

Ricardo José Medina Pais Alves

# SOLDADURA POR EXPLOSÃO DE AÇO CARBONO A ALUMÍNIO

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica  
na Especialidade de Produção e Projeto

Coimbra, julho, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Soldadura por explosão de aço carbono a alumínio**

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

**Autor**

**Ricardo José Medina Pais Alves**

**Orientadores**

**Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**

**Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro</b> <b>Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão</b> <b>Professor Adjunto Convidado do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa</b>

**Coimbra, julho, 2017**



*“Every great and deep difficulty bears in itself its own solution. It forces us to change our thinking in order to find it.”*

Niels Bohr



## Agradecimentos

Este trabalho só foi possível graças ao apoio dos que me rodeiam. Face à impossibilidade de falar de todos sem exceção, o meu obrigado.

Gostaria de agradecer particularmente,

Ao grupo LEDAP, pela disponibilização da infraestrutura e dos materiais necessários ao processo de detonação.

Ao grupo CEMMPRE, pela disponibilização das infraestruturas e equipamentos que permitiram a execução deste trabalho.

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes, por toda a ajuda prestada na realização de soldaduras e sempre disponível para tirar dúvidas no que quer que fosse.

Ao Professor Doutor Rui Leal, pela sua contagiante boa disposição, pela prontidão com que me ajudou em qualquer que fosse o problema, sem a sua ajuda o trabalho não estaria concluído certamente.

Ao Professor Doutor Altino Loureiro, por toda a partilha de conhecimentos e experiência.

A todos os colegas no Gabinete de Tecnologia, particularmente ao Engenheiro Gustavo Senna por partilhar os seus conhecimentos na área.

Aos meus verdadeiros amigos de curso, eles sabem quem são, um mais profundo obrigado.

À minha mãe por todo o amor e educação que me deu.

Ao meu pai por abdicar do que quer que fosse, para que eu estivesse bem.

À minha irmã, por ser quem mais me ajuda.

Ao meu avô Vitor, por seres o meu herói. À minha avó Emília, por toda a preocupação e carinho. Em especial à minha avó Isabel, por apesar de já não estar presente, todo este trabalho é lhe dedicado.

Aos meus tios e primos, que sempre fizeram questão de estar presentes.

À Melanie, pela dedicação, entrega e por me acompanhar na minha vida.

Ao Ivo, apesar de estar bem longe, sempre fez questão de parecer estar perto.

Ao Miguel, pela presença ao longo destes quase 15 anos de amizade.





## Resumo

O objetivo deste trabalho é o estudo de juntas soldadas por explosão entre aço carbono e alumínio e analisar a influência dos parâmetros na morfologia da ligação.

Foram realizados seis ensaios experimentais utilizando diferentes misturas explosivas: emulsão explosiva com sensibilizantes e ANFO. Os ensaios que utilizaram emulsão explosiva não resultaram em soldaduras consistentes e foram caracterizados nas interfaces para identificar o motivo do insucesso nas soldaduras. Posteriormente, foi alcançado o sucesso na soldadura quando se utilizou ANFO, com velocidades de detonação inferiores à emulsão explosiva. Foi igualmente feita a caracterização ao nível macro e microestrutural bem como mecânico. Num último ensaio foram mantidas as mesmas condições do ensaio bem sucedido, fazendo apenas diminuir o rácio de explosivo, resultando numa soldadura muito inconsistente.

Após a caracterização das soldaduras, foi possível concluir que com o aumento da velocidade de detonação, a espessura de intermetálicos é superior, bem como as durezas próximas da interface são mais elevadas. Além disso, com o aumento da velocidade de detonação do explosivo, a percentagem em peso de alumínio decresce.

A janela de soldabilidade mostrou-se ser uma ferramenta útil para a seleção dos parâmetros da soldadura, uma vez que todos os ensaios com sucesso se encontram dentro da janela. Ainda foi possível verificar que a utilização de explosivos com velocidades de detonação inferiores são mais adequados para a realização das soldaduras destes dois materiais.

**Palavras-chave:** Compostos intermetálicos, Janela de soldabilidade, Rácio de explosivo, Velocidade de detonação, Soldadura no estado sólido, Interface de soldadura



## Abstract

The main goal of this work is the study of explosive welded joints between carbon steel and aluminum and the study of their parameters in the joint morphology.

Six experiments were performed, using ammonium nitrate-based emulsion explosive with the help of sensitizers and also Ammonium Nitrate/ Fuel Oil. The tests conducted with ammonium nitrate-based emulsion were unsuccessful, and were characterized in order to identify the main reasons for the welding failure. With the use of Ammonium Nitrate/ Fuel Oil and consequently lower detonation velocities than emulsion explosive. It was performed a metallographic analysis (macroscopic analysis, optical microscopy and scanning electron microscopy) and mechanical characterization of the joints. In the last experiment with Ammonium Nitrate/ Fuel Oil, it was tried to reduce the explosive ratio, but it resulted in a inconsistent welding.

After characterizing the welding samples, it was possible to conclude that for a higher detonation velocity the intermetallic layer is bigger and the hardness is higher near the interface. On the other hand, for an higher detonation velocity, the presence of aluminum in the intermetallics is lower.

The weldability window showed to be an useful tool for the selection of the welding parameters, once all the experiments that were successful were inside the weldability window. It was concluded that the welding of these two metals can be made preferentially with lower detonation velocities, such as Ammonium Nitrate/ Fuel Oil.

**Keywords** Intermetallic composites, Weldability window, Explosive ratio, Detonation velocity, Solid state welding, Welding interface



---

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas .....	xvi
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte .....	3
2.1. Contexto Histórico.....	3
2.2. Princípios do processo .....	4
2.2.1. Características da interface.....	6
2.2.2. Mecanismo de formação de ondas .....	7
2.2.3. Parâmetros do processo .....	9
2.2.4. Alternativas do processo.....	13
2.2.5. Vantagens e desvantagens do processo .....	14
2.2.6. Aplicações do processo .....	15
2.3. Janela de soldabilidade .....	16
2.3.1. Equações.....	16
2.3.2. Enquadramento no diagrama .....	18
2.4. A ligação Aço-Alumínio.....	20
3. Procedimento Experimental .....	25
3.1. Materiais e equipamentos .....	25
3.1.1. Material de base.....	25
3.1.2. Equipamentos utilizados.....	26
3.2. Nomenclatura utilizada .....	27
3.3. Montagem experimental .....	27
3.4. Medição da velocidade de detonação .....	28
3.5. Parâmetros de Soldadura .....	30
3.6. Análise Metalográfica.....	30
3.6.1. Preparação das amostras.....	30
3.6.2. Ataque químico .....	31
3.6.3. Análise microestrutural.....	31
3.6.4. Análise Química .....	31
3.7. Análise Mecânica.....	32
3.7.1. Microdureza.....	32
3.7.2. Ensaio de tração ao corte .....	32
4. Apresentação e Discussão de Resultados .....	33
4.1. Parâmetros de soldadura .....	33
4.1.1. Janela de soldabilidade .....	33
4.1.2. Velocidade de detonação .....	34

4.1.3.	Velocidade de projeção .....	34
4.1.4.	Ângulo dinâmico de colisão .....	35
4.1.5.	Enquadramento dos ensaios .....	36
4.2.	Análise macroscópica .....	36
4.2.1.	EW23.....	36
4.2.2.	EW25.....	37
4.2.3.	EW27.....	38
4.2.4.	EW29.....	38
4.2.5.	EW31.....	39
4.2.6.	EW35.....	39
4.3.	Análise microscópica.....	40
4.3.1.	EW23.....	40
4.3.2.	EW27.....	40
4.3.3.	EW29.....	41
4.3.4.	EW35.....	41
4.4.	Microdureza.....	42
4.4.1.	Materiais base.....	42
4.4.2.	Microdureza dos ensaios .....	43
4.5.	Análise da interface .....	46
4.5.1.	EW23.....	46
4.5.2.	EW27.....	48
4.5.3.	EW29.....	50
4.5.4.	EW35.....	53
4.5.5.	Discussão dos resultados .....	54
4.6.	Análise mecânica .....	56
4.6.1.	Ensaio de tração ao corte .....	56
5.	Conclusão .....	59
	Referências Bibliográficas .....	61
	APÊNDICE A .....	65
	APÊNDICE B .....	67
	APÊNDICE C .....	69
	APÊNDICE D .....	71
	APÊNDICE E.....	73
	APÊNDICE F .....	75

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão, adaptada de Blazynski (1983). .....	5
Figura 2.2. Esquema do processo de soldadura por explosão durante a detonação, adaptada de Patterson (1993).....	6
Figura 2.3. Diferentes tipos de interface: a) interface plana; b) interface ondulada ; c) interface com camada de material fundido (Cowan et al. 1971).....	7
Figura 2.4. Esquema da formação de ondas, adaptada de Abrahamson (1961).....	8
Figura 2.5. Esquema da formação de ondas, adaptada de Bahrani et al. (1967). .....	8
Figura 2.6. Instabilidade de Kelvin-Helmholtz (Carton 2004).....	9
Figura 2.7. Esquema da formação vórtices, adaptada de Blazynski (1983).....	9
Figura 2.8. Influência do rácio na interface na soldadura por explosão, adaptada de Gulenc (2008). .....	11
Figura 2.9. Influência da STD na interface na soldadura por explosão, adaptada de Durgutlu et al. (2008). .....	12
Figura 2.10. Configuração inclinada, adaptada de Blazynski (1983).....	13
Figura 2.11. Configuração cilíndrica, adaptada de Mendes et al. (2013).....	14
Figura 2.12. Utilização de placa intermédia na configuração paralela, adaptada de Han et al. (2003). .....	14
Figura 2.13. Janela de soldabilidade e seus limites, adaptada de Mendes et al. (2013).....	16
Figura 2.14. Diagrama de fases em equilíbrio Aço alumínio, adaptada de Kattner & Burton (1992). .....	21
Figura 2.15. Interface das soldaduras para placa intermédia de: a) 0,2mm; b) 0,5mm; c) 1mm; d) 2mm; adaptada de Han et al. (2003).....	22
Figura 3.1. Microestrutura do: a) Aço carbono DC06; b) Alumínio AA6082-T6. ....	26
Figura 3.2. Montagem da caixa de soldadura EW23.....	28
Figura 3.3. a) Circuito elétrico típico para a medição de velocidade de detonação; b) Osciloscópio digital.....	29
Figura 3.4. Medição de velocidade de detonação: a) Sonda individual; b) Conjunto de sondas. ....	29
Figura 3.5. Provete EW29LT1 utilizado no ensaio de tração.....	32
Figura 4.1. Janela de soldabilidade DC06-AA6082-T6. ....	33
Figura 4.2. Cálculo da Velocidade de projeção do ensaio EW29. ....	35

---

Figura 4.3. Enquadramento dos ensaios na janela de soldabilidade. ....	36
Figura 4.4. Análise macroscópica da soldadura EW23: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas. ....	37
Figura 4.5. Análise macroscópica da soldadura EW25: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas. ....	37
Figura 4.6. Análise macroscópica da soldadura EW27: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas. ....	38
Figura 4.7. Análise macroscópica da soldadura EW29: a) Vista de topo; b) Vista de lado.	38
Figura 4.8. Análise macroscópica da soldadura EW31: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas. ....	39
Figura 4.9. Análise macroscópica da soldadura EW35: a) Vista de topo; b) Vista lateral.	39
Figura 4.10. Análise microscópica do ensaio EW23L: a) Placa voadora; b) placa base. ...	40
Figura 4.11. Análise microscópica do ensaio EW27L: a) Placa voadora; b) placa base. ...	41
Figura 4.12. Análise microscópica da interface no provete: a) EW29L e b) EW29T. ....	41
Figura 4.13. Análise microscópica do provete EW35L. ....	42
Figura 4.14. Dureza média dos materiais base: a) Aço DC06; b) AA6082-T6. ....	42
Figura 4.15. Perfis de dureza dos provetes: a) EW23; b) EW27; c) EW29; d) EW35. ....	44
Figura 4.16 Sobreposição dos perfis de durezas. ....	45
Figura 4.17 Análise ao aumento médio de dureza com: a) Rácio; b) Velocidade de detonação. ....	46
Figura 4.18 Zona da interface no ensaio EW23: a) Placa voadora; b) Placa base. ....	46
Figura 4.19 Microscopia eletrónica de varrimento do ensaio EW23FL. ....	47
Figura 4.20 Zona da interface no ensaio EW27: a) Placa voadora; b) Placa base. ....	48
Figura 4.21. Microscopia eletrónica de varrimento EW27FL: a) e b) Placa voadora; c) e d) Placa base. ....	49
Figura 4.22. Zona da interface do ensaio EW29: a) Longitudinal; b) Transversal. ....	51
Figura 4.23. Microscopia eletrónica de varrimento do provete EW29L. ....	51
Figura 4.24. Zona da interface do ensaio EW35. ....	53
Figura 4.25. Microscopia eletrónica de varrimento do provete EW35L. ....	53
Figura 4.26 Análise ao aumento da espessura de intermetálico com: a) Velocidade de detonação; b) Rácio. ....	55
Figura 4.27 Influência da velocidade de detonação com: a) Variação da dureza dos intermetálicos; b) Variação da percentagem em peso de alumínio. ....	56
Figura 4.28 Ensaio de tração ao corte: a) Curvas de tensão-deformação; b) Mapa de deformações nos provetes; c) Microscopia eletrónica de varrimento do provete EW29LT1. ....	57

---



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Microdurezas e estrutura cristalina dos intermetálicos. Adaptada de (Tricarico et al. 2009) e (Rathod & Kutsuna 2004). .....	23
Tabela 3.1. Composição química do aço carbono DC06 (%). .....	25
Tabela 3.2. Composição química do Alumínio 6082-T6 (%). .....	25
Tabela 3.3. Parâmetros específicos de cada soldadura. ....	30
Tabela 4.1. Medição das velocidades de detonação. ....	34
Tabela 4.2. Valores calculados do ângulo dinâmico de colisão e velocidade de projeção. 35	
Tabela 4.3. Espectros do provete EW23FL, com percentagem em peso de cada elemento. ....	47
Tabela 4.4. Espectros do provete EW27FL, com percentagem em peso de cada elemento. ....	50
Tabela 4.5. Espectros do provete EW29L, com percentagem em peso de cada elemento..	52
Tabela 4.6. Espectros do provete EW35L, com percentagem em peso de cada elemento..	54
Tabela A.1. Parâmetros para cálculo da velocidade de Gurney. ....	73



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\alpha$  – Inclinação inicial na configuração inclinada

$\beta$  – Ângulo dinâmico de colisão

C – Massa de explosivo

$C_1, C_2$  – Constantes empíricas

$C_b$  – Velocidade de propagação do som num material

$C_{b,f}$  – Velocidade de propagação do som na placa voadora

$C_{b,b}$  – Velocidade de propagação do som na placa base

$\sqrt{2E}$  – Energia de Gurney

HV<sub>b</sub> – Dureza Vickers da placa base

HV<sub>f</sub> – Dureza Vickers da placa voadora

$k_1$  – Constante empírica de limpeza do material

M – Massa da placa voadora

N – Constante empírica de Walsh

$p_{cj}$  – Pressão de Chapman-Jouguet

$\rho_b$  – Densidade da placa base

$\rho_v$  – Densidade da placa voadora

R – Rácio de explosivo

$Re_{cr}$  – Número de Reynolds

$t_0$  – Instante de tempo inicial

$T_{m,f}$  – Temperatura de fusão da placa voadora

$V_c$  – Velocidade do ponto de colisão

$V_p$  – Velocidade de projecção

$V_L$  – Velocidade longitudinal

$V_S$  – Velocidade transversal

$V_{explosivo}$  – Volume de explosivo

$V_{p,Gurney}$  – Velocidade de projeção de Gurney

$V_{c,min}$  – Velocidade do ponto de colisão mínima

$V_{c,tr}$  – Velocidade do ponto de colisão de transição

$V_p(t)$  – Velocidade de projeção em função do tempo

$V_{p,cal}$  – Velocidade de projeção de calibração

## **Siglas**

ANFO – *Ammonium Nitrate / Fuel Oil*

CEMMPRE – Centro de Engenharia Mecânica Materiais e Processos

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DMC – *DeLorean Motor Company*

EDS- *Energy-Dispersive X-ray spectroscopy*

EPS- *Expanded Polystyrene*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPN – Instituto Pedro Nunes

LEDAP – Laboratório de Energética o e Detónica, Associação de Apoio

MDF – *Medium Density Fiberboard*

MOP – Microesferas ocas de plástico

MOV – Microesferas ocas de vidro

PETN – *Pentaerythritol Tetranitrate*

RDX – *1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazinane (Hexogen)*

SEM – *Scanning electron microscope*

STD – *Stand-off distance*

TNT – *Trinitrotoluene*

WIF – *Wave Interface Factor*

## 1. INTRODUÇÃO

A soldadura de materiais metálicos dissimilares é necessária quando se pretende a obtenção de componentes com propriedades distintas. Neste aspeto, as soldaduras no estado sólido são cada vez mais recorrentes, uma vez que os materiais não necessitam de ter propriedades semelhantes, como é o caso da temperatura de fusão para a soldadura convencional. A soldadura entre aço e alumínio, permite aliar a baixa densidade do alumínio à maior resistência mecânica apresentada no aço, no entanto a sua soldadura é bastante complicada com métodos tradicionais, devido a se tratarem de materiais com propriedades distintas, como por exemplo as diferentes temperaturas de fusão.

A soldadura por explosão vem permitir a ligação de materiais com características muito díspares, como a ligação aço-alumínio, no entanto esta soldadura possui parâmetros muito específicos para que a mesma tenha sucesso. Uma das maiores dificuldades prende-se no comportamento que cada combinação de explosivo irá ter aquando da detonação, pelo que se deve conhecer bem o explosivo que se irá utilizar na soldadura. Neste sentido, o objetivo desta dissertação é o estudo de juntas soldadas por explosão, entre o aço carbono e o alumínio, e daí a tentativa de perceber até que ponto esta tecnologia é viável para o uso destes materiais em específico.

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. Após este capítulo, segue-se o estado da arte, onde é feita a apresentação desta tecnologia de soldadura e da janela de soldabilidade muito frequentemente utilizada antes de se realizar qualquer soldadura. Foi feita ainda uma análise à ligação entre os materiais utilizados neste trabalho. No terceiro capítulo é apresentado o procedimento experimental, que contém os materiais e equipamentos utilizados, o modo como foi feita a montagem experimental e a definição dos parâmetros de soldadura em cada um dos ensaios. Foi ainda apresentado o procedimento utilizado em cada um dos tipos de análise efetuados. No quarto capítulo foi feita simultaneamente a apresentação e discussão dos resultados. Inicialmente foi construída a janela de soldabilidade e enquadrada para os materiais aplicados, seguindo-se das análises efetuadas, quer macroscópica, quer microscópica, quer ainda microdureza. Foi feita ainda uma análise à interface de soldadura de modo a tentar caracterizar os intermetálicos

resultantes em cada ensaio. Por fim, no último capítulo foram retiradas as conclusões da análise dos resultados apresentados e discutidos anteriormente, bem como apresentadas propostas de trabalhos futuros.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Contexto Histórico

Como muitas tecnologias, a soldadura por explosão foi desenvolvida em tempos de guerra. Foi observada pela primeira vez na 1ª Guerra Mundial, onde os estilhaços disparados por explosivos estavam soldados em superfícies metálicas (Carpenter & Wittman 1975). No entanto, foi apenas em 1944, em plena 2ª Guerra Mundial, que L.R. Carl fez testes em dois discos, utilizados para posicionar cargas explosivas, naquilo que foi por ele considerado uma soldadura no estado sólido, uma vez que durante os seus testes não foram reveladas zonas fundidas na interface (Young 2004).

Posteriormente, foram feitos poucos estudos nesta tecnologia, até que Philipchuk, o pai do termo “soldadura por explosão”, encontrou um potencial uso comercial para esta tecnologia em 1957 (Crossland 1976). Este notou, ao acaso, nos seus trabalhos sobre a conformação de perfis em U de alumínio numa matriz em aço por explosão, que partes do perfil ficaram soldados à matriz durante a operação. Prosseguiu assim os seus estudos agora na soldadura por explosão, chegando a publicar um método que acabou por ser patenteado. No entanto, esse método era pouco eficaz, por não se conhecer devidamente os parâmetros que influenciavam o processo. Para além do desconhecimento dos parâmetros, era difícil converter a energia da onda de choque em calor, sendo que a ligação só era possível se a força de compressão fosse durante tempo o suficiente para se dar a ligação (Deribas et al. 1967).

Entre 1946 e 1948, uma equipa de investigadores liderada por M. A. Lavrent'ev em Kiev conseguiu obter um compósito metálico aço-cobre enquanto investigavam cargas explosivas moldadas, onde era bem visível uma interface ondulada, característica deste processo (Deribas et al. 1967).

Entretanto nos anos 60, Arnold Holtzman e a sua equipa da *DuPont* desenvolveram esforços para a investigação da soldadura por explosão, tendo estes chegado a patentear o processo. Essa patente foi aceite em 1964, que, apesar de ser semelhante à patente Philipchuk, já levava em conta a importância da velocidade de detonação e a

possibilidade de unir múltiplas juntas sobrepostas (Deribas et al. 1967). Posto isto, a *DuPont* em 1965 estava em condições de começar a comercializar componentes bi-metálicas (Young 2004).

Atualmente o mercado de peças soldadas por explosão na Europa é detido principalmente por duas empresas: *NobelClad*, empresa francesa que foi adquirida em 1996 pela DMC (*DeLorean Motor Company*) e pela *ExploMet*, empresa localizada na Polónia, que detêm o mercado no leste Europeu. Para além disso, existe uma investigação contínua, de modo a conhecer melhor a influência dos parâmetros de soldadura e também a otimizar o processo, sendo que atualmente existe uma vasta gama de combinações de metais possíveis para realizar soldadura por explosão.

