na Figura 4.6. (b) no interior do retângulo azul para a placa voadora e na Figura 4.6. (c) no interior do quadrado verde para a placa base, assim como remanescência de material fundido. A fusão parcial de material com possibilidade de formação de intermetálicos de natureza frágil, permitiu que no momento do contacto das duas placas o desenvolvimento de uma onda de tração, ou seja, a reflexão da onda de choque, a ligação momentaneamente estabelecida fosse quebrada e as duas placas separadas. Na Tabela 4.4. encontram-se os valores dos parâmetros determinados através da medição efetuada ao comprimento de onda das placas.

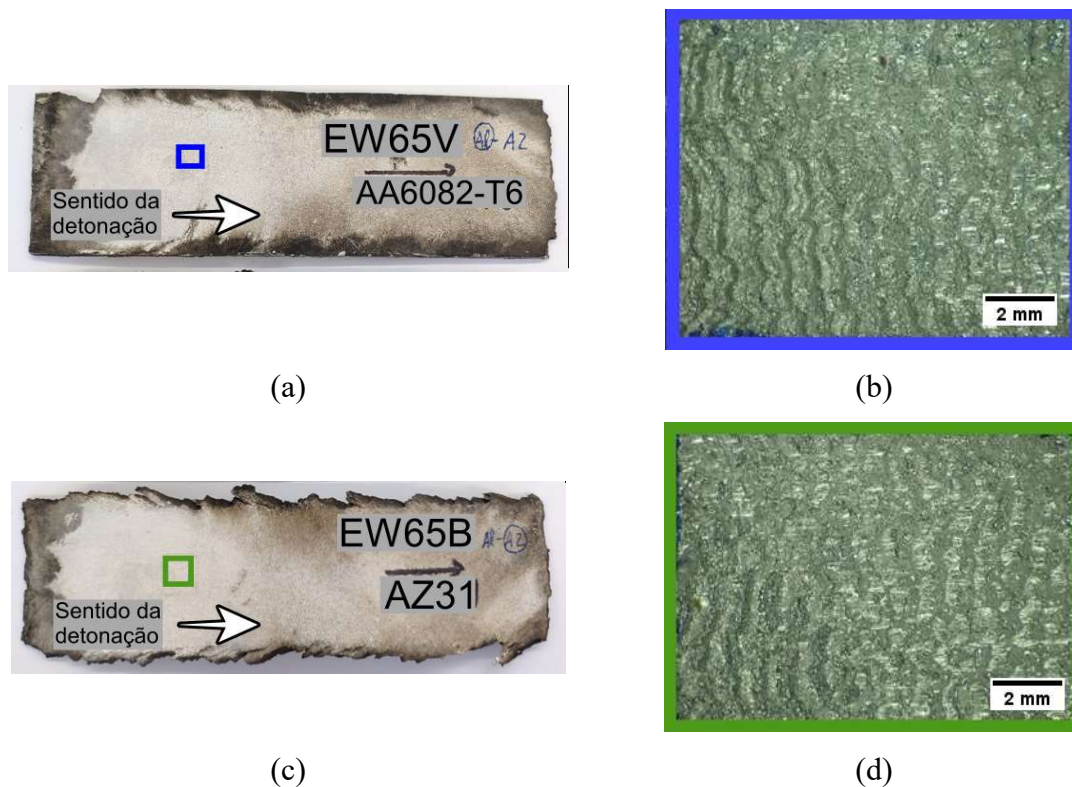


Figura 4.6. Materiais após a execução do ensaio EW65: (a) EW65V; (b) região de análise da placa EW65V; (c) EW65B; (d) região de análise da placa EW65B.

Tabela 4.4. Valores referentes ao comprimento de onda EW65.

	EW65
Comprimento de onda máximo [μm]	860,00
Comprimento de onda mínimo [μm]	675,00
Comprimento de onda médio [μm]	729,00
Desvio padrão [μm]	52,19

4.2.4. EW66

Na Figura 4.7. é visível o resultado do ensaio EW66 (Cu-SS). A união das placas foi garantida com sucesso e as condições do ensaio permitem enquadrá-lo no interior da janela de soldabilidade. A qualidade da soldadura atendeu às expectativas.

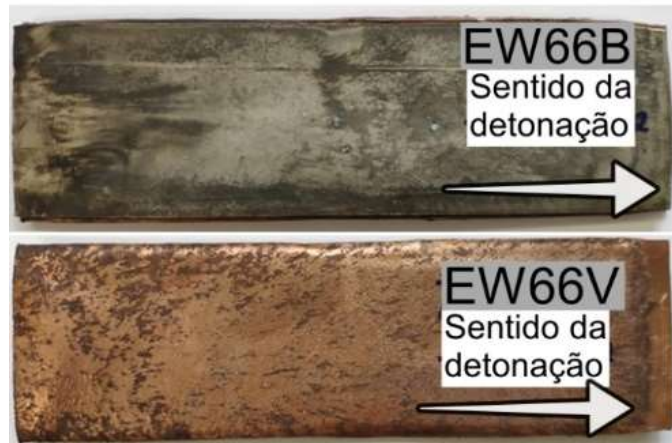


Figura 4.7. Materiais após a execução do ensaio EW66.

4.3. Análise Microscópica

4.3.1. Perfis de microdureza

Os perfis de microdureza foram traçados de acordo com o referido na secção 3.8.1 Microdureza, com o intuito de traçar uma linha de tendência comportamental da evolução dos valores da dureza dos materiais, assim como da junta soldada. Esta medição permite comparar a evolução da dureza das amostras com a dureza da amostra do material base.

4.3.1.1. EW63L1

Na Figura 4.8. encontra-se traçado o perfil de microdureza para a amostra EW63L1 assim como a dureza média da liga AZ31 utilizada. É observável que o material da placa base apresentou um endurecimento ao longo da sua espessura. Existe uma tendência de endurecimento, sendo esta um aumento considerável da dureza relativamente ao material base e um ligeiro aumento ao longo da espessura na direção da interface.

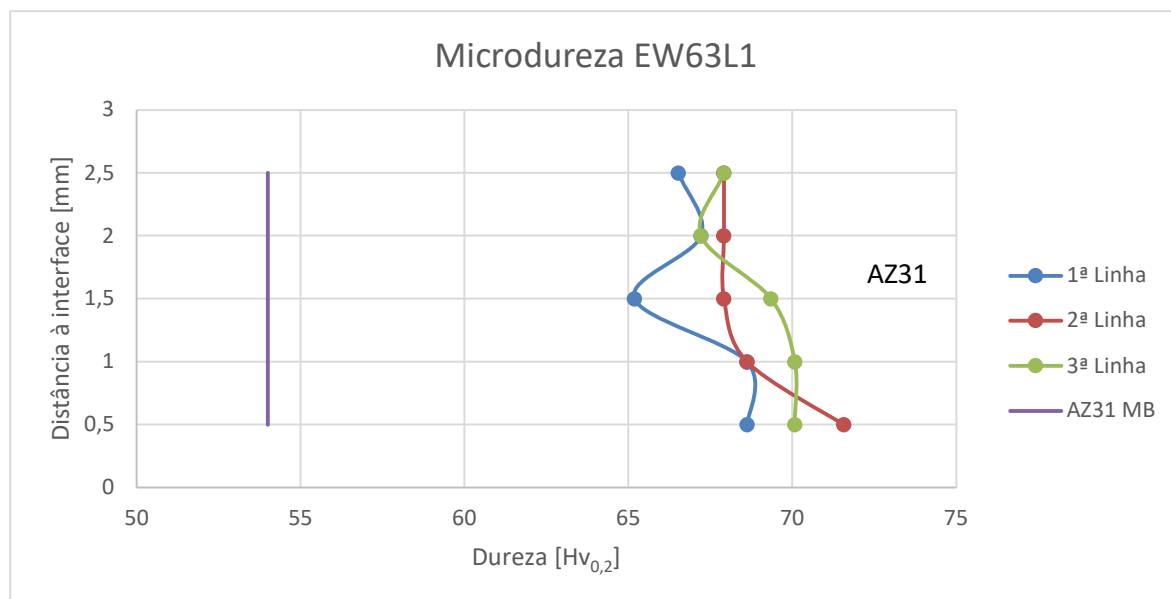


Figura 4.8. Perfil de dureza traçado para a amostra EW63L1 com a representação da dureza média do AZ31 MB.

