



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

António José Rodrigues Oliveira

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES  
METÁLICOS TRIDISSIMILARES PRODUZIDOS  
POR SOLDADURA POR EXPLOSÃO**

**Dissertação no âmbito do mestrado integrado em engenharia mecânica na área de produção e projeto, orientada pelos Professores Doutores Altino de Jesus Roque Loureiro e Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia.**

outubro de 2020



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Caracterização de componentes metálicos tridissimilares produzidos por soldadura por explosão**

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

## **Characterization of tridissimilar components produced by explosive welding**

**Autor**

**António José Rodrigues Oliveira**

**Orientadores**

**Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão**

**Júri**

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

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

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

**Coimbra, outubro, 2020**



*“You can never cross the ocean until you have the courage to lose sight of the  
shore”*

Christopher Columbus



## Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio de muitas pessoas e identidades, mas infelizmente, apenas irei agradecer particularmente a alguns, porque não existe a possibilidade de referir todos os que me apoiaram. A todos os que me apoiaram e que não estão aqui referidos o meu obrigado.

Em concreto eu gostaria de agradecer,

Ao grupo LEDAP, pela disponibilização das infraestruturas, dos materiais e dos equipamentos que foram necessários para a realização das soldaduras

Ao grupo CEMMPRE, pela disponibilização das infraestruturas e equipamentos que foram necessários para a análise das soldaduras

Ao Professor Doutor Altino Loureiro, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e partilha de conhecimentos

Ao Professor Doutor Ivan Galvão, pela orientação e críticas construtivas que forneceu e favoreceram muito este trabalho

Ao professor Doutor Rui Leal, pelo apoio dado na realização dos procedimentos experimentais

Ao professor Doutor Ricardo Mendes, pela ajuda dada na realização das soldaduras

Ao professor Doutor Carlos Leitão, pelo apoio dado na realização dos ensaios de tração ao corte

A todos os colegas e amigos que sempre me ajudaram durante o curso todo, e finalmente, mas não menos importante, à minha família que sempre me motivou a ir à procura de melhores oportunidades na vida.



## Resumo

A ligação entre o alumínio e o aço inoxidável já foi estudada e verificou-se que ocorre a formação de intermetálicos duros e frágeis na interface, o que prejudica a resistência mecânica das soldaduras. Deste modo, a utilização de placas intermédias pode mitigar este problema. O objetivo deste trabalho é estudar as características da ligação entre alumínio, titânio e aço inoxidável produzida por soldadura por explosão. O titânio foi utilizado como placa intermédia entre o alumínio e o aço inoxidável, e este trabalho centra-se mais na análise deste aspeto. Para realização desta análise foram feitas duas séries de soldaduras com diferentes cargas explosivas e com diferentes quantidades de carga explosiva. Uma das séries foi realizada com ANFO, e a outra foi realizada com emulsão explosiva e sensibilizante.

As duas séries de soldaduras foram observadas macroscopicamente e microscopicamente, foram sujeitas a análises de composição química e ainda foram sujeitas a caracterização mecânica. Ambas as séries de soldaduras obtidas eram consistentes, mas foi possível verificar que entre o alumínio e o titânio existiam zonas onde a ligação não ocorreu, e entre o titânio e o aço inoxidável ocorreu a formação de compostos intermetálicos frágeis. A série de soldadura realizada com ANFO foi a mais bem-sucedida, porque, de forma geral, apresentava as melhores características no que diz respeito à resistência mecânica das ligações.

A série de soldadura que foi realizada com ANFO parece ter sido beneficiada pela velocidade de detonação mais baixa, visto que a outra apresentou resultados menos positivos no que diz respeito à resistência mecânica das suas ligações.

**Palavras-chave:** Soldadura por explosão, Janela de soldabilidade, Placa intermédia, Interface de soldadura, Velocidade de detonação, Rácio de explosivo.



## Abstract

The connection between aluminium and stainless steel has already been studied and it has been found that hard and fragile intermetallics are formed at the interface, which impairs the mechanical resistance of the welds. Thus, the use of intermediate plates can mitigate this problem. The objective of the work is to study the characteristics of the aluminium, titanium and stainless steel tridissimilar joints produced by explosion welding. Titanium was used as interlayer between aluminium and stainless steel, and this work was especially focused on the analyses of this aspect. To perform this analysis, two weld series were made with different explosive charges and with different amounts of explosive charge. One of the weld series was made with ANFO, and the other was made with explosive emulsion and sensitizer.

The two weld series were observed macroscopically and microscopically. The analysis of the chemical composition and the mechanical characterization of the welds were also made. Both weld series were found to be consistent, but it was possible to observe that there were areas where the connection did not happen, and brittle intermediate compounds were formed between titanium and stainless steel. The weld series performed with ANFO was the most well succeeded, because, generally, it had the best characteristics concerning to mechanical strength of the joints.

The weld series that was carried out with ANFO seems to have benefited from the lower detonation speed, since the other one presented fewer positive mechanical behaviour results.

**Keywords** Explosive welding, Weldability window, Interlayer, Welding interface, Detonation speed, Explosive ratio.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiv
1. Introdução.....	1
2. Estado de arte.....	3
2.1. Contexto Histórico .....	3
2.2. Aplicações.....	3
2.3. Princípios da soldadura por explosão .....	4
2.3.1. Etapas do processo .....	4
2.3.2. Parâmetros do processo .....	4
2.3.3. Tipos de interface .....	9
2.3.4. Utilização de placa intermédia .....	10
2.3.1. Requisitos para a qualidade da soldadura por explosão .....	11
2.3.2. Intermetálicos .....	11
2.4. Vantagens e desvantagens da utilização deste processo .....	12
2.5. Fenómenos na interface .....	13
2.5.1. Mecanismos de formação do jato .....	13
2.5.2. Mecanismos de Formação de onda.....	13
2.5.3. Janela de soldabilidade .....	16
2.6. Ligações heterogéneas .....	19
2.6.1. Ligação aço inoxidável-alumínio .....	19
2.6.2. Ligação aço inoxidável-titânio .....	20
2.6.3. Ligação alumínio-titânio.....	21
2.6.4. Observações gerais das ligações entre aço inoxidável, titânio e alumínio ....	22
2.6.5. Investigações a serem feitas nas ligações entre aço inoxidável e alumínio...	23
3. Procedimento experimental .....	25
3.1. Ligas metálicas utilizadas .....	25
3.2. Produção das soldaduras .....	25
3.3. Ensaios experimentais.....	27
3.3.1. Caracterização macro e microestrutural .....	27
3.3.2. Caracterização mecânica .....	28
4. Apresentação e discussão de resultados .....	31
4.1. Parâmetros de soldadura .....	31
4.2. Análise macroscópica .....	34
4.3. Análise microscópica .....	35
4.4. Caracterização da composição química .....	40
4.5. Análise da Microdureza .....	43
4.6. Análise mecânica .....	47
5. Conclusão .....	51

5.1. Propostas de trabalhos futuros .....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
APÊNDICE A .....	59
APÊNDICE B .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Reservatório fabricado em aço ao carbono com revestimento interior em aço inoxidável [3] .....	4
Figura 2.2. Representação das velocidades e ângulo de colisão associados à soldadura por explosão [7] .....	5
Figura 2.3. Configurações a) paralela e b) oblíqua [6] .....	9
Figura 2.4. Configuração cilíndrica com os sistemas a) implosivo, b) explosivo e c) implosivo/explosivo [5] .....	9
Figura 2.5. Mecanismo de indentação (adaptado de [21]) .....	15
Figura 2.6. Limites da janela de soldabilidade (adaptado de [1]) .....	18
Figura 3.1. Localização das indentações referentes aos perfis de dureza registados na secção longitudinal das soldaduras .....	29
Figura 4.1. Enquadramento das soldaduras AF e EE na janela de soldabilidade da ligação do Al6082-t6 com o Ti6Al4V .....	34
Figura 4.2. Enquadramento das soldaduras AF e EE na janela de soldabilidade da ligação do Ti6Al4V com o AISI304 .....	34
Figura 4.3. Placas soldadas na soldadura AF .....	35
Figura 4.4. Placas soldadas na soldadura EE .....	35
Figura 4.5. Microscopia ótica de cortes longitudinais à direção de soldadura das soldaduras AF e EE .....	37
Figura 4.6. Micrografias SEM das interfaces das soldaduras AF e EE .....	38
Figura 4.7. IMP calculado para diferentes ligações [31] .....	40
Figura 4.8. Micrografias SEM dos intermetálicos das interfaces das soldaduras AF e EE .....	42
Figura 4.9. Diagrama de fases entre titânio e ferro [45] .....	43
Figura 4.10. Diagrama de fases entre titânio e alumínio [46] .....	43
Figura 4.11. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra AF L .....	45
Figura 4.12. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra AF T .....	46
Figura 4.13. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra EE L .....	46
Figura 4.14. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra EE T .....	47
Figura 4.15. Mapa de deformação e rotura do provete 2 da soldadura AF .....	48
Figura 4.16. Gráfico da evolução da força em função do alongamento dos provetes da soldadura AF .....	48
Figura 4.17. Observação SEM das superfícies de rotura do ensaio de tração ao corte do provete 2 da soldadura AF .....	49

Figura 4.18. Micrografias SEM das superfícies de rotura do ensaio de tração ao corte do  
proвете 2 da soldadura AF ..... 49

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades de diferentes explosivos (adaptado de [6]) .....	6
Tabela 3.1. Propriedades das ligas metálicas utilizadas .....	25
Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura .....	27
Tabela 4.1. Medições dos tempos de detonação e valores médios das $V_d$ .....	31
Tabela 4.2. Velocidades de impacto nas soldaduras AF e EE.....	32
Tabela 4.3. Ângulos de colisão das soldaduras AF e EE .....	32
Tabela 4.4. Dimensões obtidas nas micrografias óticas .....	37
Tabela 4.5- Valor do WIF nas interfaces entre alumínio e titânio e entre titânio e aço inoxidável .....	39
Tabela 4.6. Percentagens atômicas obtidas nos diversos espectros .....	42
Tabela 4.7. Durezas médias dos materiais nas amostras das soldaduras e dos materiais base .....	44
Tabela 4.8. Variação das durezas dos materiais com a soldadura.....	44
Tabela 4.9. Percentagens atômicas obtidas nos espectros da análise EDS da superfície de rotura .....	49



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$C_0$  – Velocidade do som no material

$C_{b\ base}$  – Velocidade do som no material da placa base

$C_{b\ voadora}$  – Velocidade do som no material da placa voadora

$C_p$  – Calor específico a pressão constante para um material

$E_0$  – Calor de explosão

$E_K$  – Energia de Gurney

$\sqrt{2E_K}$  – Velocidade característica de Gurney

$h$  – Espessura da placa voadora

HV – Dureza Vickers do material (o número que eventualmente acompanha, significa a carga de indentação em kg)

$HV_F$  – Dureza Vickers da placa voadora

$HV_P$  – Dureza Vickers da placa base

$K_1$  – Constante da equação de Deribas e Zakharenko

$m_{intermédia}$  – Massa da placa intermédia

$m_{voadora}$  – Massa da placa voadora

N – Constante da equação do limite superior de Wittman

R – Rácio de explosivo

$Re_{ct}$  – Reynolds crítico

$T_M$  – Temperatura de fusão do material

$T_{M\ base}$  – Temperatura de fusão do material da placa base

$T_{M\ voadora}$  – Temperatura de fusão do material da placa voadora

$V_c$  – Velocidade do ponto de colisão

$V_{c, tr}$  – Velocidade do ponto de colisão, de transição para a interface plana a ondulada

$V_d$  – Velocidade de detonação

$V_p$  – Velocidade de impacto

$V_{P\ voadora}$  – Velocidade da placa voadora

$V_{P\ voadora+intermédia}$  – Velocidade da placa voadora com a placa intermédia

$Z_{Base}$  – Impedância do material da placa base

$Z_{ratio}$  – Rácio de impedâncias

$Z_{voadora}$  – Impedância da placa voadora

$\beta$  – Ângulo de colisão

$\rho_{voadora}$  – Densidade do material da placa voadora

$\rho_{base}$  – Densidade do material da placa base

## Siglas

ANFO – Sigla para designar um explosivo, à base de uma mistura de nitrato de amónia (AN) e óleo combustível (FO)

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEMMPRE – Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e processos

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EDS – *Energy Dispersion Spectrometry*

EE – Emulsão Explosiva

EPS – *Expanded Polystyrene*

IMP – *Impedance Mismatch Parameter*

IPN – Instituto Pedro Nunes

LEDAP– Laboratório de Energia e Detónica (Condeixa-A-Nova)

MDF – Medium Density Fiberboard material de média densidade, derivado de madeira, utilizado neste trabalho como material para a construção da cofragem do explosivo.

SEM – *Scanning Electron Microscopy*

STD – *Stand-off Distance*

WIF – *Wave Interface Factor*

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldadura por explosão tem sido foco de investigação do Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos (CEMMPRE), do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). A soldadura por explosão é usada para a ligação de materiais com diferentes propriedades físicas, químicas e mecânicas. Esta soldadura é vantajosa, porque permite a conciliação das vantagens de diferentes materiais, como por exemplo, a baixa densidade do alumínio com a resistência mecânica e a resistência à corrosão do aço inoxidável. Este tipo de combinações tem um grande interesse para aplicações industriais como a construção naval e a produção de reservatórios para a indústria química. A soldadura por explosão é conhecida por permitir a ligação entre materiais que não podem ser ligados através de outras técnicas, e por ser capaz de soldar grandes áreas superficiais, devido à distribuição de grandes densidades de energia através da explosão.

A soldadura por explosão permite ligar dois materiais diferentes, mas também permite ligar três materiais, onde o terceiro material é utilizado como placa intermédia, com o objetivo de fortalecer a ligação entre os materiais principais da ligação. A utilização do titânio como placa intermédia na ligação entre o alumínio e o aço inoxidável será analisada, de forma a descobrir se a sua utilização é viável, visto que se trata de um material dispendioso. Através desta ligação torna-se possível conciliar a baixa densidade e elevada resistência específica do alumínio com a elevada resistência mecânica e à corrosão do aço inoxidável.

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos, a introdução, o estado de arte, o procedimento experimental, a análise e discussão dos resultados e por fim a conclusão. No estado de arte são apresentados todos os conceitos teóricos necessários para a compreensão do processo da soldadura por explosão e para a análise dos seus resultados. Também serão referidos resultados obtidos em outros trabalhos que abordaram a soldadura por explosão com os materiais utilizados neste estudo. O procedimento experimental explica o modo como a soldadura e as suas análises foram realizadas, e ainda refere os equipamentos que foram utilizados nestes procedimentos. A análise e discussão dos resultados apresenta as observações feitas nas diferentes análises realizadas, comparando-as e justificando-as com

observações de outros trabalhos. Finalmente, a conclusão faz uma síntese de tudo o que se observou e se percebeu na análise de resultados e indica propostas de trabalhos futuros.

## 2. ESTADO DE ARTE

A soldadura por explosão já é um processo que é estudado há algum tempo, e como tal, é necessária uma contextualização para se saber o que é que já se fez nesta área em termos de indústria e de investigação científica. Neste capítulo, será feita uma abordagem dos conhecimentos já adquiridos sobre este processo.

### 2.1. Contexto Histórico

A maior parte dos processos de soldadura, principalmente os que recorrem ao arco elétrico, foram desenvolvidos no final do século XIX, mas a origem da soldadura por explosão localiza-se no século XX durante a primeira guerra mundial. Neste cenário, as explosões produziam estilhaços e os soldados reparavam que estes ficavam colados nas superfícies metálicas em que embatiam. Em 1944 L. R. Carl fez os primeiros experimentos com este processo e nos anos 50 outros investigadores continuaram o desenvolvimento [1].

Philipchuk V. e Franklin L. Bois [2] foram os primeiros a perceber a utilidade comercial da soldadura por explosão e foram os primeiros a criar uma patente deste processo em 1962. Arnold Holtzman e uma equipa da DuPont já utilizavam a soldadura por explosão para fazerem ligações metálicas em Delaware. A DuPont já tinha uma vasta experiência na produção de explosivos, o que facilitou o desenvolvimento deste processo neste grupo [3]. Em 1962 Holtzman [4] também registou uma patente nos Estados Unidos e em 1964 esta foi concedida. A produção comercial de revestimentos bimetálicos começou na DuPont em 1965 [3].

### 2.2. Aplicações

A aplicação industrial mais importante deste processo de soldadura é o revestimento de chapas de aço com uma grande variedade de metais e ligas resistentes à corrosão. Como este processo é capaz de unir metais diferentes, as aplicações mais competitivas envolvem as combinações como aço/titânio, aço/tântalo e aço/alumínio. A Figura 2.1 mostra um recipiente de aço ao carbono que possui um revestimento interior em aço inoxidável. Este reservatório destinava-se a ser utilizado na indústria química e o revestimento foi obtido através da soldadura por explosão [5]. Existem muitas mais

aplicações, tais como juntas de transição, uniões remotas de peças metálicas em ambientes perigosos, construção naval e indústria criogénica [6][7].

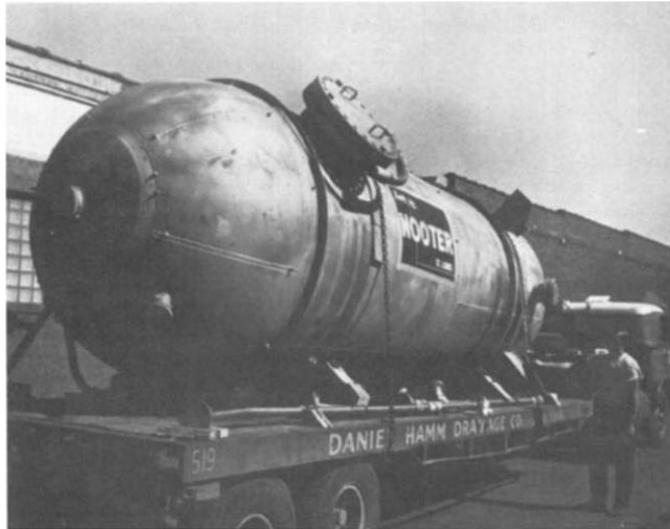


Figura 2.1. Reservatório fabricado em aço ao carbono com revestimento interior em aço inoxidável [5]

## 2.3. Princípios da soldadura por explosão

Neste subcapítulo vão ser abordados alguns conceitos teóricos e aspetos práticos que são necessários para a compreensão do processo de produção das soldaduras e para a análise que irá ser feita das observações realizadas nas soldaduras.

### 2.3.1. Etapas do processo

Considerando um caso geral de colisão de duas placas planas, o processo pode ser dividido em três etapas básicas, a detonação da carga explosiva, a deformação e aceleração da placa ou componente voador e a colisão entre os componentes que se pretendem soldar [8].

### 2.3.2. Parâmetros do processo

Os fatores que influenciam as condições finais na zona de colisão e o modo como a energia é dissipada são a  $V_p$  (velocidade de impacto), a  $V_c$  (velocidade do ponto de colisão) e  $\beta$  (o ângulo de colisão dinâmico). A magnitude destes fatores pode ser variada manipulando os parâmetros do processo que irão ser abordados mais à frente. Os fatores mencionados podem ser calculados considerando a transferência de momento da carga explosiva para a placa voadora, a continuidade do fluxo através da região de colisão em coordenadas transformadas e a dinâmica da deformação da placa [8]. A Figura 2.2 mostra o enquadramento de  $V_c$ ,  $V_p$ ,  $\beta$  e  $V_d$  (velocidade de detonação) numa soldadura por explosão.