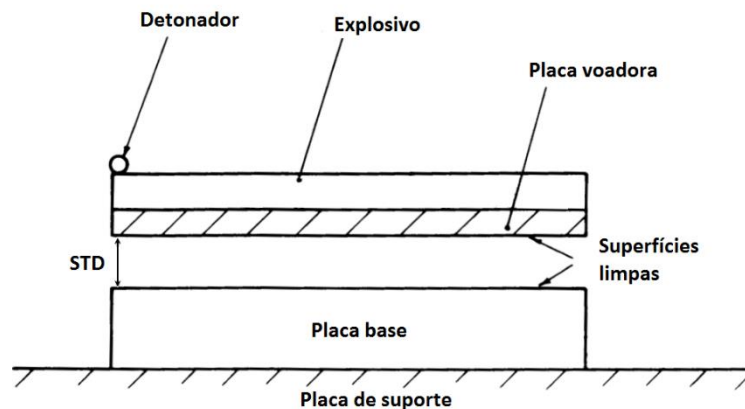
## 2.2. Princípios do processo

A soldadura por explosão é considerada uma soldadura no estado sólido, sendo que a maior vantagem deste tipo de processo é que não sofre das limitações de soldadura por fusão, como por exemplo a necessidade dos materiais base possuírem pontos de fusão idênticos. Isto é, no caso da soldadura por fusão é necessário que a interface esteja devidamente fundida para que haja soldadura. Tal não é necessário na soldadura por explosão, embora por vezes seja observável na zona da interface a presença de material fundido (Blazynski 1983).

Apesar das elevadas temperaturas causadas pela detonação do explosivo, o tempo para se realizar a soldadura é muito curto, não havendo uma transferência de calor significativa entre a placa voadora e a placa base. Numa situação ideal, a soldadura por explosão não deverá conter material fundido (Nobili et al. 1999).

Na Figura 2.1 está ilustrada a montagem típica utilizada no processo de soldadura por explosão, numa configuração paralela, onde é possível observar os constituintes utilizados na soldadura por explosão. Para além desta configuração pode existir ainda uma configuração inclinada e a configuração cilíndrica (Deribas et al. 1967; Mendes et al. 2013).





**Figura 2.1.** Configuração paralela do processo de soldadura por explosão, adaptada de Blazynski (1983).

Os constituintes típicos deste processo são:

- Detonador;
- Explosivo;
- Placa voadora;
- Placa base;
- Placa de suporte

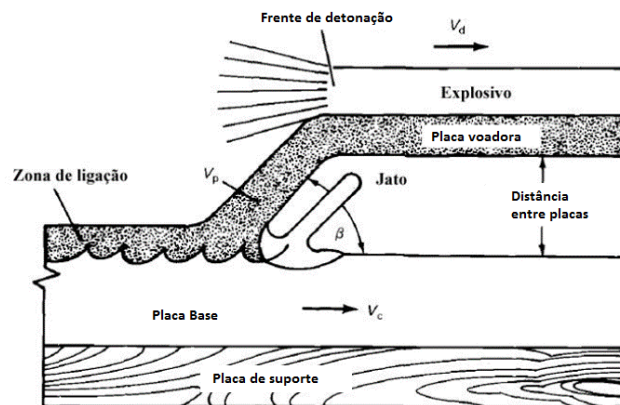
O detonador é um elemento acionado remotamente que tem como função dar início à detonação. O explosivo é colocado no topo da placa voadora uniformemente, de modo a que a detonação se dê de forma progressiva. Entre a placa voadora e a placa base é necessário impor uma determinada distância, designada por *stand-off distance* (STD) adequada ao processo de soldadura, fundamental para este processo de soldadura, uma vez que o explosivo necessita de estar a uma determinada distância para atingir a velocidade desejada. Por fim, a placa base poderá ser assente numa placa de suporte, de modo a haver uma melhor absorção do impacto causado pela detonação.

O processo de soldadura por explosão pode ser subdividido em três etapas distintas:

- Detonação do explosivo;
- Aceleração e deformação da placa voadora;
- Colisão entre a placa voadora e a placa base.

Na Figura 2.2 está representado o mecanismo de funcionamento da soldadura por explosão a uma determinada velocidade de detonação ( $V_d$ ), que se inicia devido à expansão dos gases da detonação (Nobili et al. 1999). Quando a detonação é iniciada, a placa voadora é projetada a uma inclinação ( $\beta$ ) e velocidade de projeção ( $V_p$ ), dependem do tipo e

da quantidade de explosivo, das propriedades mecânicas da placa voadora e ainda da STD (Lince 1997; Patterson 1993). Estas velocidades deverão ser inferiores à velocidade do som no material para que se dê uma melhor soldadura (Findik 2011). A detonação deve ser progressiva sobre a superfície da placa voadora, sendo que neste aspeto a seleção do explosivo é de extrema importância para a obtenção de boas soldaduras, devendo este promover uma detonação uniforme para que a velocidade do ponto de colisão ( $V_c$ ) seja uniforme (Findik 2011; Lince 1997). Quando se dá a colisão existe ainda a formação de um jato através do contacto entre as superfícies das placas. Quaisquer contaminantes, óxidos ou impurezas serão removidos pelo jato, sendo que no ponto de colisão, estas superfícies limpas sofrem o impacto a elevadas pressões (Nobili et al. 1999).



**Figura 2.2.** Esquema do processo de soldadura por explosão durante a detonação, adaptada de Patterson (1993).

### 2.2.1. Características da interface

Na soldadura por explosão, um dos aspetos mais discutidos é o tipo de interface apresentado. Existem três tipos de interface (Findik 2011):

- Interface plana;
- Interface ondulada;
- Interface com camada de material fundido.

Cowan et al. (1971) fizeram variar a velocidade do ponto de colisão nos seus ensaios de soldadura por explosão de níquel a aço, de modo a conseguir obter os três tipos de interface apresentados na Figura 2.3. No caso: Figura 2.3 a) interface plana, com uma velocidade do ponto de colisão de 1600m/s; Figura 2.3 b) interface ondulada, com uma

velocidade do ponto de colisão de 1900m/s; Figura 2.3 c) interface ondulada com camada de material fundido, com uma velocidade do ponto de colisão de cerca de 2500m/s.



**Figura 2.3.** Diferentes tipos de interface: a) interface plana; b) interface ondulada ; c) interface com camada de material fundido (Cowan et al. 1971).

Grande parte das soldaduras com interface ondulada possuem zonas de material fundido, proveniente do jato de material, que normalmente se localiza antes e depois da onda. Quando é excessivo, a presença do material fundido conduz a problemas de ductilidade e resistência na união. Por outro lado, quando a velocidade do ponto de colisão é abaixo do valor necessário para os materiais a soldar, obtém-se uma interface plana. Apesar desta apresentar propriedades mecânicas satisfatórias na maioria dos casos, em outros pode significar a falta de ligação entre a placa voadora e placa de base (Lince 1997).

### 2.2.2. Mecanismo de formação de ondas

Embora uma linha de interface sem ondas apresente boas propriedades mecânicas, é preferível uma interface ondulada, que mostra que o material foi trabalhado mecanicamente (Carton 2004). O mecanismo de formação de ondas não é consensual entre autores, pelo que existem diversas teorias para a explicação do fenómeno:

- Mecanismo de indentação do jato (Abrahamson 1961; Bahrani et al. 1967);
- Mecanismo de fluxo instável (Hunt 1967);
- Mecanismo formação de vórtices (Cowan & Holtzman 1963).

#### 2.2.2.1. Mecanismo de indentação do jato

Este mecanismo foi apresentado pela primeira vez por Abrahamson (1961) apresentado na Figura 2.4, que ditou que a ação de indentação do jato forma ondas na placa base (Figura 2.4 a)). No ponto de colisão, a placa de base é deformada devido ao momento angular causado pelo jato de material da placa voadora, formando assim uma curvatura logo

após o ponto de colisão devido ao material removido pelo jato que o encaminha para a placa voadora (Figura 2.4 b)). Assim, este jato formado por material da placa base que irá ocupar a curvatura na placa voadora e permite a continuação do mesmo (Blazynski 1983; Carton 2004).

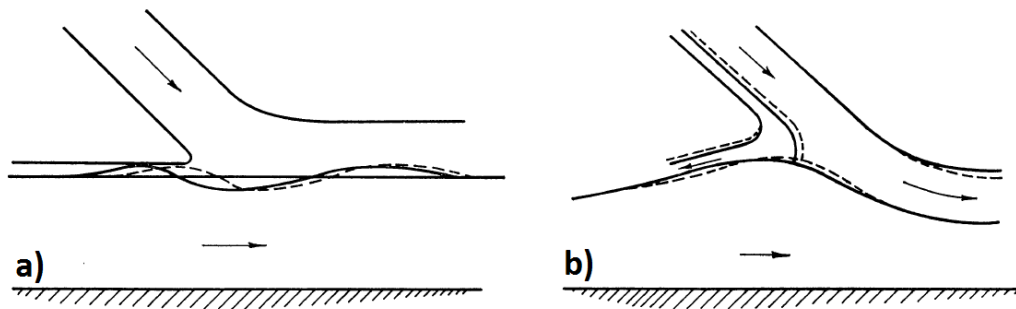


Figura 2.4. Esquema da formação de ondas, adaptada de Abrahamson (1961).

Foram feitos estudos mais detalhados por (Bahrani et al. 1967) que atribuem a indentação ao jato de reentrada e ainda caracterizam a formação de vórtices devido interação entre a curvatura e o jato de reentrada (Blazynski 1983), conforme é representado na Figura 2.5.

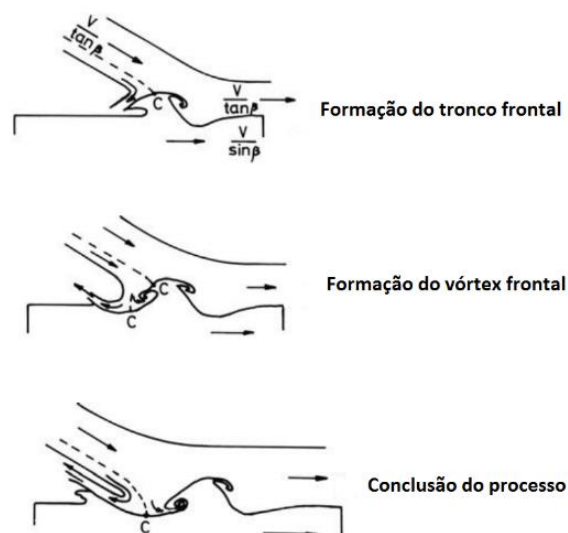


Figura 2.5. Esquema da formação de ondas, adaptada de Bahrani et al. (1967).

#### 2.2.2.2. Mecanismo de fluxo instável

Este mecanismo foi apresentado por (Hunt 1967), na qual não só corrigiu falhas apresentadas nas teorias anteriores, como também ditou que é necessária uma grande deformação na zona da interface onde a soldadura começa, bem como havia a incerteza na formação da onda seguinte. Segundo este, a formação de ondas na soldadura por explosão é

devido à instabilidade de Kelvin-Helmholtz ilustrado na Figura 2.6, fazendo uma analogia com a formação de vórtices entre dois líquidos a velocidades diferentes (Carton 2004). Segundo Hunt (1967), a diferença de velocidades ocorre entre a placa base e o jato de reentrada. Mais tarde, para (Robinson 1975), essa diferença de velocidades entre materiais na interface dava-se entre a placa base e a saliência criada pelo jato.



Figura 2.6. Instabilidade de Kelvin-Helmholtz (Carton 2004).

### 2.2.2.3. Mecanismo de formação de vórtices

Segundo Cowan & Holtzman (1963), este mecanismo dita que a formação de ondas se deve a pontos de estagnação que funcionam como um obstáculo e levam à formação de vórtices, análogo à formação de vórtices de *von Karman*. Este processo pode ser observado na Figura 2.7.

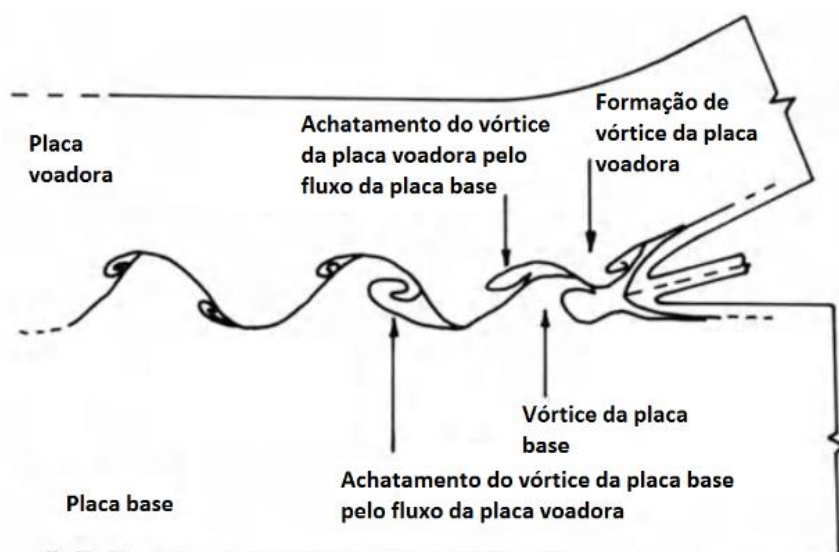


Figura 2.7. Esquema da formação vórtices, adaptada de Blazynski (1983).

### 2.2.3. Parâmetros do processo

É necessário fazer-se uma análise completa e prévia aos diversos parâmetros que podem influenciar a qualidade da soldadura, visto que este tipo de soldadura não permite a otimização dos parâmetros aquando da realização da mesma. Os principais parâmetros, que influenciam o processo são as velocidades de projeção ( $V_p$ ), velocidade do ponto de colisão

( $V_c$ ), velocidade de detonação ( $V_d$ ), e o ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ ). Estes parâmetros podem ser alterados através da seleção do explosivo, variação da distância entre placas, alteração da geometria da configuração, conforme serão explicados posteriormente.

### **2.2.3.1. Seleção do explosivo**

A seleção do explosivo corresponde a um passo importante, uma vez que este faz depender os seguintes parâmetros:

- Velocidade de detonação ( $V_d$ );
- Velocidade de projeção ( $V_p$ );
- Velocidade do ponto de colisão ( $V_c$ );
- Ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ );

Na escolha do explosivo é necessário ter em conta que a velocidade de detonação ( $V_d$ ) é uma propriedade do explosivo, sendo que normalmente deve-se escolher um explosivo cuja velocidade de detonação esteja entre os 1500m/s e 3500m/s. Os explosivos deverão ser fáceis de espalhar numa camada uniforme e sem porosidades. Deverão ainda ser sensíveis o suficiente para detonar à mínima espessura. Para esta aplicação já foram utilizados explosivos como, Emulsão explosiva, nitroglicerina em poros, mistura de TNT (*Trinitrotoluene*) -nitrato de amónio e mistura PETN (*Pentaerythritol tetranitrate*) -nitrato de amónio (Blazynski 1983).

#### **2.2.3.1.1. Sensibilizantes**

Alguns explosivos necessitam de sensibilizantes para uma detonação mais adequada, como é o caso do ANFO ou Emulsões Explosivas, que tem uma sensibilidade baixa à detonação. A Emulsão Explosiva, por exemplo, possui uma velocidade de detonação muito elevada para obter soldaduras com sucesso. O uso de sensibilizantes com emulsão explosiva provou que a densidade e a velocidade de detonação estão ligadas numa escala linear, pelo que uma redução de densidade permite obter velocidades de detonação inferiores (Mendes et al. 2013). Para isso, o uso de microesferas ocas de vidro (MOV) ou microesferas ocas poliméricas (MOP) como sensibilizante irá reduzir a densidade do explosivo e portanto espera-se que a velocidade de detonação seja inferior (Mendes et al. 2014).

### 2.2.3.1.2. Explosivo plástico

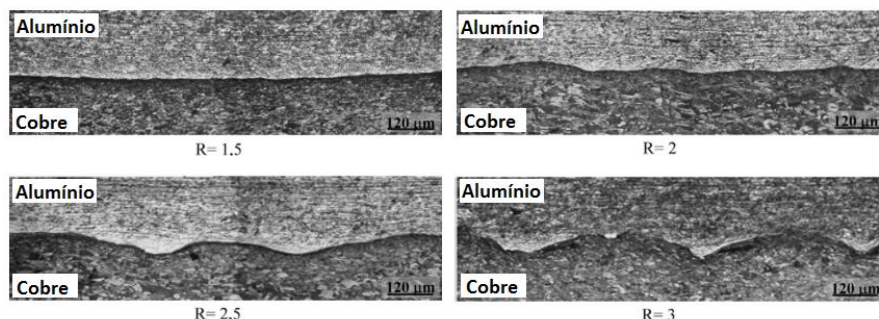
Os explosivos plásticos têm tipicamente uma velocidade de detonação ( $V_d$ ) muito superior aos explosivos utilizados na soldadura por explosão, pelo que não é recomendado o seu uso isolado para obter soldaduras. O RDX (*1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazinane (Hexogen)*), muito frequentemente utilizado como complemento ao explosivo, possui uma velocidade de detonação na ordem dos 8000m/s, velocidade totalmente incomportável para a obtenção de soldaduras. No entanto, alguns explosivos possuem uma sensibilidade baixa, como é o caso das emulsões explosivas, pelo que pode ser utilizado um explosivo plástico para auxiliar a detonação. Estes que possuem uma elevada sensibilidade, sendo que quando o detonador é acionado irá atuar sobre o explosivo plástico. Quando este é detonado, a frente de detonação será mais uniforme quando atingir o explosivo principal.

### 2.2.3.2. Rácio de explosivo

Para além de ter em conta a escolha do explosivo, a quantidade de explosivo é de grande importância, uma vez que esta irá influenciar o rácio, que afeta a qualidade da soldadura. O rácio de explosivo (R) é a razão entre a massa de explosivo (C) e a massa da placa voadora (M), por unidade de área, sendo expressa pela Equação (2.1)

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

A variação do rácio conduz a alterações na morfologia da interface. Como é possível observar na Figura 2.8, o aumento do rácio conduz a um aumento da deformação da interface, podendo em certo ponto levar à formação de ondas e aumentar o seu comprimento e amplitude.



**Figura 2.8.** Influência do rácio na interface na soldadura por explosão, adaptada de Gulenc (2008).

Nos seus estudos, Gulenc (2008) observou que numa soldadura alumínio cobre, para um rácio 1,5 a interface apresentada era praticamente plana. À medida que aumentava

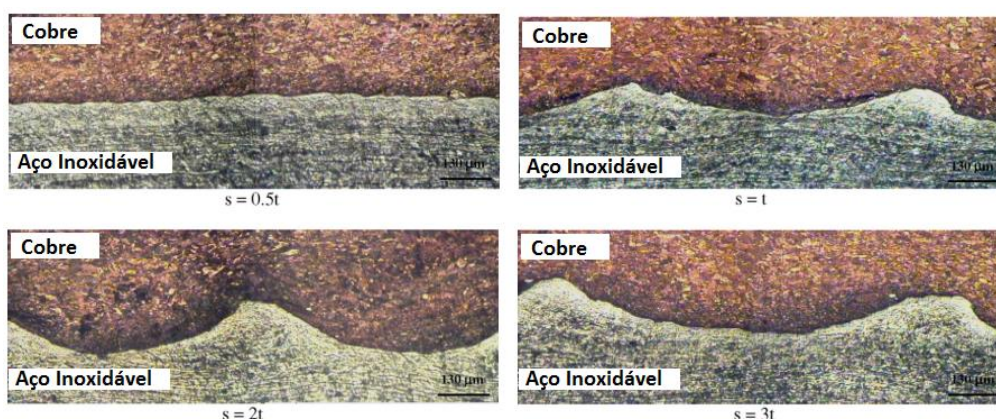
o rácio, a interface teria tendência a ser ondulada, apresentando melhores características mecânicas, havendo ainda um aumento da dimensão e alteração da forma das ondas. O aumento de rácio conduz ainda a um aumento da velocidade e pressão de impacto, pelo que quando estes parâmetros são superiores, a deformação na interface, amplitude e comprimento da onda aumentam. No entanto concluiu ainda que um rácio de explosivo excessivo conduzia à formação excessiva de intermetálicos na interface, bem como um rácio de explosivo demasiado baixo não promovia a ligação.

É, portanto, conveniente otimizar um valor de rácio de explosivo para a soldadura que se deseja efetuar, uma vez que este depende da massa de explosivo e da massa da placa voadora.

### 2.2.3.3. *Stand-off distance (STD)*

Uma variação da STD também promove uma variação da morfologia da interface. Esta está diretamente relacionada com a espessura da placa voadora, pelo que esta distância deverá ser no mínimo superior a metade da espessura da placa voadora, para que esta adquira uma velocidade de projeção mínima necessária, sendo que no limite esta distância pode ser até três vezes superior (Durgutlu et al. 2008).

Durgutlu et al. (2008) nos seus estudos fez variar a STD desde metade da espessura da placa voadora até três vezes, tendo concluído que para uma baixa STD a interface tenderia a ser plana. Verificou ainda que havia a formação de ondas, um aumento do comprimento e amplitude das mesmas para um aumento a STD.



**Figura 2.9.** Influência da STD na interface na soldadura por explosão, adaptada de Durgutlu et al. (2008).



## 2.2.4. Alternativas do processo

Para além da configuração plana do processo de soldadura representada na Figura 2.1, existem configurações alternativas, que são igualmente utilizadas para a soldadura por explosão:

- Configuração inclinada;
- Configuração tubular;
- Placa intermédia.

### 2.2.4.1. Configuração inclinada

Esta configuração foi utilizada pela primeira vez por Davenport e Dunvall em Junho de 1961 (Deribas et al. 1967). Esta é semelhante à configuração paralela, tendo uma inclinação inicial  $\alpha$ , sendo que quando a detonação se desenvolve, o ângulo dinâmico de colisão passa a ser  $(\beta + \alpha)$ .

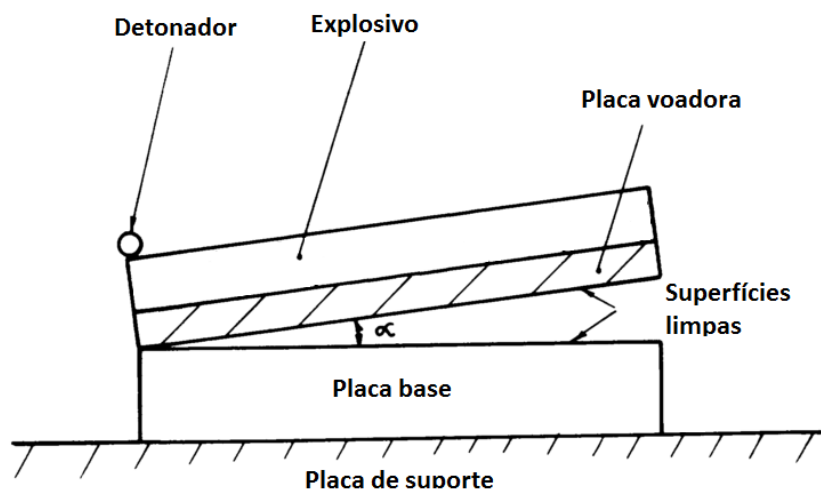


Figura 2.10. Configuração inclinada, adaptada de Blazynski (1983).