4.3.1.2. EW66T1

Na Figura 4.9. encontra-se traçado o perfil de dureza da amostra EW66T1, sendo comparado o valor de cada indentação com o valor de dureza média de cada material base. É de fácil observação que a liga AISI 316L sofreu um aumento considerável de dureza e que à medida que se aproxima da interface, mais acentuado é esse mesmo aumento. Uma vez que a análise do perfil de dureza traçado para a amostra EW66T1 a 1ª Linha apresentava um comportamento diferente da 2ª Linha e 3ª Linha, traçou-se uma nova linha (Linha 1') distanciada 1 mm da 1ª Linha. Como observado, este comportamento repetiu-se, sendo traçado posteriormente uma linha na amostra D (Linha D) e outra linha na amostra E (Linha E), para entender o comportamento da microdureza nas regiões periféricas das placas soldadas. Como tal, observa-se um aumento da microdureza à medida que nos afastamos para a periferia da soldadura, efeito da maior deformação plástica sofrida nestas regiões. Na Figura 4.10. encontra-se representada as indentações efetuadas para a análise transversal da microdureza do ensaio EW66.

Relativamente à liga Cu-DHP, ou seja, a placa voadora sofre um pequeno aumento de dureza em zonas junto à interface da soldadura, mas quanto a regiões periféricas da interface da soldadura o aumento de dureza não é significativo.

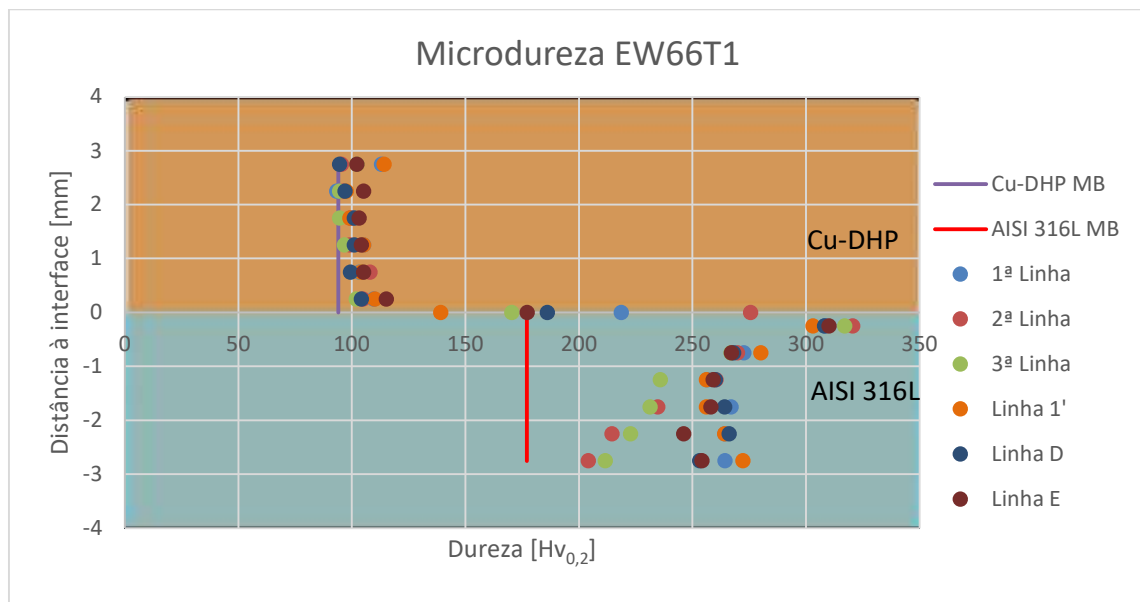


Figura 4.9. Perfil de dureza traçado para a amostra EW66T1 com a representação da dureza média do Cu-DHP MB e AISI 316L MB.

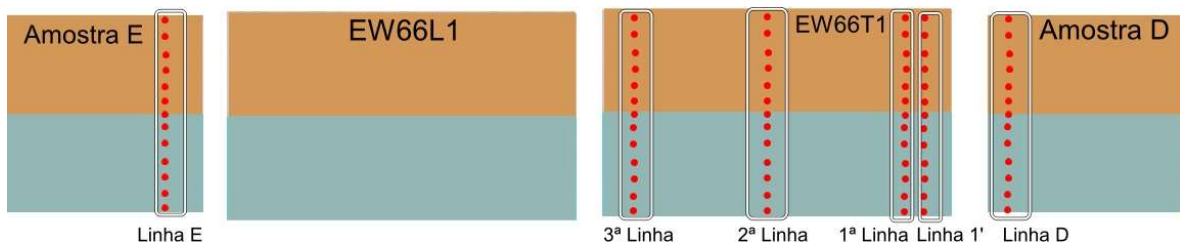


Figura 4.10. Distribuição das indentações efetuadas na análise transversal da microdureza do ensaio EW66.

4.3.1.3. EW66L1

A Figura 4.11. é o esboço do gráfico do perfil de microdureza para a amostra EW66L1, comparando esse mesmo esboço com a dureza média do material base utilizado. Os resultados observados nesta figura são semelhantes aos observados no gráfico da amostra EW66T1. Existe um aumento significativo por parte da placa base, isto é, pela placa da liga AISI 316L, à medida que existe uma aproximação da interface, enquanto o aumento da dureza da placa de Cu-DHP apenas apresenta um reduzido aumento junto à interface.

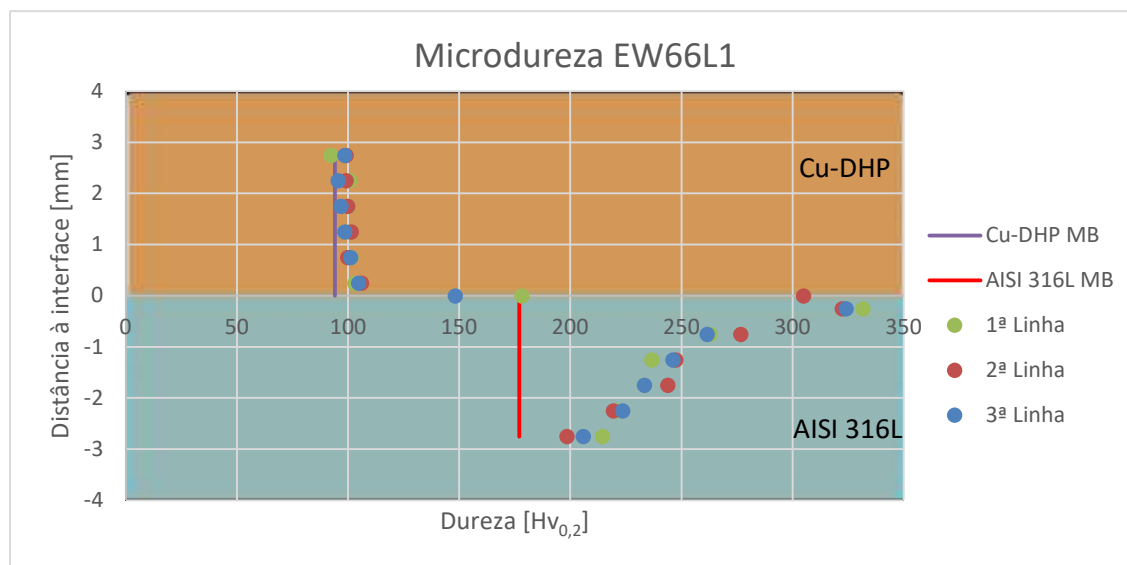


Figura 4.11. Perfil de dureza traçado para a amostra EW66L1 com a representação da dureza média do Cu-DHP MB e AISI 316L MB.

4.3.2. Discussão dos resultados da microdureza

A Tabela 4.5 e Tabela 4.6. são uma compilação de parâmetros que foram calculados a partir da medição da microdureza das amostras do ensaio EW63 e EW66 respetivamente. Nestas tabelas estão representadas a microdureza média, tendo sido calculada para cada placa, para tal foi excluída a indentação correspondente ao ponto que na Figura 3.7. Distribuição das indentações referentes aos perfis de dureza: (a) material base; (b) EW66L1. (b) está situado no centro da interface no caso do ensaio. Para além da microdureza média, encontra-se calculado o aumento médio de dureza que cada placa sofreu após o processo de soldadura por explosão, assim como o aumento máximo que foi calculado tendo em conta o valor máximo da indentação registada. Na Tabela 4.6. são apresentados os valores do ensaio EW57 como comparação dos resultados obtidos no ensaio EW66.