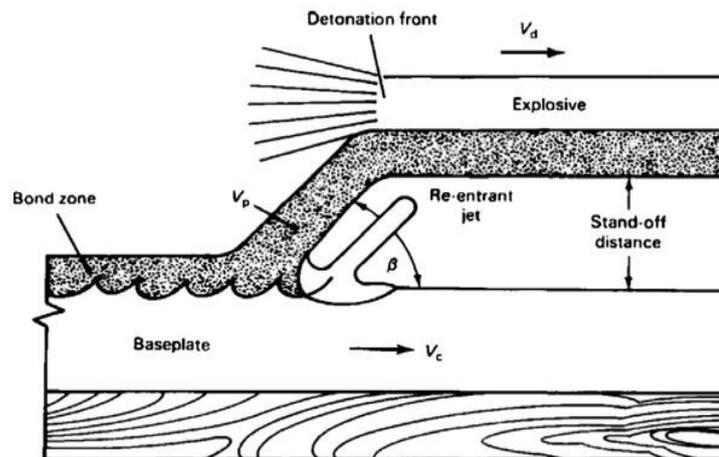


Figura 2.2. Representação das velocidades e ângulo de colisão associados à soldadura por explosão [9]

Para a detonação a uma dimensão, Gurney desenvolveu a equação (2.1) para calcular a velocidade de impacto em função da energia cinética da explosão e do rácio de explosivo [7].

$$V_p = \sqrt{(2E_k)} \left( \frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1),  $\sqrt{2E_k}$  é a velocidade característica de Gurney e  $R$  é o rácio de explosivo. Adicionalmente, Cooper P. W. [10] desenvolveu a equação (2.2) que se trata duma correlação empírica que relaciona  $\sqrt{2E_k}$  com a  $V_d$  para explosivos ideais [11].

$$\sqrt{2E_k} = \frac{V_d}{2,97} \quad (2.2)$$

El-Sobky [8] constatou que várias propriedades como o calor da detonação e a velocidade característica de Gurney dependem da mistura explosiva, por isso, deve-se comparar apenas soldaduras com bases explosivas similares [12]. A contribuição da detonação da carga explosiva fornece a energia requerida para a deformação e a aceleração da placa voadora através da distância inicial entre as placas definida como STD (*stand of distance*) [8].

Um dos principais requisitos de um explosivo na soldadura por explosão é fornecer uma velocidade de detonação apropriada, que segundo T.Z.Blazynski [7] pode estar entre 1,5 km/s e 3,5 km/s, mas I.A. Bataev *et al.* [13] descreveu um experimento realizado com velocidades de detonação acima dos 4 km/s, e que obteve soldaduras consistentes. Outras características desejáveis são que ele possa ser facilmente espalhado em uma camada

uniforme, que seja suficientemente sensível à detonação para se propagar na espessura mínima exigida e preferencialmente que não seja tóxico. Os tipos de explosivos mais utilizados são à base de nitroglicerina, gasóleo e nitrato de amónio. Estes explosivos são usados na forma de grão ou pó para permitir fácil espalhamento numa camada uniforme. É essencial evitar qualquer ar preso na carga explosiva, caso contrário as superfícies das placas ficam danificadas. Cada combinação de metais tem a sua velocidade de detonação ótima. Velocidades de detonação controladas com precisão requerem adaptação dos explosivos alterando a sua composição e a sua espessura. As cargas explosivas são preparadas com base no peso e a compactação da carga explosiva deve ser uniforme [7]. Na Tabela 2.1 são apresentados alguns explosivos e respetivas propriedades.

**Tabela 2.1. Propriedades de diferentes explosivos (adaptado de [8])**

Explosivo	Calor de explosão $E_0$ (cal/g)	Energia de Gurney $E_k$ (cal/g)	Velocidade de detonação (m/s)	Densidade do Explosivo ( $\text{g/cm}^3$ )	Velocidade característica de Gurney $\sqrt{2E_k}$ (m/s)
<i>Detasheet 'D'</i>	870	870	7200	1,40	2700
<i>Pentolite</i> (fundida)	1220	1220	7470	1,66	3170
<i>Pentolite</i> (pó)	1220	900	5150	0,95	2730
TNT (fundida)	1160	1160	6700	1,56	3100
TNT (pó)	1160	800	4800	1,0	2580
<i>Nitrostarch dynamite</i> (70%)	1050	430	3300	1,0	1810
<i>AN dynamite</i> (80%)	800	240	3200	1,25	1400
AN-8% Al	1100	205	2300	1,05	1300
AN-6% óleo combustível	890	310	2540	0,82	1600
<i>Trimonite</i> No. 1	1260	185	3000	1,1	1240

Muitos explosivos possuem uma detonação muito intensa e existe a necessidade de sensibilizar a explosão. Na soldadura por explosão pode existir essa necessidade ou não, dependendo do explosivo que se está a usar. Os sensibilizantes são, no fundo, microesferas feitas de polímero ou de vidro. Com o aumento da concentração de sensibilizantes, reduz-se a velocidade da detonação numa relação linear [14]. A carga explosiva a ser aplicada é indicada pelo valor do rácio de explosivo, onde se compara a massa da placa voadora com a massa da carga explosiva. A velocidade de impacto vai variar com a variação do rácio do explosivo, ou seja, quanto maior for o rácio de explosivo, maior vai ser a velocidade de impacto. O rácio de explosivo pode ser calculado através da equação (2.3) [8].

$$R = \frac{\text{massa da carga explosiva}}{\text{massa da placa voadora}} = \frac{m_c}{m_p} \quad (2.3)$$

A distância inicial entre as placas que se pretendem soldar denomina-se “stand-off distance” (STD). Esta distância é definida em relação à espessura da placa voadora, e geralmente o valor ideal é próximo de uma vez e meia essa espessura. Apesar de não existir um método simples que permita obter este valor com exatidão, ele está relacionado com as propriedades de detonação do explosivo e com as características físicas do metal. Existem dois motivos para deixar esta distância entre as placas. Em primeiro, o afastamento fornece a distância necessária para que a placa acelere até à velocidade de impacto necessária para que se forme o jato e para que ocorra uma ligação sem impurezas. O segundo aspeto importante no afastamento entre as placas, é o fornecimento de uma saída para o jato livre e o ar existente entre as placas. A maior parte da energia cinética da placa voadora é convertida em energia associada ao jato [5]. O efeito da STD na soldadura foi estudado em [15], e verificou-se que a interface era plana para STD’s maiores, e ondulada para STD’s mais baixas. O comprimento de onda, a amplitude das ondas e a dureza da ligação na interface também aumentam com o aumento desta distância. Neste caso, a STD variou entre meia espessura da placa voadora e três vezes essa mesma espessura [15].

A configuração geométrica é importante de ser referida, e está relacionada com a forma como as placas são montadas. Existem três configurações possíveis, paralela, oblíqua e cilíndrica [8]. Na Figura 2.3 estão representadas duas configurações, a e b. A configuração a é paralela e a b é oblíqua. Na configuração paralela e oblíqua, a placa voadora e a placa base são planas. As chapas com mais de 3 mm de espessura podem ser soldadas com estas configurações para grandes áreas, mas para espessuras a baixo deste patamar, as áreas de soldadura são limitadas [7]. A configuração cilíndrica está representada na Figura 2.4.

Na configuração paralela, a STD é constante e a velocidade do ponto de colisão é igual à velocidade de detonação. A velocidade de impacto da placa voadora pode ser calculada através da equação (2.4)

$$V_p = 2V_d \sin \frac{\beta}{2} \quad (2.4)$$

Nesta configuração a placa voadora irá ter uma velocidade de impacto constante ao longo de todo o comprimento da soldadura. Por esta razão, esta configuração é preferível para grandes áreas de soldadura, pois permite uma maior uniformidade das propriedades ao longo de toda a interface [7].

Na configuração oblíqua, a STD é variável ao longo da soldadura. Esta configuração pode ser usada com sucesso em casos especiais com STD's reduzidas, mas para grandes afastamentos entre as placas, ocorre a distorção excessiva da placa voadora e isso pode levar à não ocorrência de soldadura em algumas zonas da interface [7].

A configuração cilíndrica tem limitações dimensionais. Um revestimento de borracha é usado para separar o explosivo do cilindro voador, e é usado um molde externo. À medida que a detonação frontal avança na superfície cilíndrica do tubo voador, uma onda de pressão é transmitida através da parede do tubo voador, e esta transmissão cria alta temperatura e pressão no material. Existem três sistemas de explosão nas configurações cilíndricas, existe o sistema explosivo, o implosivo e o implosivo/explosivo. Por outras palavras, no sistema explosivo, a carga explosiva impulsiona o tubo voador de dentro para fora, no implosivo, de fora para dentro, e no explosivo/implosivo existem duas cargas explosivas uma no interior dos tubos e outra no seu exterior que impulsionam os tubos um contra o outro, de dentro para fora e de fora para dentro ao mesmo tempo. Estes três sistemas estão representados na Figura 2.4, em que a) é o sistema explosivo, b) é o sistema implosivo e c) é o sistema implosivo/explosivo [7].

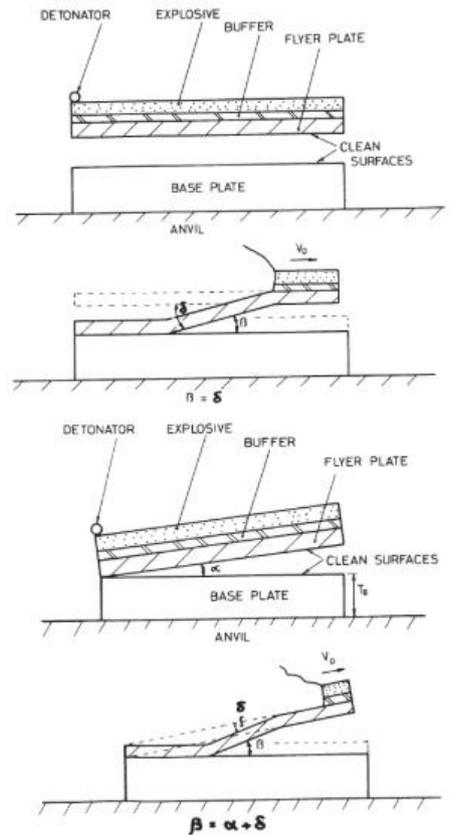


Figura 2.3. Configurações a) paralela e b) oblíqua [8]

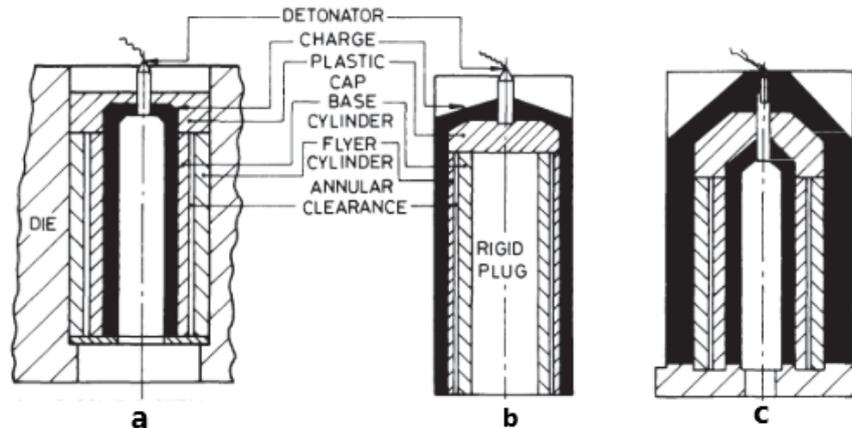


Figura 2.4. Configuração cilíndrica com os sistemas a) implosivo, b) explosivo e c) implosivo/explosivo [5]

### 2.3.3. Tipos de interface

As interfaces nas ligações soldadas que existem são a plana, a que tem camada de material fundido e a ondulada. A interface ondulada é preferível às interfaces plana e com camada de material fundido [1]. De acordo com Hoseini-Athar e Tolaminejad [16], as interfaces onduladas são preferíveis, porque na maior parte dos casos apresentam melhores propriedades mecânicas [12]. A morfologia ondulada está associada a uma maior área de contacto entre as duas placas, e quanto maior for a área duma ligação, maior será a sua

resistência, desde que não existam muitos intermetálicos na interface. Esta morfologia também melhora a resistência da ligação através do travamento mecânico entre as placas [16]. A interpenetração é benéfica na ligação entre os metais para pequenas distâncias interatômicas. Para componentes dissimilares, a extrusão do material mais macio no material mais duro é mais fácil que a extrusão do material mais duro no material mais macio [16]. O rácio de explosivo afeta a velocidade de impacto, e esta, por sua vez, afeta a quantidade de deformação plástica que ocorre na interface. Aumentando o rácio de explosivo, a velocidade de impacto e a deformação plástica aumentam. Esta deformação dos metais na interface produz as desejadas interfaces onduladas. As ondas, os vórtices e/ou as zonas fundidas frequentemente formadas não estão relacionadas apenas com a pressão de soldadura e com os mecanismos de fusão. A deformação do grão e a formação de onda na interface sugere que o mecanismo de soldadura também tem que estar associado a um processo de fluxo, onde o metal se comporta como um fluido [8]. A formação de jato na região de colisão demonstra este comportamento temporário.

#### **2.3.4. Utilização de placa intermédia**

O problema da utilização de velocidades de impacto elevadas nas soldaduras dissimilares é a possibilidade de obter fusão excessiva que impeça a soldadura. Carvalho *et al.* [17] mostraram que este problema ainda é mais crítico quando a placa voadora é de alumínio. Neste experimento foram feitas três soldaduras, uma entre duas placas de cobre DHP e duas entre alumínio AA6082-T6 e cobre DHP. Todas as placas de alumínio e cobre tinham espessura de 3mm. Nas micrografias realizadas verificou-se que ocorreu a formação de uma camada contínua de material fundido na interface da soldadura entre alumínio e cobre, que tinha como carga explosiva uma mistura emulsiva (EE). A elevada energia libertada pelo explosivo e o baixo ponto de fusão do alumínio provocaram uma fusão contínua na interface. Este fenómeno é desfavorável à resistência da ligação [17]. Para evitar este tipo de situações, é necessário reduzir a energia cinética associada à deslocação da placa voadora. A introdução de uma placa intermédia pode ajudar na resolução deste problema. A energia cinética vai reduzindo à medida que as placas vão colidindo, e a massa acelerada vai aumentando. A cada colisão, a velocidade de deslocação das placas diminui, e como tal, a energia cinética associada também [8]. Por vezes uma junção de diferentes materiais pode ter a tendência de formar intermetálicos indesejados na interface, como é o caso da ligação entre o alumínio e o aço inoxidável. A placa intermédia também permite a redução da

formação de intermetálicos entre dois materiais diferentes através da introdução de um material intermédio na ligação entre eles. Carvalho *et al.* [18] realizaram uma soldadura entre aço ao carbono e alumínio, e foi possível observar que esta tem a tendência de formar intermetálicos. Este é um bom exemplo de uma combinação que poderia beneficiar com a utilização de uma placa intermédia de um material compatível com os materiais primários da ligação. Geralmente, quando se pretende ligar três placas usa-se apenas uma explosão, e esta provoca o impacto da placa voadora com a placa intermédia, e posteriormente o impacto da placa voadora unida à placa intermédia com a placa base. Os revestimentos criogénicos e outros casos especiais não são produzidos com apenas uma explosão, mas sim com duas, onde a placa intermédia e a placa voadora são impulsionadas em explosões diferentes. Nesta situação, são necessárias duas cargas explosivas, uma para ligar a placa intermédia à placa base e outra para ligar a placa voadora à placa intermédia. A montagem das placas antes de serem soldadas nos casos com mais de duas placas requer mais atenção na medição das STD's entre as placas, principalmente se uma das placas for fina e se a tolerância dimensional da espessura das placas depois de soldadas for pequena [7].

### **2.3.1. Requisitos para a qualidade da soldadura por explosão**

Os requisitos mais importantes são a ocorrência de jato na interface e a diminuição da pressão associada à dissipação da energia cinética até um nível mínimo, num espaço de tempo suficiente para se obter ligações interatómicas, e para que estas alcancem estabilidade. Neste caso, a pressão é determinada pela velocidade de impacto, onde o tempo disponível está ligado à velocidade do ponto de colisão [8].

### **2.3.2. Intermetálicos**

O excesso de energia cinética na placa voadora pode levar a grandes velocidades de impacto entre a placa voadora e a placa base, e este excesso provoca fusão na interface. Esta fusão pode provocar a ligação entre elementos atómicos das duas placas e consequentemente a formação de novos compostos duros, frágeis e que facilitam a propagação de fissuras. Estes compostos são designados de intermetálicos. A quantidade de intermetálicos, e a forma como se distribuem nas interfaces das soldaduras são fatores imprescindíveis na avaliação da qualidade das ligações, principalmente em situações que envolvem combinações de metais com maior probabilidade de formação dos mesmos, como referido na secção 2.3.4. Na soldadura por explosão, a quantidade de intermetálicos e a forma

como se distribuem não é suficiente para definir a qualidade e resistência da ligação soldada. É essencial perceber como é que os intermetálicos interagem com as tensões internas presentes na interface, pois a combinação de tensões internas com compostos duros e frágeis pode provocar a formação de fissuras. A formação de intermetálicos também indica que ocorreu interação metalúrgica entre os dois materiais, algo essencial para uma boa ligação, por isso, a total ausência de intermetálicos pode indicar falta de interação entre os materiais e energia insuficiente para que ocorresse uma boa soldadura. Em suma, o que se deve analisar numa soldadura por explosão entre materiais dissimilares é como é que os intermetálicos estão inseridos na ligação em termos de quantidade, distribuição e composição. É necessário alcançar uma interação metalúrgica apropriada, evitando camadas contínuas de intermetálicos e obtendo distribuições interfaciais que acomodem deformação e tensão, evitando que estas fiquem aplicadas diretamente nos intermetálicos [11].

## **2.4. Vantagens e desvantagens da utilização deste processo**

A soldadura por explosão possui um conjunto de vantagens em relação a outros processos mais convencionais que utilizam a fusão na ligação dos materiais, e uma das mais importantes é a inexistência de limitações sérias por causa de diferenças nas propriedades físicas dos metais que estão a ser ligados como o ponto de fusão. Na soldadura por fusão os dois metais têm de se fundir, e como tal, os pontos de fusão dos dois materiais têm de ser idênticos. A soldadura por explosão utiliza a deformação plástica como meio principal de ligação, e por isso, a necessidade de proximidade dos pontos de fusão deixa de ser importante [7]. Para além disso, a soldadura por explosão permite a ligação de grandes áreas superficiais, e as propriedades mecânicas e corrosivas não são alteradas [8]. Na maioria das combinações soldadas, as ligações possuem uma resistência mecânica na união que iguala ou excede a resistência do metal original mais fraco [5]. Relativamente às desvantagens, os materiais soldados através deste processo precisam de ter ductilidade suficiente (10%) e tenacidade à fratura (30J), para que estes se consigam deformar rapidamente sem que ocorra fratura [1]. Os metais e ligas com pontos de fusão e resistências mecânicas elevados não se deformam plasticamente com facilidade. Esta característica é desvantajosa na soldadura por explosão [8]. A necessidade de utilizar explosivos também pode ser vista como uma desvantagem, porque impõe limitações do ponto de vista dos regulamentos de segurança, e como tal, a realização deste tipo de soldaduras só pode ser feito por pessoas qualificadas e com as condições de segurança necessárias [7].

## 2.5. Fenómenos na interface

Diferentes mecanismos foram sugeridos para explicar o processo da soldadura por explosão. Este processo já foi considerado um processo de fusão. Neste caso, a dissipação da energia cinética na interface causava a fusão e a difusão entre as camadas fundidas. Atualmente, é mais comum considerar a soldadura por explosão um processo de difusão no estado sólido e uma operação de soldadura de pressão que depende da deformação plástica na interface. Nesta abordagem, deve existir um nível de pressão alto durante um período suficiente de tempo para que a ligação ocorra com sucesso [19].

### 2.5.1. Mecanismos de formação do jato

O jato é o agente responsável pela limpeza das superfícies. Esta limpeza possibilita aos materiais que se liguem em distâncias atômicas quando sujeitos a ondas de pressão produzidas a partir da explosão. Como a pressão durante a colisão pode alcançar valores da ordem de  $10^2$  Mbar, a resistência dos metais envolvida é claramente muito inferior e como tal, os metais podem ser tratados nesta situação como fluidos [5].