### 2.2.4.2. Configuração tubular

A soldadura por explosão também pode ser utilizada para soldar cilindros e tubos. Neste caso, utiliza-se uma configuração alternativa, representada na Figura 2.11, utilizada por (Mendes et al. 2013) para realizar soldadura entre um tubo aço inoxidável e um cilindro de aço carbono. O explosivo é colocado no exterior do tubo de aço inoxidável, sendo que com a detonação este irá colidir sobre o aço carbono, previamente espaçado do aço inoxidável.

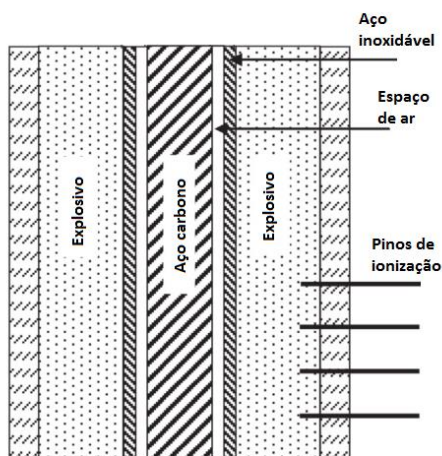


Figura 2.11. Configuração cilíndrica, adaptada de Mendes et al. (2013).

### 2.2.4.3. Placa intermédia

O uso da placa intermédia tem como finalidade a redução da energia dissipada na explosão, de modo a evitar um excesso de camada fundida de material (Hokamoto et al. 1993). A configuração é semelhante à paralela, com a inclusão de uma placa intermédia entre as placas e ainda de uma nova STD, como é possível observar na Figura 2.12.

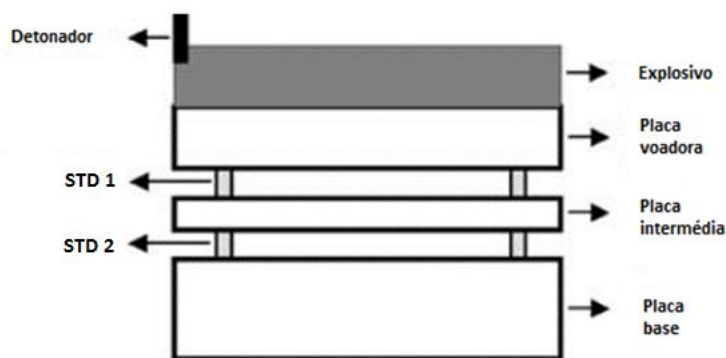


Figura 2.12. Utilização de placa intermédia na configuração paralela, adaptada de Han et al. (2003).

### 2.2.5. Vantagens e desvantagens do processo

Segundo Blazynski (1983) e Findik (2011), as principais vantagens do processo são:

- Utilizado para uniões dissimilares, entre materiais com propriedades distintas;
- Processo sem necessidade de fusão dos materiais;
- Adquire boas propriedades de ligação;

- 
- Mantém as propriedades dos materiais base;
  - Possibilidade de soldar sobre grandes áreas;
  - Processo económico;
  - Possibilidade de soldadura em condições ambientais diversas;
  - Possibilidade de soldadura por controlo remoto;
  - Simplicidade do processo;
  - Pequenas quantidades de explosivo utilizadas;
  - Grandes variedades de espessura podem ser unidas;
  - Possibilidade de soldar em grande escala com uma só detonação.

As desvantagens que Findik (2011) aponta são:

- Os metais têm de ter elevada resistência ao impacto e ductilidade;
- É necessário grande cuidado e proteção na óptica do operador;
- Uso industrial de explosivos necessita de licença específica;
- As geometrias a soldar deverão ser simples (planas, cilíndricas ou cónicas).

### **2.2.6. Aplicações do processo**

Algumas aplicações do processo são descritas por Findik (2011) e Blazynski (1983):

- União de tubos;
- Recipientes de pressão;
- Uniões remotas em ambientes hostis;
- União de materiais dissimilares e com propriedades distintas;
- Fuselagem de aviões;
- Fabrico de permutadores de calor;
- Indústria naval;
- Indústria criogénica;
- Indústria nuclear;
- Fabrico de alhetas de refrigeração;
- Revestimentos;
- Processamento químico.

## 2.3. Janela de soldabilidade

A janela de soldabilidade trata-se de uma ferramenta que permite a seleção dos parâmetros mais adequados para o tipo de soldadura que se pretende. Será de esperar que se os parâmetros forem todos bem seleccionados, o ponto determinado se encontre dentro dos limites da janela de soldadura. No entanto, não invalida que se efetue uma soldadura com sucesso fora dos limites da janela de soldadura, já que esta se baseia em equações com constantes empíricas facilmente manipuláveis, que poderão alterar os limites da janela.

A janela de soldabilidade é uma combinação de equações determinadas por diversos autores, mais abaixo citados, pelo que é delimitada por quatro linhas, conforme é possível observar na Figura 2.13. Esta é baseada nos parâmetros velocidade do ponto de colisão  $V_c$  e no ângulo dinâmico de colisão  $\beta$ .

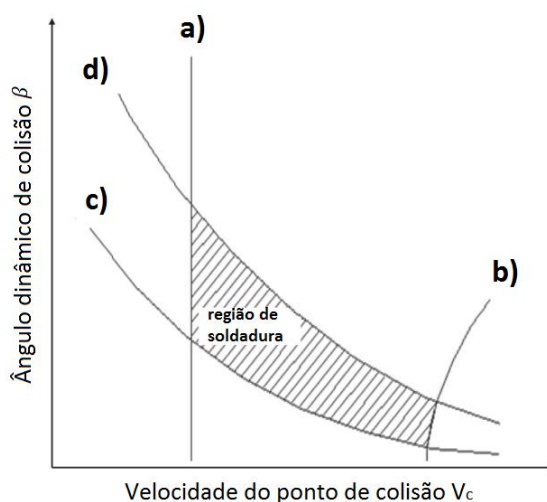


Figura 2.13. Janela de soldabilidade e seus limites, adaptada de Mendes et al. (2013).

### 2.3.1. Equações

Dentro dos quatro limites assinalados na Figura 2.13, é possível identificar a região de soldadura. Quando os parâmetros da soldadura permitem que a mesma se enquadre nesta região, considera-se que esta está dentro da janela de soldabilidade, sendo provável que a soldadura seja bem sucedida.

O limite a) está relacionado com a formação de ondas. À esquerda deste limite as soldaduras realizadas não possuirão interface ondulada, como na Figura 2.3 a), já à direita apresenta uma interface ondulada, à semelhança da Figura 2.3 b). Segundo alguns autores, a este limite está associada uma velocidade de colisão de transição ( $V_{c,tr}$ ), função do ângulo

dinâmico de colisão  $\beta$ , pelo que não se deverá tratar de uma reta vertical, no entanto, a maioria considera esta velocidade independente do ângulo dinâmico de colisão (Ribeiro et al. 2014). É com esta última consideração que Cowan et al. (1971) admitiu que esta velocidade seria função da densidade da placa base ( $\rho_b$ ) e voadora ( $\rho_f$ ) em  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ , bem como das durezas Vickers dos mesmos ( $HV_b$ ;  $HV_f$ ) em  $[\text{MPa}]$ , e ainda do Número de Reynolds crítico ( $Re_{cr}$ ), que pode tomar valores entre 8 e 13. De Rosset (2006) considera que o valor do Número de Reynolds crítico é calculado de forma empírica, tendo aplicado o valor de 10,6 nos seus estudos.

$$V_{c,tr} = \left( \frac{2Re_{cr} (HV_f + HV_b)}{\rho_f + \rho_b} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

O limite b) determina a formação ou não do jato intermetálico no ponto de colisão, indispensável para o sucesso de uma soldadura. Assim, Walsh et al. (1953) assumiu que para haver formação de jato, a velocidade do ponto de colisão expressa em  $[\text{m}/\text{s}]$  deverá ser inferior à velocidade de propagação do som ( $C_b$ ) no material da placa voadora, conforme na Equação (2.3).

$$V_c \leq C_b \quad (2.3)$$

O cálculo da velocidade de propagação do som é feito com base em (Marsh 1980), que possui uma base de dados sobre as componentes longitudinal ( $V_L$ ) e transversal ( $V_S$ ) da velocidade do som em diversos materiais. Ora, o cálculo da velocidade de propagação do som num dado material pode ser efetuado conforme a Equação (2.4), estando todas as variáveis expressas em  $[\text{m}/\text{s}]$ .

$$C_b = \sqrt{V_L^2 - \frac{4}{3} V_S^2} \quad (2.4)$$

O limite c) está relacionado com a velocidade de projeção mínima, de modo a que a pressão de impacto exceda a tensão limite de elasticidade dos materiais a soldar (Ribeiro et al. 2014). Abaixo deste limite, não se gera energia suficiente para deformar plasticamente a placa para se dar a ligação. Para a definição deste limite, procede-se ao cálculo da velocidade do ponto de colisão mínima ( $V_{c,min}$ ) em função da dureza Vickers do material mais duro em  $[\text{MPa}]$ , a média das densidades dos materiais a soldar ( $\rho_b$ ,  $\rho_f$ ) em  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , do ângulo dinâmico de colisão expresso em radianos e de um coeficiente empírico

de limpeza do material, que pode variar entre 0,6 (para superfícies limpas) e 1,2 (para superfícies menos limpas) ( $k_1$ ), conforme consta na Equação (2.5) (Zakharenko & Zlobin 1984).

$$V_{c,min} = \frac{k_1}{\beta} \left( \frac{H_v}{\frac{\rho_b + \rho_f}{2}} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Por fim, o limite d) mantém a velocidade no ponto de impacto abaixo de um valor tal, que a energia cinética dissipada não promova a fusão dos materiais ou a formação de intermetálicos excessivos (Ribeiro et al. 2014). Quando uma soldadura se dá acima deste limite, esta irá possuir uma camada de metal fundido, como é o caso da Figura 2.3 c) (Athar & Tolaminejad 2015). Segundo Carpenter & Wittman (1975), a velocidade máxima que a placa voadora pode ter é apresentada na Equação (2.6).

$$V_p = \frac{1}{N} \frac{(C_{b,f} T_{m,f})^{1/2}}{V_c} \left( \frac{(K_f C_{p,f} C_{b,f})}{(\rho_f h_f)} \right)^{1/4} \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6),  $N$  é uma constante empírica, onde existem autores que relatam que o valor pode ser 0,11 (de Rosset 2006) ou 0,062 (Ribeiro et al. 2014),  $T_{m,f}$  é a temperatura de fusão da placa voadora [°C],  $C_{b,f}$  a velocidade de propagação do som na placa voadora [cm/s],  $K_f$  a condutividade térmica da placa voadora [erg/s.cm.°C],  $C_{p,f}$  o calor específico a pressão constante da placa voadora [erg/g.°C] e  $h_f$  a espessura da mesma [cm].

Por fim, é possível calcular o ângulo dinâmico de colisão, através da Equação (2.7), tendo a velocidade de detonação e a velocidade de projeção (Findik 2011).

$$V_p = 2V_d \sin \frac{\beta}{2} \quad (2.7)$$

### 2.3.2. Enquadramento no diagrama

Após a realização das soldaduras, é necessário proceder-se ao enquadramento destas na janela de soldadura. O enquadramento é efetuado através dos seguintes parâmetros:

- Velocidade de projeção ( $V_p$ );
- Velocidade de detonação ( $V_d$ );
- Ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ ).

### 2.3.2.1. Velocidade de projeção ( $V_p$ )

Gurney (1943) desenvolveu equações que permitiram o cálculo da velocidade terminal de fragmentos acelerados pela detonação de um explosivo para diversas aplicações militares, e ainda relaciona a mesma com a energia específica para cada explosivo, denominada Energia de Gurney ( $\sqrt{2E}$ ). Posteriormente, Kennedy (1970) fez um estudo intensivo do Método de Gurney, que permitiu a obtenção da velocidade de Gurney ( $V_{P,Gurney}$ ) para uma configuração plana, através da Equação (2.8).

$$V_{P,Gurney} = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{3}{1 + 5\left(\frac{1}{R}\right) + 4\left(\frac{1}{R}\right)^2}} \quad (2.8)$$

Após o cálculo da velocidade de Gurney, é feito o cálculo da velocidade de projeção com uma equação exponencial (Chou & Flis 1986), através da Equação (2.9).

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

Para a resolução da equação é necessário definir ainda o parâmetro  $t_0$  que é o instante inicial e  $\tau$  uma constante de tempo, que é obtido através da Equação (2.10).

$$\tau = C_1 \frac{M \cdot V_{P,Gurney}}{p_{cj}} + C_2 \quad (2.10)$$

Onde  $p_{cj}$  corresponde à pressão de Chapman-Jouguet e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes empíricas que são calibradas em cada caso, de modo a que a placa voadora seja acelerada até atingir uma velocidade de calibração que é 80% da velocidade de Gurney ( $V_{p,cal}$ ), como mostra a Equação (2.11). O instante de tempo a que a velocidade de calibração é atingida corresponde a 7 reflexões da onda de choque, à velocidade de propagação do som, sobre a espessura da placa voadora, como mostra a Equação (2.12).

$$V_{p,cal} = 0,8 \times V_{p,Gurney} \quad (2.11)$$

$$t_{v,cal} = 7 \times \frac{h_f}{C_b} \quad (2.12)$$

Assim, para um dado incremento de tempo, é possível calcular a velocidade de projeção, pela Equação (2.9), bem como a da distância percorrida pela placa voadora em função do tempo. Posto isto, é apenas necessário recorrer ao cálculo da velocidade de projeção no momento do impacto.

#### **2.3.2.2. Velocidade de detonação ( $V_d$ )**

Este parâmetro é medido para cada soldadura efetuada. É variável em função do explosivo, sendo que para cada combinação de explosivo diferente é necessário proceder-se à medição da mesma.

#### **2.3.2.3. Ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ )**

Para efetuar o cálculo do ângulo dinâmico de colisão aplica-se a Equação (2.7), estando finalmente em condições de inserir os parâmetros na janela de soldadura previamente definida.

## **2.4. A ligação Aço-Alumínio**

### **2.4.1.1. Interface Aço-Alumínio**

A interface típica de uma soldadura por explosão de aço alumínio é geralmente plana ou de fraca ondulação heterogénea.

Nos seus estudos, Carvalho et al. (2017) chegou a uma expressão que permite prever se a interface apresentará ondas, ou se será plana. Este parâmetro denominado *Wave Interface Factor* (WIF) relaciona a razão de densidades da placa voadora e placa base, com a razão das temperaturas de fusão das mesmas e, quanto menor o valor da relação, maior a probabilidade de formação de ondas, tendo estabelecido que o valor de transição seria de 5.

$$WIF = \frac{\rho_{placa\ voadora}}{\rho_{placa\ base}} \times \frac{T_{placa\ voadora}}{T_{placa\ base}} \quad (2.13)$$

Assim, é possível verificar que o parâmetro WIF para a soldadura do aço no alumínio terá um valor de 6,79, pelo que será de esperar uma interface plana.

### **2.4.1.2. Existência de Intermetálicos**

Apesar deste processo ser considerado um processo de ligação no estado sólido, devido à rapidez com que é executada a detonação e soldadura, em certos pontos é possível



a existência de zonas fundidas e formação de intermetálicos. As fases de intermetálicos são formadas abaixo do ponto de fusão por difusão e dependem da temperatura (Tricarico et al. 2009). Na Figura 2.14 encontra-se o diagrama de fases em equilíbrio do aço-alumínio, onde é possível observar as diferentes fases da ligação, variando a temperatura e a percentagem de alumínio.

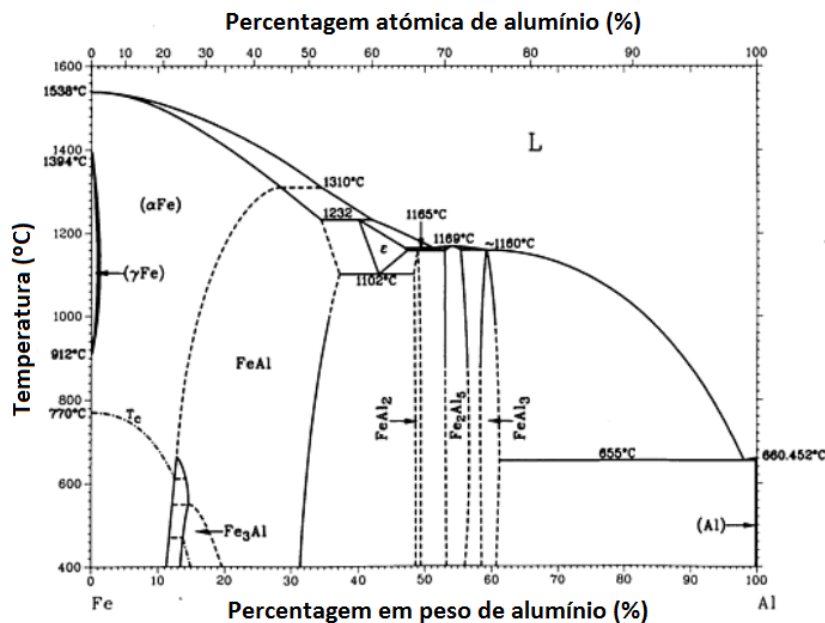


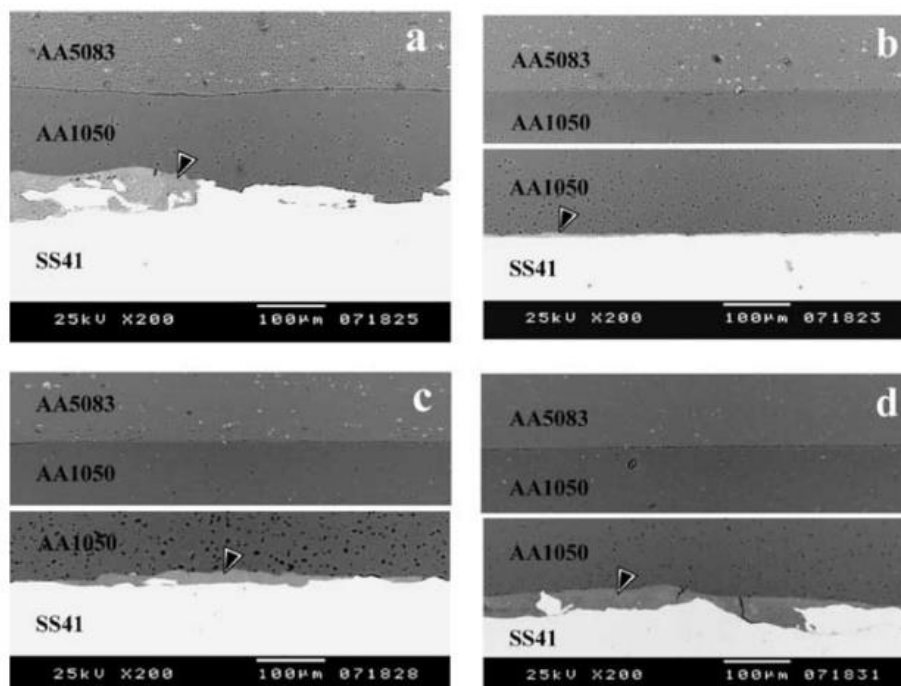
Figura 2.14. Diagrama de fases em equilíbrio Aço alumínio, adaptada de Kattner & Burton (1992).

Segundo Kattner & Burton (1992), os intermetálicos formados entre aço e alumínio, com as respetivas percentagens em peso de alumínio, são:

- $Fe_3Al$  13~20% Al;
- $FeAl$  12,8~37% Al;
- $FeAl_2$  48~49,4% Al;
- $Fe_2Al_5$  53~57% Al;
- $FeAl_3$  58,5~61,3% Al.

Han et al. (2003) nos seus estudos efetuaram soldadura por explosão entre uma chapa de alumínio AA5083 e uma de aço carbono SS41, com o auxílio de uma placa intermédia de alumínio AA1050, uma vez que sem esta a ligação era demasiado fraca. Fizeram ainda variar a espessura da placa intermédia e verificaram quais seriam os efeitos da alteração da espessura sobre a ligação e na resistência ao corte. Para as soldaduras efetuadas encontraram o intermetálico  $FeAl_3$ , pelo que concluíram que com o aumento da espessura da placa intermédia a zona de intermetálicos aumenta e, como consequência, a

resistência ao corte era mais baixa. Na Figura 2.15 é possível observar as interfaces para diferentes espessuras de placa intermédia. De notar ainda, que para a espessura de 2mm é possível observar a presença de fissuras, a que os autores atribuíram à combinação da natureza frágil da interface e a diferença de coeficientes de expansão térmicos dos materiais.



**Figura 2.15.** Interface das soldaduras para placa intermédia de: a) 0,2mm; b) 0,5mm; c) 1mm; d) 2mm; adaptada de Han et al. (2003).

#### 2.4.1.3. Microdurezas típicas

É de esperar que os materiais sofram um endurecimento durante o processo de soldadura, em comparação à dureza do material base, devido à deformação sofrida. Kovacs-Coskun et al. (2015) observaram que nos seus ensaios de soldadura por explosão, em que foi projetada uma chapa de alumínio numa barra de aço carbono houve um aumento de dureza. No caso do aço, a dureza passou de  $120\text{HV}_{1,2}$  para  $178\text{HV}_{1,2}$ , sendo que no alumínio o aumento da dureza foi mais ligeiro, tendo-se observado no material base uma dureza de  $72\text{HV}_{0,2}$  e na soldadura de  $85\text{HV}_{0,2}$ .

O perfil de durezas também é afetado devido aos intermetálicos presentes na interface, pelo que as durezas típicas, segundo Tricarico et al. (2009), nos intermetálicos, estão presentes na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1.** Microdurezas e estrutura cristalina dos intermetálicos. Adaptada de (Tricarico et al. 2009) e (Rathod & Kutsuna 2004).