Tabela 4.5. Compilação de parâmetros determinados para o ensaio EW63 com recurso à microdureza.

		EW63VL1	MB
AZ31	Microdureza média [$Hv_{0,2}$]	68,3	54
	Aumento médio [%]	26,5	---
	Aumento máximo [%]	32,5	---

Tabela 4.6. Compilação de parâmetros determinados para o ensaio EW66 e EW57 com recurso à microdureza.

		EW66T1	EW66L1	MB	EW57T	EW57L	MB
Cu-DHP	Microdureza média [Hv _{0,2}]	101,1	100,0	94	111,3 [29]	109,6 [29]	94 [29]
	Aumento médio [%]	4,0	3,4	---	18,4 [29]	16,6 [29]	---
	Aumento máximo [%]	10,7	6,8	---	68,5 [29]	36,2 [29]	---
AISI 316L (AISI 304SS)	Microdureza média [Hv _{0,2}]	256,7	250,2	177	(309,5) [29]	(330,9) [29]	(188) [29]
	Aumento médio [%]	45,0	41,4	---	(64,6) [29]	(76) [29]	---
	Aumento máximo [%]	81,1	87,4	---	(118) [29]	(157,9) [29]	---

Como observado na Tabela 4.5. a amostra longitudinal da placa voadora do ensaio EW63 apresenta alterações nos valores da microdureza quando comparados com as indentações efetuadas no material base. O aumento médio da microdureza é de 26,5 % e aumento máximo de 32,5 % devido à deformação plástica ocorrida no ensaio de soldadura por explosão.

A análise da Tabela 4.6. permite concluir que tanto a liga AISI 316L como a liga Cu-DHP apresentam um aumento na dureza após o ensaio de soldadura, porém o maior aumento ocorre na placa de AISI 316L que ronda um aumento médio superior a 40 % o que pode ser corroborado pelo processo de endurecimento dos aços através do mecanismo de deformação plástica característica dos aços inoxidáveis estudado por autores como Ankur K.Agrawal [40]. É de igual modo visível que a amostra transversal (EW66T1) apresenta um aumento médio superior ao da amostra EW66L1, ou seja, o aumento médio de dureza é superior no sentido transversal ao sentido da detonação.

Quando comparado o aumento da dureza do ensaio EW66 com os valores observados no ensaio EW57 (Cu-SS), o aumento é superior no ensaio EW57, o que pode ser justificado por uma maior deformação plástica induzida pelo ANFO e pelo rácio de explosivo superior.

4.3.3. Análise da interface

4.3.3.1. EW66T1

Na Figura 4.12 (a) e Figura 4.12. (b) estão representadas algumas zonas da interface da amostra EW66T1, sendo possível a observação de toda a interface através da Figura 3.7. Distribuição das indentações referentes aos perfis de dureza: (a) material base; (b) EW66L1. (b). A revelação da microestrutura na região da interface apresentou uma grande dificuldade e o ataque químico pouco efeito teve. É possível observar algumas zonas de penetração do material da placa voadora na placa base, formando pequenas regiões de cobre na placa de aço inoxidável. Existem zonas mais escuras na interface designadas de zonas mistas, sendo constituídas pelos dois materiais e possível formação de intermetálicos.

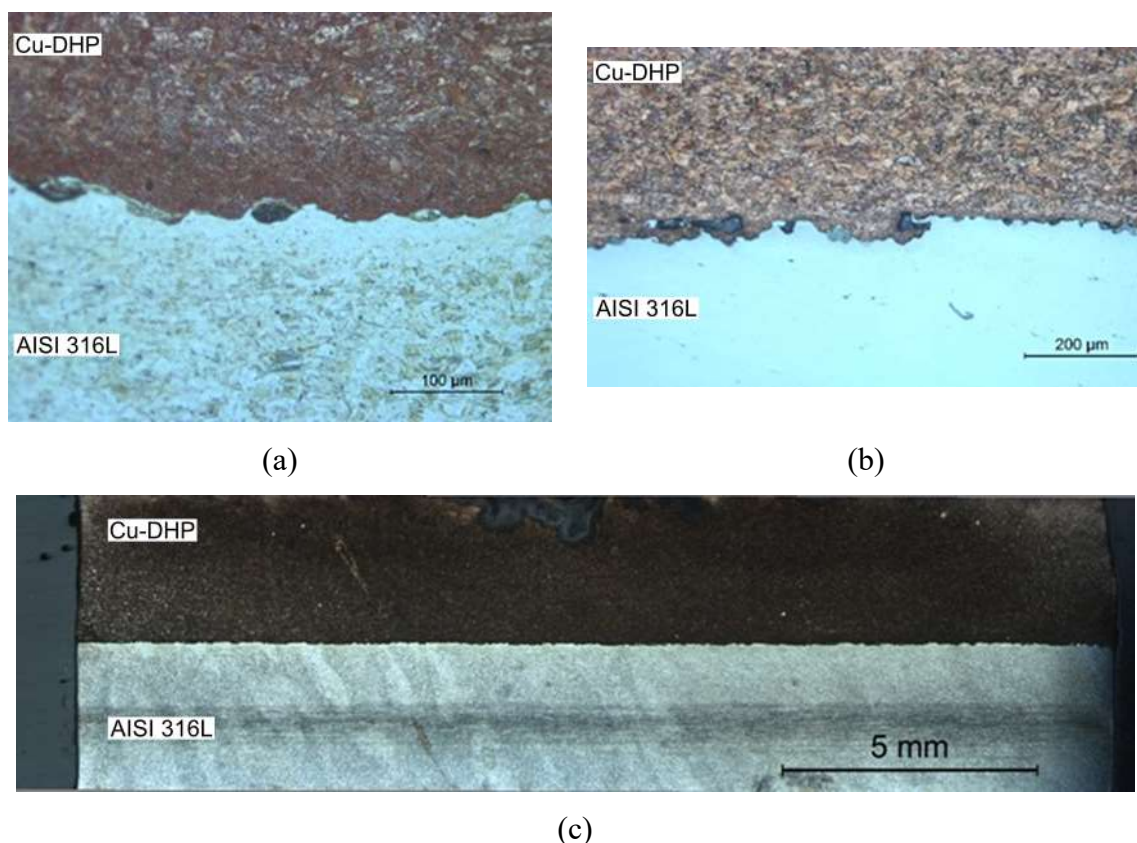


Figura 4.12. Microestrutura da amostra EW66T1: a) placa base b) placa voadora c) macro da soldadura EW66T1.

4.3.3.2. EW63L1

Na Figura 4.12. (a) e Figura 4.12. (b) são representadas algumas das zonas da amostra longitudinal do ensaio EW66 (Cu-SS), sendo visível na Figura 4.12. (c) uma ampliação de

uma zona ondulada da interface da soldadura. Enquanto na Figura 4.12. (a) foi realizado um ataque químico com o intuito de revelar a microestrutura da placa base (aço inoxidável), enquanto na Figura 4.12. (b) o ataque químico permitiu revelar a microestrutura da placa voadora (cobre). É visível um alongamento e achatamento do grão na região de contacto das duas placas o que corrobora o endurecimento sofrido por deformação plástica esperado pelo resultado das indentações efetuadas. A liga de cobre apresenta a formação de vórtices, rodeados por uma zona mista, que possivelmente se deve à formação de compostos intermetálicos, sendo o aparecimento destas zonas superior na amostra longitudinal do que na amostra transversal à direção de detonação.