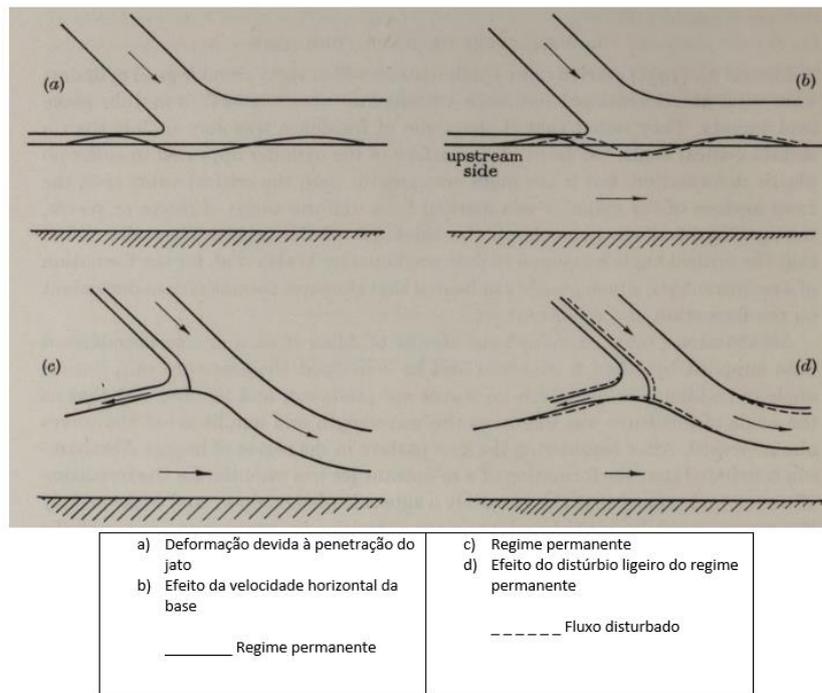
Cowan e Holtzman [20][21], entre outros, mostraram que o jato ocorre em colisão oblíqua entre as placas na ausência de ondas de choque oblíquo relacionadas com a propagação do ponto de colisão. Este critério tem sido aceite como condição limitante da formação de jato [8]. Durante a colisão oblíqua, o jato do metal é formado e uma parte desse jato é forçada a ir para fora da zona que se localiza entre as placas em colisão a alta velocidade. No ponto de colisão, as superfícies metálicas virgens são forçadas a entrar em contacto através da alta pressão da explosão, efetuando-se assim a ligação metalúrgica através da interface. A porção do jato que se mantém na zona entre as placas forma redemoinhos na ligação entre as faces. Em suma, na soldadura por explosão, o jato decompõe-se e limpa as camadas de sujidade, e isso permite que ligações interatómicas possam ser estabelecidas. A porção do jato que fica entre as placas denomina-se jato preso e a parte que sai para o exterior denomina-se jato livre [5].

### 2.5.2. Mecanismos de Formação de onda

Vários mecanismos foram sugeridos para a formação de ondas, mas numa análise final, todos eles são maioritariamente de natureza qualitativa, e como tal, não fornecem uma base sólida para tratamento analítico. Existem uma variedade de tipos de onda, mas cada mecanismo proposto apenas é capaz de descrever um tipo de onda.

Conseqüentemente, existe a necessidade de uma observação mais detalhada através da mecânica dos fluidos na zona de colisão para se poder fazer uma análise mais geral e abrangente de todos os tipos de onda que se podem formar na interface [8].

O primeiro mecanismo a ser referido vai ser o mecanismo de indentação. As principais suposições deste mecanismo são a existência de um jato que pode alterar a superfície da placa base, e que este se divide em duas correntes no momento de impacto. O ângulo de colisão tem uma forte influência neste mecanismo. Se o ângulo de colisão for zero ou menos que um certo ângulo crítico, a superfície plana frontal não aparenta sofrer deformação plástica, mas se o ângulo for maior que o valor crítico, então a superfície frontal fica marcada com séries uniformes de ondas. O espaçamento de cada onda depende da espessura do alvo. O ângulo de colisão crítico depende da formação do jato de reentrada. Para além disso, Abrahamson [22] concluiu a partir da observação do padrão das ondas, que a formação do jato de reentrada é fundamental para a formação das ondas. O jato tende a penetrar a superfície da placa fixa, formando uma depressão na zona de impacto. O movimento da superfície da placa base faz com que o jato tenda a mover o lado jusante da depressão, e como resultado, o jato penetra continuamente material a jusante da depressão. Como consequência da mudança da forma da superfície sobre o jato, parte do mesmo é desviado para a corrente saliente. O regime permanente é estabelecido momentaneamente, para o qual a penetração do jato é apenas capaz de contrariar o efeito do movimento do material base. Após surgir uma perturbação, como a diminuição momentânea da velocidade do jato, então a penetração diminui, o que faz com que o ponto mais alto se desloque para jusante. Isto, por sua vez, causa a mudança da visão do jato devido à alteração da inclinação da superfície sob o jato, fazendo com que o fluxo saliente se torne menor e o fluxo reentrante maior, de tal modo que o regime permanente não pode ser restabelecido e uma onda é efetivamente produzida [23]. Este mecanismo está representado na Figura 2.5.



**Figura 2.5. Mecanismo de indentação (adaptado de [23])**

O mecanismo de instabilidade foi outra teoria desenvolvida à semelhança do mecanismo de indentação. Enquanto o mecanismo de indentação indica que as ondas são formadas essencialmente dentro da zona de colisão, o mecanismo de instabilidade sugere que estas são criadas à frente ou atrás do ponto de colisão. Isto deve-se à descontinuidade da velocidade na interface envolvente do jato reentrante ou do jato saliente respetivamente. O processo de formação de onda é identificado como uma instabilidade de Helmholtz [8]. A instabilidade de Kelvin-Helmholtz surge entre camadas de fluido que se deslocam em sentidos contrários e com velocidades distintas e é caracterizada pela formação duma camada de vorticidade [24]. A descontinuidade é acentuada e é necessária para a formação de onda. Também é assumido que o jato reentrante deve permanecer em contacto com a placa que lhe deu origem. As taxas de deformação no jato saliente são altas ao ponto de justificar um comportamento semelhante ao de um fluido e que o perfil de velocidade na interface possui um ou dois pontos de inflexão. Estas suposições permitem calcular a superfície da deformação como uma superfície de vorticidade constante [8].

O mecanismo de formação de vórtices foi desenvolvido por Cowan e Hotzman [21], Kowalick e Hay [25][26] e Onzawa e Ishi [27][28]. Eles sugeriram que o ponto de estagnação atua como um obstáculo sólido, se o estado estacionário for estabelecido, e as ondas forem formadas devido a um mecanismo de formação de vórtice, iniciado no ponto de estagnação e crescendo atrás da zona de colisão [8]. A alta energia cinética do jato preso

é convertida em calor. Este aumento de temperatura causa a fusão do metal, mas este aumento é rapidamente extinto pela transmissão do calor ao material circundante. Este fenómeno forma bolsas de material fundido nos redemoinhos. As bolsas fundidas não têm efeitos prejudiciais para a ligação soldada desde que se mantenham pequenas [5].

### 2.5.3. Janela de soldabilidade

A janela de soldabilidade é uma ferramenta desenvolvida com base em experimentos já realizados e as suas formulações são empíricas. A janela de soldabilidade não permite a obtenção de dados exatos, ela permite apenas ter uma noção geral dos valores que a velocidade do ponto de colisão e o ângulo de colisão devem ter para que a soldadura tenha uma maior probabilidade de sucesso. Esta ferramenta dá indicações sobre os parâmetros de soldadura e identifica as dificuldades na combinação das diferentes ligas metálicas [12]. Vários critérios de soldabilidade foram desenvolvidos ao longo do tempo, mas o critério atualmente mais usado e mais bem conhecido é baseado na relação entre a  $V_c$  (velocidade do ponto de colisão) e o  $\beta$  (ângulo de colisão). Na Figura 2.6 está representada a janela de soldabilidade no espaço  $\beta$ - $V_c$ .

Vários autores estudaram diferentes tipos de falha da soldadura por explosão, analisando os diferentes fenómenos que ocorrem na interface. Cownan e Holtzman [21] constataram que boas soldaduras não podem ser obtidas sem a formação de ondas na interface, Walsh [29] indicou as condições para a formação do benéfico jato metálico, Carpenter e Wittman [5] identificaram a excessiva fusão como um problema, Deribas e Zakharenko [30] provaram que se a deformação do material for insuficiente, as soldas não ficam consistentes. Todos estes problemas estão associados aos limites da janela de soldabilidade.

O limite esquerdo está relacionado com a formação de ondas na interface. À esquerda deste limite não ocorre a formação de interfaces onduladas o que prejudica as propriedades da ligação. A equação (2.5) que define o limite esquerdo foi desenvolvida por Cownan *et al* [20].

$$V_{c,tr} = \sqrt{\frac{2Re_{ct}(HV_p + HV_f)}{(\rho_{base} + \rho_{voadora})}} \quad (2.5)$$

Na equação (2.5), a velocidade do ponto de colisão de transição ( $V_{c,tr}$ ) é expressa em função das densidades dos materiais da placa base e voadora ( $\rho_p, \rho_f$ ), das durezas da placa base e voadora ( $HV_p, HV_f$ ), e do número de Reynolds crítico ( $Re_{ct}$ ) que pode tomar valores entre 8.0 e 13.0 para uma soldadura por explosão assimétrica. Kuzmin e Lysak [31] também estudaram este limite, que está relacionado com a velocidade do ponto de colisão de transição ( $V_{c,tr}$ ) e concluíram que esta velocidade varia em função do ângulo de colisão e como tal não deveria ser uma linha vertical como aparece na Figura 2.6. De qualquer modo, para efeitos simplificativos, aplica-se a teoria de Cowan e Holtzman.

O limite de cima é a velocidade máxima de impacto, para que a dissipação da energia cinética não produza uma camada fundida continua dos materiais que estão a ser soldados.[1] As equações (2.6) e (2.7) que definem o limite superior foram desenvolvidas por Carpenter e Wittman [5].

$$V_p = \frac{1}{N} \frac{(T_M C_0)^{1/2}}{V_c} \left( \frac{K C_p C_0}{\rho_{voadora} h} \right)^{1/4} \quad (2.6)$$

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{N} \frac{(T_M C_0)^{1/2}}{2(V_c)^2} \left( \frac{K C_p C_0}{\rho_{voadora} h} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

A equação (2.6) tem todos os parâmetros referentes à placa voadora, onde,  $T_M$  é a temperatura de fusão,  $C_p$  é a capacidade térmica,  $\rho_{voadora}$  é a densidade do material,  $h$  é a espessura e  $C_0$  é a velocidade do som na massa.  $N$  é uma constante que depende do metal que está a ser estudado, mas segundo Rosset [32],  $N$  pode tomar valor de 0,11 para os materiais utilizados neste trabalho. Esta equação apresenta a velocidade do ponto de colisão máxima ( $V_c$ ) para a qual não ocorre a formação de uma camada intermédia de metal fundido. A relação entre esta velocidade e o ângulo de colisão define o limite superior da janela de soldabilidade [5].

O tempo de solidificação das áreas fundidas nas superfícies de ligação entre as duas placas também deve ser analisado para verificar se este é inferior ao tempo de surgimento das tensões de tração associadas ao impacto [12]. Caso estas áreas não solidifiquem antes do surgimento das tensões internas, a ligação pode falhar através do surgimento de fraturas e cavidades na interface, podendo levar até mesmo à separação total das placas.

O limite da direita está ligado à formação do jato no ponto de colisão. O jato metálico limpa a superfície metálica de impurezas que possam existir, e que possam prejudicar a resistência da soldadura. Walsh *et al.* [29] verificou que a velocidade no ponto de colisão deve ser inferior à velocidade do som nos materiais para que ocorra a formação de jato metálico. A velocidade do som nos materiais é uma função fraca do ângulo de colisão  $\beta$ , por isso, em vez de uma linha vertical, o limite direito pode ser definido como uma linha ligeiramente concava para a esquerda.

O limite de baixo relaciona-se com a velocidade de impacto  $V_p$  mínima para a qual a pressão de impacto no ponto de colisão é suficiente para ultrapassar a tensão de cedência dos materiais, promovendo assim a deformação plástica. A equação (2.7) define o limite inferior e foi desenvolvida por Deribas e Zakharenko [30]

$$V_{c,min} = \frac{K_1}{\beta} \sqrt{\frac{HV_f}{\rho_{voadora}}} \quad (2.8)$$

A equação (2.8) apresenta a velocidade de colisão mínima ( $V_{c,min}$ ) em função da dureza do material da placa voadora ( $HV_f$ ), da densidade do material da placa voadora ( $\rho_{voadora}$ ), do ângulo de colisão ( $\beta$ ) e da constante ( $K_1$ ) que pode tomar valores entre 0.6 (para superfícies limpas) e 1.2 (para superfícies mal limpas).



Figura 2.6. Limites da janela de soldabilidade (adaptado de [1])

## 2.6. Ligações heterogéneas

A ligação de diferentes materiais através da soldadura por explosão nem sempre permite obter ligações com boas propriedades mecânicas. Nas ligações entre os metais que vão ser utilizados neste trabalho já existem uma série de pesquisas realizadas, e como tal, será feita uma abordagem sobre aquilo que já se sabe.

### 2.6.1. Ligação aço inoxidável-alumínio

O desafio na soldadura do aço inoxidável ao alumínio deve-se essencialmente à grande diferença das propriedades físicas, que não promove boas soldaduras através de processos convencionais que recorrem ao arco elétrico. Processos de soldadura no estado sólido como a soldadura por explosão são mais adequados para a ligação soldada destes dois materiais. ANFO e emulsão explosiva já foram utilizados como carga explosiva nesta ligação, e já foi observado que o ANFO produz mais irregularidades na interface, o que pode ser considerado uma fase inicial na formação de ondas. Isto deve-se ao facto do ANFO produzir velocidades de detonação mais baixas [11].

O aço inoxidável e o alumínio já foram usados na placa base e na placa voadora em ensaios diferentes. As séries produzidas com a placa voadora de alumínio apresentaram soldaduras com boa qualidade, estando de acordo com a respetiva janela de soldabilidade. Todas as tentativas com a placa voadora de aço inoxidável não apresentaram uma ligação consistente. Em alguns casos ocorreu a formação de uma camada de intermetálicos entre as duas placas na interface, e noutros, as tensões relacionadas com a colisão surgiram antes da conclusão da solidificação das zonas fundidas [12]. A soldadura por explosão do aço inoxidável com o alumínio só pode ser conseguida posicionando o aço inoxidável na base, mas mesmo assim, a microscopia eletrónica de varrimento revelou uma camada contínua de intermetálicos na interface de soldaduras feitas com placa voadora de alumínio. A utilização de placa intermédia de alumínio nestas ligações também foi analisada. Ensaios de tração indicaram que a utilização de placa intermédia teve um efeito positivo nas soldaduras. Estas placas intermédias provocam uma perda de parte da energia cinética associada ao movimento da placa voadora, e como tal, a fusão na interface diminui. A utilização de uma velocidade de impacto elevada conciliada com a ausência de placa intermédia leva a uma fusão excessiva e impede uma boa ligação [11]. Carvalho *et al.* [33] também utilizaram placas intermédias de nióbio e de aço ao carbono na ligação entre o alumínio e o aço inoxidável. As variações dos materiais utilizados na placa intermédia influenciam a forma

das ondas na interface e a composição dos intermetálicos. A utilização do aço ao carbono como placa intermédia favoreceu a formação de ondas e promoveu melhores propriedades mecânicas na soldadura, mas os intermetálicos resultantes da utilização de nióbio não eram tão duros como os que se formaram com o aço ao carbono, e conseqüentemente, a formação de fissuras foi menor. Claramente, a utilização de placa intermédia pode favorecer a ligação entre o alumínio e o aço inoxidável, se o material intermediário assim o permitir [33].

Jatinder Kaur, *et al.* [34] conseguiram ser bem-sucedidos na ligação entre o aliga de alumínio AA1100 com o aço inoxidável SS304. Houve a formação de ondas na interface sem espaços vazios ou fissuras. Os materiais endureceram principalmente nas zonas próximas à interface e a difusão entre os dois materiais foi muito reduzida. Não existiam áreas desconectadas na interface, a não ser a área do início da detonação correspondente às cargas que facilitam o começo da detonação [34].

### **2.6.2. Ligação aço inoxidável-titânio**

Esta ligação já foi estudada por vários autores como N. Kahraman, *et al.* [35] e P. Manikandan, *et al.* [36]. N. Kahraman, *et al.* [35] usaram ELBAR 5 (92% Nitrato de amônia, 5% mínimo de óleo combustível e 3% mínimo de TNT) como carga explosiva em vez de ANFO ou emulsão explosiva. Neste procedimento foi utilizada uma configuração inicial oblíqua. A análise dos resultados revelou os seguintes aspetos: a resistência mecânica era maior nas soldaduras que nos materiais originais, os grãos ficaram alongados na direção da explosão, todas as amostras resistiram bem à flexão, não ocorreu a formação de bolsas de metal fundido nem de intermetálicos, e a reduzida corrosão destes metais depois de soldados não impedia a sua utilização segura em ambientes corrosivos. Os valores de dureza máxima foram obtidos perto da interface soldada e os mais baixos foram obtidos no centro de ambos os metais e a dureza das placas soldadas era maior que a dos materiais originais [35].

A influência do rácio da carga explosiva foi avaliada neste tipo de ligações. Para um rácio de 0.5, a soldadura não ocorreu. A morfologia ondulada na interface começou a ocorrer para um rácio de explosivo de 1.2, e a morfologia ondulada com vórtices surgiu apenas para rácios de 2 e 3. A melhor soldadura aconteceu para um rácio de 1.5. As cargas explosivas mais elevadas provocaram a formação de intermetálicos na interface, e nas cargas explosivas mais baixas, a formação de intermetálicos foi reduzida, mas a baixa energia de impacto não limpou completamente os óxidos das superfícies antes delas se ligarem. Para

além disso as ondas formadas não eram simétricas devido à diferença de densidades entre o titânio e o aço inoxidável [37].

P. Manikandan, *et al.* [36] estudaram o efeito duma placa intermédia neste tipo de ligações. Nesse experimento foram feitas várias soldaduras, uma sem placa intermédia e as restantes com uma. A espessura das placas voadoras foram 1mm e 5mm e a das placas intermédias foram 0,3mm, 0,5mm e 1mm. Na soldadura sem placa intermédia foram observados vórtices onde o jato metálico ficou preso entre as placas. A elevada energia cinética provocou a fusão do metal. Estes vórtices estão associados a problemas como a existência de cavidades provocadas pelo arrefecimento e diminuição volúmica do material fundido e a formação de intermetálicos. As placas voadoras com maior espessura provocaram mais facilmente a formação de intermetálicos. A energia cinética perdida na interface da placa intermédia e da base resultou na redução do volume de material fundido. A utilização de placa intermédia reduz a formação dos intermetálicos e permite a formação de ondas melhorando assim a resistência mecânica das ligações soldadas [36]. A morfologia da interface nesta combinação de metais pode ser ondulada e possuir vórtices com a formação de intermetálicos como FeTi e Fe<sub>2</sub>Ti. A dureza dos materiais depois da soldadura realizada costuma ser maior perto da interface [38].

### **2.6.3. Ligação alumínio-titânio**

Esta ligação já foi testada e analisada em vários experimentos como o que está descrito em [39]. Neste experimento foi usada uma placa voadora de titânio, a configuração inicial foi paralela e o explosivo usado foi uma emulsão explosiva. Nas observações feitas foi possível observar que os seguintes aspetos: a morfologia da ligação da interface era ondulada, a difusão foi reduzida, não ocorreu a formação de intermetálicos, o grão tinha uma orientação aleatória perto da interface devido à deformação plástica, existia o surgimento de fraturas no titânio devido ao seu endurecimento e os ensaios de tração mostraram que esta ligação têm propriedades mecânicas aceitáveis [39].