<b>Fase</b>	<b>Microdureza [HV]</b>	<b>Estrutura cristalina</b>
$Fe_3Al$	250-350	CFC
$FeAl$	400-520	Cúbica
$FeAl_2$	1000-1050	Triclínico
$Fe_2Al_5$	1000-1100	Monoclínico
$FeAl_3$	820-980	Monoclínico (BC)



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Materiais e equipamentos

##### 3.1.1. Material de base

Para a realização das soldaduras foi utilizada chapa de aço de baixo teor em carbono DC06 de 3mm de espessura e barra de alumínio AA6082-T6 de 15mm, sendo que ambos apresentam 250x70 mm nas restantes dimensões. A composição química dos materiais encontra-se na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.

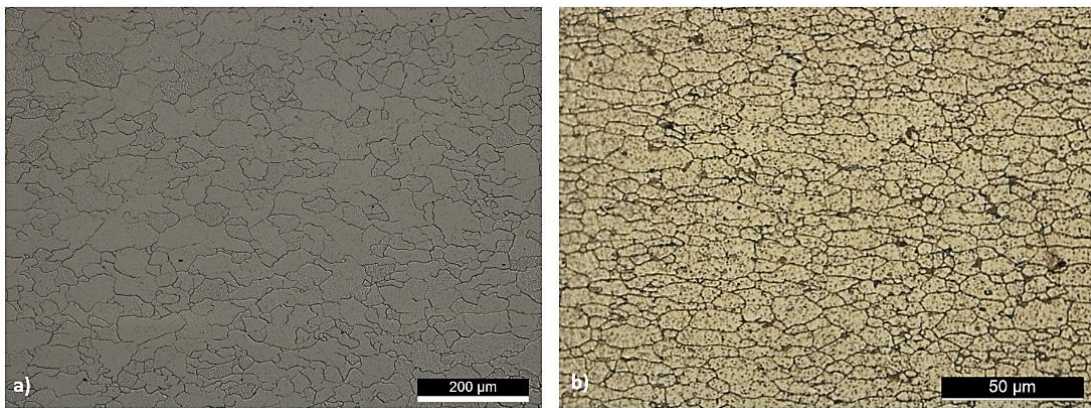
**Tabela 3.1.** Composição química do aço carbono DC06 (%).

	C	Mn	P	S	Ti
<b>DC06</b>	≤0,02	≤0,25	≤0,02	≤0,02	≤0,3

**Tabela 3.2.** Composição química do Alumínio 6082-T6 (%).

	Al	Cu	Fe	Si	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn	Outro
<b>Al 6082-T6</b>	Rest.	0,1	0,5	0,7-1,3	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	0,4-1	0,05-0,15

Na Figura 3.1 a) está apresentada a microestrutura do aço carbono DC06, com a presença de grãos de diferentes tamanhos e ainda na Figura 3.1 b) a microestrutura do alumínio AA6082-T6. De notar que no caso do alumínio, a nível microestrutural, foi observado limites da barra que o grão era muito maior que no interior da mesma. A microestrutura do alumínio revela um grão por norma alongado e pouco uniforme.



**Figura 3.1.** Microestrutura do: a) Aço carbono DC06; b) Alumínio AA6082-T6.

### **3.1.2. Equipamentos utilizados**

#### **3.1.2.1. Análise microestrutural**

A análise microestrutural foi realizada através do microscópio ótico *Leica DM4000 M LED*, com ampliação de 12,5x a 1000x, com a câmara incluída *Leica MC 120HD*, que permite o registo fotográfico através do software *LAS (Leica Application Suite)*

#### **3.1.2.2. Análise de durezas**

Para a medição de durezas Vickers utilizou-se um microdurómetro manual *Struers Duramin 2*, com uma gama de cargas entre 0,001 kg e 2kg.

#### **3.1.2.3. Ensaios de tração**

Para a realização dos ensaios de tração recorreu-se ao equipamento *Instron 4206* e o *Aramis Optical 3D Deformation & Strain measurement system*, para a medição da deformação.

#### **3.1.2.4. Análise SEM**

Para a análise SEM, foi utilizado o microscópio eletrónico de varrimento, disponível no Instituto Pedro Nunes, *Zeiss Gemini 2*.

#### **3.1.2.5. Medição de velocidades de detonação**

Para a medição de velocidades de detonação foi utilizado um osciloscópio digital *LeCroy Wavejet 352*, do Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio (LEDAP), Condeixa.

### 3.2. Nomenclatura utilizada

A nomenclatura vem na sequência da que havia sido adotada nos anos anteriores, onde os ensaios são referenciados com o prefixo “EW” do inglês *Explosive Welding*, seguidos do número de identificação da soldadura, que se inicia na soldadura EW23. O número da soldadura não é necessariamente seguido, uma vez que foram realizadas paralelamente soldaduras por outro aluno de Dissertação de Mestrado.

Para identificação das amostras para análise metalográfica, é aplicado o sufixo “L” ou “T”, caso se trate de uma amostra em que se pretenda analisar a componente longitudinal ou transversal do ensaio.

Para identificação das amostras de material base, as amostras são identificadas com o prefixo “MB” de material base, seguindo-se de “F” do inglês *flyer*, placa voadora ou “B” caso se trate da placa base. São ainda aplicados os mesmos sufixos utilizados para identificar o material para os ensaios que não tiveram sucesso.

Para os provetes utilizados nos ensaios de tração ao corte, identifica-se a soldadura utilizada, seguida do sufixo “Tx”, de tração, onde o termo “x” representa número do provete ensaiado.

### 3.3. Montagem experimental

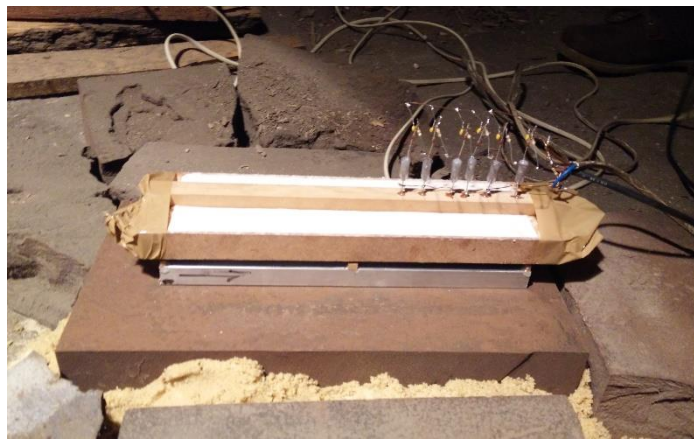
A montagem e realização dos ensaios de soldadura foram feitos no LEDAP, em Condeixa, Coimbra.

A barra de alumínio tem 70x15 mm, sendo apenas necessário recorrer ao corte na serra alternada para seccionar em placas de 250mm. Quanto à chapa de aço, foi encomendada com 2x3 metros. O corte foi feito com a rebarbadora segundo as dimensões desejadas, sendo posteriormente utilizado esmeril para acertar as dimensões, de modo a que sejam as mesmas que as da placa de alumínio. Após se ter os materiais nas dimensões desejadas, é ainda necessário lixar as mesmas com lixas P320, de modo a remover camadas de óxidos ou impurezas, principalmente no aço, devido a ser um aço carbono e este ter sido adquirido com uma grande quantidade de óxidos.

As caixas que contêm o explosivo e os espaçadores que irão determinar a STD são feitas em *Medium Density Fiberboard* (MDF), de acordo com as dimensões desejadas. Os desenhos das caixas que contêm os explosivos encontram-se no APÊNDICE A. A placa voadora é colada no fundo da caixa, com cola *epoxi*, estando assim em contacto direto com

o explosivo. Os espaçadores, responsáveis por impor a STD, foram colados à placa base com a mesma cola, nos cantos da placa. Posto isto, é colocado o explosivo na caixa e no topo desta, o conjunto de sondas que irá medir a velocidade de detonação, cujos desenhos se encontram igualmente no APÊNDICE A. Para a detonação, foram utilizados ANFO e Emulsão Explosiva como matrizes dos explosivos, podendo em alguns casos ser necessário recorrer a utilização de sensibilizantes como MOV ou MOP. Foi ainda utilizado explosivo plástico para promover a iniciação da detonação dos explosivos.

Por fim, o conjunto é colocado sobre uma placa de suporte em aço, assente em areia conforme é possível observar na Figura 3.2, de modo a manter a montagem o mais nivelada possível e para sofrer o mínimo de deformações possíveis.



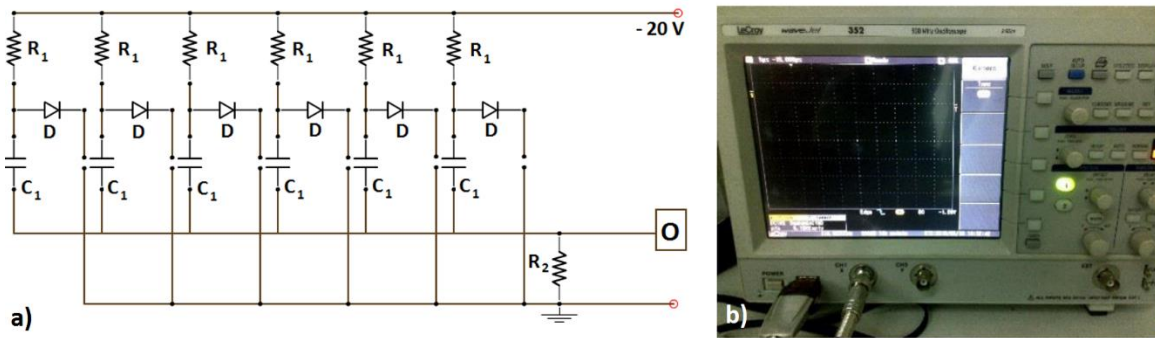
**Figura 3.2.** Montagem da caixa de soldadura EW23.

Na Figura 3.2 trata-se da montagem de uma caixa de soldadura já na câmara de explosão, faltando apenas o detonador, que não pode ser incluído no registo fotográfico devido a razões de segurança. O detonador seria incluído na zona esquerda caixa de soldadura, previamente furada, promovendo assim uma detonação da esquerda para a direita.

### **3.4. Medição da velocidade de detonação**

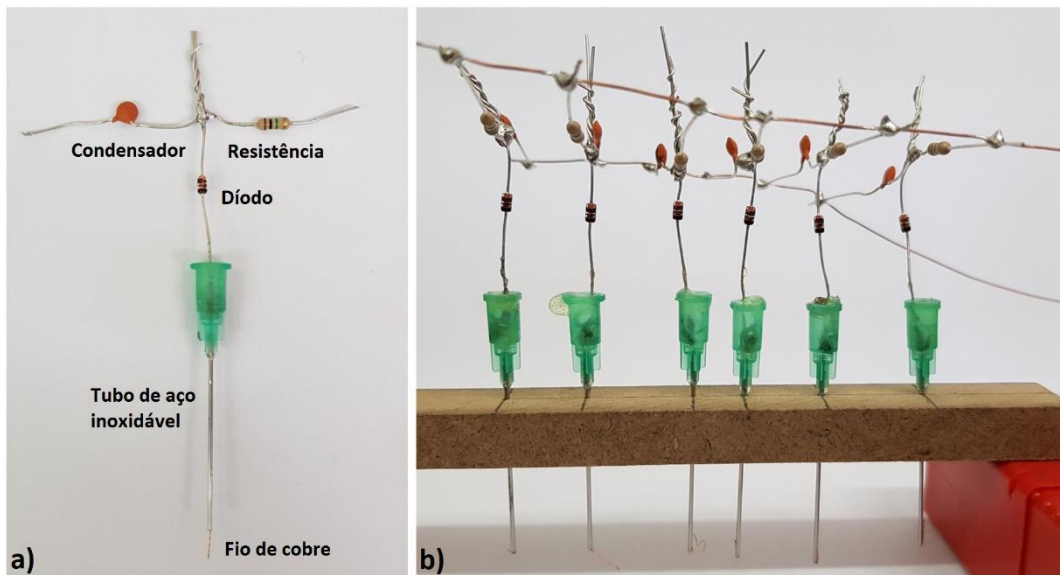
O cálculo da velocidade de detonação foi feito através da utilização de um conjunto de sondas. Estas sondas foram montadas conforme na Figura 3.3 a). Todo o circuito é alimentado por uma diferença de potencial de 20V e o mesmo é ligado ao osciloscópio digital. Quando se dá a detonação e a onda de choque atravessa as sondas, estas entram em curto circuito, que irá enviar um sinal ao osciloscópio, apresentado na Figura 3.3 b).





**Figura 3.3.** a) Circuito elétrico típico para a medição de velocidade de detonação; b) Osciloscópio digital.

O circuito da Figura 3.3 é formado por um conjunto de 6 sondas, cada uma composta por um condensador de 1nF, resistência 1MΩ e um díodo que não permite a passagem de uma diferença de potencial inferior a 40V. O cátodo do díodo é soldado a um fio de cobre revestido entrelaçado, que por sua vez está dentro de um tubo de aço com 0,8mm de diâmetro, estando todos os tubos soldados a um fio de cobre, responsável pela ligação ao osciloscópio. Entre o fio de cobre e os condensadores, encontra-se uma resistência de 47Ω. Na Figura 3.4 a) está apresentada uma sonda individual, onde é possível identificar os constituintes na mesma. Por outro lado, na Figura 3.4 b) mostra o conjunto completo das sondas utilizado nos ensaios.



**Figura 3.4.** Medição de velocidade de detonação: a) Sonda individual; b) Conjunto de sondas.

Apenas foi medida a velocidade de detonação para os ensaios EW23 e EW27, tendo para os outros considerado valores de velocidades de detonação de ensaios já realizados nas mesmas condições.

### 3.5. Parâmetros de Soldadura

Os parâmetros gerais de soldadura para cada um dos diferentes ensaios efetuados estão presentes na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3.** Parâmetros específicos de cada soldadura.

	EW23	EW25	EW27	EW29	EW31	EW35
<b>Tipo de explosivo</b>	Emulsão	ANFO	Emulsão	ANFO	ANFO	ANFO
<b>Sensibilizante</b>	MOV	Emulsão	EPS	-	Emulsão	-
<b>Explosivo plástico</b>	Sim					
<b>Material de suporte</b>	Placa de aço sobreposta em areia					
$V_{explosivo} [cm^3]$	334,6	250,95	334,6	418,25	334,6	334,6
$\rho_{explosivo} [g/cm^3]$	786,01	1370,79	612,67	855,95	1315	794,98
<b>Placa voadora</b>	Aço carbono DC06					
<b>Placa de base</b>	Alumínio 6082-T6					
$h_{explosivo} [mm]$	20	15	20	25	20	20
<b>R</b>	0,6805	0,8901	0,5305	0,9264	1,1385	0,6883
<b>STD [mm]</b>	4,5					

### 3.6. Análise Metalográfica

#### 3.6.1. Preparação das amostras

Para se proceder a uma correta análise de microestrutura e microdureza, é assim necessária uma prévia preparação dos provetes a analisar. Em todos os ensaios foram identificados previamente os provetes, estando estas marcações presentes no APÊNDICE B.

Na maioria dos provetes é necessário envolvê-los em resina endurecedora. Posto isto, é necessário utilizar lixas de P180, P320, P600, P1000, P2500 antes de se efetuar o polimento do provete. Para o polimento, é necessário utilizar diferentes panos de polimento, acompanhados da correspondente pasta de diamante e devida lubrificação, sendo que para o aço basta utilizar pasta de diamante de 6 e 3 $\mu$ m para se obter uma superfície espelhada e sem

riscos. Já para o alumínio é necessário efetuar ainda polimento com pasta 1µm para se obter uma superfície devidamente preparada.

### **3.6.2. Ataque químico**

O ataque químico é realizado de modo a que a microestrutura seja revelada, sendo que para cada material é necessário um reagente diferente.

Assim, para o aço carbono, o ataque utilizado foi *Nital* 2%, que é constituído por:

- 98% Álcool etílico;
- 2% HNO<sub>3</sub>.

Para atacar o alumínio, utilizou-se *Weck's*, que é constituído por:

- 100 ml H<sub>2</sub>O;
- 4g de KMnO<sub>4</sub>;
- 1g de HNO<sub>3</sub>.

Em ambos os casos o ataque químico é efetuado por imersão durante 5 segundos e posteriormente é feita a verificação no microscópio ótico para avaliar se existe necessidade de proceder a novo ataque. De notar ainda, que após cada ataque é necessário lavar imediatamente a amostra com água, álcool e secar, de modo a evitar que os reagentes continuem a ação corrosiva.

### **3.6.3. Análise microestrutural**

Para a análise microestrutural, utilizando o microscópio ótico, foi feita uma análise e registo fotográfico das amostras. Foram analisadas a forma e deformação de grão, bem como a morfologia da interface, presença de intermetálicos e regiões fundidas.

### **3.6.4. Análise Química**

A análise química foi efetuada com o auxílio de um equipamento SEM, com o intuito de proceder a uma identificação dos compostos intermetálicos presentes na região da interface de soldadura.

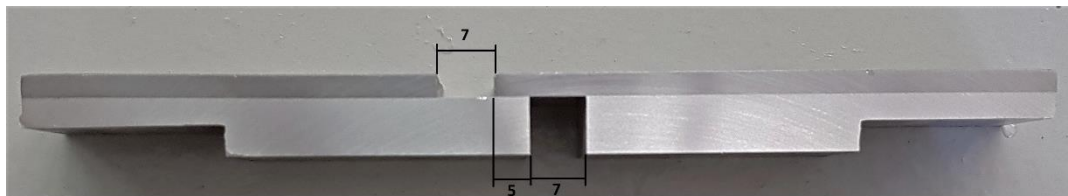
### 3.7. Análise Mecânica

#### 3.7.1. Microdureza

Foram medidas as microdurezas de forma a caracterizar o material base e os restantes ensaios. No caso dos materiais base, foram efetuadas medições de microdureza utilizando cargas de 200g durante 15s, em diversos pontos do provete. Já para os provetes dos ensaios de soldadura foram criados perfis de dureza, conforme é possível observar no APÊNDICE C. Nos ensaios em que não foram obtidas soldaduras, foi aplicada a mesma carga e duração que no material base, já para os ensaios com sucesso foram aplicada uma carga de 25g durante 15s, permitindo assim a obtenção de um maior número de indentações próximo da zona da interface. De notar ainda que foram realizadas indentações nos intermetálicos com 15g ou 25g durante 15s, dependendo da espessura dos intermetálicos da amostra.

#### 3.7.2. Ensaio de tração ao corte

Para os ensaios de tração, foi necessário proceder à maquinação dos provetes, conforme as cotas apresentadas na Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Provete EW29LT1 utilizado no ensaio de tração.

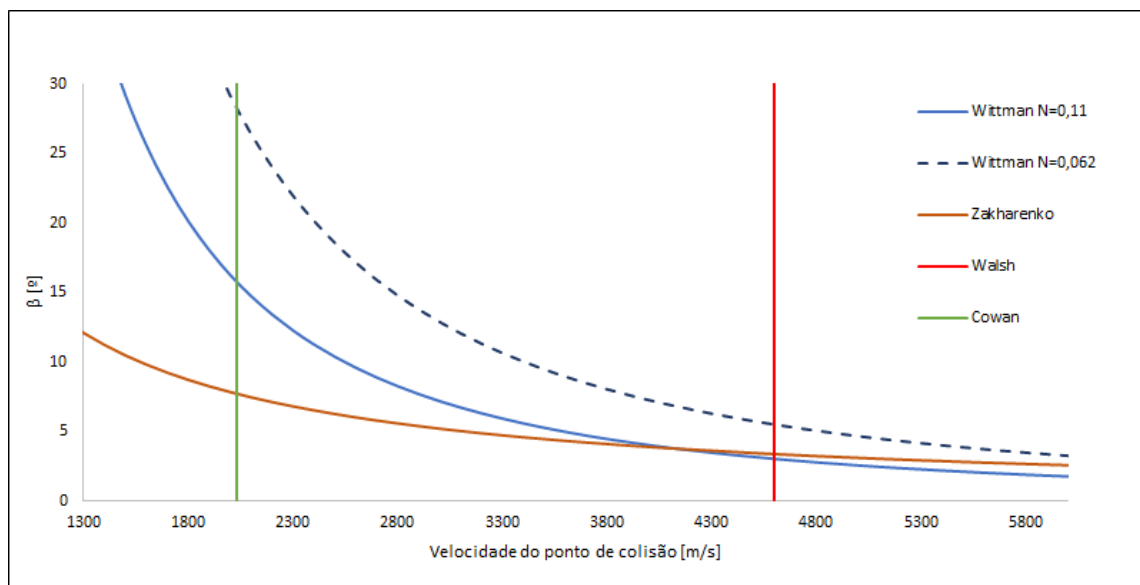
Após a maquinação, é necessário pintar os provetes na face de análise com tinta branca e pulverizar com tinta preta. O padrão apresentado na face de análise irá permitir ao *software* do *Aramis* a criação da malha necessária para ser feita a correta medição da deformação.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. Parâmetros de soldadura

#### 4.1.1. Janela de soldabilidade

Com a aplicação das Equações (2.2), (2.3), (2.5) e (2.6) é possível obter a janela de soldabilidade do aço carbono DC06 no alumínio AA6082-T6. Como é possível observar na Figura 4.1 encontra-se delimitada a janela de soldabilidade. De notar ainda, que se encontram dois limites superiores de Wittman, sendo que a única diferença entre ambos é o valor da constante empírica  $N$ , tendo-se aplicado num dos casos  $N=0,11$  e no outro  $N=0,062$ .



**Figura 4.1.** Janela de soldabilidade DC06-AA6082-T6.

A visualização da janela de soldabilidade funciona sobretudo como auxílio na seleção dos explosivos que se podem utilizar, saltando à vista que para este caso, deverá ter uma velocidade de detonação entre os 2030 e 4594m/s, caso se considere o limite de Wittman  $N=0,062$  e entre os 2030 e 4000m/s caso se considere  $N=0,11$ . O valor do ângulo dinâmico de colisão também pode variar entre  $8^\circ$  e  $16^\circ$  ou entre  $8^\circ$  e  $28^\circ$  dependendo do limite superior aplicado, na zona mais próxima do limite de Cowan e ainda pode variar entre  $4^\circ$  e  $6^\circ$  na zona mais próxima do limite de Walsh.