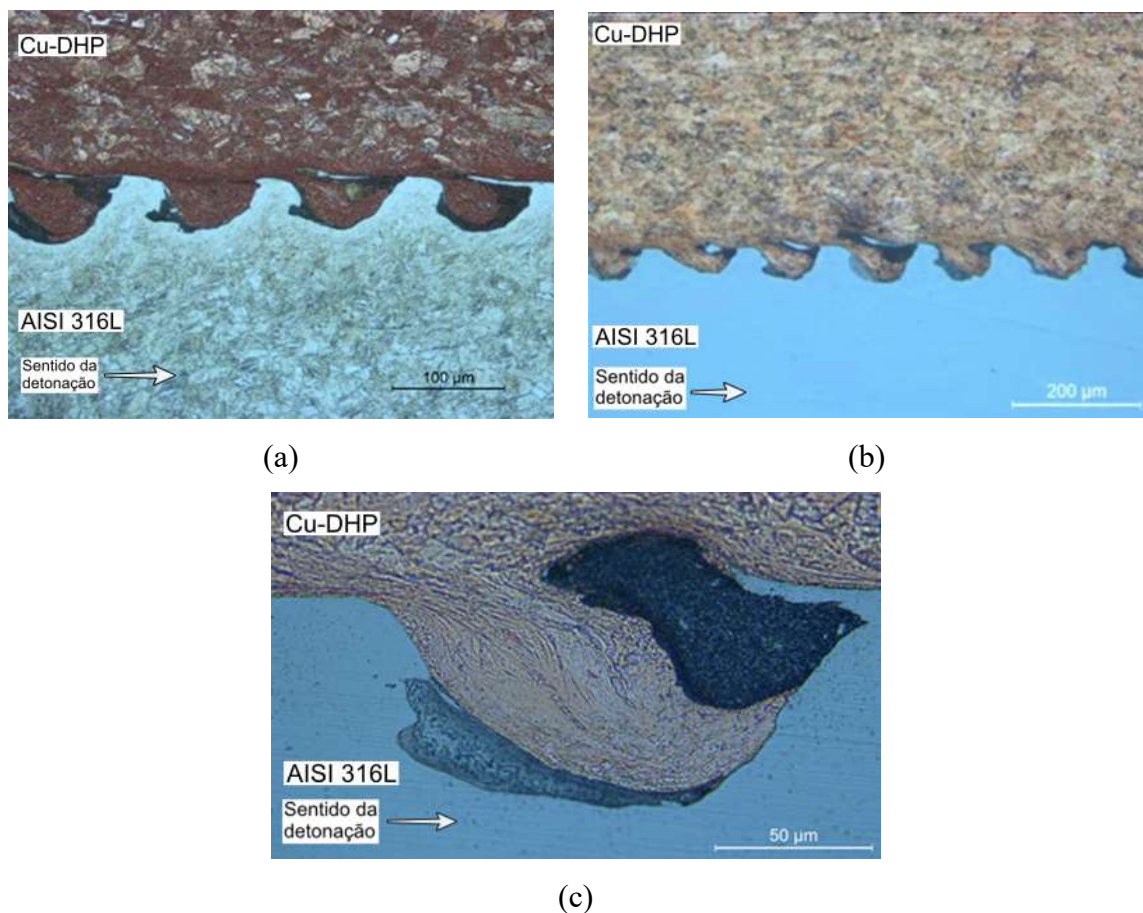


Figura 4.13. Microestrutura da amostra EW66L1: a) placa base b) placa voadora c) ampliação de 20 x de uma zona ondulada.

Analisando a morfologia da interface apresentada por esta amostra, existem indícios que aproximam a sua estrutura ao mecanismo de fluxo instável, assim como existem indicativos que permitem associar a sua interface ao mecanismo turbulento. Os pontos de ancoragem apresentados em algumas das ondas da Figura 4.12. (a) possibilitam uma semelhança com os fenómenos explicados na secção pelo mecanismo de fluxo instável com

base nos fenómenos hidrodinâmicos para dois fluidos com velocidades diferente. Contudo, o aparecimento de vórtices em regiões da interface da soldadura provocado pelo aumento da temperatura nas zonas de colisão e conseqüente fusão parcial do material na zona envolvente das ondas formadas, apresenta semelhanças com o mecanismo turbulento.

Na Tabela 4.7 e Tabela 4.8 encontram-se compilados os parâmetros da medição do comprimento e altura de onda respetivamente. Nas tabelas referidas encontram-se os valores medidos para a soldadura EW57 como termo de comparação.

Tabela 4.7. Valores referentes ao comprimento de onda EW66L1 e EW57.

	EW66L1	EW57
Comprimento de onda máximo [µm]	185,00	228,34
Comprimento de onda mínimo [µm]	140,00	180,01
Comprimento de onda médio [µm]	155,80	200,02
Desvio padrão [µm]	14,03	13,68

Tabela 4.8. Valores referentes à altura de onda EW66L1 e EW57.

	EW66L1	EW57
Altura de onda máxima [µm]	67	81,25
Altura de onda mínima [µm]	36	58,36
Altura de onda média [µm]	57,60	69,10
Desvio padrão [µm]	9,58	7,32

A observação das tabelas anteriores permite concluir que o comprimento de onda médio e a altura de onda média são superiores na situação do ensaio EW57. Esta superioridade apresentada corrobora o que foi descrito na secção 2.4.3. Seleção do Explosivo, isto é, a morfologia, o comprimento e a amplitude de onda depende do tipo de explosivo selecionado.

4.3.4. SEM/EDS

4.3.4.1. EW65

A Figura 4.14. (a) representa a análise de SEM efetuada a uma zona da amostra da placa base da liga de magnésio, com a representação de dois espectros que foram alvo de análise, em duas zonas em planos aparentemente distintos. Na Figura 4.14. (b) é possível a observação de um espectro que foi alvo de uma análise EDS para proceder à sua caracterização química. É visível a presença de fissuras em quantidade substancialmente superior na placa de magnésio, o que corrobora a fragilidade apresentada pelo magnésio neste tipo de ensaios, como verificado na soldadura EW63 (Mg-Ti) e EW64 (Ti-Mg). Estas fissuras não foram detetadas quando se procedeu à análise macroscópica efetuada na secção 4.2.3. EW65.

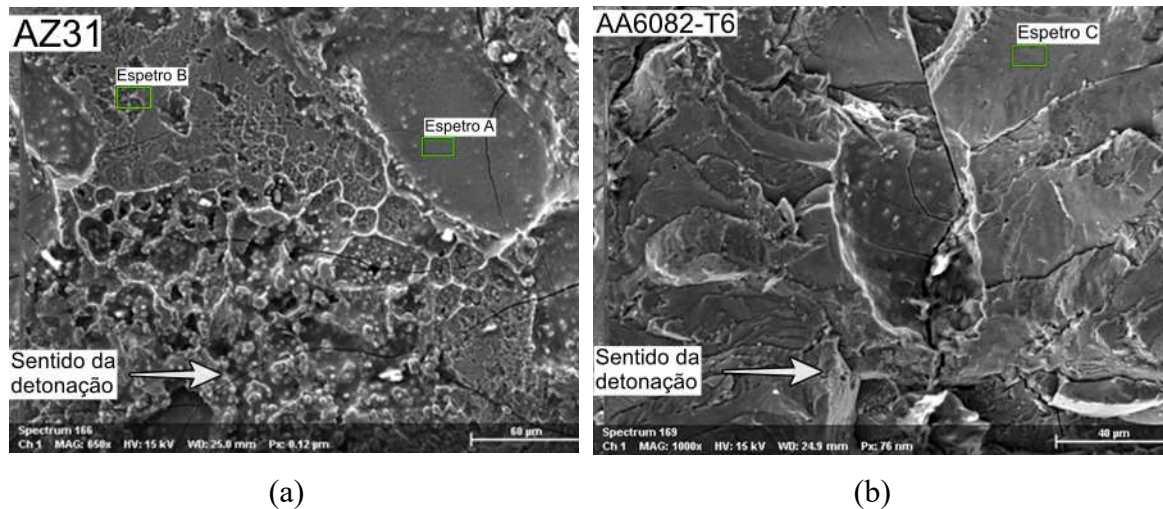


Figura 4.14. SEM da amostra EW65: (a) placa base (Mg) espectro A e espectro B; (b) placa voadora (Al) espectro C.

Na

Tabela 4.9. está representado o resultado dos espectros efetuados, focando a análise nas percentagens atómicas de magnésio e alumínio. Não foram considerados outros elementos presentes no registo como o carbono, o oxigénio e o sódio, estando no APÊNDICE E

representada a tabela com os elementos identificados, assim como a sua percentagem atômica.

Tabela 4.9. Espectros das amostras do ensaio EW65 [at. %].

	Mg	Al
Espetro A	19,61	21,33
Espetro B	16,29	15,93
Espetro C	20,55	27,95

É observável que as percentagens atômicas de magnésio e alumínio são relativamente idênticas, independentemente de a análise estar a ser efetuada na placa voadora (Al) ou na placa base (Mg). Esta observação evidencia a formação de uma camada frágil, na interface, com a presença de alumínio e magnésio, potenciadora da separação das placas e conseqüente insucesso na união pretendida. Uma vez que em alturas diferentes de ondas o espetro A e espetro B são semelhantes a nível de percentagens atômicas do magnésio e o alumínio, efetuou-se a análise do espetro C na placa voadora (Al) que quando comparado com os dois espetros efetuados na placa base (Mg) (espetro A e espetro B), apresentam uma semelhança na percentagem atômica dos elementos presentes. Esta semelhança permite confirmar que foi desenvolvida uma camada frágil e contínua que no momento de reflexão da onda na base da placa de magnésio de choque potenciou a separação das placas.