D. M. Fronczek *et al.* [40] também analisaram esta ligação. Neste experimento foi usada uma configuração paralela na montagem e ANFO como carga explosiva. A morfologia ondulada foi obtida em toda a área investigada da interface. Esta morfologia foi obtida entre a placa com o ponto de fusão mais alto e uma inclusão intermetálica que se formou na ligação. A formação de vórtices ocorreu em toda a área observada e a formação da camada intermédia começou apenas por ser nós únicos, localizados nos declives das

ondas, que após um recozimento, desenvolveram-se para uma camada contínua, formada maioritariamente por  $TiAl_3$ . Não ocorreu deformação plástica significativa, nem no alumínio, nem no titânio.[40]

A utilização de placa intermédia nesta ligação foi estudada por R. Chulist *et al.* [41]. Neste caso, foi utilizada uma placa voadora de alumínio, uma placa intermédia de titânio e uma placa base de alumínio. Depois da explosão, a soldadura não apresentou descontinuidades, poros e impurezas, o que significa que houve a formação dum jato de ar antecedente à soldadura que limpou as superfícies. Esta limpeza permitiu uma melhor ligação entre os materiais. A soldadura por explosão mudou a textura inicial e a microestrutura do titânio. Os grãos do titânio ficaram alongados todos na direção da detonação e a microestrutura sofreu *twining* ou uma deformação ondulada na microestrutura perto da interface. Os grãos do alumínio também ficaram alongados na direção da detonação. No titânio, o *twining* concentrou-se mais na parte superior da placa. A grande transformação da textura do grão nestas regiões também indica uma deformação intensa [41]. Henryk Paul *et al.* [42] também analisaram a microestrutura e as propriedades mecânicas desta ligação. Nesta situação foram utilizadas placas intercaladas de alumínio e titânio com 1mm de espessura e foi utilizada uma STD constante de 1mm. Foram aplicadas 3 velocidades de detonação diferentes e todas elas produziram ligações livres de macro defeitos, vazios, fissuras e delaminações. Zonas fundidas, deformação e recristalização ocorreram perto das interfaces. A deformação que ocorreu nas proximidades das interfaces era caracterizada essencialmente por uma grande densidade de deslocações na microestrutura o que contribuiu para o endurecimento dos metais nestas zonas [42].

#### **2.6.4. Observações gerais das ligações entre aço inoxidável, titânio e alumínio**

A formação de intermetálicos é um problema constante na ligação entre ligas metálicas diferentes, mas H. bo Xia *et al.* [39] indicaram que na ligação do titânio e do alumínio, a baixa solubilidade não permite a formação muito acentuada de intermetálicos. Por outro lado, grandes energias de explosão provocam elevada fusão na interface e esta por sua vez, pode levar à formação de uma camada contínua de intermetálicos. A fusão acentuada também causa a formação de vórtices e estes originam a formação de intermetálicos e de cavidades. A fusão na interface deve ser reduzida, mas isso também significa uma solidificação mais rápida. A solidificação não deve ser demasiado rápida para não provocar a formação de microestruturas com tamanhos de grão pequeno e a respetiva

fragilização dos materiais. As grandes diferenças das propriedades físicas entre o aço inoxidável e o alumínio, como a densidade e o ponto de fusão, dificultam a produção de morfologias onduladas nas interfaces, no entanto, para velocidades de detonação suficientemente elevadas, verificou-se a formação de irregularidades na interface, o que pode ser visto como uma fase inicial de formação de onda. Jatinder Kaur, *et al* [34], mostraram que é possível realizar ligações soldadas entre o alumínio e o aço inoxidável com a formação de ondas na interface. Geralmente, as ondas formadas nas interfaces não são simétricas por causa da diferença das densidades entre os diferentes metais. A deformação plástica na microestrutura deixa os grãos alongados na direção da velocidade de detonação e endurece os materiais nas proximidades das interfaces e das superfícies que sofreram impactos. O grão pequeno e a deformação plástica, para além de provocarem o endurecimento dos materiais na presença de deslocamentos nos grãos, também podem criar fraturas. As fraturas também podem aparecer se a deformação plástica surgir antes da solidificação total das zonas fundidas e se as áreas fundidas forem grandes. O titânio pode ter uma orientação aleatória perto da interface devido à deformação plástica e ao deslocamento dos grãos, ou podem ficar alongados na direção da detonação, caso a deformação plástica não seja muito acentuada, e para além disso, a sua microestrutura pode sofrer *twining* nas zonas próximas das superfícies de impacto.

#### **2.6.5. Investigações a serem feitas nas ligações entre aço inoxidável e alumínio**

A utilização de três materiais diferentes numa só soldadura é incomum. A maior parte das investigações realizadas estudaram apenas as propriedades mecânicas da ligação entre apenas dois materiais. A ligação de aço inoxidável com alumínio é difícil de ser realizada devido à grande diferença das suas propriedades físicas. A utilização de placas intermédias pode ser interessante, não só para absorverem parte da energia da explosão e diminuírem a velocidade de impacto, mas também para se conseguirem obter combinações entre o aço inoxidável, o alumínio e um terceiro material que permitam uma ligação com boas propriedades mecânicas. Neste trabalho, o titânio é avaliado no sentido de se saber se permite uma ligação com boas propriedades mecânicas entre o aço inoxidável e o alumínio. Outros materiais devem ser testados como placa intermédia até existirem soluções viáveis neste tipo de ligações.



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No procedimento experimental estão explicados os procedimentos realizados, desde da produção das soldaduras até à sua análise. Os materiais base e os equipamentos utilizados também são referidos.

#### 3.1. Ligas metálicas utilizadas

As ligas utilizadas neste trabalho são muito utilizadas industrialmente, e como tal, existe interesse em estudar o seu comportamento na soldadura por explosão. A liga de alumínio utilizada foi a AA6082-T6, a de titânio foi a Ti6Al4V e o aço inoxidável utilizado foi o AISI304. As propriedades destes materiais estão presentes na Tabela 3.1. Os valores das durezas foram obtidos experimentalmente.

**Tabela 3.1. Propriedades das ligas metálicas utilizadas**

<b>Propriedades Físicas</b>	<b>Al6082-T6</b>	<b>Ti6Al4V</b>	<b>AISI304</b>
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2700 [43]	4420 [43]	7930 [43]
Condutividade térmica [W/m.K]	193 [43]	5,8 [43]	16,3 [43]
Calor específico [J/kg.K]	897 [12]	610 [43]	502 [43]
Temperatura de fusão [°C]	660 [44]	1660 [45]	1400 [33]
<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Al6082-T6</b>	<b>Ti6Al4V</b>	<b>AISI304</b>
Tensão de cedência [MPa]	285 [43]	1110 [43]	216 [43]
Tensão de rotura [MPa]	315 [43]	1160 [43]	571 [43]
Dureza [HV <sub>0,2</sub> ]	114	376	143

#### 3.2. Produção das soldaduras

Neste trabalho procedeu-se à produção de duas soldaduras tridissimilares alumínio-titânio-aço inoxidável. Todos os componentes necessários na montagem foram previamente preparados no DEM. As placas foram cortadas com 250mm×70mm e as

superfícies foram lixadas com uma lixa P320 para remover os óxidos presentes nas superfícies. A cofragem da carga explosiva foi feita em *Medium Density Fiberboard* (MDF) com as dimensões representadas no APÊNDICE A. As velocidades de detonação foram obtidas através da medição do tempo que a detonação demorava a percorrer numa distância previamente definida. A medição dos tempos de detonação foi feita com uns sensores que foram feitos manualmente com fios de cobre e tubos de aço inoxidável com 1mm de diâmetro externo. Introduziram-se dois fios de cobre dentro do tubo, garantindo que estes não faziam curto-circuito. Os sensores foram colados num suporte com furos que se encontra representado no APÊNDICE A. Estes furos serviram precisamente para colocar os tubos espaçados nas distâncias previamente definidas. Os sensores foram introduzidos no explosivo com as suas pontas a aproximadamente 10 mm da superfície superior. A detonação do explosivo fez com que os fios se ligassem na ponta dos tubos e apresentassem curto-circuito. As terminações dos fios de cobre na parte superior dos sensores foram ligadas a um osciloscópio digital LECROY WAVEJET 352, que mediu os intervalos de tempo entre os curto-circuitos de cada sensor. Este equipamento encontra-se no laboratório de energia e detónica, associação de apoio (LEDAP), Condeixa.

Foram utilizadas três placas em cada soldadura, uma placa voadora de alumínio com 3 mm, uma placa intermédia de titânio com 1 mm e uma placa base de aço inoxidável com 3 mm. A placa voadora de alumínio foi usada como base da cofragem e esteve diretamente em contacto com a carga explosiva. As placas foram colocadas umas sobre as outras, com as devidas STD's. Estas distâncias eram iguais a uma vez e meia a espessura da respetiva placa voadora, e foram asseguradas através da introdução de espaçadores entre as placas. A montagem foi feita sobre uma base de aço colocada sobre areia. A STD entre a placa base e a placa intermédia foi de 1,5mm e a STD entre a placa intermédia e a placa voadora foi de 4,5mm. Os explosivos utilizados foram ANFO e emulsão explosiva com 2% de EPS. O EPS é poliestireno e têm a função de reduzir a velocidade de detonação. Na zona onde se dá o início da detonação, foi utilizada uma carga iniciadora para facilitar a ignição da carga explosiva. Os valores dos parâmetros de soldadura estão presentes na Tabela 3.2. A montagem foi feita no LEDAP, situado em Condeixa, Coimbra e nestas instalações existe uma câmara de explosões, onde as soldaduras foram realizadas em segurança.

Neste trabalho foi criada uma nomenclatura com o objetivo de identificar as cargas explosivas utilizadas e o tipo de amostra que foi tirada. No que diz respeito à carga explosiva, AF significa que a soldadura foi feita com ANFO e EE significa que a soldadura

foi feita com emulsão explosiva. Quanto ao tipo de amostra, o T significa que a amostra apresenta um corte transversal à direção de soldadura e o L significa que a amostra apresenta um corte longitudinal à direção de soldadura, por exemplo, a amostra AF L foi tirada da soldadura feita com ANFO e é um corte longitudinal à direção de soldadura.

**Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura**

<b>Soldadura</b>	<b>AF</b>	<b>EE</b>
Espessura da carga explosiva [mm]	30,0	20,0
Densidade da carga explosiva [kg/m <sup>3</sup> ]	796,6	587,0
Rácio da carga explosiva	3,1	1,3
Placa voadora [g]	144,2	143,3
Placa intermédia [g]	80,3	81,7
Placa base [g]	414,0	417,0

### 3.3. Ensaios experimentais

As soldaduras foram sujeitas a ensaios experimentais para se fazerem observações e análises que as caracterizassem. Foram feitos ensaios experimentais que permitiram a caracterização macro e microestrutural e a caracterização mecânica das soldaduras.

#### 3.3.1. Caracterização macro e microestrutural

As placas, depois de soldadas, foram cortadas com o auxílio de uma serra elétrica e foram tiradas amostras do centro das placas na zona do início da detonação. Essas amostras foram polidas com várias lixas de diferentes granulometrias, começando nas de granulometria maior e acabando nas de granulometria mais pequena. As lixas usadas foram as P180, P320, P600, P1000 e P2500. No final, foi utilizado um pano com as suspensões de diamante de 3µm e de 1µm para dar um polimento final. Posteriormente procedeu-se ao ataque químico para revelar a microestrutura, fazendo-se um para cada metal da amostra. No ataque químico ao alumínio, a amostra esteve dentro da solução durante 30 segundos e a solução era constituída por 4 g de KMnO<sub>4</sub> (permanganato de potássio), 1 g de NaOH (hidróxido de sódio) e 100 ml de H<sub>2</sub>O (água destilada). Para o aço inoxidável, foi feito um

ataque eletrolítico e a amostra esteve imersa na solução química composta por 10 g de  $H_2CO_4$  (ácido oxálico) e 100 ml de  $H_2O$  (água destilada) durante 60 segundos com uma corrente elétrica contínua de 1 ampere e uma tensão de 6 volts. No titânio não foi encontrado um ataque químico que revelasse bem a microestrutura.

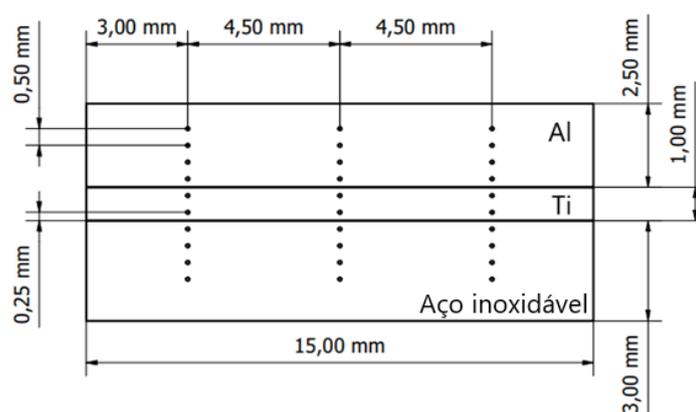
As amostras, depois de atacadas, foram observadas por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varrimento (SEM) e foram analisadas em espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). A microscopia ótica foi feita na interface e nos materiais base e as análises SEM e EDS foram feitas na interface. A microscopia ótica foi feita com um microscópio ótico LEICA DM400 M LED, câmara fotográfica incorporada LEICA MC 120 HD e um software LAS (Leica Application Suite). Este equipamento encontra-se no laboratório do grupo de tecnologia do CEMMPRE. As análises SEM e EDS foram feitas com um microscópio eletrônico de varrimento ZEISS-GEMINI 2 e o software de análise EDS da OXFORD *instruments*. Este equipamento encontra-se no IPN (Instituto Pedro Nunes).

### **3.3.2. Caracterização mecânica**

A caracterização mecânica foi feita através da medição de microdurezas, da análise do comportamento das soldaduras em ensaios de tração/corte e da análise da superfície de fratura resultante desses ensaios de tração. As medições das microdurezas nas amostras foram feitas na secção longitudinal, ao longo da sua espessura, em três linhas distintas, uma na esquerda, uma no centro e outra na direita. Foram feitas medições distanciadas 0,5 mm umas das outras em cada linha. Avaliou-se também a dureza nos materiais base e em regiões específicas da interface das chapas. As amostras AF L e EE L foram sujeitas a medições de microdureza conforme foi descrito anteriormente e essas medições permitiram a construção de perfis de dureza ao longo da espessura dessas amostras. As medições das microdurezas nos materiais base foram feitas em amostras de alumínio, de titânio e de aço inoxidável e as medições de microdureza localizadas em algumas regiões da interface foram feitas também nas amostras AF L e EE L. As análises de microdureza feitas ao longo da espessura das amostras e nos materiais base foram feitas com uma carga de 0,2 kg e com um período de permanência do indentador de 15 segundos e as análises nas interfaces das amostras foram feitas com uma carga de 0,025 kg e um tempo de permanência do indentador de 15 segundos. As posições das indentações relativas às amostras AFL e EEL estão representadas na Figura 3.1. Para efeitos de simplificação na

análise de resultados, designou-se a linha de indentações da esquerda a linha 1, a do centro a linha 2 e a da direita a linha 3. As medições das microdurezas Vickers foram feitas com um microdurómetro SHIMADZU HMV-G e o seu software de análise incorporado. Este equipamento, à semelhança do microscópio ótico, encontra-se no laboratório do grupo de tecnologia do CEMMPRE.

Os provetes para os ensaios de tração/corte foram cortados com o auxílio de uma serra elétrica, e posteriormente, foram maquinados para aplanar as faces laterais e para fazer entalhes que permitissem a solicitação da interface das soldaduras. Foram retirados 3 provetes longitudinalmente à direção de soldadura em cada placa. Os provetes cortados na placa proveniente da soldadura EE começaram a separar-se na interface entre o alumínio e o titânio durante o corte, pelo que, não foram realizados ensaios de tração desses provetes. As medidas finais dos provetes tirados da soldadura AF estão apresentadas no APÊNDICE B. Depois de cortados, os provetes foram pintados com tinta branca e foram pulverizados com tinta preta. Os padrões das gotículas de tinta preta dispersas no fundo branco nas superfícies dos provetes permitiram a construção de mapas de deformação dos provetes. Os ensaios de tração ao corte foram feitos numa máquina de tração SHIMADZU AGS-X e os mapas de deformação foram obtidos através do equipamento ARAMIS *optical 3D deformation & strain measurement system*. O ensaio foi realizado com uma velocidade de 1 mm/minuto. Os provetes, depois de tracionados, apresentaram uma superfície de fratura, que foi sujeita às análises SEM e EDS no microscópio eletrónico de varrimento ZEISS-GEMINI 2, que já foi referido na secção 3.3.1.



**Figura 3.1. Localização das indentações referentes aos perfis de dureza registados na secção longitudinal das soldaduras**



## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A apresentação e discussão de resultados indica toda as observações que foram feitas nas diferentes análises realizadas, interligação entre elas e possíveis motivos que levaram à sua ocorrência. Os possíveis motivos da sua ocorrência foram fundamentados pela análise de outros trabalhos.

### 4.1. Parâmetros de soldadura

As distâncias entre cada sonda foram medidas antes de se realizarem as soldaduras e durante a detonação do explosivo o osciloscópio referido na secção 3.2 forneceu os valores de tempo que a detonação demorou a percorrer entre as sondas. Essas distâncias e tempos estão presentes na Tabela 4.1 e permitiram calcular as velocidades médias de detonação para cada soldadura. Estas velocidades são as médias das velocidades de detonação obtidas em cada sonda. Na soldadura AF, a velocidade de detonação foi mais baixa por causa da carga explosiva utilizada. Carvalho *et al.* [11] indicou que o ANFO produz velocidades de detonação mais baixas quando comparado com a emulsão explosiva.

**Tabela 4.1. Medições dos tempos de detonação e valores médios das  $V_d$**

	AF		EE	
	Posição da sonda[mm]	Tempo[ $\mu$ s]	Posição da sonda[mm]	Tempo[ $\mu$ s]
<b>Sonda 1</b>	0	0	0	0
<b>Sonda 2</b>	15,55	6,692	14,84	4,609
<b>Sonda 3</b>	31,18	14,061	29,96	9,394
<b>Sonda 4</b>	52,03	23,896	50,18	15,748
<b><math>V_d</math> [m/s]</b>	2240		3198	

As velocidades de impacto foram calculadas através das equações (2.1), (2.2), (2.3) e (4.1). Os valores das propriedades dos materiais usados nas soldaduras e que são necessárias nas equações (2.1), (2.2) e (2.3) estão presentes na Tabela 3.1 da secção 3.1 e os valores das massas necessárias na equação (4.1) estão presentes na Tabela 3.2.

A Tabela 4.2 indica as velocidades de impacto que ocorreram entre a placa voadora e a placa intermédia e entre a placa intermédia e a placa base nas duas soldaduras. Os valores presentes na Tabela 4.2 foram calculados utilizando as equações (2.1), (2.2) e (2.3) da secção 2.3.2. Para além disso foi utilizada a equação (4.1) para calcular a velocidade

de projeção da placa voadora com a placa intermédia. A equação (4.1) foi utilizada por Carvalho *et al.* [11], que apesar de ser fácil de se utilizar, trata-se de um método aproximado que considera a colisão perfeitamente inelástica e a conservação de momento [11].

$$V_{P \text{ voadora+intermédia}} = \frac{m_{\text{voadora}} \times V_{P \text{ voadora}}}{m_{\text{voadora}} + m_{\text{intermédia}}} \quad (4.1)$$

$V_{P \text{ voadora+intermédia}}$  é a velocidade da placa voadora com a placa intermédia,  $V_{P \text{ voadora}}$  é a velocidade de impacto da placa voadora,  $m_{\text{voadora}}$  é a massa da placa voadora e  $m_{\text{intermédia}}$  é a massa da placa intermédia.