#### 4.1.2. Velocidade de detonação

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores das distâncias entre as sondas e o tempo que demorou cada uma a emitir o sinal no osciloscópio, que permitem o cálculo da velocidade de detonação. De notar que nos ensaios EW25 e EW31 foi feita a tentativa de medição de velocidade de detonação, no entanto o explosivo não detonou. Ainda, no ensaio EW35 não foi efetuada medição da velocidade de detonação, pelo que se considera o mesmo valor de um ensaio executado em anos anteriores com o mesmo explosivo e mesma espessura, tendo este sido de 2072m/s. É possível consultar os sinais obtidos no osciloscópio digital, bem como o enquadramento das velocidades de detonação no APÊNDICE D.

**Tabela 4.1.** Medição das velocidades de detonação.

	EW23		EW27		EW29	
	Posição da sonda [mm]	Tempo [ $\mu$ s]	Posição da sonda [mm]	Tempo [ $\mu$ s]	Posição da sonda [mm]	Tempo [ $\mu$ s]
<b>Sonda 1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Sonda 2</b>	14,66	4,24	14,72	-	14,25	8,12
<b>Sonda 3</b>	34,78	9,92	34,25	-	33,72	13,6
<b>Sonda 4</b>	44,3	13,1	43,72	13,6	43,28	18,76
<b>Sonda 5</b>	58,94	16,8	59,08	18,76	57,3	-
<b>Sonda 6</b>	78,92	22,4	78,15	-	76,86	-
<b><math>V_d</math> [m/s]</b>	3514		3172		2300	

#### 4.1.3. Velocidade de projeção

A velocidade de projeção é calculada segundo a metodologia de Mendes et al. (2013), presente na secção 2.3.2.2.

A calibração da curva de Gurney é efetuada com as variáveis  $V_{p,cal}$  e  $t_{v,cal}$  que podem ser calculadas pelas Equações (2.11) e (2.12). A calibração das constantes empíricas  $C_1$  e  $C_2$  utilizadas na Equação (2.10) é feita de modo a que curva de Gurney calculada com a

Equação (2.9) passe pelo ponto de coordenadas  $(t_{v,cal}, V_{p,cal})$ . Calcula-se o instante de tempo que a placa demora a percorrer o valor da STD aplicada ao ensaio e de seguida a velocidade de projeção é calculada com a Equação (2.9) para o instante interpolado anteriormente. Na Figura 4.2 está o exemplo do cálculo da velocidade de projeção, neste caso para o ensaio EW29, que é de aproximadamente 400m/s.

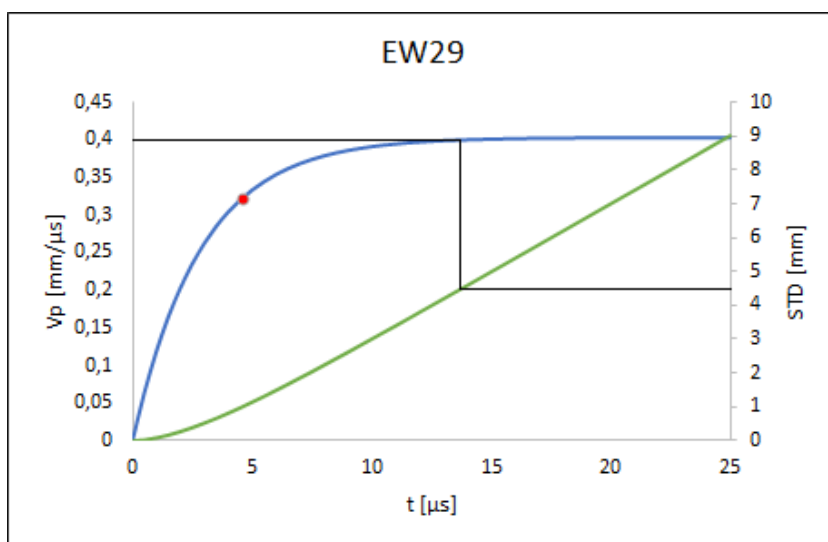


Figura 4.2. Cálculo da Velocidade de projeção do ensaio EW29.

Os parâmetros e os gráficos de cálculo da velocidade de projeção dos diferentes ensaios encontram-se presentes nos APÊNDICE E e APÊNDICE F, bem como na Tabela 4.2 se encontram os valores calculados da velocidade de projeção pelo método de Gurney.

#### 4.1.4. Ângulo dinâmico de colisão

Para o cálculo do ângulo dinâmico de colisão é necessário aplicar a equação (2.7). Os valores de  $\beta$  encontram-se na Tabela 4.2. Posto isto, está-se assim em condições de se realizar o enquadramento dos ensaios na janela de soldabilidade.

Tabela 4.2. Valores calculados do ângulo dinâmico de colisão e velocidade de projeção.

	EW23	EW27	EW29	EW35
$\beta$ [°]	8,00	8,19	9,78	8,18
$V_p$ [m/s]	489,95	452,35	400,08	295,61

### 4.1.5. Enquadramento dos ensaios

O enquadramento dos ensaios é feito considerando a velocidade de detonação da Tabela 4.1 e o ângulo dinâmico de colisão da Tabela 4.2, assim, com os limites previamente obtidos, obtém-se a Figura 4.3.

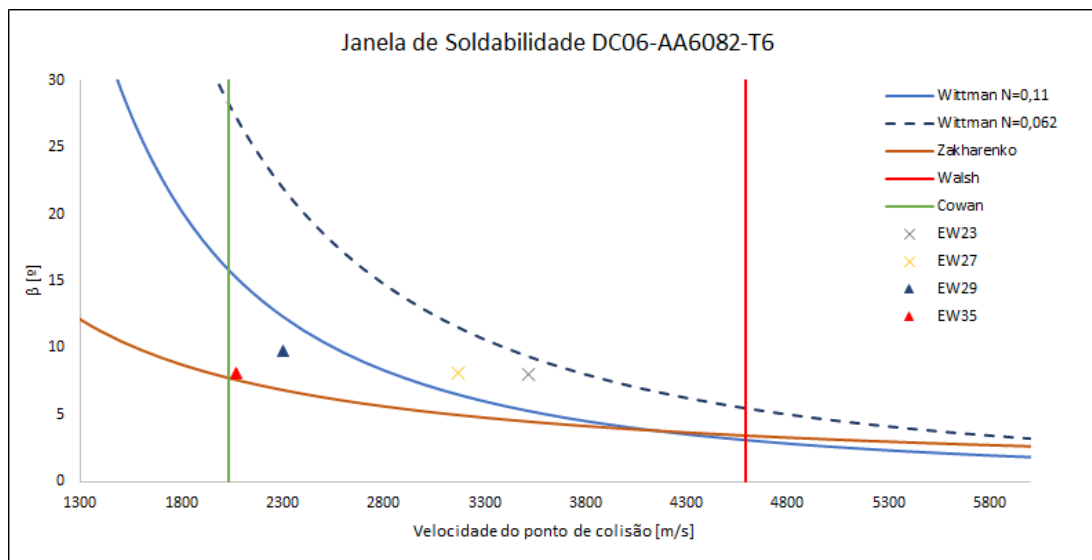


Figura 4.3. Enquadramento dos ensaios na janela de soldabilidade.

Os ensaios EW23 e EW27 não foram bem sucedidos. No ensaio EW29 a soldadura foi consistente e no EW35 a soldadura foi deveras inconsistente, possivelmente, devido ao processo instável de detonação do ANFO. Para além dos ensaios apresentados, foram ainda realizados mais dois ensaios em que o explosivo não detonou (EW25, EW31), pelo que não foi possível realizar a medição da velocidade de detonação e conseqüentemente não ser possível o enquadramento na janela de soldabilidade.

## 4.2. Análise macroscópica

### 4.2.1. EW23

Neste ensaio as placas não soldaram, possivelmente por fornecimento de energia excessivo. Ambas as placas sofreram uma elevada deformação, como é possível observar na Figura 4.4 a), onde a placa base sofreu uma deformação elevada devido ao impacto. Na Figura 4.4 b) é possível observar a superfície de impacto de ambas as placas. De notar uma elevada quantidade de material fundido e ainda a maior quantidade de deformação causada pelo explosivo plástico na zona esquerda. Apesar do ensaio não ter tido sucesso, este esteve



enquadrado com a janela de soldabilidade para  $N=0,062$  no limite de Wittman, como é possível observar na secção 4.1.5. Possivelmente a placa estaria soldada e com a reflexão da onda de choque deu-se a quebra da soldadura pela zona da interface, devido à elevada fragilidade dos intermetálicos formados.

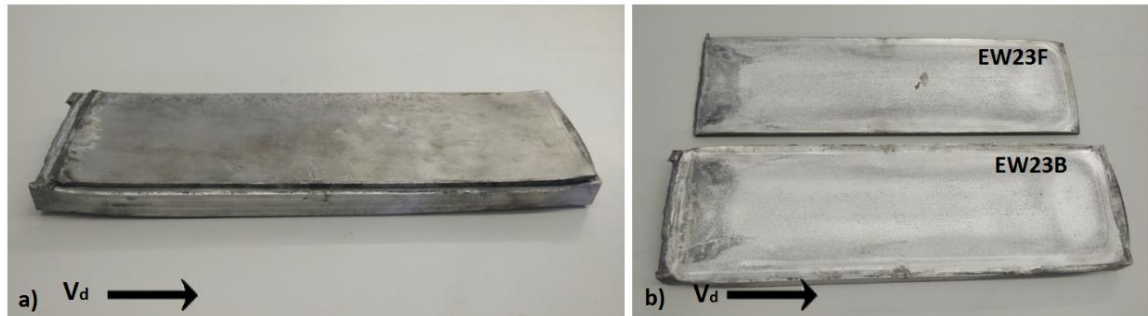


Figura 4.4. Análise macroscópica da soldadura EW23: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas.

#### 4.2.2. EW25

Neste ensaio, o explosivo não detonou, possivelmente por não possuir a espessura suficiente para que se desse a detonação. A Figura 4.5 a) mostra as peças sobrepostas, pelo que é possível observar, à esquerda, que a única zona que sofreu impacto foi a zona onde o explosivo plástico detonou, tendo ocorrido apenas deformação nessa zona. A restante parte da peça encontra-se em estado de oxidação devido ao explosivo ter estado em contacto direto com a peça e ser difícil a total remoção do mesmo. Na Figura 4.5 b) é possível observar a região que iria corresponder à interface onde, quer na placa voadora como na base, se consegue observar à esquerda, a onda de impacto causada pela detonação do explosivo plástico.

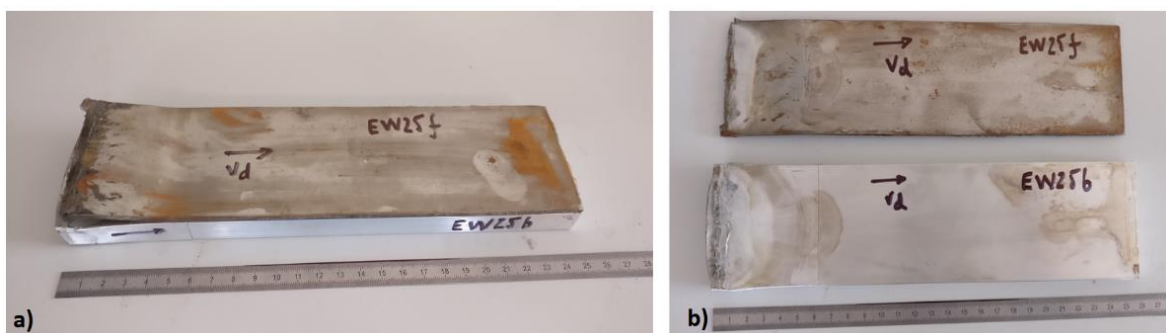


Figura 4.5. Análise macroscópica da soldadura EW25: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas.

#### 4.2.3. EW27

Tal como no ensaio EW23, este enquadrava-se dentro dos limites da janela de soldabilidade, no entanto não se deu a soldadura das placas. De referir ainda que se deu uma menor deformação nas suas placas, comparativamente ao ensaio EW23, tal como é possível observar na Figura 4.6 a). Ainda é possível observar uma camada de material fundido menos intensa que no outro ensaio falhado. Novamente, presume-se que o ensaio não teve sucesso devido a uma excessiva formação de intermetálicos frágeis.

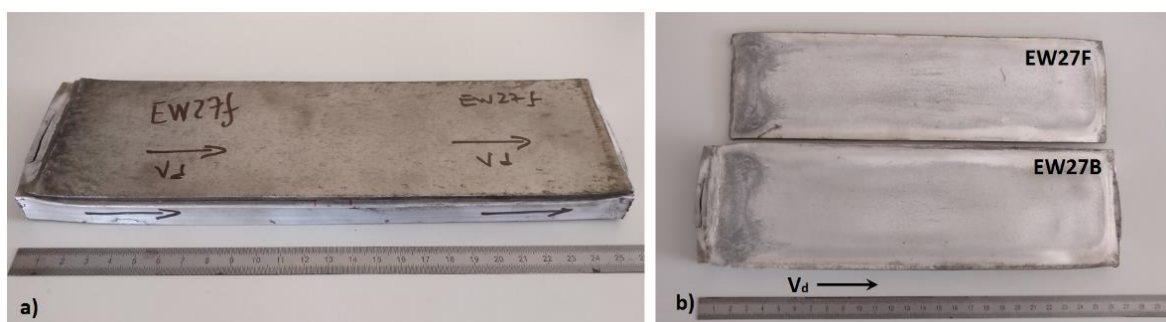


Figura 4.6. Análise macroscópica da soldadura EW27: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas.

#### 4.2.4. EW29

Este ensaio resultou numa soldadura com sucesso. Na Figura 4.7 a) está presente a vista de topo da soldadura, onde é possível observar as marcas deixadas pela detonação do ANFO ao longo da placa voadora. Estas marcas ajudam a concluir que a detonação se deu de uma maneira homogénea. Após a detonação, o aço carbono rapidamente entrou em oxidação, sendo possível observar uma elevada quantidade de óxidos na mesma. Na Figura 2.4 b) observa-se a vista lateral, onde se observa a deformação das placas. De referir ainda, que os cantos das placas não estavam ligados.

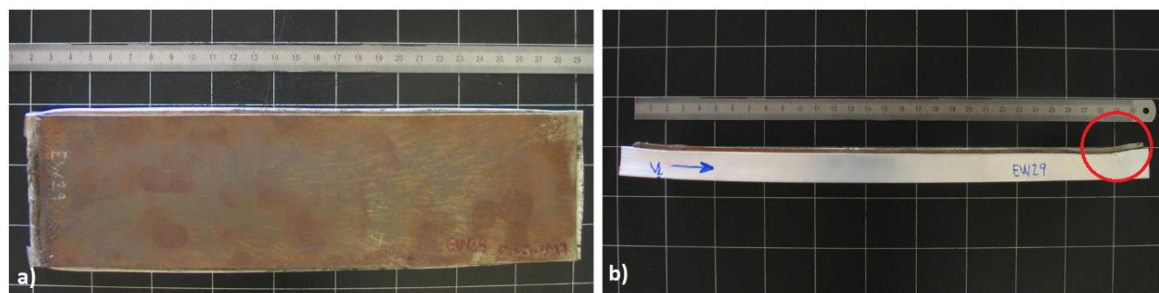


Figura 4.7. Análise macroscópica da soldadura EW29: a) Vista de topo; b) Vista de lado.

#### 4.2.5. EW31

Neste ensaio, à semelhança do ensaio EW25, o explosivo não detonou. Foram mantidas todas as condições do ensaio EW25, apenas foi aumentada a espessura do explosivo, com o objetivo que agora se desse a detonação. Como é possível observar na Figura 4.8 a), apenas existe deformação na zona onde o explosivo plástico detonou. Na Figura 4.8 b), observa-se que o explosivo plástico ainda promoveu uma iniciação da detonação, ainda assim, a espessura de explosivo não foi suficiente tendo-se assim extinguido, pelo que o resto das placas não sofreram qualquer deformação.

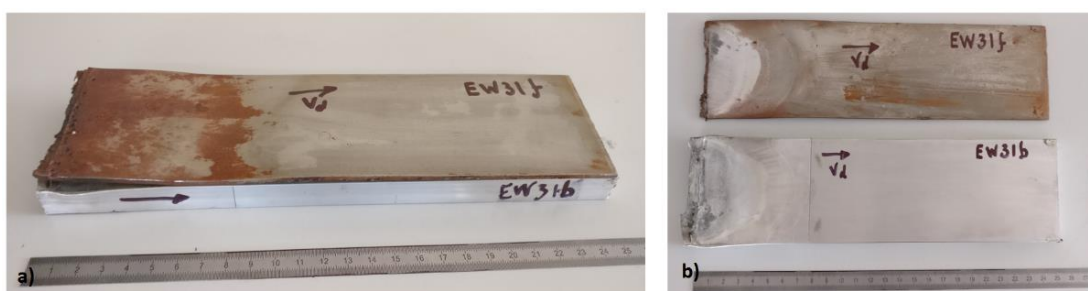


Figura 4.8. Análise macroscópica da soldadura EW31: a) Peças sobrepostas; b) Peças separadas.

#### 4.2.6. EW35

Neste ensaio as placas soldaram, no entanto com pouca adesão. Foi feita uma diminuição do rácio de explosivo, comparativamente ao ensaio EW29, sendo assim de esperar uma menor quantidade de energia transmitida à placa voadora, por parte do explosivo. Na Figura 4.9 a), observa-se a vista de topo da soldadura. Esta está muito marcada pela detonação do ANFO, no entanto, a meio da placa existe uma súbita redução dessas marcas, que indica que a mesma se possa ter extinguido. Isto deve-se porque o ANFO para este ensaio foi diferente do utilizado nos ensaios anteriores, não estando conservado o nitrato de amónio nas melhores condições. Ainda, a mistura do nitrato de amónio e do gasóleo, pode não ter sido homogénea. A Figura 4.9 b), mostra a vista lateral da soldadura, onde se nota a deformação das placas e ainda, em certas zonas, ausência de adesão entre elas.

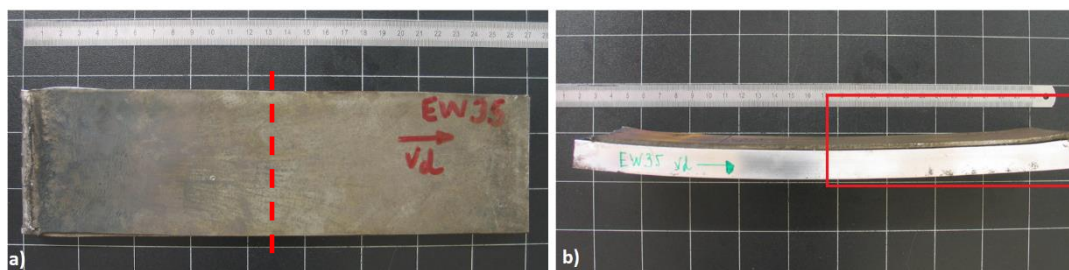


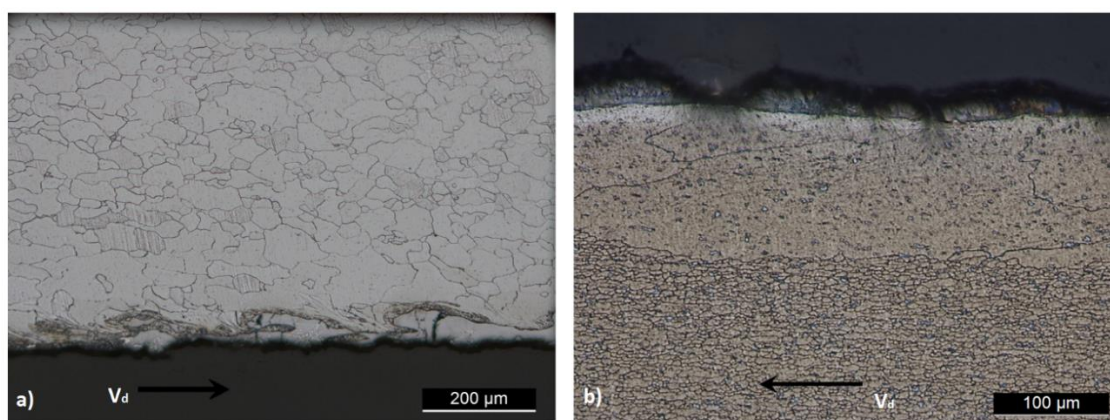
Figura 4.9. Análise macroscópica da soldadura EW35: a) Vista de topo; b) Vista lateral.

### 4.3. Análise microscópica

#### 4.3.1. EW23

Na Figura 4.10 a) é possível observar a microestrutura da placa voadora e na Figura 4.10 b) da base do provete EW23L, pelo que é possível observar a formação de uma camada de material distinto dos materiais de base, potencialmente de intermetálicos, presente em ambas as placas.

A placa voadora apresenta na zona perto da interface, uma elevada deformação de grão no sentido da velocidade de detonação, devido ao impacto com a placa base. Em algumas zonas é ainda possível observar o novo composto com uma morfologia ondulada, bem como em algumas zonas existe fissuração. Na placa base, apesar de haver uma elevada formação de material distinto, não ocorreu grande deformação da microestrutura. Os intermetálicos, por norma, apresentam uma elevada fragilidade, do qual se pode assumir que a rutura do material, a dar-se, será por essa zona. Quando é fornecida uma elevada quantidade de energia, os intermetálicos irão fissurar, o que leva à desunião das placas.



**Figura 4.10.** Análise microscópica do ensaio EW23L: a) Placa voadora; b) placa base.

#### 4.3.2. EW27

Neste ensaio foi reduzida a velocidade de detonação de modo a que fosse fornecida menos energia ao sistema. A Figura 4.11 a) mostra a zona perto da interface da placa voadora e a Figura 4.11 b) na placa base. Observa-se apenas deformação do grão na placa voadora, no sentido da velocidade de detonação. É ainda evidente à semelhança do ensaio anterior presença de uma camada de material distinto na zona da interface, apesar de mais reduzida, em ambas as placas, com destaque para a fissuração presente na placa voadora e porosidades presentes na placa base.