4.3.4.2. EW66L1

Na Figura 4.15. está representada uma secção da amostra EW66L1 que foi submetida a uma análise EDS, com o intuito de analisar a composição química da placa voadora (cobre) e da placa base (aço inoxidável), assim como a interface da soldadura. Nesta imagem é visível a presença de 4 elementos: cobre (azul), níquel (roxo), ferro (amarelo) e crómio (laranja).



Figura 4.15. Secção da amostra EW66L1 submetida a análise EDS

Para analisar com mais detalhe esta variação de composição entre a placa base, a zona de interface e a placa voadora, foi restringida uma linha que cruzou as três zonas objeto de estudo. Na Figura 4.16. (a) está representada a amarelo a seta sobre a zona que foi alvo desta análise EDS e na Figura 4.16. (b) o gráfico que permite visualizar a variação de composição no sentido que está determinado pela seta.

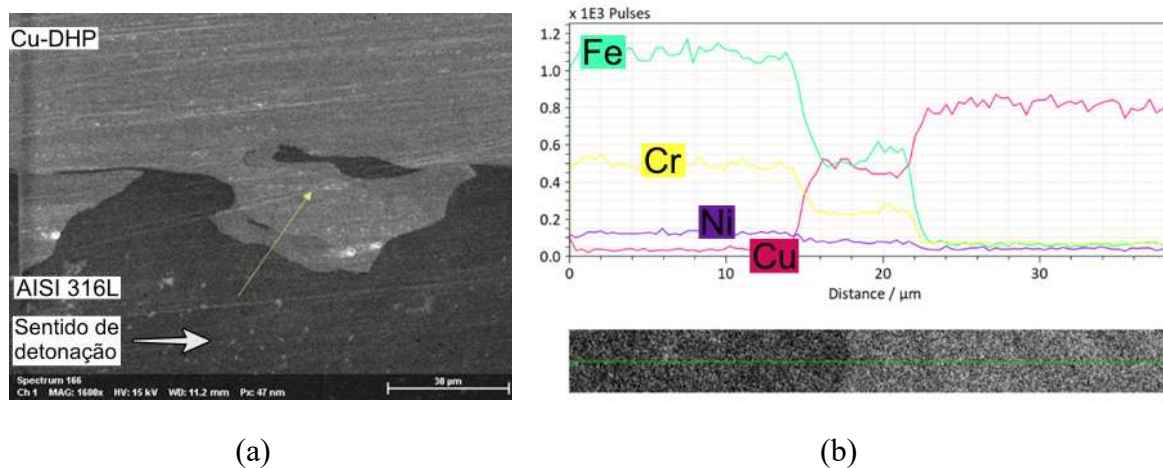


Figura 4.16. Análise da variação de composição da amostra EW66L1: (a) linha analisada; (b) gráfico de variação de composição

O gráfico da Figura 4.16. (b) permite visualizar com clareza que na placa base (aço inoxidável), existe em elevada concentração ferro e cromo, enquanto o níquel está presente em concentração muito baixa e o cobre pode ser ignorado. À medida que percorremos a zona de análise e nos aproximamos da zona da interface, as concentrações de ferro e cromo diminuem drasticamente e a concentração de cobre aumenta em grande escala, sendo esta zona caracterizada pela mistura dos 4 elementos. Como observado na secção 4.3.3. Análise da interface, existe uma zona intermédia, de cor mais escura do que os materiais da placa base e da placa voadora que é constituída por ferro e cobre praticamente na mesma proporção, cromo em percentagem mais baixa e níquel em quantidades residuais. Quando

a análise se desloca em direção à placa voadora (cobre), a concentração de ferro e níquel assumem valores que podem ser ignorados e a concentração de cobre, como seria esperado, aumenta para valores consideráveis.

4.3.5. Ensaio de tração ao corte

No total foram realizados 3 ensaios de tração ao corte para análise da soldadura EW66 (Cu-SS). Para compreensão e estudo deste ensaio, foi traçado o gráfico na Figura 4.17. onde no eixo das abcissas se encontra o alongamento sofrido pelo provete em milímetros e segundo o eixo das ordenadas a força correspondente em Newton. O comportamento dos provetes tracionados é semelhante, assim como as curvas traçadas para cada. A zona de rotura em todos os ensaios foi na região do cobre, índice revelador que a união foi garantida com sucesso e cuja resistência mecânica é superior à de pelo menos um material base.

Na Tabela 4.10. estão expressos os valores da força máxima para cada provete submetido ao ensaio de tração ao corte, assim como o respetivo alongamento em milímetros. Os valores da força máxima para cada provete ensaiado são muito próximos, o que revela uma consistência na soldadura efetuada.

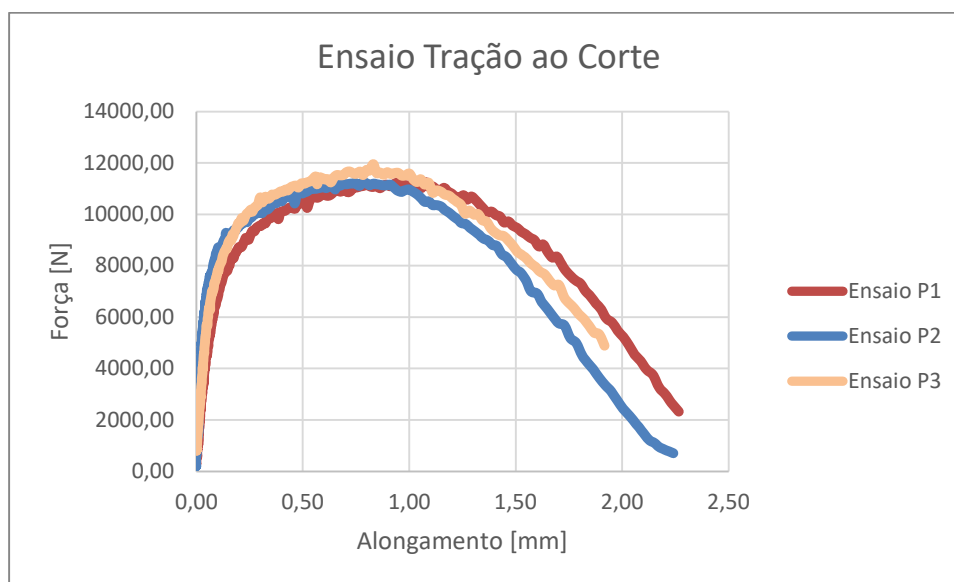


Figura 4.17. Curvas Força/Alongamento do ensaio EW66.

Tabela 4.10. Compilação de valores máximos no ensaio de tração ao corte da soldadura EW66.

	P1	P2	P3	EW57P2
Força máxima [N]	11265	11285	11957	12728
Alongamento correspondente à força máxima [mm]	1,08	0,65	0,83	1,93

Na Figura 4.18. está representada a distribuição das deformações locais para os provetes ensaiados. Nesta figura é possível observar que o local de rotura no provete não é localizado na interface da soldadura, tendo ocorrido a falha numa secção constituída por cobre.

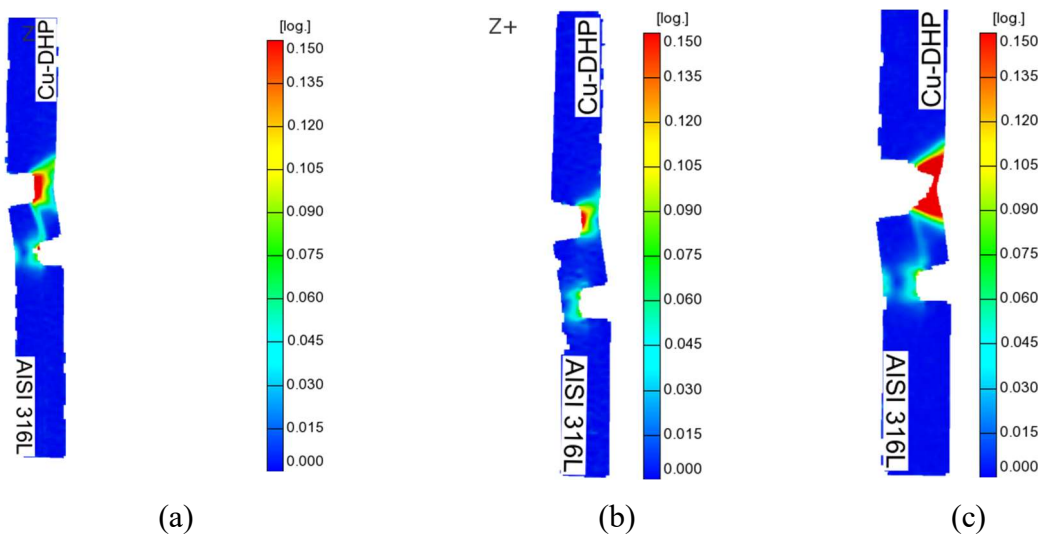


Figura 4.18. Mapa de deformações locais dos provetes do ensaio EW66: (a) P1; (b) P2; (c) P3.