Ao contrário das velocidades de detonação, as velocidades de impacto são mais elevadas na soldadura AF, porque apesar do ANFO produzir velocidades de detonação mais baixas, a soldadura AF foi realizada com um volume, densidade e rácio de explosivo superiores aos da soldadura EE. Apesar da velocidade de impacto ser maior na soldadura AF, a diferença não é muito grande, porque a carga explosiva utilizada na soldadura EE foi emulsão explosiva. Esta carga explosiva produz velocidades de detonação maiores que as produzidas pelo ANFO, e quanto maior for a velocidade de detonação maior será a velocidade de impacto conforme se verifica na equação (2.4).

**Tabela 4.2. Velocidades de impacto nas soldaduras AF e EE**

	AF		EE	
	Placa voadora	Placa voadora + Placa intermédia	Placa voadora	Placa voadora + Placa intermédia
<b>V<sub>p</sub> (m/s)</b>	749,0	481,2	700,5	446,2

O ângulo de colisão é calculado a partir da velocidade de impacto e da velocidade de detonação através da equação (2.4). A Tabela 4.3 indica os ângulos de colisão para cada soldadura no impacto com a placa voadora e no impacto com a placa voadora e a placa intermédia. Segundo a equação (2.4), quanto maior for a velocidade de impacto, maior será o ângulo de colisão, e como as velocidades de impacto são maiores na soldadura AF, então consequentemente os ângulos de colisão também serão maiores.

**Tabela 4.3. Ângulos de colisão das soldaduras AF e EE**

	AF		EE	
	Placa voadora	Placa voadora + <i>Interlayer</i>	Placa voadora	Placa voadora + <i>Interlayer</i>
<b>B (°)</b>	19,3	12,3	12,6	8,0

Neste trabalho as soldaduras realizadas foram feitas com três materiais diferentes, e como tal, cada soldadura possui duas interfaces, uma entre alumínio e titânio e outra entre titânio e aço inoxidável. Para cada interface foi necessária a construção de uma janela de soldabilidade. As janelas foram construídas tendo por base a teoria da secção 2.5.3 e as propriedades dos materiais presentes na Tabela 3.1. Em cada interface só foram consideradas as propriedades dos materiais nela envolvidos, desprezando-se o efeito do terceiro material. A Figura 4.1 e a Figura 4.2 são as janelas de soldabilidade das duas interfaces presentes em ambas as soldaduras. Nas duas janelas de soldabilidade, o limite inferior de Wittman foi construído com uma constante  $N$  igual a 0,11, porque este valor é o que melhor se adequa nas ligações analisadas neste trabalho. Em relação ao limite superior da janela de soldabilidade, o limite inferior que permite a obtenção de uma janela com maior área, é o que tem a constante  $N$  igual a 0,11. A janela de soldabilidade é maior na ligação entre o titânio e o aço inoxidável, porque o intervalo de velocidades do ponto de colisão é maior nesta ligação. Os intervalos dos ângulos de colisão são aproximadamente iguais nas duas ligações. Intervalos de velocidades do ponto de colisão e de ângulos de colisão maiores significam maiores probabilidades de a soldadura ser bem-sucedida. Desta forma, a probabilidade da ligação entre o titânio e o aço inoxidável ser bem-sucedida é maior que a da ligação entre o alumínio e o titânio. O alumínio é o material que mais difere do titânio no que diz respeito às propriedades físicas, como é possível observar na Tabela 3.1, e por isso, já é de esperar que a ligação entre o titânio e o aço inoxidável seja mais bem-sucedida. Os enquadramentos das soldaduras nas janelas de soldabilidades estão representados na Figura 4.1 e Figura 4.2. Nas soldaduras realizadas, só a soldadura EE, na ligação entre o titânio e o aço inoxidável, se encontra dentro da janela de soldabilidade. Na interface entre o alumínio e o titânio, nenhuma das soldaduras deverá ter formação de ondas, mas na interface entre o titânio e o aço inoxidável, a soldadura EE deverá ter formação de ondas.

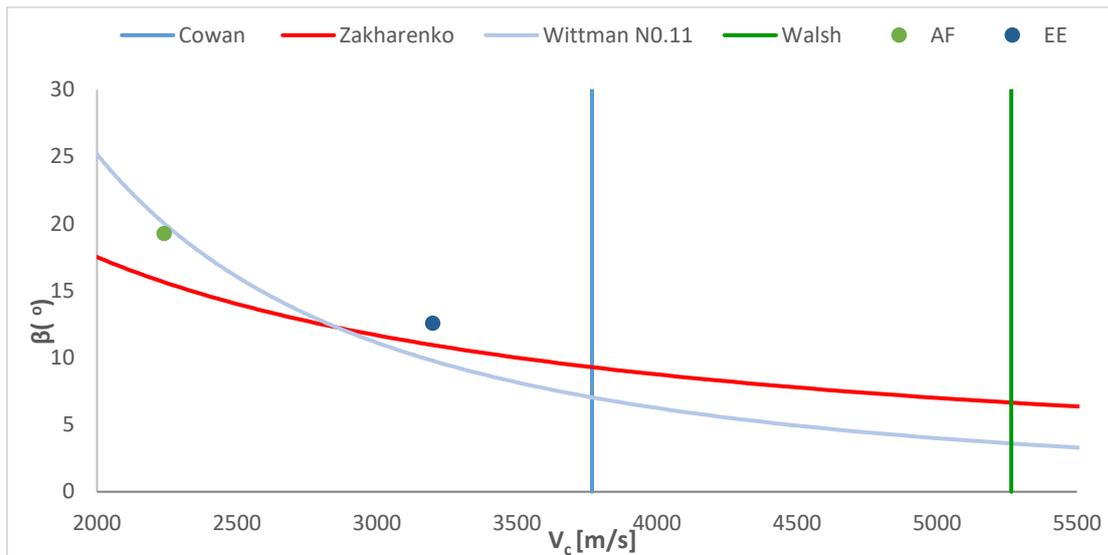


Figura 4.1. Enquadramento das soldaduras AF e EE na janela de soldabilidade da ligação do Al6082-t6 com o Ti6Al4V

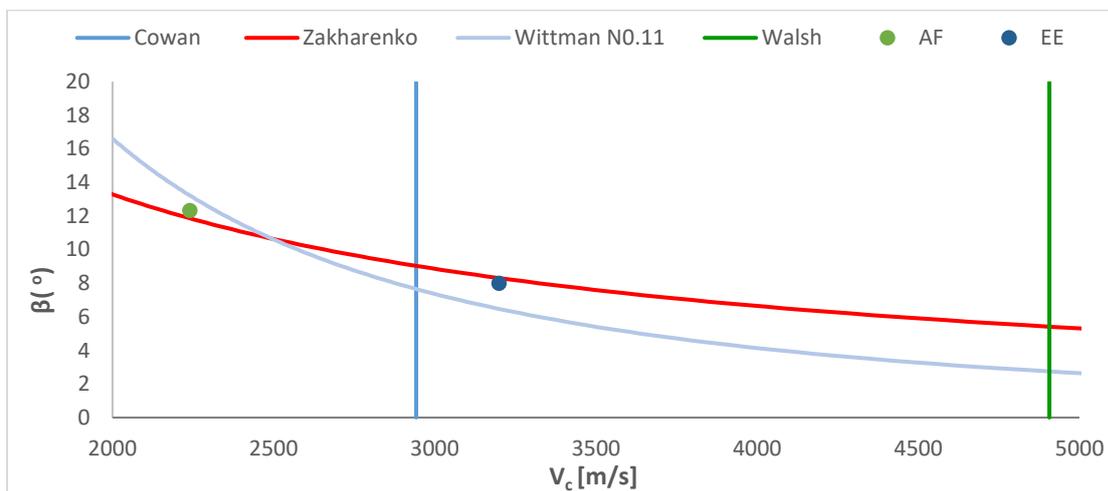


Figura 4.2. Enquadramento das soldaduras AF e EE na janela de soldabilidade da ligação do Ti6Al4V com o AISI304

## 4.2. Análise macroscópica

A Figura 4.3 apresenta o resultado da soldadura AF e a. Figura 4.4 apresenta o resultado da soldadura EE. As duas soldaduras ficaram consistentes e partes das placas voadoras de alumínio foram removidas com a agressividade da detonação. No início da detonação, na zona da carga de iniciação, as placas de alumínio apresentaram alguns sinais de agressividade, como rugosidade e deformação plástica na superfície. Nas zonas correspondentes ao final da detonação também se observou a remoção de alumínio, e isto aconteceu, porque a energia da detonação foi mais acentuada no final. Também houve remoção de alumínio nas extremidades laterais das placas. As placas constituídas pelos três materiais ficaram ligeiramente encurvadas depois da explosão. As janelas de soldabilidade

indicaram que a probabilidade das ligações entre o titânio e o aço inoxidável serem bem-sucedidas é maior que a das ligações entre o alumínio e o titânio. A análise macroscópica revelou a existência de áreas desconectadas na interface entre o alumínio e o titânio, e na soldadura EE, durante o corte das amostras e dos provetes, a placa de alumínio separou-se da de titânio. Deste modo, a janela de soldabilidade vai ao encontro do que se observou macroscopicamente.

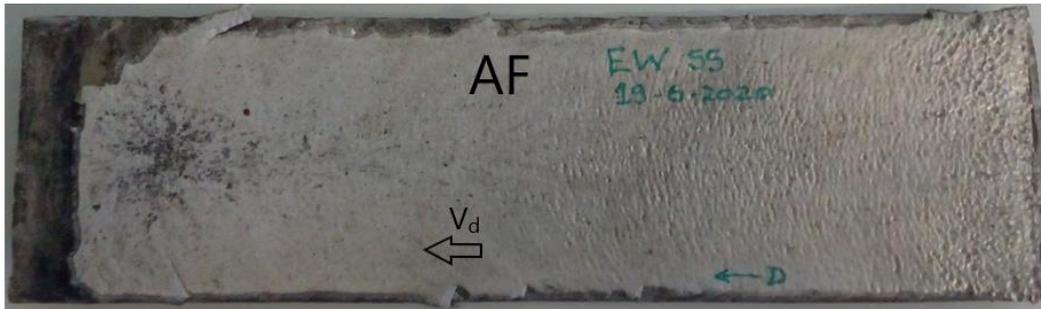


Figura 4.3. Placas soldadas na soldadura AF

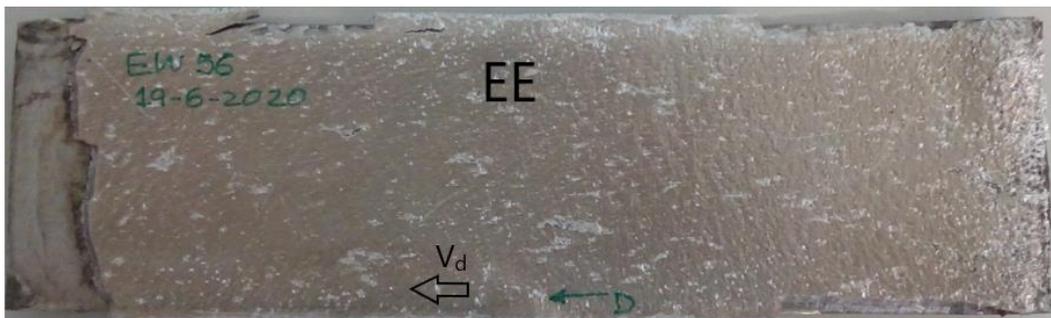


Figura 4.4. Placas soldadas na soldadura EE

### 4.3. Análise microscópica

A Figura 4.5 contém as micrografias das secções longitudinais das ligações das soldaduras AF e EE. As micrografias estão organizadas por alíneas, a alínea a) que apresenta a interface entre o alumínio e o titânio da soldadura AF, a alínea b) que apresenta a interface entre o aço inoxidável e o titânio da soldadura AF, a alínea c) que apresenta a interface entre o alumínio e o titânio da soldadura EE e a alínea d) que apresenta a interface entre o aço inoxidável e o titânio da soldadura EE. No que diz respeito às semelhanças entre as soldaduras AF e EE, o titânio não foi atacado, e como tal, não é possível observar o que ocorreu no grão deste material, mas o alumínio e o aço inoxidável foram, e neles observa-se, que perto das interfaces, o grão do alumínio e do aço inoxidável foi deformado na direção da velocidade de detonação e ficou mais fino.

As morfologias das interfaces também foram semelhantes nas duas soldaduras. Entre o aço inoxidável e o titânio existem ondas bem definidas, e entre o alumínio e o titânio

formaram-se vários contornos não lineares com a mesma geometria e que se repetem ao longo das interfaces. A formação de material intermédio foi mais acentuada nas interfaces das micrografias a) e c), mas as micrografias b) e d) também apresentam pequenas formações pontuais de material intermédio.

Quanto às diferenças entre as soldaduras, a EE apresenta uma formação maior de material intermédio na interface entre o alumínio e o titânio, e as ondas que se formaram nas interfaces entre o aço inoxidável e o titânio têm uma amplitude e comprimento de onda menores que a soldadura AF. A interface da micrografia a) também apresenta o material intermédio distribuídos ao longo de camadas não contínuas em toda a interface, enquanto que a micrografia c) apresenta as formações de materiais intermédios concentradas em zonas pontuais da interface. As dimensões das amplitudes das ondas, dos comprimentos de onda e da espessura dos materiais intermédios da Figura 4.5 são apresentadas na Tabela 4.4. O grão do alumínio e do aço inoxidável ficou mais fino perto das interfaces devido a um maior aumento da temperatura do material nessa zona e posterior arrefecimento rápido. O fenómeno promotor deste acontecimento é a recristalização.

A formação mais acentuada de materiais intermédios nas interfaces entre o alumínio e o titânio está relacionada com o facto de o ponto de fusão do alumínio ser o mais baixo dos três materiais utilizados nas soldaduras deste trabalho. Pontos de fusão mais baixos facilitam o surgimento de maiores volumes de material fundido na interface. Quanto maior for a fusão na interface, maior será a interação atómica e conseqüentemente maior será a formação de intermetálicos.

Em suma, as micrografias indicam que a ligação entre o titânio e o aço inoxidável foi mais bem-sucedida que a ligação entre o alumínio e o titânio nas duas soldaduras, porque a primeira, apesar da formação de materiais intermédios, apresenta uma morfologia ondulada e não se separou em nenhuma das soldaduras, durante o seu corte. Os materiais intermédios podem fragilizar a ligação, dependendo da sua constituição, mas as ondas aumentam a resistência mecânica das soldaduras como foi referido por Hoseini-Athar *et al.* [16]. As janelas de soldabilidade indicam que a interface entre o titânio e o aço inoxidável tem uma maior probabilidade de ser bem-sucedida e que apenas a soldadura EE deveria apresentar formação de ondas na interface entre o titânio e o aço inoxidável. Na realidade, as microscopias apresentam resultados que vão de encontro aquilo que as janelas preveem, com exceção da morfologia da interface entre o titânio e o aço inoxidável da soldadura AF, onde a janela prevê ausência de ondas e na realidade elas estão presentes.

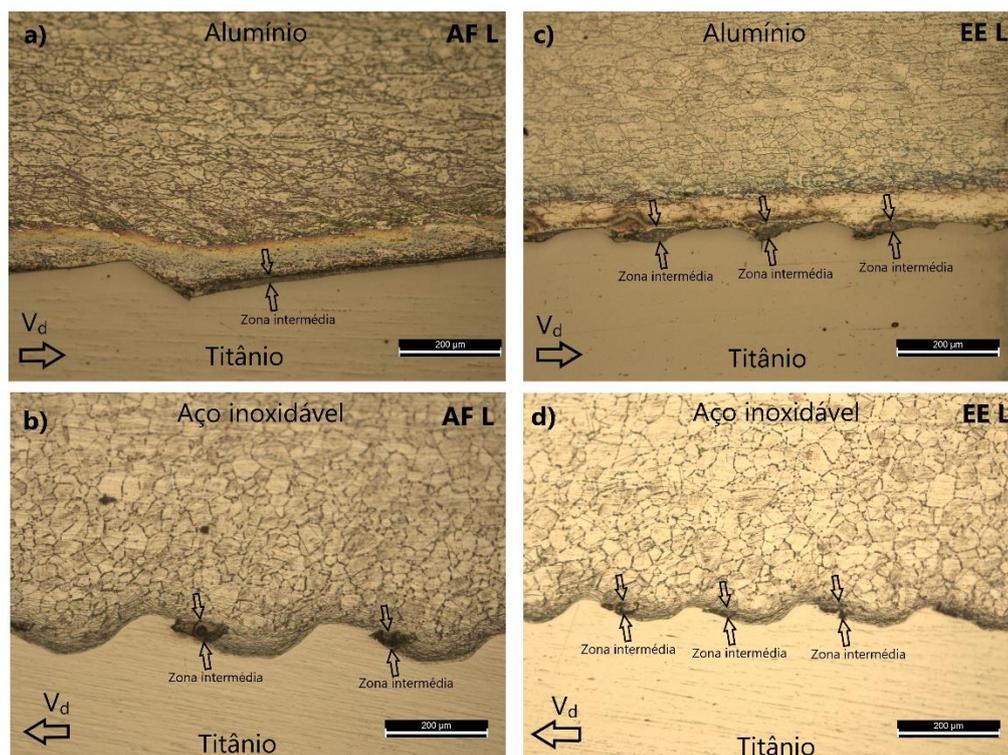


Figura 4.5. Microscopia ótica de cortes longitudinais à direção de soldadura das soldaduras AF e EE

Tabela 4.4. Dimensões obtidas nas micrografias óticas

	a)	b)	c)	d)
<b>Amplitude [<math>\mu\text{m}</math>]</b>		60		25
<b>Comprimento de onda [<math>\mu\text{m}</math>]</b>		340		200
<b>Espessura das zonas intermédias [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	15	45	35	25

A Figura 4.6 apresenta quatro micrografias SEM registadas na secção longitudinal das interfaces, entre o titânio e o aço inoxidável, e entre o alumínio e o titânio. As micrografias a) e b) dizem respeito à ligação entre o titânio e o aço inoxidável da soldadura AF, a micrografia c) diz respeito à ligação entre o titânio e o aço inoxidável da soldadura EE e a micrografia d) diz respeito à ligação entre o alumínio e o titânio da soldadura EE. A soldadura AF e a soldadura EE são semelhantes na forma como os materiais intermédios estão distribuídos ao longo das interfaces entre o alumínio e o titânio, como tal, não se apresenta a interface entre o alumínio e o titânio da soldadura EE na Figura 4.6. Os círculos 1 e 2 estão a localizar fissuras que ocorreram nos materiais intermédios e que se formaram na ligação entre o titânio e o aço inoxidável, tanto da soldadura AF como da EE. A interface entre o alumínio e o titânio da micrografia d) também tem alguns aspetos identificados. O círculo 3 indica uma camada de material fissurada, o círculo 4 localiza uma intrusão de alumínio no titânio, o círculo 5 é referente a fragmentos de titânio e pequenas

formações de materiais intermédios no interior dum material mais abundante, que aparenta ser alumínio e o círculo 6 localiza uma cavidade, que provavelmente estava preenchida por material fissurado, e que por ação do polimento das amostras, foi removido. A fissuração de materiais intermédios ocorreu nas duas interfaces, mas na interface entre o alumínio e o titânio, para além das fissuras, é possível observar a existência de áreas sem ligação. As interfaces entre o aço inoxidável e o titânio apresentam formações maiores de materiais intermédios, mas não são camadas contínuas, são formações pontuais.