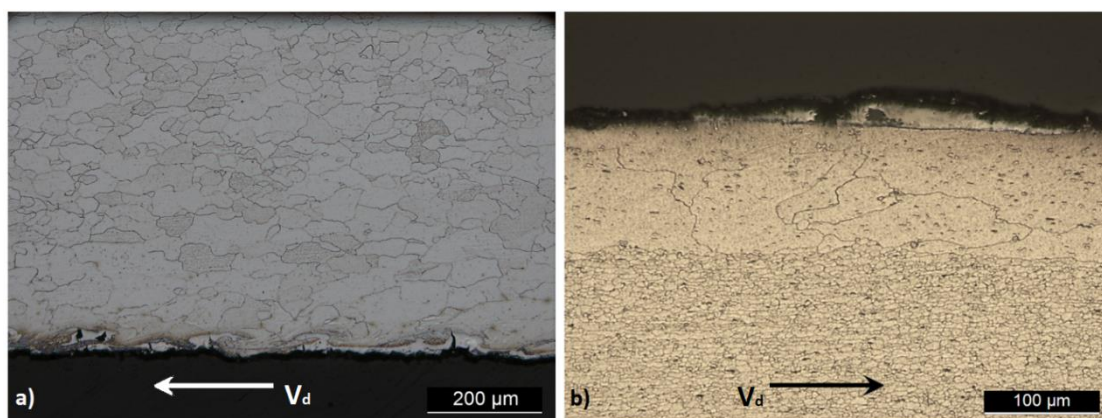


Figura 4.11. Análise microscópica do ensaio EW27L: a) Placa voadora; b) placa base.

### 4.3.3. EW29

Na Figura 4.12 está representada a microestrutura na zona da interface em ambos os provetes longitudinal e transversal deste ensaio. De notar a evidente diferença na deformação do grão no sentido da velocidade de detonação, no caso do provete no sentido longitudinal, que não se consegue observar no sentido transversal.

De destacar a presença da formação de uma camada de material, igualmente observável nos ensaios anteriores, na zona da interface, com uma espessura bem mais reduzida que nos ensaios onde as placas não soldaram.

A interface não apresenta ainda uma interface ondulada, como seria de esperar seguindo a janela de soldabilidade, no entanto, em algumas zonas, o aço apresenta formação de vórtices com aquilo que se presume que seja o composto intermetálico, que promove ainda uma maior deformação do grão do aço.

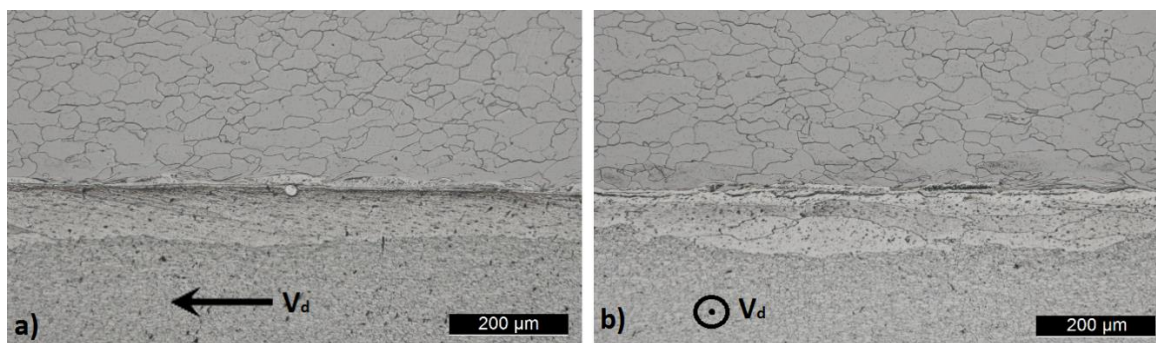


Figura 4.12. Análise microscópica da interface no provete: a) EW29L e b) EW29T.

### 4.3.4. EW35

Neste ensaio, a redução do rácio levou a uma diminuição da velocidade de detonação do explosivo. Na Figura 4.13 é possível observar a zona da interface do ensaio

EW35L. Houve uma redução drástica da deformação de grão na placa voadora, no entanto, o oposto é observável na placa base, havendo uma elevada deformação do grão maior do alumínio e também alguma deformação na zona do grão mais refinado. Existem pequenas zonas pontuais onde é observável uma nova fase e a mesma linha do que parece ser uma diferente fase do alumínio ou até um intermetálico ao longo da interface de cerca de  $5\mu\text{m}$ , à semelhança do ensaio anterior. Não existe ainda a formação de ondas, ainda que, pelo enquadramento da soldadura, esta se encontrasse à direita do limite de Cowan.

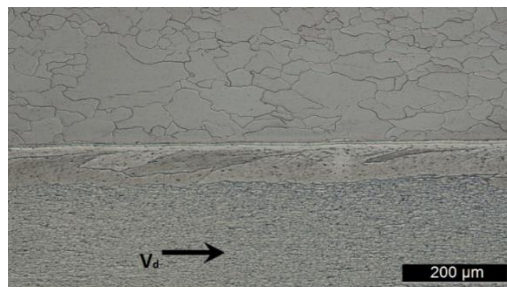


Figura 4.13. Análise microscópica do provete EW35L.

Apesar das placas terem sido soldadas, a soldadura foi inconsistente, pelo que a maioria do provete entrou em rotura no momento em que se procedia à preparação das amostras para análise microscópica, pelo que não foi possível fazer uma caracterização do perfil transversal da soldadura.

## 4.4. Microdureza

### 4.4.1. Materiais base

Foi feita uma análise de microdureza aos materiais de base, onde se obteve os valores médios de  $97,6\text{HV}_{0,2}$  e  $110,5\text{HV}_{0,2}$  para o aço e alumínio respetivamente, conforme é possível observar na Figura 4.14.

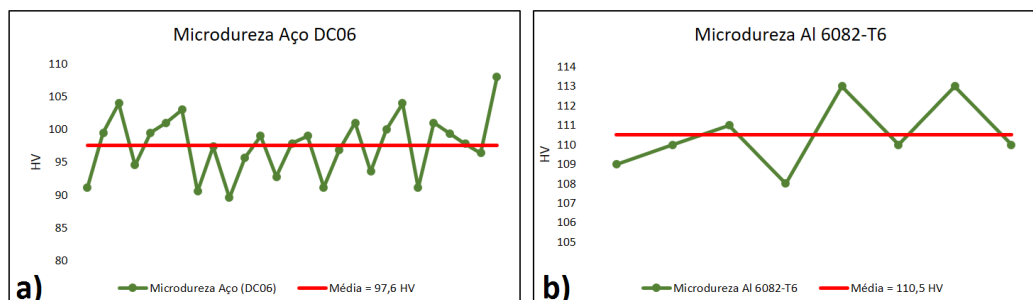


Figura 4.14. Dureza média dos materiais base: a) Aço DC06; b) AA6082-T6.

#### 4.4.2. Microdureza dos ensaios

Para a construção do perfil de dureza apenas se consideraram os provetes no sentido longitudinal, uma vez que se pretende fazer uma análise relativamente ao sentido de detonação.

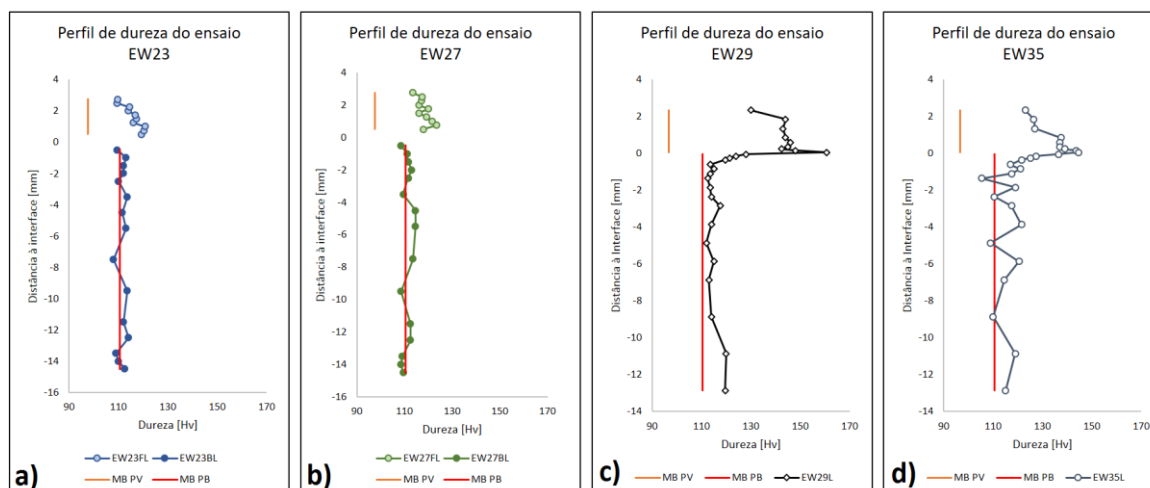
Na Figura 4.15 a) está apresentado o perfil de dureza dos provetes obtidos no ensaio EW23, onde a média foi de  $115,767HV_{0,2}$  na placa voadora e  $111,567HV_{0,2}$  na placa base. No caso da placa voadora, houve um aumento médio em relação ao material base de 18,6%, sendo que na placa base foi de 0,97%. Tal deve-se à deformação causada pelo impacto da placa voadora na base após a detonação, sendo que se supõe que o aumento médio não seja superior na placa base, devido à desunião das placas e a maioria da deformação deu-se na placa voadora. Numa análise ao perfil pode-se concluir que a placa voadora segue um aumento progressivo da sua dureza ao longo da espessura, sendo máxima na zona da interface. Já a placa base apresenta um perfil variável e sem padrões identificados.

A Figura 4.15 b) mostra o perfil de dureza dos provetes obtidos no ensaio EW27. As médias das durezas para a placa voadora e base foram de  $118,2HV_{0,2}$  e  $111,2HV_{0,2}$  respetivamente, de onde é possível concluir que houve um aumento médio em relação ao material base de 21,1% no caso da placa voadora e de 0,63% na placa base. De notar ainda que ocorreu um aumento progressivo até à zona perto da interface, havendo um ligeiro decréscimo na última indentação próximo da zona da interface, algo que não seria espectável. No caso da placa base, a dureza é variável ao longo de todo o perfil, não seguindo nenhum padrão típico.

Já para o ensaio EW29, observa-se o seu perfil na Figura 4.15 c). O valor médio das durezas na placa voadora para o perfil longitudinal foi de  $144,78HV_{0,025}$  na placa voadora e  $116,67HV_{0,025}$  na placa base. Verificou-se que à semelhança dos casos anteriores, que existe um aumento progressivo da dureza da placa voadora ao longo da espessura até à interface. No entanto, contrariamente aos ensaios EW23 e EW27, existe uma redução progressiva da dureza da placa voadora à medida que se afasta da interface, havendo posteriormente uma uniformização das durezas em zonas mais afastadas. Houve ainda um aumento médio em relação à dureza do material base de 49,71% e 5,58% para a placa voadora e base respetivamente. A grande diferença das durezas entre a placa voadora e a base é devido ao aço que é característico pela possibilidade de trabalho a frio, justificando-se assim a grande discrepância entre diferença de aumento entre placas. De notar que existiu

tanto para a placa voadora como para a placa base um aumento mais acentuado quando as placas estavam soldadas, devendo-se à reflexão da onda de choque ao longo das placas.

A Figura 4.15 d) mostra o perfil de dureza do ensaio EW35 onde foram registados os valores médios de  $135\text{HV}_{0,025}$  e  $118,22\text{HV}_{0,025}$  para a placa voadora e base respetivamente. Quanto ao aumento de dureza em relação ao material base, foram de 39,6% e 7%. Houve um decréscimo do aumento comparativamente ao ensaio EW29 no caso da placa voadora, que se deve possivelmente a uma menor energia fornecida ao sistema. À semelhança do ensaio EW29, na placa voadora, deu-se um aumento de dureza ao longo da espessura até à interface e ainda que se deu uma redução da mesma, na placa base, quando se afasta da interface, com a diferença de não se ter apresentado uma estabilização de durezas em distâncias mais elevadas.



**Figura 4.15.** Perfis de dureza dos provetes: a) EW23; b) EW27; c) EW29; d) EW35.

Posto isto, foi feita a sobreposição dos perfis da Figura 4.15 com vista a tentar perceber as diferenças de durezas entre ensaios, conforme mostra a Figura 4.16. Como é possível observar, foi nos ensaios onde se deu a soldadura que as durezas foram superiores, com destaque para o ensaio EW29. De notar que nas placas voadoras de todos os ensaios houve um aumento da dureza nas zonas próximas da interface, tendo sido máximas novamente para o ensaio EW29 e mínimas para o ensaio EW23. Foi apenas nas soldaduras que se verificou um aumento de dureza em zonas próximas da interface na placa base, sendo que para nos ensaios EW23 e EW27, os valores médios das durezas não sofreram praticamente alteração comparativamente ao material base.



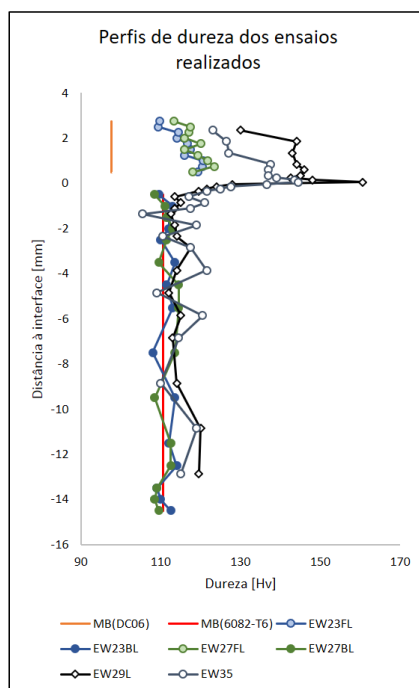


Figura 4.16 Sobreposição dos perfis de durezas.

Por fim, foi feita uma análise ao aumento de dureza nas placas voadoras, onde se realizou uma comparação entre o percentual desse aumento e do rácio e velocidade de detonação, a fim de tentar perceber qual seria a influência.

Assim, na análise ao aumento de dureza com o rácio, cujos ensaios estão enquadrados na Figura 4.17 a), salta à vista que houve um aumento mais acentuado com o aumento do rácio para os ensaios em que a soldadura bem sucedida. Nos ensaios que não foram bem sucedidos, o aumento do rácio não conduziu a grandes conclusões. Houve dois ensaios cujo rácio era semelhante, no entanto o aumento médio da dureza é muito discrepante. Ora, para além da diferença dos ensaios terem um sucesso e o outro não, foram utilizados explosivos diferentes, pelo que essa diferença poderá estar relacionada com o explosivo utilizado.

Na Figura 4.17 b), foi feita a análise ao aumento médio de dureza na placa voadora com a velocidade de detonação. Com esta análise, nos ensaios bem sucedidos, o aumento da velocidade de detonação, conduz a um aumento de dureza. Ora, apesar da grande diferença da velocidade de detonação, de notar que existe um maior aumento da dureza para os ensaios bem sucedidos do que para os que as placas não soldaram. Mais uma vez, a diferença poderá passar pelo sucesso da soldadura, ou até mesmo pela composição do explosivo.

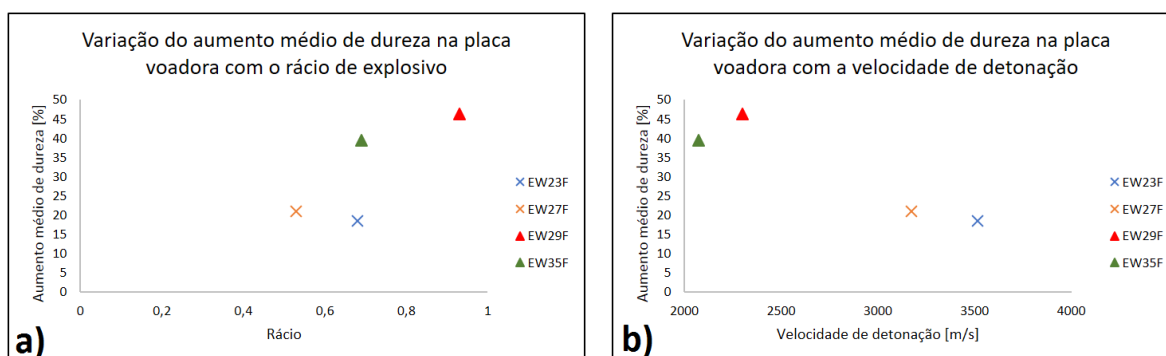


Figura 4.17 Análise ao aumento médio de dureza com: a) Rácio; b) Velocidade de detonação.

## 4.5. Análise da interface

### 4.5.1. EW23

Após a análise da interface ter revelado uma grande quantidade de intermetálicos, é necessário realizar um estudo à mesma. A Figura 4.18 a) mostra a zona perto da interface na placa voadora e a Figura 4.18 b) na placa base.

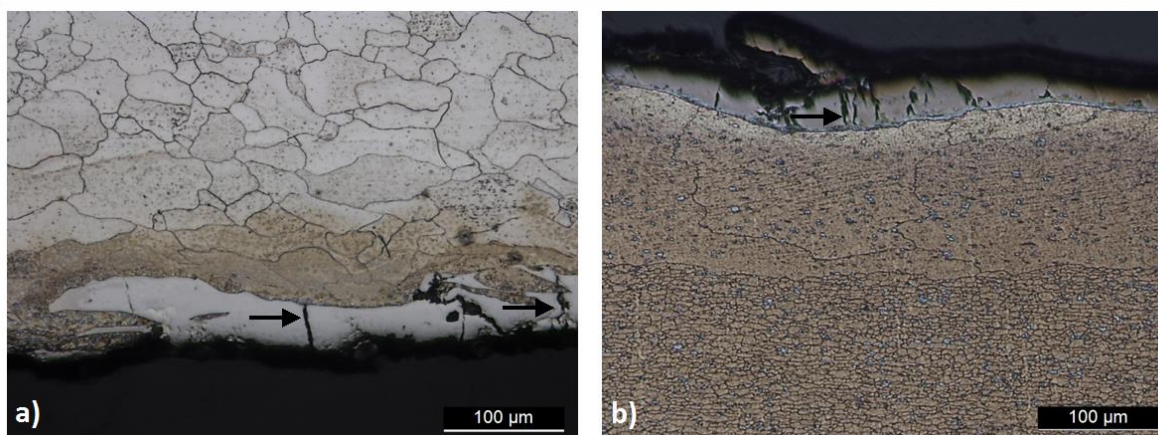
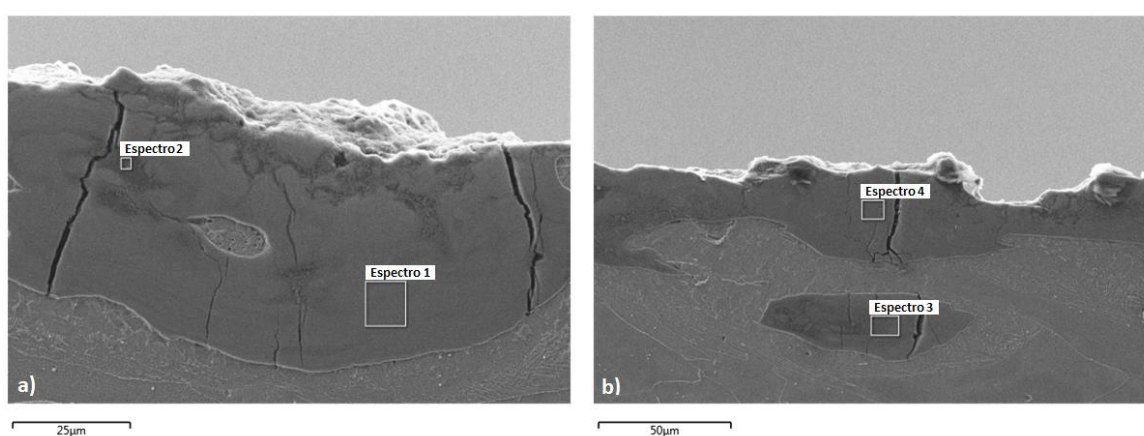


Figura 4.18 Zona da interface no ensaio EW23: a) Placa voadora; b) Placa base.

Em ambas as placas é notória a presença de fissuras nos intermetálicos, que podem ter levado à não soldadura entre as placas. As fissuras que atravessam os intermetálicos dão-se devido à elevada energia fornecida ao sistema. Posto isto, foi feita a medição de várias zonas de intermetálicos, a fim de obter a espessura média e as microdurezas na camada de intermetálicos no provete. A espessura média das camadas de intermetálicos foram de  $35,03\mu\text{m}$  para a placa voadora e  $25,62\mu\text{m}$  para a placa base. Em relação às durezas, na placa voadora foram encontradas durezas de  $890\text{HV}_{0,025}$  e  $917\text{HV}_{0,025}$ , durezas essas que segundo a Tabela 2.1 indiciam que possa ser o intermetálico  $\text{FeAl}_3$ . Na

placa base foram obtidas as durezas de  $442\text{HV}_{0,025}$  num intermetálico, que poderá ser o intermetálico  $\text{FeAl}$  e noutro intermetálico  $828\text{HV}_{0,025}$  e  $866\text{HV}_{0,025}$ , podendo ser  $\text{FeAl}_3$ , à semelhança das durezas encontradas na placa voadora.

Para uma caracterização final da camada de intermetálicos, resta saber a percentagem em peso de cada constituinte, para assim se ter uma melhor noção do intermetálico em questão. Na Figura 4.19 é possível observar uma imagem retirada do microscópio eletrónico de varrimento, onde ainda se consegue observar que foi feita a análise EDS (*Energy-Dispersive X-ray spectroscopy*), representados na Tabela 4.3.