5. CONCLUSÕES

Através da investigação desenvolvida, da observação dos resultados e a sua discussão foi possível retirar as seguintes conclusões:

Não foi conseguido nenhuma soldadura com a utilização de placas de magnésio potencialmente devido aos problemas do magnésio com a deformação ao qual foi sujeito.

No ensaio Al-Mg a formação de uma camada continua de intermetálicos frágeis na interface parece ser a causa evidente para separação das placas.

No ensaio Cu-SS a resistência mecânica da interface é superior à de pelo menos um material base. A rotura do provete ocorreu no Cu e apresentou características dúcteis.

A variação de dureza da soldadura EW66 (Cu-SS) permite concluir que o perfil de dureza varia consoante a distância do perfil ao centro da soldadura. A placa de AISI 316L sofreu um aumento significativo de dureza, o qual é atribuído a um endurecimento por deformação plástica característico deste tipo de material.

A variação de explosivo relativamente a soldaduras anteriores não afetou a qualidade da soldadura.

5.1. Propostas Para Trabalhos Futuros

Devido as condicionantes verificadas, sugere-se que para trabalhos futuros o seguinte:

Retirar a base de aço nas soldaduras por explosão que contenham titânio;

Utilização de chapas com espessura superior na ligação Alumínio/Magnésio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. H. Carpenter and R. H. Wittman, *Explosion Welding*, Mech. Eng., vol. 100, 1978.
- [2] G. Young, *Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History*, 2004.
- [3] B. Crossland, *Review of the present state-of-the-art in explosive welding*, vol. 3, no. 1. Taylor & Francis, 1976. doi: 10.1179/030716976803391845.
- [4] A. A. Deribas, V. M. Kudinov, F. I. Matveenkov, and V. A. Simonov, “Explosive Welding,” *JOM: Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 3, pp. 111–118, 1967.
- [5] T. Z. Blazynski, *Explosive welding, forming and compaction*, 1ed ed. Essex, England: Applied Science Publishers Ltd, 1983.
- [6] F. Findik, “Recent developments in explosive welding,” Mar. 2011. doi: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.
- [7] A. Nobili, T. & L. Masri, and M.C., “Recent Developments in Characterization of a Titanium-Steel Explosion Bond Interface,,” pp. 1–15, 1999.
- [8] Popoff Alexis A. and H. Casey, “Application of Explosion Welded Transition Joints,” Los Angeles, California, Mar. 1977.
- [9] 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,” Elsevier Ltd, 2013. doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.069.
- [10] R. W. Gurney, *The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shell and Grenades*,. Army Ballistic Research lab Aberdeen Proving Ground Md, 1943.
- [11] J. Kennedy, D. L. E., and F. 1972. Coffey, “Explosive output for driving metal,,” 1972.
- [12] P. W. Cooper, *Explosive Engineering*. New York, USA: Wiley-VCH, 1996.
- [13] P. C. Chou and W. J. Flis, “Recent Developments in Shaped Charge Technology,” *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 11, no. 4, pp. 99–114, Aug. 1986, doi: 10.1002/prop.19860110402.
- [14] W. Flis and P. C. Chou, “Recent developments in haped charge technology,,” Aug. 1986.
- [15] S. A. A. Mousavi and S. T. S. Al-Hassani, “Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 53, no. 11, pp. 2501–2528, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.jmps.2005.06.001.
- [16] R. Mendes, J. Ribeiro, I. Plaksin, J. Campos, and B. Tavares, “Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric micro-balloons,” Institute of Physics Publishing, May 2014. doi: 10.1088/1742-6596/500/5/052030.
- [17] I. Plaksin *et al.*, “Novelties in physics of explosive welding and powder compaction,” *J. Phys. IV France*, 110, pp. 797–802, 2003.
- [18] B. Gülenç, “Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method,” *Materials & Design*, vol. 29, pp. 275–278, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2006.11.001.

- [19] A. Durgutlu, H. Okuyucu, and B. Gulenc, “Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel,” Elsevier Ltd, 2008. doi: 10.1016/j.matdes.2007.07.012.
- [20] M. Prazmowski, “Mechanical properties of zirconium/steel bimetal fabricated by means of explosive welding at varied detonation velocities,” *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 59, no. 3, pp. 1137–1142, 2014, doi: 10.2478/amm-2014-0198.
- [21] E. P. Carton, “Wave forming mechanisms in explosive welding,” in *Materials Science Forum*, 2004, vol. 465–466, pp. 219–224. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.465-466.219.
- [22] 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.
- [23] A. Durgutlu, B. Gülenç, and F. Findik, “Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding,” *Materials and Design*, vol. 26, no. 6, pp. 497–507, 2005, doi: 10.1016/j.matdes.2004.07.021.
- [24] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Microstructure and mechanical behaviour of aluminium-carbon steel and aluminium-stainless steel clads produced with an aluminium interlayer,” Elsevier Inc., Sep. 2019. doi: 10.1016/j.matchar.2019.109819.
- [25] A. S. Bahrani, T. J. Black, and B. Crossland, *The mechanics of wave formation in explosive welding*, vol. 296. Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci., 1967.
- [26] A. José, R. Oliveira, A. De, and J. Roque, “Caracterização de componentes metálicos tridissimilares produzidos por soldadura por explosão,” Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020.
- [27] S. R. Reid, “A discussion of the mechanism of interface wave generation in explosive welding,” *International. J. Mech. Sci.* 16, pp. 399–413, 1974.
- [28] S. H. Ghaderi, A. Mori, and K. Hokamoto, “Analysis of explosively welded aluminum-AZ31 magnesium alloy joints,” *Materials Transactions*, vol. 49, no. 5, pp. 1142–1147, May 2008, doi: 10.2320/matertrans.MC200796.
- [29] M. B. Santos, “Soldadura por explosão entre cobre e aço inoxidável influência das propriedades físicas,” Universidade de Coimbra , Coimbra, 2020.
- [30] J. B. Ribeiro, R. Mendes, and A. Loureiro, “Review of the weldability window concept and equations for explosive welding,” Institute of Physics Publishing, May 2014. doi: 10.1088/1742-6596/500/5/052038.
- [31] W. S. de Rosset, “Analysis of Explosive Bonding Parameters,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 21, no. 6, pp. 634–638, Sep. 2006, doi: 10.1080/10426910600611136.
- [32] V. I. Lysak and S. v. Kuzmin, “Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 1, pp. 150–156, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.017.
- [33] J. M. Walsh, R. G. Shreffler, and F. J. Willig, “Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions,” *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 3, pp. 349–359, Mar. 1953, doi: 10.1063/1.1721278.
- [34] G. R. Abrahamson, “Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet,” vol. 28, pp. 519–528, 1960.

-
- [35] I. D. Zakharenko and B. S. Zlobin, “Effect of the hardness of welded materials on the position of the lower limit of explosive welding,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 19, no. 5, pp. 689–692, Sep. 1983, doi: 10.1007/BF00750461.
- [36] S. Carpenter and R. Wittman, *Explosion Welding, Mech. Eng.*, vol. 100. 1978.
- [37] E. A. Brandes and G. B. Brook, *Smithells Metals Reference Book*, Seventh. Woburn, 1992.
- [38] Nelson Rodrigues de Almeida Santos, “Soldadura por explosivo em configuração plana de Alumínio-Cobre,” Universidade de Coimbra, Coimbra , 2013.
- [39] M. Ferreira Da Silva, “Soldadura por explosão entre ligas de alumínio e compósitos termoplásticos reforçados com fibras,” Universidade de Coimbra , Coimbra , 2020.
- [40] A. K. Agrawal and A. Singh, “Limitations on the hardness increase in 316L stainless steel under dynamic plastic deformation,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 687, pp. 306–312, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.01.066.