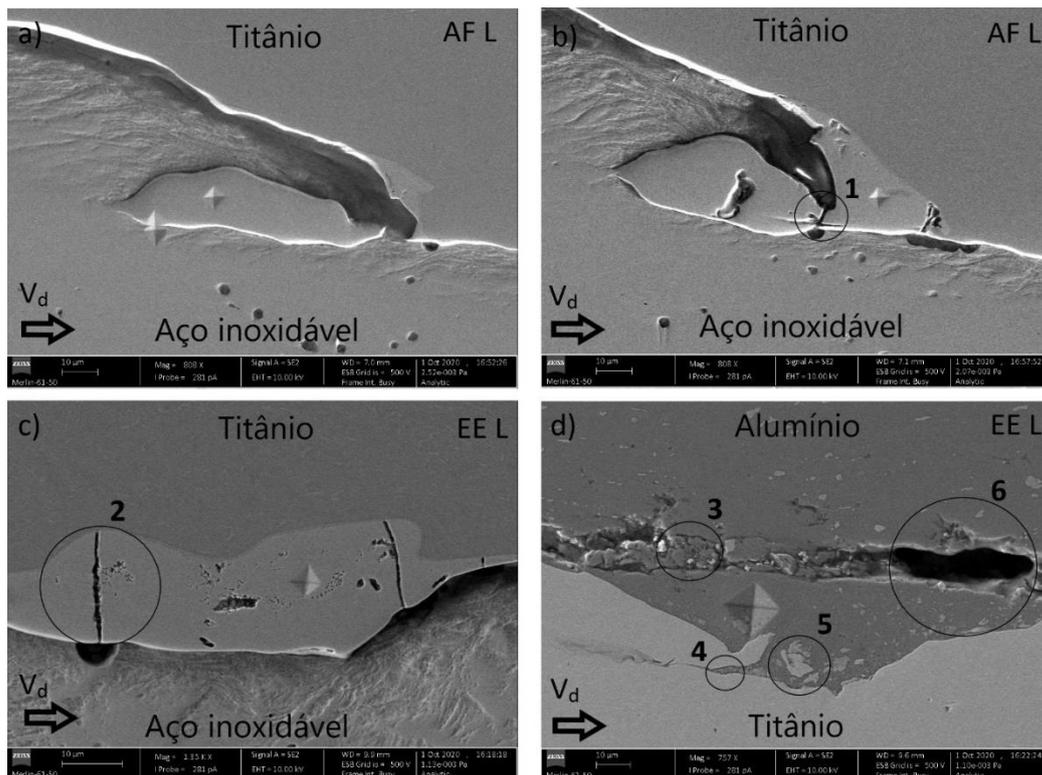


Figura 4.6. Micrografias SEM das interfaces das soldaduras AF e EE

Carvalho *et al.* [17] utilizaram o *wave interface factor* (WIF) para verificar se existia a possibilidade de haver formação de ondas numa interface entre cobre e alumínio. O WIF pode ser calculado através da equação (4.2), e se o valor obtido for superior a 5,1, a linha de ligação pode ser plana, e se for inferior a 4,2, a linha de ligação pode ser ondulada [17]. O fator WIF não indica diretamente se a interface vai ser ondulada ou plana, ele indica a possibilidade de haver formação de ondas, dependendo dos parâmetros de soldadura. [17]. A Tabela 4.5 apresenta os valores do WIF entre o alumínio e o titânio e entre o titânio e o aço inoxidável, e segundo esses valores, todas as interfaces deveriam ter a formação de ondas. O fator WIF indica a possibilidade de formação de ondas nas duas interfaces, o que não é previsto pela janela de soldabilidade como já foi referido nesta secção. A formação de ondas ocorreu nas duas soldaduras na interface entre o titânio e o aço inoxidável, mas entre

o alumínio e o titânio só se formaram alguns contornos não lineares. El-Sobky [8] deu a entender que a velocidade de impacto e a deformação plástica são importantes para a formação de ondas na interface. O titânio é um material muito mais duro e com um ponto de fusão muito maior que o alumínio, como se observa na Tabela 3.1. Estas características fazem com que o alumínio, no momento do impacto, se deforme acentuadamente e se funda sem deformar a superfície do titânio ao ponto que sejam geradas ondas bem definidas na interface.

$$WIF = \frac{\rho_{voadora}}{\rho_{base}} \times \frac{T_{M\ voadora}}{T_{M\ base}} \quad (4.2)$$

Na equação (4.2) o  $\rho_{voadora}$  é a densidade da placa voadora, o  $\rho_{base}$  é a densidade do material da placa base, o  $T_{M\ voadora}$  é a temperatura de fusão do material da placa voadora e o  $T_{M\ base}$  é a temperatura de fusão do material da placa base.

**Tabela 4.5- Valor do WIF nas interfaces entre alumínio e titânio e entre titânio e aço inoxidável**

	WIF
<b>Interface Al/Ti</b>	0,242872
<b>Interface Ti/INOX</b>	0,66089

Carvalho *et al.* [33] também referiu um parâmetro que indica o tipo de ondas que se podem formar na interface, podendo ser ondas típicas ou enroladas. Esse parâmetro é designado como *impedance mismatch parameter* (IMP) que significa parâmetro de incompatibilidade de impedâncias. Este parâmetro pode ser calculado através das equações (4.3) e (4.4). Quanto mais próximo de 1 o valor do IMP for, maior será a tendência de as ondas serem enroladas [33].

$$Z_{rácio} = \frac{Z_{voadora}}{Z_{Base}} = \frac{\rho_{voadora} \times C_{b\ voadora}}{\rho_{base} \times C_{b\ base}} \quad (4.3)$$

$$IMP = |1 - Z_{rácio}| \quad (4.4)$$

$Z_{rácio}$  é o rácio das impedâncias,  $Z_{voadora}$  é a impedância da placa voadora,  $Z_{Base}$  é a impedância da placa base,  $\rho_{voadora}$  é a densidade do material da placa voadora,  $\rho_{base}$  é a densidade do material da placa base,  $C_{b\ voadora}$  é a velocidade de propagação do

som no material da placa voadora e  $C_{b\ base}$  é a velocidade de propagação do som no material da placa base. Este parâmetro apenas foi calculado para a interface entre o titânio e o aço inoxidável, porque foi a única que apresentou formação e ondas. Os valores da impedância do titânio e do aço inoxidável necessários para o cálculo do IMP são respetivamente 22 kg/m<sup>2</sup>s e 36,4 kg/m<sup>2</sup>s e o valor do IMP obtido é aproximadamente 0,40 [33]. Carvalho *et al.* [33] fez uma síntese de vários trabalhos no que diz respeito ao IMP e contruiu o gráfico da Figura 4.7. Analisando este gráfico é possível verificar que a análise do IMP prevê que as ondas sejam enroladas na interface, e as ondas observadas nas microscopias b) e d) da Figura 4.5 apresentam enrolamento, por isso, o valor do IMP vai de encontro ao que se observa microscopicamente.

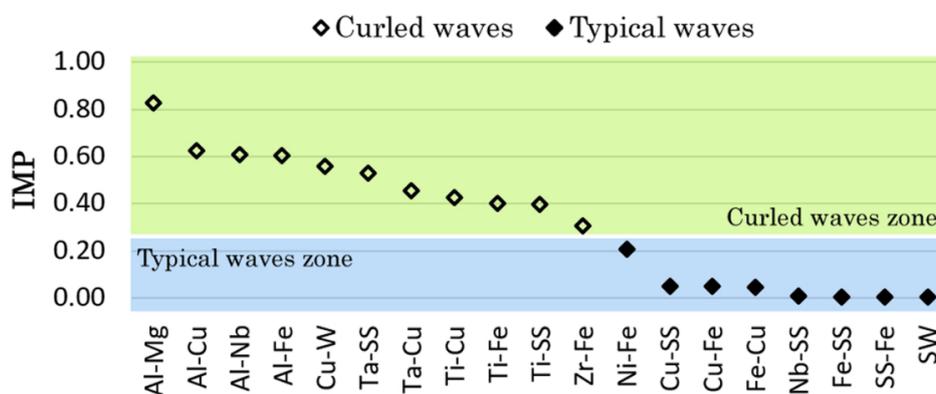


Figura 4.7. IMP calculado para diferentes ligações [33]

#### 4.4. Caracterização da composição química

A análise EDS, os diagramas de fases e as durezas dos intermetálicos vão ser as ferramentas utilizadas na identificação dos intermetálicos, mas é necessário ter em conta um conjunto de limitações que diminuem o rigor dos resultados. A análise EDS permite obter as composições atómicas dos materiais intermédios, mas esta técnica pode captar espectros de elementos atómicos dos materiais vizinhos aos materiais intermédios, e como tal, as composições atómicas obtidas podem ser diferentes das reais. A medição das durezas nos materiais intermédios também pode ser influenciada pela dureza dos materiais vizinhos. Outro aspeto a ter em conta, é o facto de as evoluções de temperatura serem extremamente rápidas na soldadura por explosão, e poderem levar à formação de fases, que não correspondem às indicadas pelos diagramas de fases.

A Figura 4.8 apresenta a análise EDS feita em zonas das interfaces das soldaduras com formação de materiais intermédios. A interface entre o alumínio e o titânio, só foi sujeita a análise EDS para a soldadura AF, porque a soldadura EE não difere no que

diz respeito à formação de materiais intermédios na interface. A análise EDS apresentada na Figura 4.8 foi organizada em alíneas. A alínea a) diz respeito a formações de materiais intermédios na interface entre o titânio e o aço inoxidável da soldadura AF, a alínea b) diz respeito a formações de materiais intermédios na interface entre o titânio e o aço inoxidável da soldadura EE, a alínea c) diz respeito a formações de materiais intermédios na interface entre o alumínio e o titânio da soldadura AF e a alínea d) é uma ampliação dos materiais intermédios da alínea c). Nas diferentes alíneas da Figura 4.8 existem várias zonas de análise, onde foram indicadas as percentagens atômicas dos diferentes elementos atômicos nas suas localizações. A Tabela 4.6 apresenta essas percentagens atômicas. No que diz respeito à interface entre o titânio e o aço inoxidável, a análise EDS indica que o material intermédio presente na alínea a) tem 58,7 At% de ferro e 12,3 At% de Ti, e segundo o diagrama de fases da Figura 4.9 estas percentagens correspondem a uma área do diagrama com as fases TiFe e TiFe<sub>2</sub>. Quanto à alínea b) o material intermédio que se formou entre o titânio e o aço inoxidável tem 26,7 At% de titânio e 48,1 At% de ferro, que segundo o diagrama de fases da Figura 4.9, são percentagens que permitem a existência de Ti $\alpha$ , Ti $\beta$  e TiFe. Zhang Yan *et al.*[46] indicou que a dureza do TiFe é 1000 HV e a do TiFe<sub>2</sub> é 600 HV. A dureza do material intermédio presente na alínea a) é de 830 HV<sub>0,025</sub>, e a dureza do material intermédio da alínea b) é de 1195 HV<sub>0,025</sub>, valores estes que estão próximos dos valores indicados por Zhang Yan *et al.*[46]. Na interface entre o alumínio e o titânio representada na alínea c), existem quantidades residuais de materiais intermédios no interior do alumínio nas zonas próximas da interface. A análise EDS indica que o material mais abundante da intrusão no titânio é maioritariamente alumínio, mas foi feita uma ampliação conforme está representado na alínea d), e no interior desse material foram encontradas formações de materiais intermédios. Essas formações de materiais intermédios dentro do alumínio são constituídas principalmente por 74,5 At% de alumínio e 25,5 At% de titânio. Segundo o diagrama de fases da Figura 4.10, estas percentagens correspondem a uma área do diagrama onde existem as fases TiAl, TiAl<sub>2</sub> e TiAl<sub>3</sub>, ou seja, pontualmente pode ter havido a formação de fases intermetálicas numa matriz de alumínio. A análise EDS ainda identificou outros elementos atômicos na zona da interface, como magnésio, silício e vanádio. A dureza correspondente à indentação marcada na alínea c) tem um valor de 290 HV<sub>0,025</sub>, mas como a indentação foi feita num material constituído maioritariamente por alumínio, este valor de dureza não corresponde à dureza dos intermetálicos. Fronczek D. M. *et al.* [40] concluíram que as durezas dos intermetálicos que se formam entre o titânio e o alumínio são muito maiores que

os próprios materiais que lhes dão origem e que podem ter valores entre os 365 HV e os 750 HV.

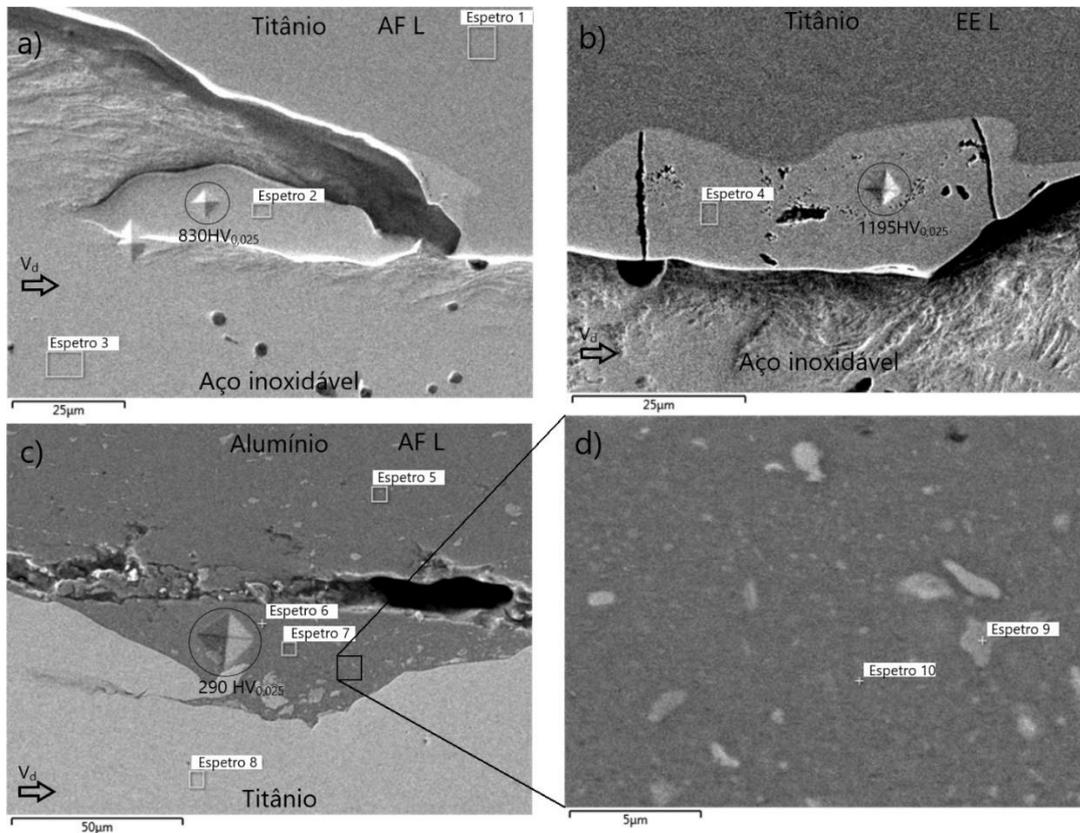


Figura 4.8. Micrografias SEM dos intermetálicos das interfaces das soldaduras AF e EE

Tabela 4.6. Percentagens atômicas obtidas nos diversos espectros

Espetro	Al [At%]	Ti [At%]	Fe [At%]	Cr [At%]	Ni [At%]	V [At%]	Si [At%]	Mg [At%]
1	10,0	86,7				3,3		
2	1,7	12,3	58,7	18,0	8,5	0,4	0,4	
3			70,3	19,3	10,0		0,4	
4	3,6	26,7	48,1	15,0	6,4	0,2		
5	98,3						1,0	0,8
6	95,8	2,7					0,9	0,6
7	97,0	1,5					0,8	0,8
8	10,4	87,2				2,4		
9	74,5	25,5						
10	96,9	2,5						0,7

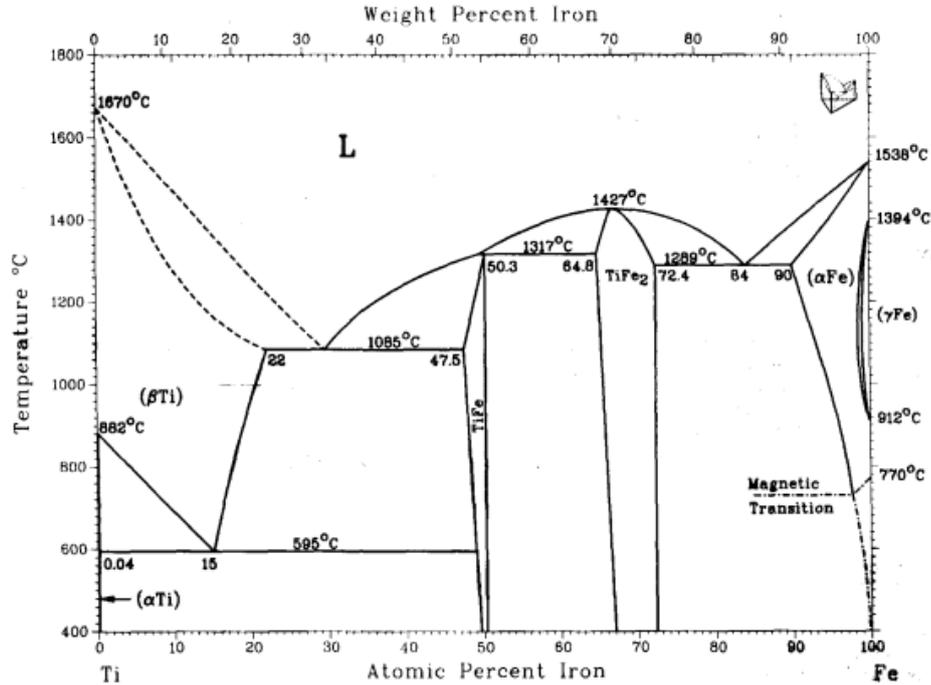


Figura 4.9. Diagrama de fases entre titânio e ferro [47]

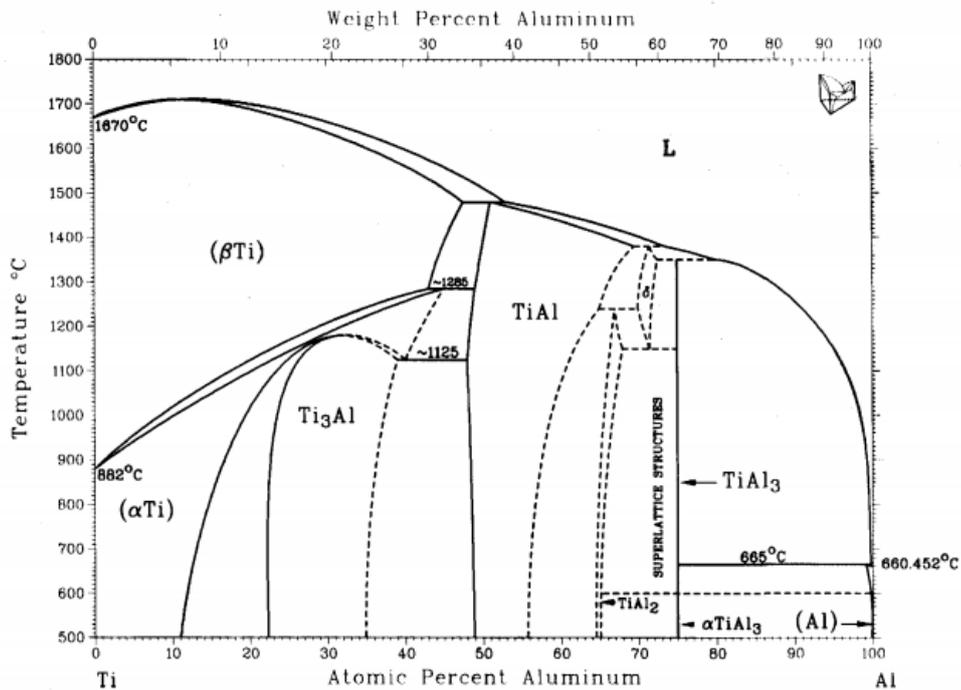


Figura 4.10. Diagrama de fases entre titânio e alumínio [48]

### 4.5. Análise da Microdureza

A Tabela 4.7 apresenta as médias dos valores de dureza das amostras das soldaduras e dos materiais base. A dureza do titânio é a mais elevada dos três materiais, seguindo-se a do aço inoxidável e por último a do alumínio. Analisando os valores de ambas

as amostras, é possível observar que de maneira geral os valores de dureza da soldadura AF são mais altos. O tipo de carga explosiva e a quantidade utilizada foram diferentes nas duas soldaduras, e a energia de explosão varia com esses fatores. Aumentando a energia de explosão, a quantidade de deformação plástica nas placas soldadas vai aumentar e consequentemente a dureza dos materiais também. O facto de os valores de dureza serem maiores na soldadura AF pode estar associado a uma maior energia fornecida pela carga explosiva.