**Figura 4.19** Microscopia eletrónica de varrimento do ensaio EW23FL.

**Tabela 4.3.** Espectros do provete EW23FL, com percentagem em peso de cada elemento.

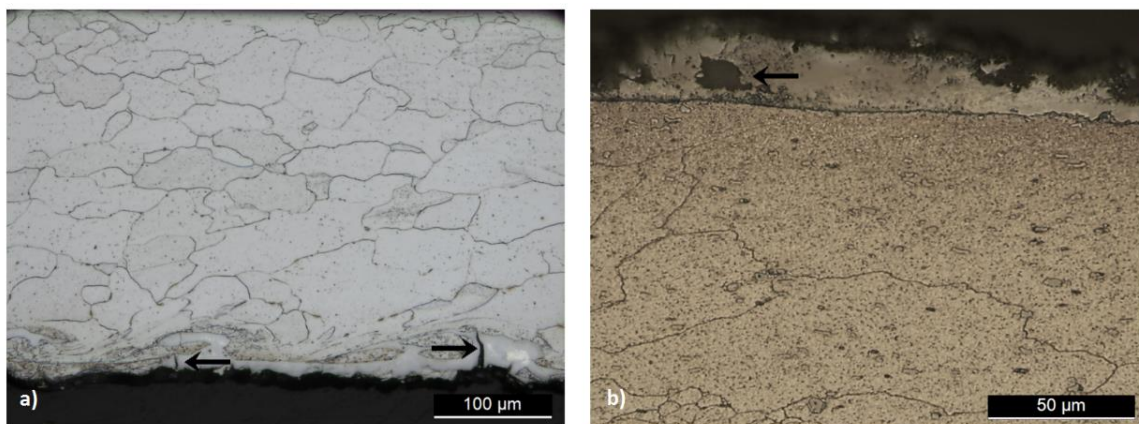
	Al [%]	Fe [%]	Si [%]	Mg [%]
<b>Espectro 1</b>	40	59,3	0,6	0,1
<b>Espectro 2</b>	86,9	11,5	0,9	0,7
<b>Espectro 3</b>	58,2	41,0	0,5	0,3
<b>Espectro 4</b>	55,9	43,1	0,7	0,3

Como é possível observar na Tabela 4.3, pode-se admitir que existe a presença de mais do que um composto intermetálico na amostra, pelo que o composto analisado nos Espectros 3 poderá ser  $\text{FeAl}_3$ , que vem ao encontro do resultado de durezas obtidas anteriormente. Por outro lado, o Espectro 4 corresponde ao  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ , não havendo enquadramento com as durezas encontradas. Os Espectros 1 e 2 mostram que é possível

encontrar diferentes fases de intermetálicos na mesma zona, não encontrando correspondência para eles na secção 2.4.1.3.

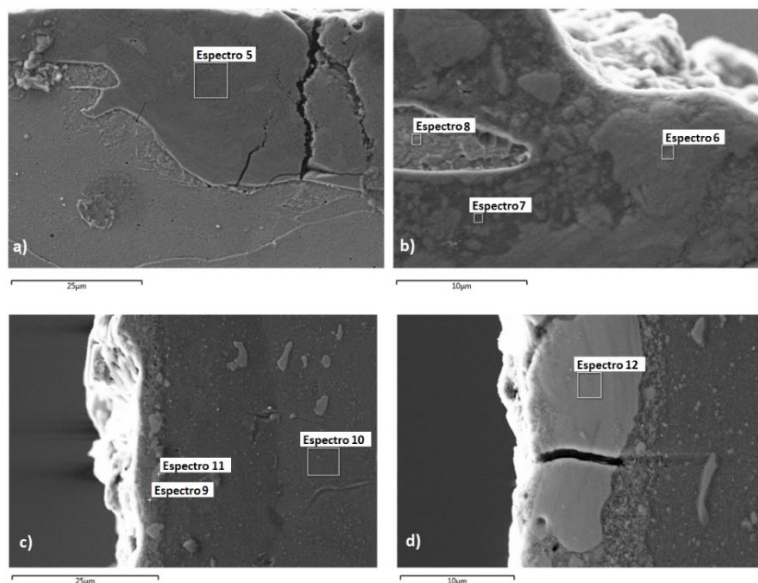
#### 4.5.2. EW27

À semelhança do ensaio anterior, é evidente a presença de intermetálicos na zona da interface. Houve também, embora em menor escala, a presença de fissuras em algumas zonas dos intermetálicos da placa voadora, como é possível observar na Figura 4.20 a). Ainda, foi possível observar zonas onde há a existência de cavidades, como mostra a Figura 4.20 b). A espessura média da camada de intermetálicos é mais reduzida que a do ensaio EW23, pelo que foi de  $19,11\mu\text{m}$  na placa base e  $24,21\mu\text{m}$  na voadora, num total de  $43,32\mu\text{m}$ . As medições de dureza realizadas em alguns intermetálicos permitiram a obtenção de intermetálicos com  $448\text{HV}_{0,025}$  na placa voadora e na placa base de  $415\text{HV}_{0,025}$  e  $478\text{HV}_{0,025}$ , estando ambos enquadrados com a gama de durezas do intermetálico *FeAl*.



**Figura 4.20** Zona da interface no ensaio EW27: a) Placa voadora; b) Placa base.

Foi, portanto, feita uma análise *EDS* à zona da interface, onde é possível observar na Figura 4.21 a) e b) intermetálicos presentes na placa voadora, bem como a presença de material base no interior do intermetálico. Na Figura 4.21 c) e d) é possível observar a zona da interface na placa base no microscópio SEM.



**Figura 4.21.** Microscopia eletrônica de varrimento EW27FL: a) e b) Placa voadora; c) e d) Placa base.

À semelhança do ensaio anterior foi construída a Tabela 4.4 de modo a tentar enquadrar as percentagens dos elementos presentes nos intermetálicos constituintes da interface, através da análise *EDS*.

Segundo a análise dos espectros, é possível observar que existem diversas fases de intermetálico, sendo que os Espectros 5 e 12 têm as percentagens em peso semelhantes à do intermetálico  $FeAl_3$ , o que não corresponde com as durezas obtidas previamente. Ainda, é possível observar que o Espectro 6 corresponde ao  $Fe_2Al_5$ , não estando igualmente enquadrado com as durezas. Por outro lado, houve espectros que não se consegue identificar com nenhum intermetálico da bibliografia, como por exemplo os Espectros 7, 9 e 11.

É ainda possível observar nos Espectros 8 e 10 os materiais de base, correspondendo respetivamente ao aço e ao alumínio.

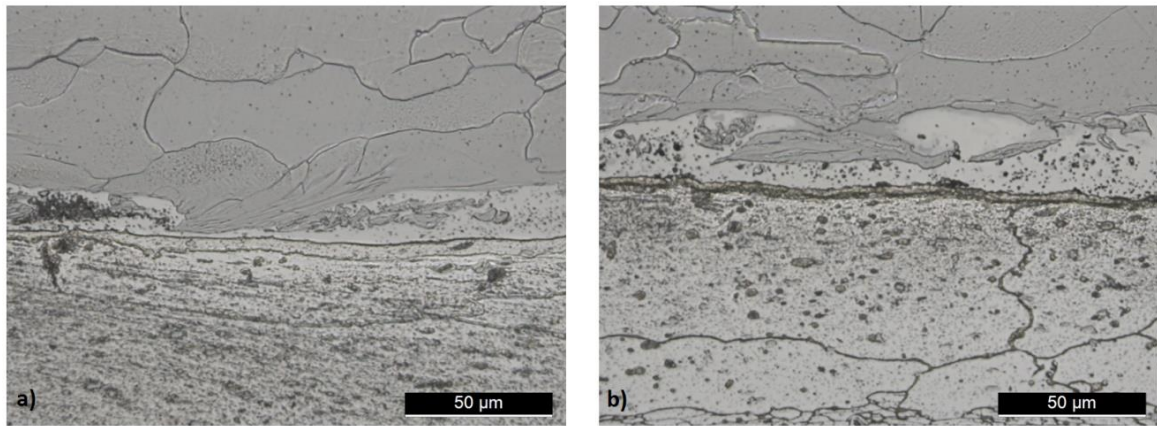
**Tabela 4.4.** Espectros do provete EW27FL, com percentagem em peso de cada elemento.

	Al [%]	Fe [%]	Si [%]	Mg [%]	Mn [%]
<b>Espectro 5</b>	60,1	38,9	0,5	0,5	-
<b>Espectro 6</b>	55,3	44,0	0,5	0,2	-
<b>Espectro 7</b>	87,7	10,7	0,9	0,7	-
<b>Espectro 8</b>	-	100	-	-	-
<b>Espectro 9</b>	82,4	9,3	6	2,3	-
<b>Espectro 10</b>	98,5	0	1	0,5	-
<b>Espectro 11</b>	77,3	13,3	4,3	0,9	4,3
<b>Espectro 12</b>	58,6	40,6	0,6	0,4	-

#### 4.5.3. EW29

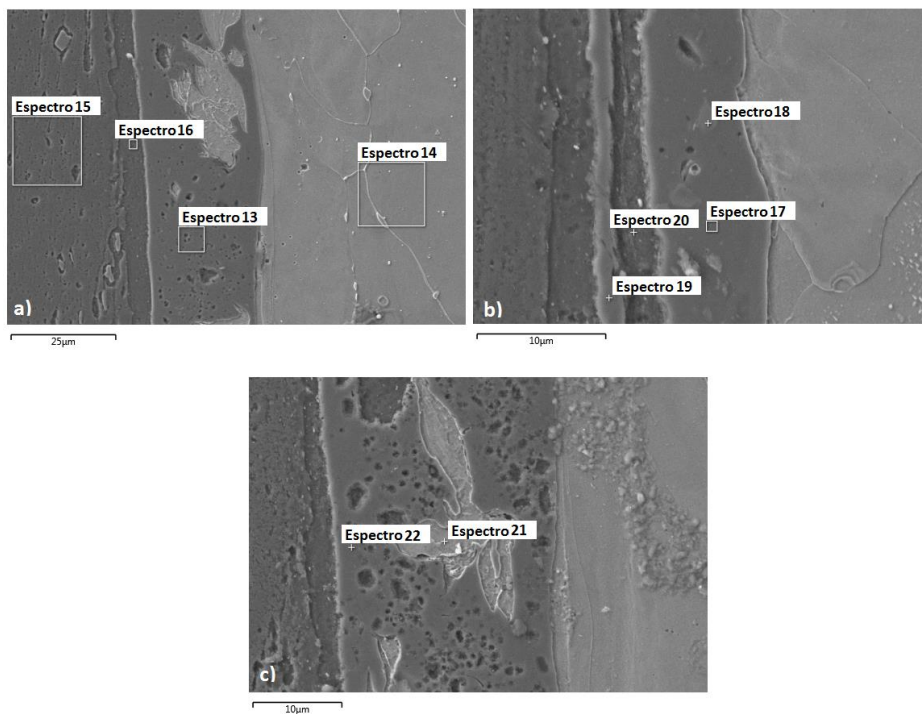
Neste ensaio observou-se uma redução de intermetálicos na zona da interface, como é possível observar na Figura 4.22. De notar em maior detalhe no sentido longitudinal, representado na Figura 4.22 a), uma maior deformação do material base comparativamente ao sentido transversal da amostra, representado na Figura 4.22 b).

O tamanho médio dos intermetálicos no provete longitudinal foi de 21,89 $\mu$ m e 20,76  $\mu$ m no provete transversal. É possível ainda observar em muitas zonas da interface, a presença de uma fina camada de cerca de 5 $\mu$ m, que se supõe que seja uma fase diferente de um composto intermetálico. Foram realizadas ainda medições de dureza, que mostraram um intervalo entre os 180 e 275 HV<sub>0,025</sub> no caso da placa longitudinal e entre os 180 e 200 HV<sub>0,025</sub> na placa transversal. Estes intermetálicos poderão ser enquadrados na fase  $Fe_3Al$ .



**Figura 4.22.** Zona da interface do ensaio EW29: a) Longitudinal; b) Transversal.

Após a análise química com recurso à microscopia eletrónica de varrimento permitiu observar a zona da interface em maior detalhe, na Figura 4.23, cujos espectros de percentagem em peso de cada constituinte encontram-se na Tabela 4.5. De notar em todas as zonas analisadas que recorrentemente se observa a presença de porosidades, que se devem ao rápido arrefecimento do material e não permitem a correta difusão dos elementos.



**Figura 4.23.** Microscopia eletrónica de varrimento do provete EW29L.

Na Figura 4.23 a) é possível observar que na zona da interface existem compostos intermetálicos, cuja percentagem de alumínio é bastante elevada (Espectro 13). À direita da interface encontra-se a placa voadora e à esquerda a base (Espectros 14 e 15). De

notar ainda, que apesar da diferença de relevo na fronteira entre a interface e placa base, o material encontrado nessa zona é apenas material da placa base.

Na Figura 4.23 b) encontra-se outra zona da interface, cuja constituição dos intermetálicos é semelhante à zona anterior. Ainda foi analisada a zona da linha observada anteriormente, que aparentemente revelou ser o mesmo intermetálico. Foi ainda observado um precipitado de Alumínio, Ferro, Manganês e Silício (Espectro 18).

Na Figura 4.23 c) observa-se que além das porosidades presentes na zona do intermetálico, a presença de aço que não se difundiu corretamente no interior do intermetálico (Espectro 21).

Através da análise do diagrama de fases presente na Figura 2.14, é possível observar que para as percentagens dos constituintes, estes não correspondem com as durezas obtidas anteriormente. Ora, isto deve-se principalmente porque nenhum dos meios de caracterização dos intermetálicos é totalmente eficaz, uma vez que a análise de dureza poderá ser influenciada pelo material base presente nas redondezas da interface, bem como a análise EDS pode incluir contagens de elementos presentes nas redondezas dos espectros selecionados.

**Tabela 4.5.** Espectros do provete EW29L, com percentagem em peso de cada elemento.

	Al [%]	Fe [%]	Si [%]	Mg [%]	Mn [%]
<b>Espectro 13</b>	86,9	11,6	1	0,5	-
<b>Espectro 14</b>	-	100	-	-	-
<b>Espectro 15</b>	98,6	-	0,9	0,5	-
<b>Espectro 16</b>	97,8	-	1,4	0,7	-
<b>Espectro 17</b>	87	11,2	1,1		-
<b>Espectro 18</b>	60,5	13,3	9,6	-	16,5
<b>Espectro 19</b>	88,2	10,5	0,7	0,6	-
<b>Espectro 20</b>	92,9	4,3	2,2	0,6	-
<b>Espectro 21</b>	0,4	99,6	-	-	-
<b>Espectro 22</b>	90	8,7	0,9	0,5	-



#### 4.5.4. EW35

A camada de intermetálicos, como é possível observar na Figura 4.24 é extremamente reduzida em comparação com os ensaios anteriores, algo que poderá ter a haver com a velocidade de detonação do explosiva, que foi a mais reduzida dos ensaios. A espessura média dos intermetálicos presentes no provete é de  $5,27\mu\text{m}$ , o que inviabilizou a tarefa da medição de microdurezas nos mesmos. De notar ainda a presença de uma linha com uma espessura com cerca de  $5\mu\text{m}$  constituindo uma possível fase diferente de intermetálicos.

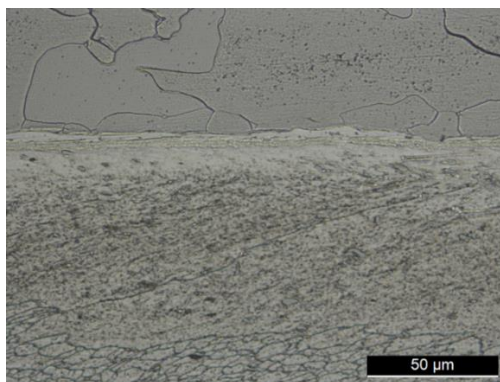


Figura 4.24. Zona da interface do ensaio EW35.

Com a microscopia eletrónica de varrimento executada ao provete, de modo a fazer uma caracterização da interface, foi possível retirar as imagens constituintes da Figura 4.25 cujos espetros estão representados na Tabela 4.6.

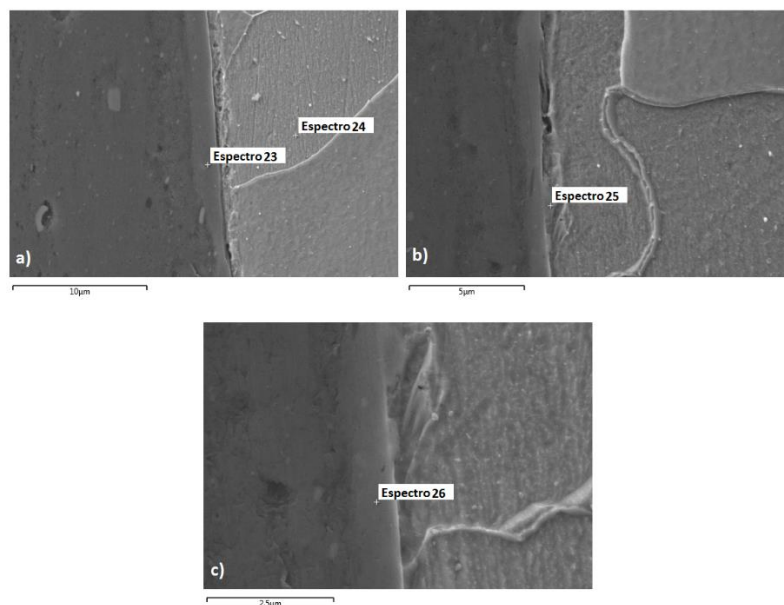


Figura 4.25. Microscopia eletrónica de varrimento do provete EW35L.

Na Figura 4.25 a) é possível observar a região da interface, no entanto esta com uma baixa adesão, com a ausência de intermetálicos e os respetivos espectros revelaram apenas a presença dos materiais base.

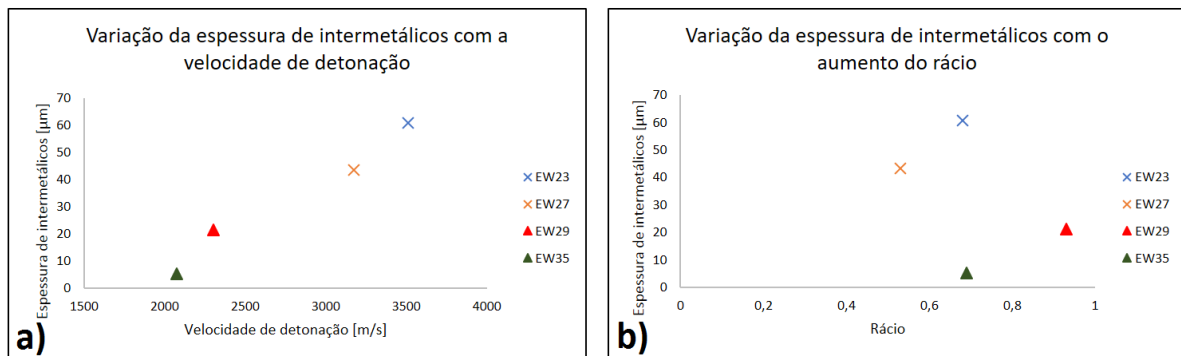
A Figura 4.25 b) mostra a presença da fenda e um intermetálico na zona da interface. Este intermetálico de constituição no Espectro 25, segundo a secção 2.4.1.2, possui percentagem em alumínio típica da fase *FeAl*. Na Figura 4.25 c) está representada o que se pensa que seja outra fase de intermetálico, ou até alumínio com resíduos de ferro, apresentada no Espectro 26.

**Tabela 4.6.** Espectros do provete EW35L, com percentagem em peso de cada elemento.

	Al [%]	Fe [%]	Si [%]	Mg [%]
<b>Espectro 23</b>	98,2	-	1,8	-
<b>Espectro 24</b>	-	100	-	-
<b>Espectro 25</b>	21,8	75,8	0,4	1,9
<b>Espectro 26</b>	93,5	5,1	0,9	0,6

#### 4.5.5. Discussão dos resultados

Após a exposição dos resultados provenientes da análise da interface, é possível retirar que de ensaio para ensaio, ao se reduzir a velocidade de detonação quando se procedia a uma alteração do explosivo, a espessura média dos intermetálicos presentes reduz, como é possível observar na Figura 4.26 a). Ora, quando se aumenta a velocidade de detonação, a energia fornecida ao sistema é mais elevada, pelo que é espectável que a haja uma maior formação de intermetálicos. Por outro lado, como está apresentado na Figura 4.26 b), um aumento de rácio apenas promove a um aumento da espessura dos intermetálicos, quando o mesmo se faz variar dentro do mesmo explosivo. Isto é, o ensaio EW23 e EW27 foram executados com Emulsão explosiva e um aumento do rácio promoveu um aumento da espessura de intermetálicos. Por outro lado, apesar do rácio do ensaio EW23 e EW35 ser semelhante, a espessura de intermetálicos é drasticamente menor no último. Entre o ensaio EW29 e EW35, foi utilizado o ANFO, variando apenas o rácio, e para um aumento do mesmo, houve um aumento da espessura de intermetálicos.



**Figura 4.26** Análise ao aumento da espessura de intermetálico com: a) Velocidade de detonação; b) Rácio.

Por outro lado, fazendo uma análise à dureza dos intermetálicos presentes em cada uma das amostras como é possível observar na Figura 4.27 a), é possível observar que para um aumento da velocidade de detonação, a dureza dos intermetálicos irá aumentar. Por outro lado, na Figura 4.27 b), observa-se que com um aumento da velocidade de detonação, a percentagem de alumínio reduz, à exceção do ensaio EW35 (Neste ensaio, contudo, não foi possível avaliar uma maior quantidade de intermetálicos pelo que o valor não deverá ser considerado para análise). Uma vez que a difusão do ferro no alumínio é mais fácil do que a do alumínio no ferro, como comprovado por Rathod & Kutsuna (2004), a formação de intermetálicos ricos em alumínio é mais favorável, uma vez que os átomos de ferro migram para a zona de alumínio, formando assim intermetálicos ricos em alumínio. Com o aumento da energia fornecida ao sistema, maior será a quantidade de ferro difundido, sendo natural que para energias mais elevadas, seja observável a existência de compostos mais ricos em ferro. Os estudos feitos por Bouché et al. (1998) e Kobayashi & Yakou (2002) permitiram a conclusão de que os intermetálicos  $Fe_2Al_5$  e  $FeAl_3$  formam-se numa gama de temperaturas entre os 700 e 900°C, e ainda, por outro lado os intermetálicos mais ricos em ferro,  $Fe_3Al$  e  $FeAl$ , formam-se a temperaturas na ordem dos 1000°C. Ora, se a velocidade de detonação é mais elevada, maior é a energia fornecida ao sistema e as placas irão alcançar uma maior temperatura. Portanto, para uma maior velocidade de detonação, é espectável que os intermetálicos tenham na sua composição uma maior percentagem de ferro, à semelhança do observado nos diferentes ensaios.