APÊNDICE A



Figura A.1. Suporte das sondas.

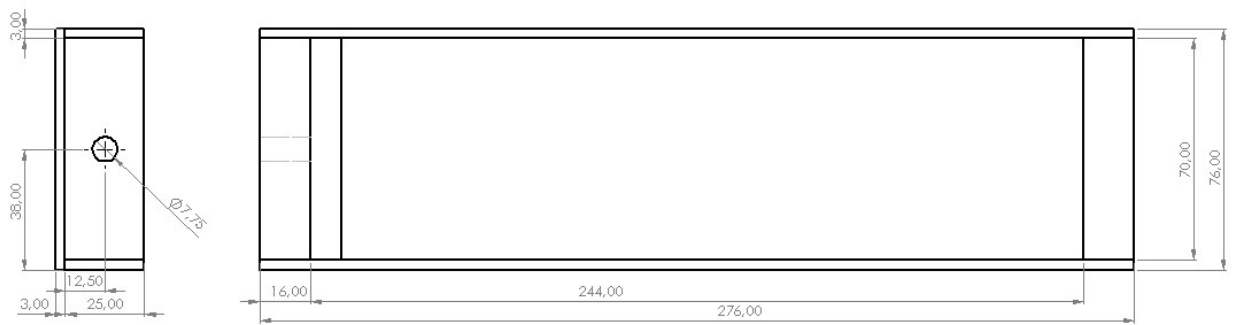


Figura A.2. Caixa utilizada para o ensaio EW63 e EW64.

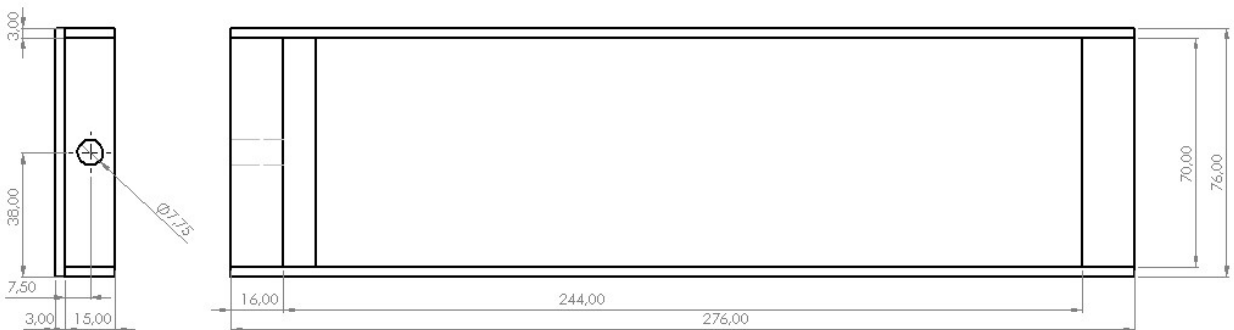


Figura A.3. Caixa utilizada para o ensaio EW65.

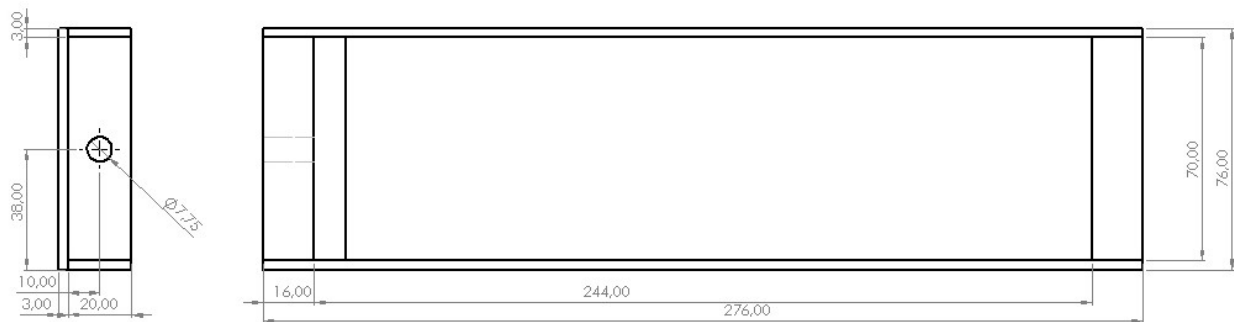


Figura A.4. Caixa utilizada para o ensaio EW66.

APÊNDICE B

Tabela B.1. Ficha técnica do ensaio EW63.



Ficha técnica

Soldadura por explosão: Paralela totalmente sobreposta
 Data: 11/04/2022
 Identificação Soldadura: EW63
 Responsáveis: Ricardo Antônio Lopes Mendes

	Material	Dimensões [mm]			Dist. Entre placas (mm)	Massa [g]	Explosivo				
		Comp.	Largura	Esp.			Tipo	ANFO			
Flyer plate	AZ31	250	70	3	4,5	96,01					
Interlayer							Altura [mm]	25,25			
Base plate	Ti6Al4V	250	70	3		247	Rácio	3,84			
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Volume [mm³]	391324,5			
Tipo	-	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	PBX	Massa [g]	369			
Volume [mm ³]	-	226,4	70	25,25	Volume [mm ³]	10605	Densidade [kg/m ³]	943			
Massa [g]	-	Diam. Agulha [mm]		0,9	Massa [g]	15					
Cilindro padrão		Resistência [Ω]		-	Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6
Densidade [kg/m ³]	-	Díodo		-	Distância entre seringas	19,75	18,95	19,10			
Volume [mm ³]	-	Condensador [nF]		-	Distância (c/ agulhas) [mm]						
Massa [g]	-	Dif. Potencial [V]		-	Tempo s/ agulhas [μs]	---	---	---			
File name:		-			-						

Tabela B.2. Ficha técnica do ensaio EW63.



Ficha técnica

Soldadura por explosão: Paralela totalmente sobreposta

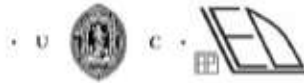
Data: 22/04/2022

Identificação Soldadura: EW64

Responsáveis: Ricardo António Lopes Mendes

	Material	Dimensões [mm]			Dist. Entre placas (mm)	Massa [g]	Explosivo											
		Comp.	Largura	Esp.			Tipo	ANFO										
Flyer plate	Ti6Al4V	250	70	3	4,5	243,5												
Interlayer							Altura [mm]	25,50										
Base plate	AZ31	250	70	3		95,68	Rácio	1,43										
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Volume [mm ³]	395020,5										
Tipo	-	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	PBX	Massa [g]	349										
Volume [mm ³]	-	226,3	70	25,50	Volume [mm ³]	8750	Densidade [kg/m ³]	883										
Massa [g]	-	Diam. Agulha [mm]		0,9		Massa [g]	15											
Cilindro padrão		Resistência [Ω]		-		Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6						
Densidade [kg/m ³]	-	Díodo		-		Distância entre seringas	19,86	19,14	18,56									
Volume [mm ³]	-	Condensador [nF]		-		Distância (c/ agulhas) [mm]												
Massa [g]	-	Dif. Potencial [V]		-		Tempo s/ agulhas [μs]	---	---	---									
File name:																		

Tabela B.3. Ficha técnica do ensaio EW65.



Ficha técnica

Soldadura por explosão: Paralela totalmente sobreposta

Data: 22/04/2022

Identificação Soldadura: EW65

Responsáveis: Ricardo António Lopes Mendes

	Material	Dimensões [mm]			Dist. Entre placas (mm)	Massa [g]	Explosivo						
		Comp.	Largura	Esp.			Tipo	EEx (2% EPS)					
Flyer plate	Al6082 – T6	250	70	3	4,5	147,60	Altura [mm]	15					
Interlayer							Rácio	1,26					
Base plate	AZ31	250	70	3		95,20	Volume [mm ³]	273000					
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Massa [g]	186					
Tipo	-	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	PBX	Densidade [kg/m ³]	683,1					
Volume [mm ³]		260	70	15	Volume [mm ³]								
Massa [g]	-	Diam. Agulha [mm]		0,9		Massa [g]							
Cilindro padrão		Resistência [Ω]		-		Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	
Densidade [kg/m ³]	683	Díodo		-		Distância entre seringas	18,80	19,84	18,84				
Volume [mm ³]	-	Condensador [nF]		-		Distância (c/ agulhas) [mm]							
Massa [g]	25,76	Dif. Potencial [V]		-		Tempo s/ agulhas [µs]	5,696	11,724	---				
File name:		-		-									

Tabela B.4. Ficha técnica do ensaio EW66.