**Tabela 4.7. Durezas médias dos materiais nas amostras das soldaduras e dos materiais base**

	<b>AF L</b>	<b>AF T</b>	<b>EE L</b>	<b>EE T</b>	<b>Material base</b>
Dureza média alumínio [HV <sub>0,2</sub> ]	132,92	131,25	131,22	118,45	113,94
Dureza média titânio [HV <sub>0,2</sub> ]	356,27	340,12	359,11	301,62	376,40
Dureza média aço inoxidável [HV <sub>0,2</sub> ]	295,22	301,08	265,68	268,30	143,30

A dureza do alumínio e do aço inoxidável são maiores depois dos materiais soldados, e destas duas, a que aumenta mais é a do aço inoxidável. A dureza do titânio diminuiu com a soldadura ao contrário dos outros dois materiais. A Tabela 4.8 apresenta as variações de dureza entre os materiais antes de serem soldados e depois de estarem soldados. Analisando os valores da Tabela 4.8, é possível verificar que a dureza do aço inoxidável aumenta aproximadamente 50% da dureza do material base em todas as amostras. O alumínio e o titânio apresentam variações mais baixas. A liga AA6082 é uma liga tratável termicamente, e como tal, a deformação plástica não influencia muito a sua dureza, por causa das variações de temperatura na interface. O principal mecanismo de endurecimento desta liga de alumínio é a precipitação. A dureza do aço inoxidável, por outro lado, é muito influenciada pela deformação plástica.

**Tabela 4.8. Variação das durezas dos materiais com a soldadura**

	<b>AF L</b>	<b>AF T</b>	<b>EE L</b>	<b>EE T</b>
Alumínio	14,24%	13,14%	13,12%	3,76%
Titânio	-5,54%	-10,55%	-4,70%	-24,66%
Aço inoxidável	51,56%	52,50%	46,17%	46,70%

As medições de durezas dos materiais base e a evolução das durezas nos materiais depois de soldados, estão representadas nos gráficos da Figura 4.11 ,da Figura 4.12, da Figura 4.13 e da Figura 4.14. Nestes gráficos é possível observar que a dureza do aço inoxidável aumentou muito mais que a do alumínio perto da interface. Isto deve-se ao facto de a deformação plástica influenciar muito mais a dureza do aço inoxidável que a do alumínio. A microscopia ótica também revelou que o grão da microestrutura do alumínio e do aço inoxidável é mais fino perto da interface, e metais com grão mais fino estão associados a valores de dureza maiores.

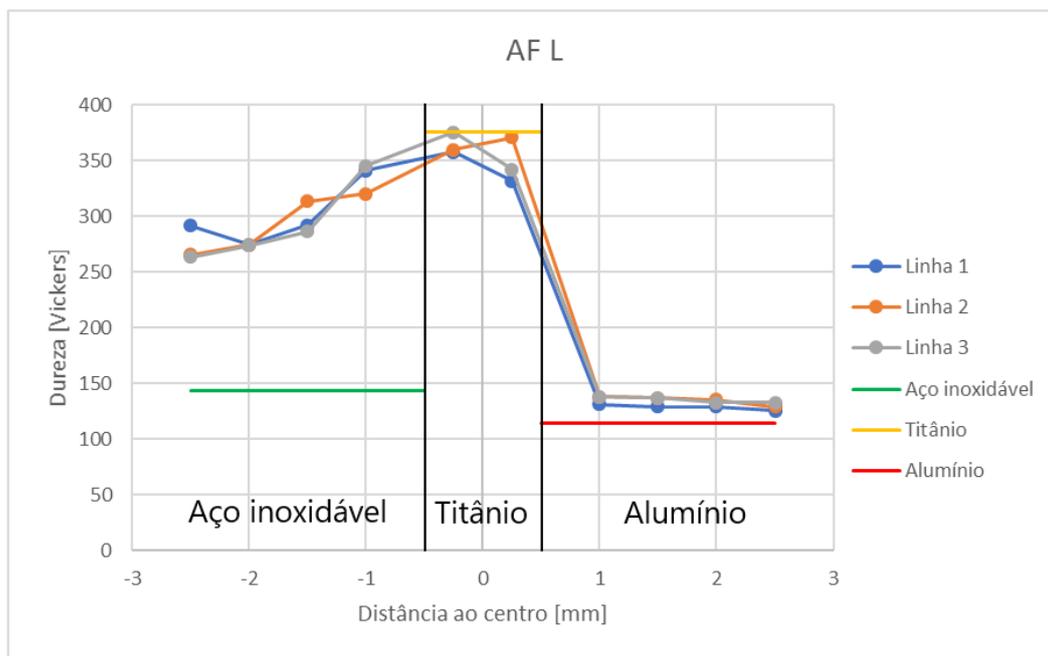


Figura 4.11. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra AF L

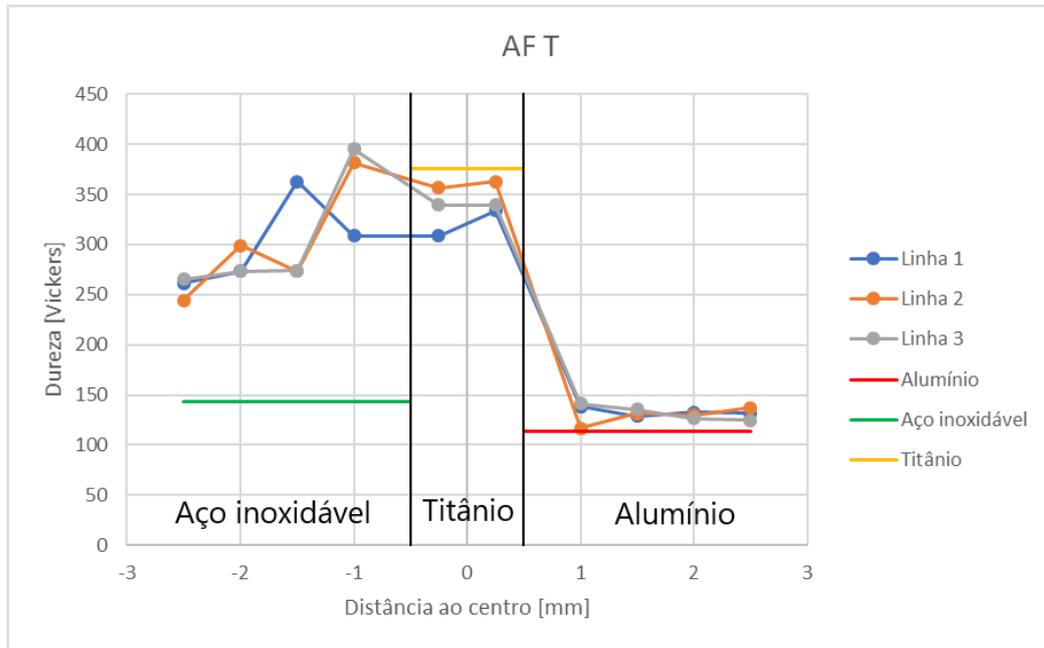


Figura 4.12. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra AF T

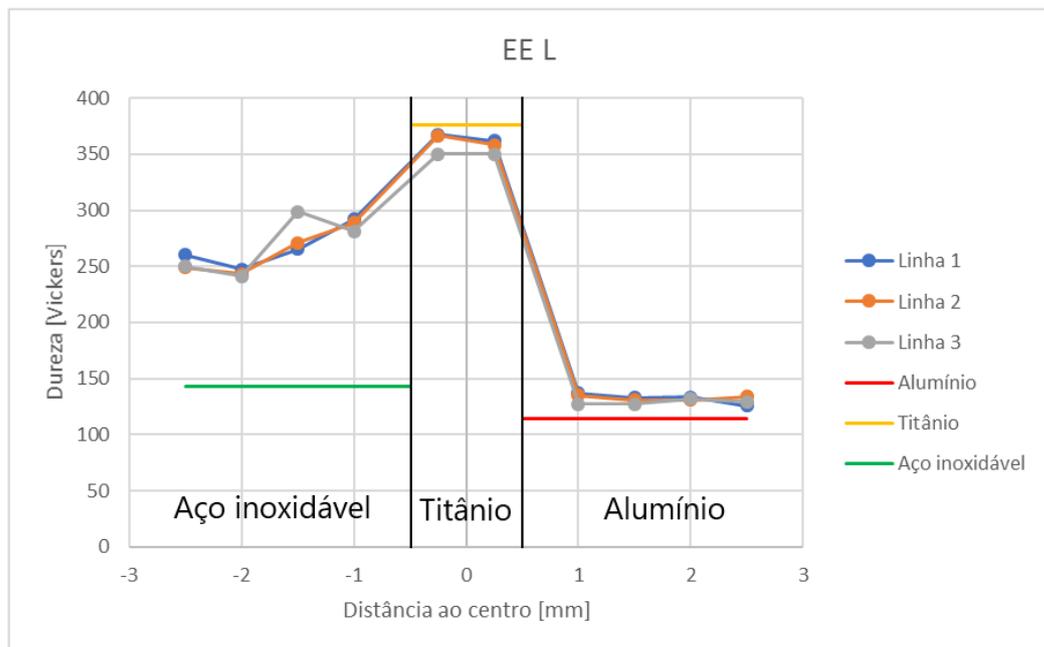


Figura 4.13. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra EE L

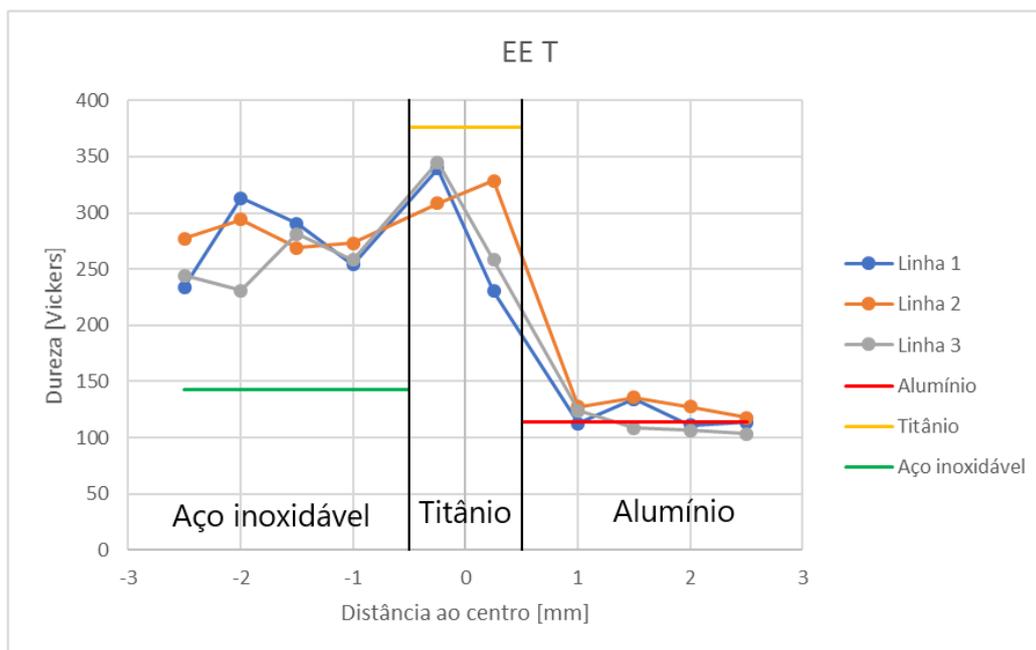


Figura 4.14. Variação das durezas ao longo da espessura da amostra EE T

## 4.6. Análise mecânica

Os provetes da soldadura AF foram tirados das placas soldadas sem a ocorrência da separação na interface durante a maquinação, mas durante o ensaio, estes fraturaram na interface entre o titânio e o aço inoxidável. A Figura 4.15 mostra o mapa de deformação no instante da força máxima e a localização da rotura. A deformação apresentada no mapa de deformação é a deformação equivalente de Von Mises. Um aspeto de notar, é que a deformação foi mais acentuada no alumínio e no aço inoxidável nas zonas dos entalhes, que na interface onde ocorreu a rotura. A zona de rotura sofreu uma deformação plástica praticamente nula, o que significa que a rotura foi frágil. Todos os provetes tiveram um comportamento idêntico, as forças máximas suportadas foram idênticas e os alongamentos até à rotura também. Os comportamentos dos provetes nos ensaios de tração ao corte estão representados na Figura 4.16.

A superfície de rotura foi sujeita a observação SEM e a Figura 4.17 é o resultado dessa observação. Nela verifica-se a formação de material intermetálico e a formação de ondas. Para além da observação SEM, a superfície de rotura do lado do titânio também foi submetida a análise EDS, e como se pode observar na Figura 4.18 e na Tabela 4.9, os elementos atômicos encontrados em maior percentagem foram o Ti, o Fe, e o Cr. Analisando as percentagens atômicas da análise EDS e o diagrama de fases da Figura 4.9, as fases que podem estar presentes na superfície de rotura são o  $Ti\beta$ , o  $Ti\alpha$  e o  $TiFe_2$ . As composições

atómicas das formações de materiais intermédios na superfície de rotura são semelhantes às da interface da amostra AF L, e como tal, as fases correspondentes também são as mesmas. Estes compostos são duros e frágeis o que diminui a resistência mecânica das soldaduras e justifica o facto de a rotura na interface ter sido frágil.

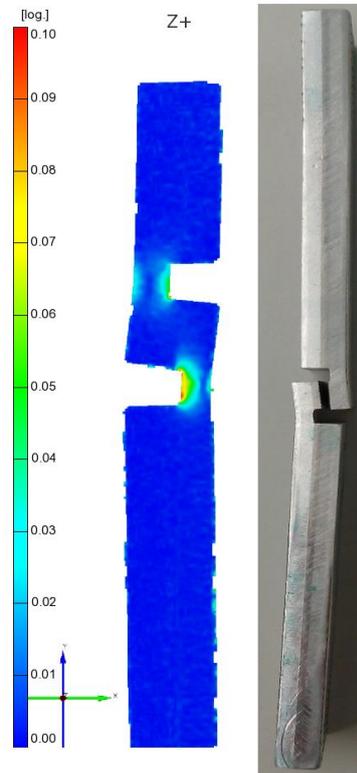


Figura 4.15. Mapa de deformação e rotura do provete 2 da soldadura AF

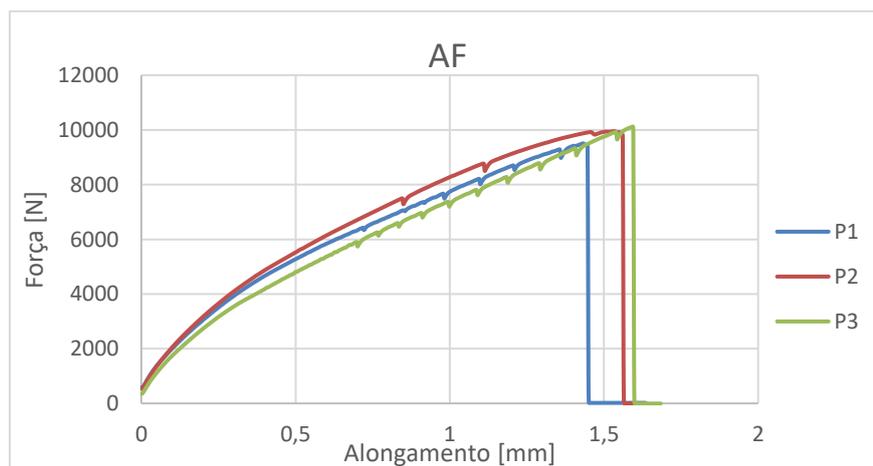
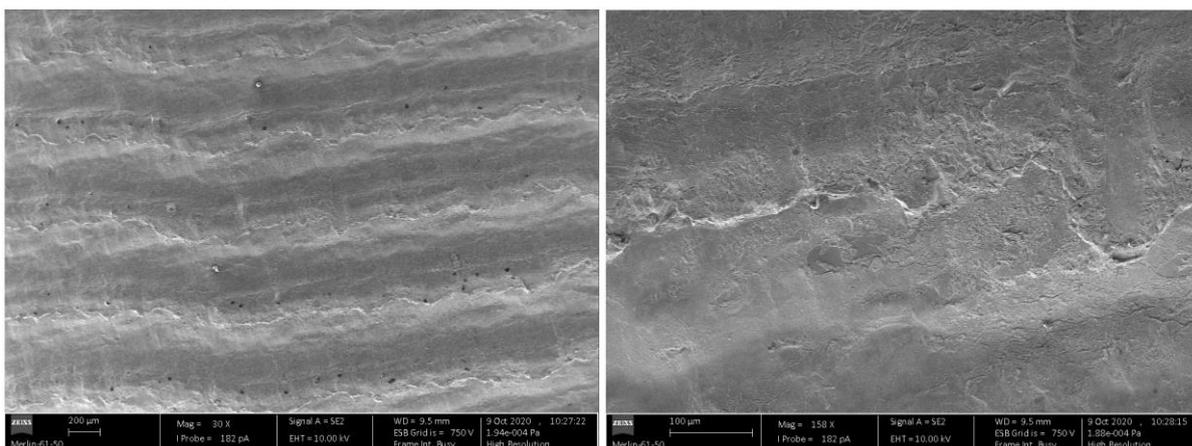
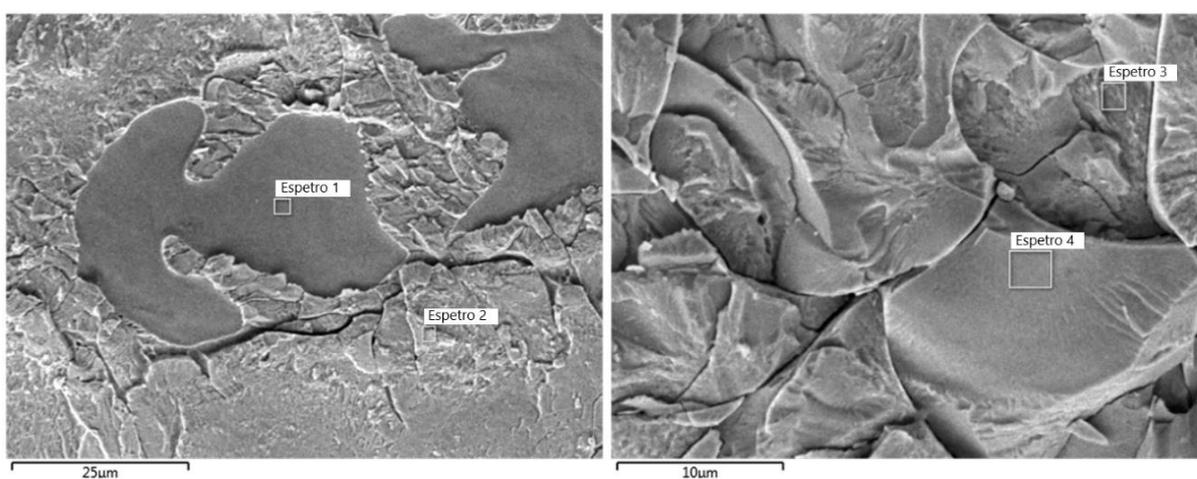


Figura 4.16. Gráfico da evolução da força em função do alongamento dos provetes da soldadura AF



**Figura 4.17. Observação SEM das superfícies de rotura do ensaio de tração ao corte do provete 2 da soldadura AF**



**Figura 4.18. Micrografias SEM das superfícies de rotura do ensaio de tração ao corte do provete 2 da soldadura AF**

**Tabela 4.9. Percentagens atômicas obtidas nos espectros da análise EDS da superfície de rotura**

Espetros	Ti [At%]	Fe [At%]	Cr [At%]	Ni [At%]	Al [At%]	V [At%]
1	72,8	13,5			10	3,7
2	23,4	48,4	18,2	7,3	2,8	
3	41,6	38,7	8,8	5,4	5,5	
4	23,6	50,2	16,3	6,5	3,5	



---

## 5. CONCLUSÃO

Através da observação dos resultados e da sua interpretação baseada em outros trabalhos, foi possível retirar as seguintes conclusões.