Ficha técnica

Soldadura por explosão: Paralela totalmente sobreposta
 Data: 22/04/2022
 Identificação Soldadura: EW66
 Responsáveis: Ricardo António Lopes Mendes

	Material	Dimensões [mm]			Dist. Entre placas (mm)	Massa [g]	Explosivo							
		Comp.	Largura	Esp.			Tipo	EEx (3%EPS)						
Flyer plate	Cu-DHP	250	70	3	4,5	485								
Interlayer							Altura [mm]	20						
Base plate	AISI 316L	250	70	3		418	Rácio	0,435						
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]			Iniciador		Volume [mm ³]	361440						
Tipo	-	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	PBX	Massa [g]	211						
Volume [mm ³]	-	257	72	20	Volume [mm ³]	8640	Densidade [kg/m ³]	583,8						
Massa [g]	-	Diam. Agulha [mm]		0,9	Massa [g]	10								
Cilindro padrão		Resistência [Ω]	-		Sondas	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6			
Densidade [kg/m ³]	584	Díodo	-		Distância entre seringas	19,48	18,12	20,22						
Volume [mm ³]	-	Condensador [nF]	-		Distância (c/ agulhas) [mm]									
Massa [g]	21,42	Dif. Potencial [V]	-		Tempo s/ agulhas [μs]	6,218	11,833	18,263						
File name:														

APÊNDICE C

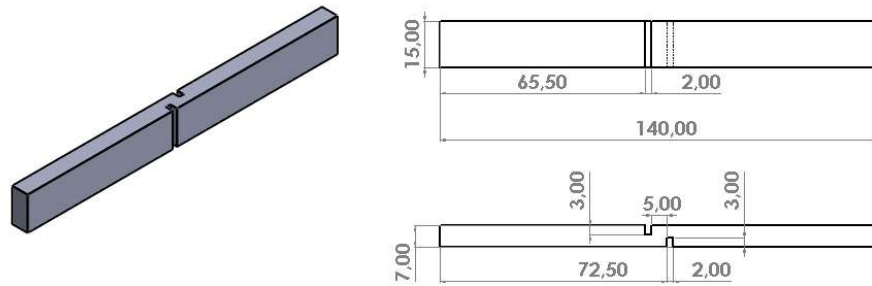


Figura C. 1. Dimensões dos provetes maquinados.



(a)



(b)

Figura C.2. Provette submetido ao ensaio de tração ao corte EW66P1: (a) vista frontal (b) entalhes criados no provete.

APÊNDICE D

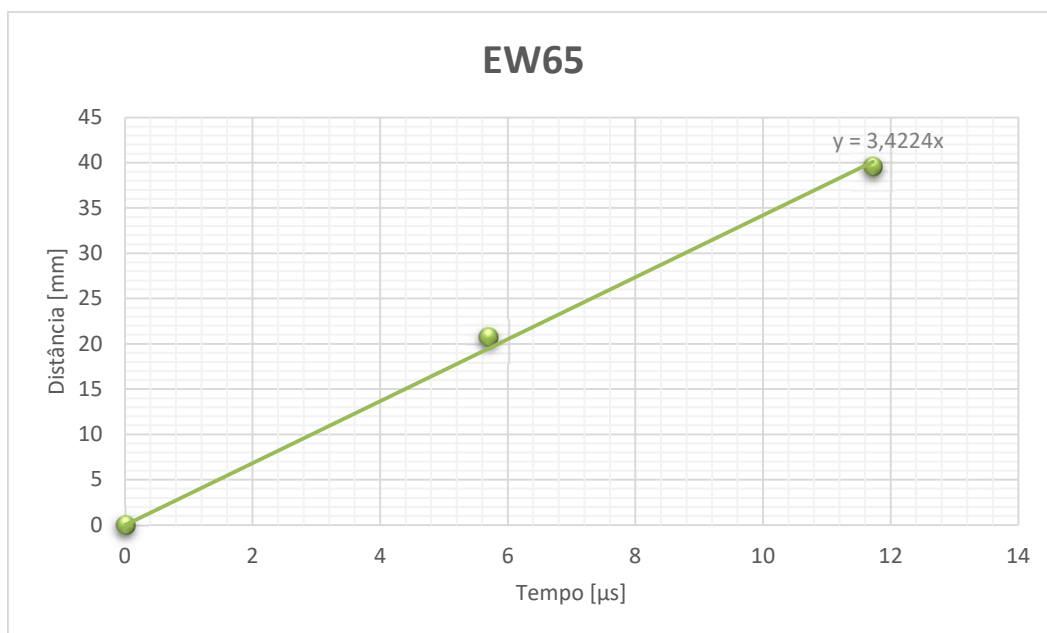


Figura D. 1. Gráfico de medição da velocidade de detonação do ensaio EW65.

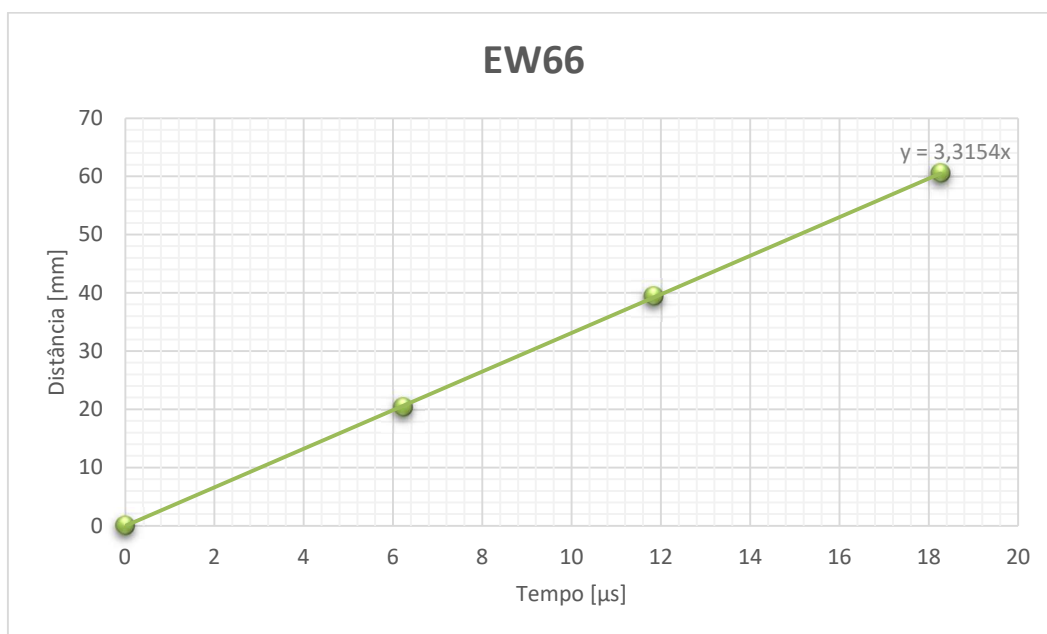


Figura D. 2. Gráfico de medição da velocidade de detonação do ensaio EW66.

APÊNDICE E

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
C	6	1256	29.20	40.27	59.06	6.24	21.37
Mg	12	12665	19.62	27.05	19.61	1.10	5.59
Al	13	10469	23.69	32.67	21.33	1.17	4.95
		Sum	72.51	100.00	100.00		

Tabela E. 1. Composição química do Espetro A

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
C	6	1351	34.43	46.58	64.16	7.21	20.95
O	8	175	2.58	3.50	3.61	1.07	41.23
Mg	12	8550	17.69	23.93	16.29	1.01	5.69
Al	13	6619	19.21	25.99	15.93	0.98	5.10
Cl	17	0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32
		Sum	73.91	100.00	100.00		

Tabela E. 2. Composição química do Espetro B

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
C	6	548	24.31	27.63	43.89	6.61	27.19
O	8	312	5.02	5.71	6.81	1.67	33.15
Na	11	281	0.85	0.96	0.80	0.11	13.41
Mg	12	8510	23.04	26.18	20.55	1.30	5.65
Al	13	9093	34.77	39.52	27.95	1.72	4.95
		Sum	87.99	100.00	100.00		

Tabela E. 3. Composição química do Espetro C