As janelas de soldabilidade permitiram ter uma ideia dos intervalos das velocidades do ponto de colisão e do intervalo dos ângulos de colisão que as soldaduras tinham de ter, para que estas tivessem uma maior probabilidade de sucesso. Das duas janelas de soldabilidade analisadas, a maior é a da interface entre o titânio e o aço inoxidável, ou seja, a probabilidade de a soldadura ser bem-sucedida nesta interface é maior.

Quando se localizaram as soldaduras nas janelas de soldabilidade, observou-se que estas não se localizavam no interior da janela, com exceção da ligação entre o titânio e o aço inoxidável da soldadura realizada com ANFO. Na realidade as soldaduras obtidas foram consistentes, mesmo estando localizadas fora da zona soldável da janela de soldabilidade, o que prova que as janelas não são uma ferramenta rigorosa.

Ambas as placas resultantes da soldadura apresentaram marcas de agressividade da explosão na superfície do alumínio que esteve em contacto direto com a carga explosiva, mas enquanto a soldadura EE apresentava zonas pontuais onde a soldadura estava desconectada na interface entre o alumínio e o titânio, a soldadura AF não apresentava desconexões tão evidentes.

A formação de compostos intermetálicos ocorreu nas duas interfaces, mas foi mais acentuada na interface entre o titânio e o aço inoxidável. Para além disso os valores de WIF indicam que a formação de ondas deveria ocorrer nas duas interfaces, mas na análise microscópica foi possível observar que a interface entre o titânio e o alumínio não apresenta uma morfologia ondulada tão evidente como a interface entre o titânio e o aço inoxidável.

Os compostos intermetálicos de ambas as interfaces apresentaram fissuras, fenómeno este que está associado à elevada dureza e fragilidade dos mesmos. Na interface entre o titânio e o aço inoxidável, as formações de compostos similares a intermetálicos apresentam valores de dureza mais elevados, e como tal, são materiais frágeis.

A rotura que ocorreu nos provetes foi frágil, e isso verificou-se, porque não houve deformação plástica na zona onde ela ocorreu. Esta fragilidade não está só associada aos valores elevados de dureza dos compostos intermetálicos que se formaram, mas também está associada aos valores elevados de dureza dos próprios materiais que foram soldados. As

medições de dureza não foram realizadas apenas nos compostos similares a intermetálicos, mas também nos materiais base, e foi possível verificar que nas zonas próximas das interfaces, a dureza dos materiais base aumentou.

A utilização de placa intermédia de titânio beneficiou a ligação entre o alumínio e o aço inoxidável e permitiu a obtenção de soldaduras consistentes, contudo, as análises efetuadas revelaram que existem um conjunto de problemas, tanto na interface entre o alumínio e o titânio como na interface entre o titânio e o aço inoxidável que põem em causa a resistência mecânica desta ligação. De qualquer modo, a utilização de uma velocidade de detonação mais baixa parece ter beneficiado a soldadura AF, porque esta apresenta maior resistência mecânica. Tendo em conta os problemas já referidos e os custos elevados do titânio, muito facilmente se encontram outros materiais mais baratos e convenientes para serem utilizados como placa intermédia entre o alumínio e o aço inoxidável

## **5.1. Propostas de trabalhos futuros**

Os explosivos utilizados e os parâmetros de soldadura influenciam a qualidade das ligações, como tal, seria apropriado estudar a sua influência no estabelecimento de ligações com placa intermédia de titânio.

A janela de soldabilidade desempenha uma função essencial no que diz respeito à indicação dos intervalos das velocidades do ponto de colisão e dos ângulos de colisão para que a soldadura seja bem-sucedida. Deste modo, deve-se investigar os efeitos que a utilização de uma placa intermédia pode ter numa janela de soldabilidade, e desenvolver modelos matemáticos que definam esses efeitos.

As placas voadoras de alumínio deste trabalho sofreram alterações superficiais como rugosidade e deformações plásticas, que foram causadas pela detonação da carga explosiva. O acabamento das superfícies das placas voadoras podem ser fundamentais na indústria, e como tal, seria interessante desenvolver maneiras de mitigar estas alterações superficiais.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Mendes, J. B. Ribeiro, and A. Loureiro, “Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration,” *Mater. Des.*, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.069.
- [2] V. Philipchuck and L. B. Franklin, “Explosive Welding,” no. 4976, pp. 0–1, 1962.
- [3] G. Young, “Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History,” 2004.
- [4] A. H. Holtzman, “Process for Bonding Metals by Explosive Means,” 1964.
- [5] S. H. Carpenter and R. H. Wittman, “Explosion Welding,” *Mech. Eng.*, vol. 100, no. 5, pp. 28–35, 1978, doi: 10.1146/annurev.ms.05.080175.001141.
- [6] F. Findik, “Recent developments in explosive welding,” *Materials and Design*. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.
- [7] T. Z. Blazynski, *Explosive welding, forming and compaction*. Applied Science Publishers London and New York.
- [8] H. El-Sobky, “Mechanics of Explosive Welding,” *Explos. Welding, Form. Compact.*, pp. 189–217, 1983, doi: 10.1007/978-94-011-9751-9\_6.
- [9] J. Song, R. Field, A. Clarke, Y. Fu, and M. Kaufman, “ASM Vol 6 Welding, Brazing, and Soldering,” *Acta Mater.*, vol. 165, pp. 362–372, 2019, doi: 10.1016/j.actamat.2018.11.063.
- [10] P. W. Cooper, *Explosive Engineering*. New York, USA: Wiley-VCH, 1996.
- [11] 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,” *Mater. Charact.*, vol. 155, no. April, p. 109819, 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.109819.
- [12] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Explosive welding of aluminium to stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 262, no. June, pp. 340–349, 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.042.
- [13] I. A. Bataev and D. V. Pavliukova, “Structural and mechanical properties of metallic – intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing,” *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 225–234, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.030.
- [14] R. Mendes, “Differences between the detonation behavior of emulsion explosives

- sensitized with glass or with polymeric micro-balloons Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric micro- balloons,” pp. 2–8, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/500/5/052030.
- [15] 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,” *Mater. Des.*, vol. 29, pp. 1480–1484, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.07.012.
- [16] M. M. Hoseini-Athar and B. Tolaminejad, “Interface morphology and mechanical properties of Al-Cu-Al laminated composites fabricated by explosive welding and subsequent rolling process,” *Met. Mater. Int.*, vol. 22, no. 4, pp. 670–680, 2016, doi: 10.1007/s12540-016-5687-4.
- [17] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Influence of base material properties on copper and aluminium–copper explosive welds,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 23, no. 6, pp. 501–507, 2018, doi: 10.1080/13621718.2017.1417783.
- [18] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Formation of intermetallic structures at the interface of steel-to-aluminium explosive welds,” *Mater. Charact.*, vol. 142, no. June, pp. 432–442, 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2018.06.005.
- [19] B. Crossland and J. D. Will, “Explosive welding.”
- [20] G. R. Cowan, O. R. Bergmann, and A. H. Holtzman, “Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 2, no. 11, pp. 3145–3155, 1971, doi: 10.1007/BF02814967.
- [21] G. R. Cowan and A. H. Holtzman, “Flow configurations in colliding plates: Explosive bonding,” *J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 4, pp. 928–939, 1963, doi: 10.1063/1.1729565.
- [22] G. R. Abrahamson, “No Title,” *J. Appl. Mech*, vol. 83 (E), no. 519, 1961.
- [23] T. J. A. S. Bahrani and B. Crossland, “The mechanics of wave formation in explosive welding,” *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, 1967, doi: 10.1098/rspa.1967.0010.
- [24] P. Freitas-lemes, I. Rodrigues, and M. Faúndez-abans, “Estudo da instabilidade Kelvin-Helmholtz através de simulações com o código athena,” *Univ. do Val. do Paraíba - UNIVAP / Inst. Pesqui. e Desenvolv.*, pp. 49–52.

- 
- [25] J. F. Kowalick and D. R. Hay, “No Title,” in *D.R. Proc. 3rd Int. Conf. of the Center for High Energy Rate Forming*, 1971.
- [26] J. F. Kowalick and D. . Hay, “No Title,” *D.R. Met. Trans.*, vol. 2, 1971.
- [27] I. T. Y. Onzawa, “No Title,” *Trans. Japan Weld. Soc.*, vol. 4, pp. 101–108, 1973.
- [28] I. Y. T. Onzawa, “No Title,” in *Proc. 5th Int. Conf. of the Center for High Energy Rate Forming*, 1975.
- [29] J. M. Walsh, R. G. Shreffler, and F. J. Willig, “Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions,” *J. Appl. Phys.*, vol. 24, no. 3, pp. 349–359, 1953, doi: 10.1063/1.1721278.
- [30] A. A. Deribas and I. D. Zakharenko, “Surface effects with oblique collisions between metallic plates,” *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 10, no. 3, pp. 358–367, 1974.
- [31] V. I. Lysak and S. V. Kuzmin, “Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 1, pp. 150–156, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.017.
- [32] william S. Rosset, “Analysis of Explosive Bonding Parameters,” vol. 6914, 2007, doi: 10.1080/10426910600611136.
- [33] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 283, no. October 2019, p. 116707, 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116707.
- [34] J. Kaur, V. Mangla, J. Singh, S. Kumar, and N. Srivastava, “Cladding of Stainless Steel ( SS304 ) on Aluminium Alloy ( AA1100 ) by Explosive Welding,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19136–19139, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.267.
- [35] N. Kahraman, B. Gülenç, and F. Findik, “Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 169, no. 2, pp. 127–133, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.045.
- [36] P. Manikandan, K. Hokamoto, M. Fujita, K. Raghukandan, and R. Tomoshige, “Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium / 304 stainless steel,” vol. 5, pp. 232–240, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.002.
- [37] S. A. A. A. Mousavi and P. F. Sartangi, “Experimental investigation of explosive

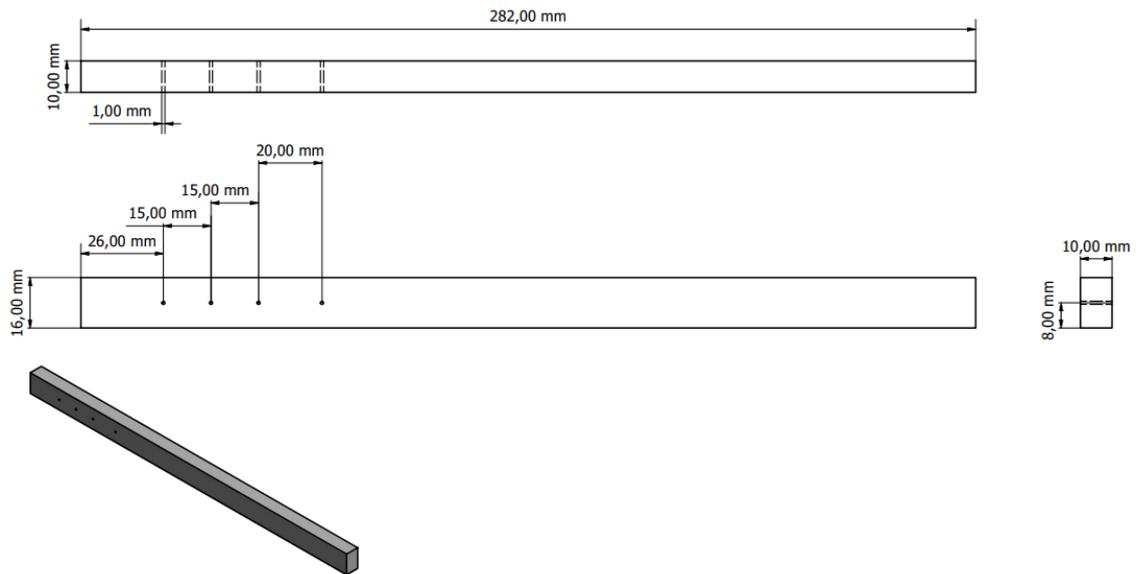
- welding of cp-titanium / AISI 304 stainless steel,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 3, pp. 459–468, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.06.016.
- [38] P. Manikandan, K. Hokamoto, A. A. Deribas, K. Raghukandan, and R. Tomoshige, “Explosive Welding of Titanium / Stainless Steel by Controlling Energetic Conditions,” vol. 47, no. 8, pp. 2049–2055, 2006, doi: 10.2320/matertrans.47.2049.
- [39] H. bo Xia, S. gang Wang, and H. feng Ben, “Microstructure and mechanical properties of Ti/Al explosive cladding,” *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 1014–1019, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.012.
- [40] D. M. Fronczek *et al.*, “Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing,” *Mater. Des.*, vol. 91, pp. 80–89, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.087.
- [41] R. Chulist, D. M. Fronczek, Z. Szulc, and J. Wojewoda-budka, “Texture transformations near the bonding zones of the three-layer Al / Ti / Al explosively welded clads,” *Mater. Charact.*, vol. 129, no. May, pp. 242–246, 2017, doi: 10.1016/j.matchar.2017.05.007.
- [42] H. Paul, A. Santana, P. Afonso, A. Zanin, and R. Wernke, “Microstructure and mechanical properties of Al / Ti composites produced by Conference explosive welding Costing models for capacity optimization Trade-off a Industry between used capacity operational efficiency Microstructure and mechanical proper,” vol. 00, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.343.
- [43] E. A. Brandes and G. B. Brook, Eds., *Smithells Metals Reference Book*, Seventh. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1992.
- [44] N. C. Kaushik and R. N. Rao, “Tribology International Effect of grit size on two body abrasive wear of Al 6082 hybrid composites produced by stir casting method,” *Tribology Int.*, vol. 102, pp. 52–60, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.015.
- [45] B. Stucker, “Analysis of Defect Generation in Ti-6Al-4V Parts Made using Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Processes,” *Addit. Manuf.*, 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.002.
- [46] Y. Zhang, D. Sun, X. Gu, and H. Li, “Microstructure and Mechanical Property Improvement in Laser-Welded TC4 Titanium Alloy and 301L Stainless Steel Joints Without Filler Metal,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 28, no. 1, pp. 140–153, 2019, doi: 10.1007/s11665-018-3753-4.
- [47] T. B. Mssalski, *Binary alloy phase diagrams. V. 2*. Ohio 44073: William W. Scott,

- Jr.
- [48] T. B. Massalski, *Binary alloy phase diagrams. V. 1.* Ohio 44073: William W. Scott, Jr.

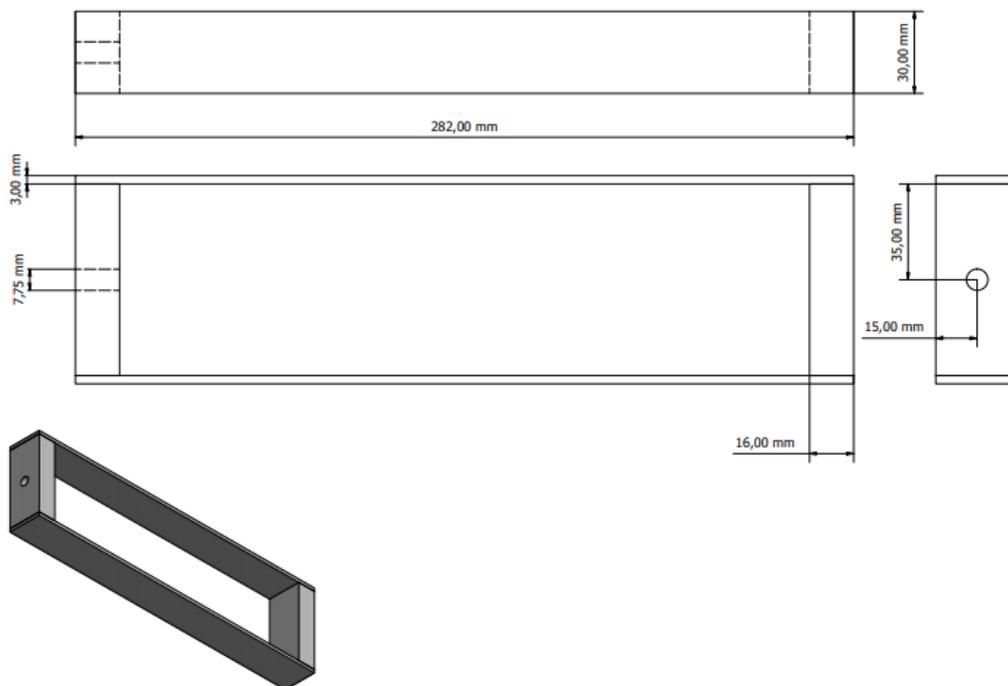


## APÊNDICE A

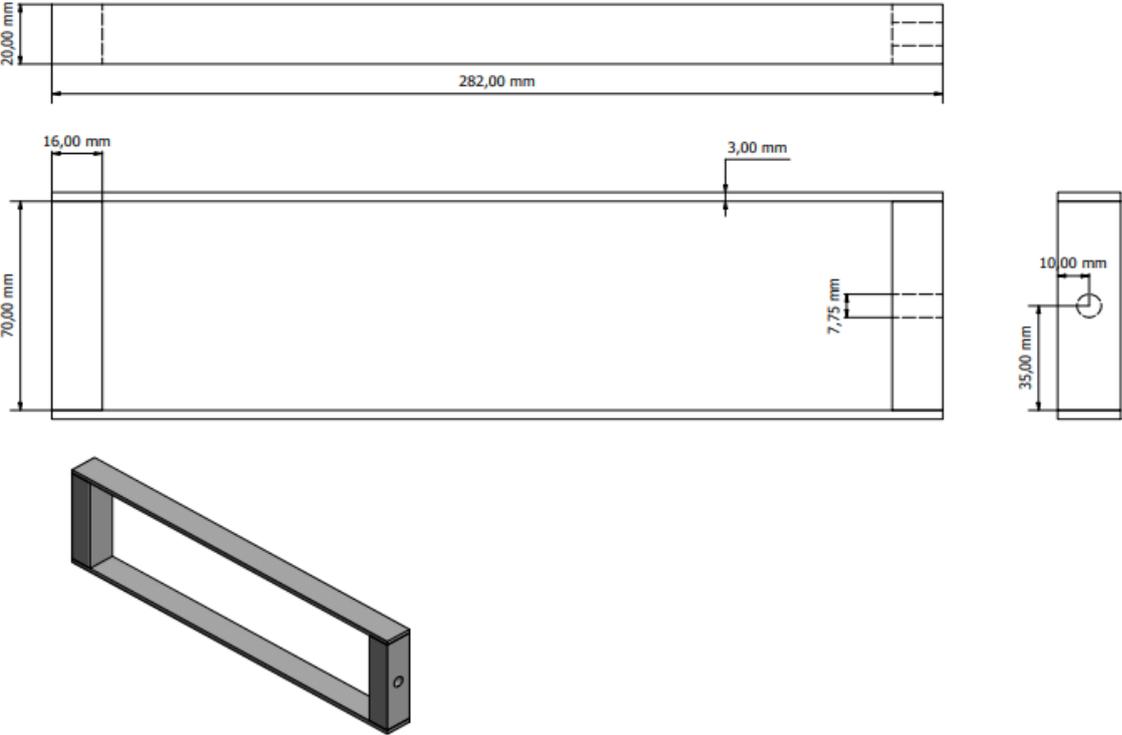
### Suporte das sondas de medição dos tempos de detonação



### Cofragem da carga explosiva da soldadura EW55



Cofragem da carga explosiva da soldadura EW56



## APÊNDICE B

Medidas dos provetes 1 e 2