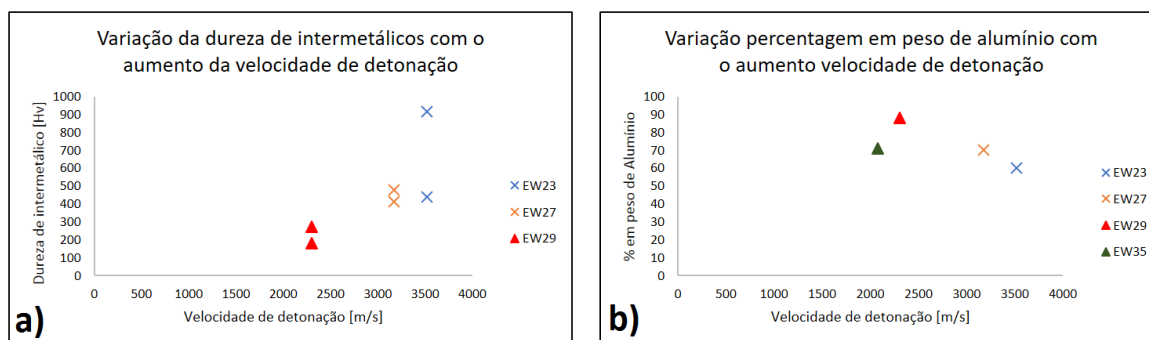


Figura 4.27 Influência da velocidade de detonação com: a) Variação da dureza dos intermetálicos; b) Variação da percentagem em peso de alumínio.

## 4.6. Análise mecânica

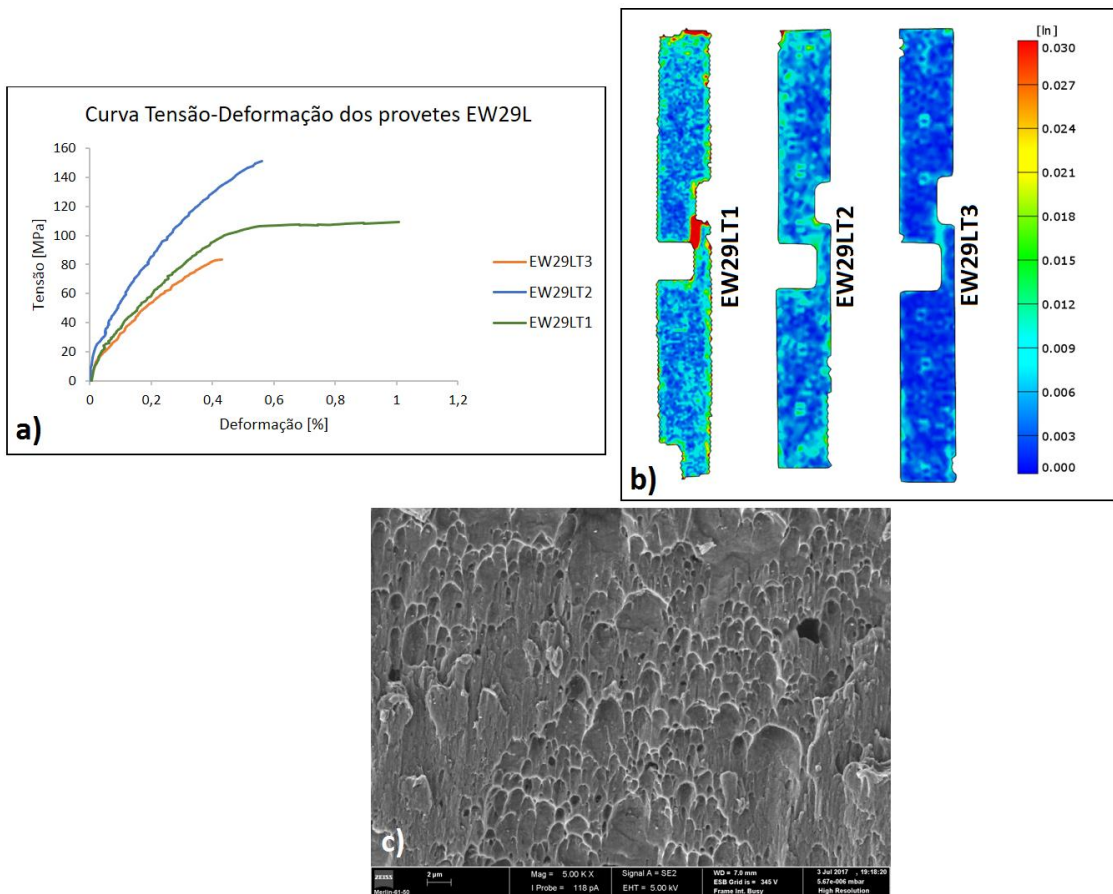
### 4.6.1. Ensaios de tração ao corte

Apenas foi possível realizar ensaios de tração ao corte no ensaio EW29, uma vez que na outra soldadura bem sucedida, a adesão era muito reduzida, tendo-se as placas desprendido no momento da maquinação para este ensaio.

A Figura 4.28 a) mostra a curva de tensão deformação dos diferentes ensaios realizados. No provete EW29LT1 é possível observar que a tensão máxima ocorre antes da rotura, sendo esta de 116,85MPa, correspondendo a uma deformação de 1%. Já para o provete EW29LT2, a tensão é máxima novamente na rotura sendo esta de 151,19MPa, dando uma deformação de 0,69%. Por fim, no provete EW29LT3, apresentou a tensão máxima de 88,69MPa, sendo esta a menor dos três ensaios, correspondendo a 0,43% de deformação.

Já na Figura 4.28 b) é possível observar o mapa de deformações dos três provetes no instante antes da rotura, segundo a deformação equivalente de *Von Mises*. Apenas no último ensaio é que não foi possível observar a concentração de tensões na zona de rotura, sendo esta mais evidente no provete EW29LT1.

Por fim, na Figura 4.28 c) é possível observar a superfície de arrancamento do provete EW29LT1. É notável a presença de alvéolos na zona observada, que, juntamente com a análise da curva tensão-deformação e do mapa de deformações, permite concluir que se trata de uma fratura dúctil.



**Figura 4.28** Ensaio de tração ao corte: a)Curvas de tensão-deformação; b) Mapa de deformações nos provetes; c) Microscopia eletrônica de varrimento do provete EW29LT1.



## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível concluir que a soldadura entre aço carbono e alumínio é complicada, no entanto não impossível. Para esta combinação, a utilização do ANFO revelou-se mais eficaz que a emulsão explosiva, devido à sua baixa velocidade de detonação.

A janela de soldabilidade foi uma ferramenta importante para a escolha do explosivo a utilizar nos ensaios realizados. Os resultados obtidos relativos às soldaduras bem sucedidas e às condições em que não se verificou soldadura, permitem indicar que, o limite de Wittman com  $N=0,11$  descreve o comportamento desta ligação. Pois, o limite superior com  $N=0,11$  engloba apenas as soldaduras bem sucedidas, o que não acontece com  $N=0,065$ .

No caso das soldaduras bem sucedidas, o aumento do rácio e o aumento da velocidade de detonação conduzem a um maior aumento médio de dureza.

O aumento da velocidade de detonação induz um aumento da espessura média da camada de intermetálicos na interface, bem como se dá um aumento das durezas dos compostos intermetálicos. Para cada tipo de explosivo verificou-se que o aumento do rácio de explosivo, também induz um aumento da espessura média da camada de intermetálicos na interface. Por outro lado, o aumento da velocidade de detonação, conduz a uma redução da percentagem em peso de alumínio nos intermetálicos.

Todavia não se consegue concluir com exatidão, os compostos intermetálicos presentes nos diferentes ensaios, uma vez que nem todas as durezas correspondem com as percentagens em peso de alumínio nas mesmas zonas. Ora, a análise EDS não é eficaz no que toca à identificação dos intermetálicos, uma vez que apenas faz a análise espectral de cada elemento nas redondezas da zona selecionada. Esta análise complementada com uma análise de microdurezas na mesma zona poderá auxiliar à seleção do intermetálico, no entanto nenhum dos métodos é totalmente eficaz. Seria vantajoso proceder-se à difração por raio-x que permite uma melhor identificação da fase do intermetálico. No entanto é possível concluir que os provetes apresentam mais do que uma fase de intermetálico em cada um dos ensaios.

Através da análise dos ensaios de tração ao corte e dos mapas de deformação, é possível a conclusão de que não se trata de uma soldadura homogénea, pelo que as soldaduras não apresentaram as mesmas propriedades nos diferentes ensaios.

Como trabalhos futuros são feitas as seguintes propostas:

O ensaio EW35, apesar de apresentar uma soldadura, a mesma foi muito inconsistente, pelo que não se consegue concluir se foi devido a uma má preparação do ANFO ou do baixo rácio de explosivo. Seria assim conveniente realizar um novo ensaio nas mesmas condições a fim de perceber se a soldadura iria ter as mesmas propriedades.

Deveria ser feita uma melhor caracterização mecânica dos ensaios, como por exemplo realizar ensaios de corte. Os mesmos foram planeados nas soldaduras bem sucedidas deste projeto, bem como foi feita a projeção da ferramenta para o ensaio. No entanto o equipamento para maquinar a ferramenta não chegou a tempo da conclusão deste trabalho.

A utilização da placa intermédia deve ser uma opção a considerar em soldaduras aço-alumínio. A mesma é útil no auxílio à redução do fornecimento de energia à placa base, permitindo assim uma soldadura com velocidades de detonação superiores. Este tipo de soldadura revelou que a presença de intermetálicos é uma constante. O uso de uma placa intermédia de, por exemplo, chumbo, iria permitir que não se desse a formação de intermetálicos, uma vez que o mesmo não tem afinidade química quer com o aço, quer com o alumínio.

Por fim, o *Plain Wave Generator*, permite a planificação da onda de detonação de forma mais eficaz. Seria conveniente testar o seu uso em ensaios com as mesmas condições de soldaduras bem sucedidas e assim perceber a sua influência na interface.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahamson, G., 1961. Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet. *Journal of Applied Mechanics*, pp.519–528.
- Athar, M.M.H. & Tolaminejad, B., 2015. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding. *Materials and Design*, 86, pp.516–525.
- Bahrani, A.S., Black, T.J. & Crossland, B., 1967. The mechanics of wave formation in explosive welding. , 296, pp.123–136.
- Blazynski, T.Z., 1983. *Explosive Welding, Forming and Compaction*. 1ed. Applied Science Publishers Ltd, Essex, Inglaterra.
- Bouché, K., Barbier, F. & Coulet, A., 1998. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, 249(1–2), pp.167–175.
- Carpenter, S.H. & Wittman, R.H., 1975. Explosion Welding. *Annual Review of Materials Science*, 6, pp.177–200.
- Carton, E., 2004. Wave Forming Mechanisms in Explosive Welding. *Materials Science Forum*, 465–466, pp.219–224.
- Carvalho, G.H.S.F.L. et al., 2017. Effect of the flyer material on the interface phenomena in aluminium and copper explosive welds. *Materials & Design*, 122, pp.172–183.
- Chou, P.C. & Flis, W.J., 1986. Recent Developments in Shaped Charge Technology. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 11(4), pp.99–114.
- Cowan, G.R., Bergmann, O.R. & Holtzman, A.H., 1971. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2(11), pp.3145–3155.
- Cowan, G.R. & Holtzman, A.H., 1963. Flow configurations in colliding plates: Explosive bonding. *Journal of Applied Physics*, 34(4), pp.928–939.
- Crossland, B., 1976. Review of the present state-of-the-art in explosive welding. , (January), pp.8–20.
- Deribas, A.A. et al., 1967. Explosive Welding. *JOM: Journal of The Minerals, Metals &*

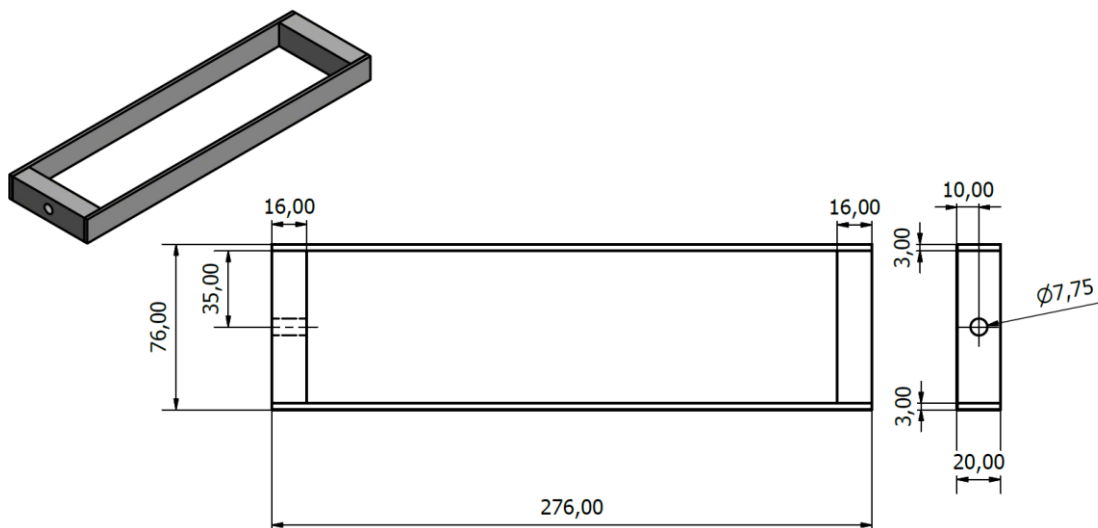
- Materials Society*, 3(1), pp.111–118.
- Durgutlu, A., Okuyucu, H. & Gulenc, B., 2008. Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel. *Materials and Design*, 29(7), pp.1480–1484.
- Findik, F., 2011. Recent developments in explosive welding. *Materials and Design*, 32(3), pp.1081–1093.
- Gulenc, B., 2008. Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method. *Materials and Design*, 29(1), pp.275–278.
- Gurney, R.W., 1943. The Initial Velocities of fragments from Bombs, shell and grenades. , (45).
- Han, J.H., Ahn, J.P. & Shin, M.C., 2003. Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding. *Journal of Materials Science*, 38(1), pp.13–18.
- Hokamoto, K., Izuma, T. & Fujita, M., 1993. New explosive welding technique to weld. *Metallurgical Transactions A*, 24(10), pp.2289–2297.
- Hunt, J.N., 1967. Wave Formation in Explosive Welding.pdf. *Philosophical Magazine*, (January 2013), pp.37–41.
- Kattner, U.R. & Burton, B.P., 1992. *ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams*, Al-Fe (Aluminum-Iron).
- Kennedy, J.E., 1970. Gurney energy of explosives: Estimation of the velocity and impulse imparted to driven metal.
- Kobayashi, S. & Yakou, T., 2002. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment. *Materials Science and Engineering A*, 338(1–2), pp.44–53.
- Kovacs-Coskun, T., Volgyi, B. & Sikari-Nagl, I., 2015. Investigation of aluminum-steel joint formed by explosion welding. *Journal of Physics: Conference Series*, 602, p.12026.
- Lince, D., 1997. Explosion Welding, fundamentals of the process. *AWS*, pp. 766-781.
- Marsh, S.P., 1980. LASL Shock Hugoniot Data. *Los Alamos Series on Dynamic Material Properties*, p.150.
- Mendes, R. et al., 2014. Differences between the detonation behavior of emulsion

- explosives sensitized with glass or with polymeric micro-balloons. *Journal of Physics: Conference Series*, 500(5), p.52030.
- Mendes, R., Ribeiro, J.B. & Loureiro, A., 2013. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration. *Materials and Design*, 51, pp.182–192.
- Nobili, A., Masri, T. & Lafont, M.C., 1999. Recent Developments in Characterization of a Titanium-Steel Explosion Bond Interface. , pp.1–15.
- Patterson, R.A., 1993. Welding brazing and soldering. *ASM Handbook*, 6, p.2873.
- Rathod, M.J. & Kutsuna, M., 2004. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding. *Welding journal*, 83(1), pp.16–26.
- Ribeiro, J.B., Mendes, R. & Loureiro, A., 2014. Review of the weldability window concept and equations for explosive welding. *Journal of Physics: Conference Series*, 500(5), p.52038.
- Robinson, J.L., 1975. The mechanics of wave formation in impact welding. *Philosophical Magazine*, 31(3), pp.587–597.
- de Rosset, W.S., 2006. Analysis of Explosive Bonding Parameters. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(6), pp.634–638.
- Tricarico, L. et al., 2009. Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints. *Materials and Design*, 30(7), pp.2693–2700.
- Walsh, J.M., Shreffler, R.G. & Willig, F.J., 1953. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions. *Journal of Applied Physics*, 24(3), pp.349–359.
- Young, G., 2004. Explosion Welding , Technical Growth and Commercial History References : *Stainless Steel World*, pp.1–6.
- Zakharenko, I.D. & Zlobin, B.S., 1984. Effect of the hardness of welded materials on the position of the lower limit of explosive welding. , 19(5), pp.689–692.

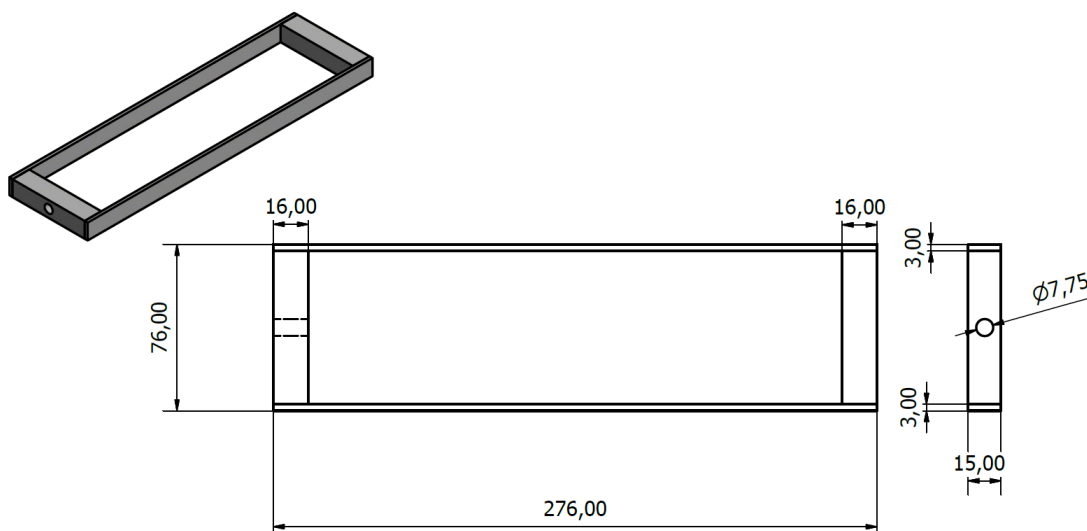


## APÊNDICE A

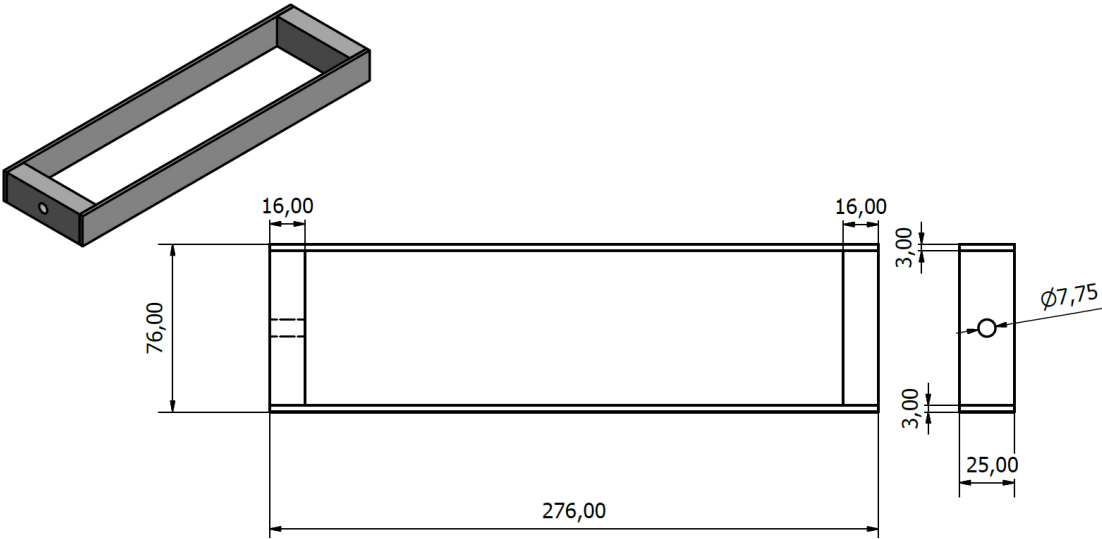
- Caixas utilizadas com 20mm de altura.



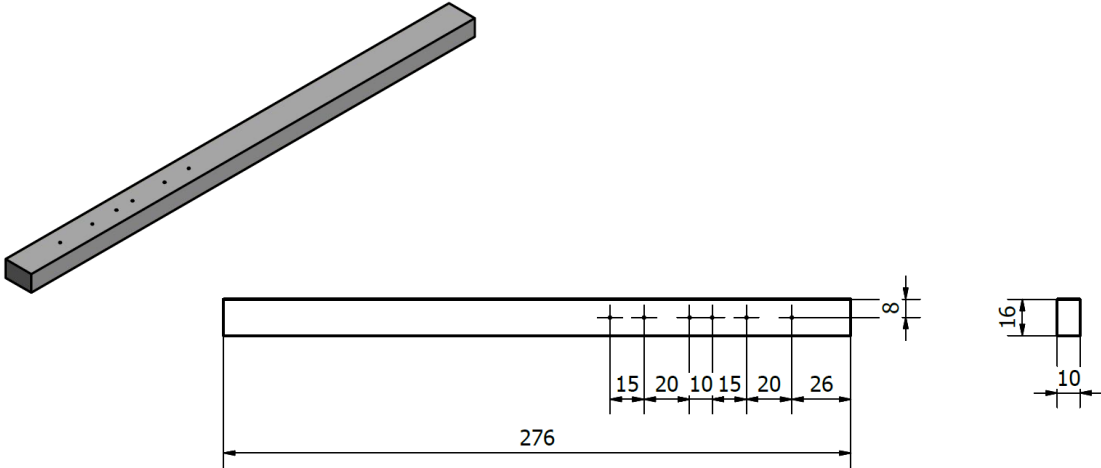
- Caixas utilizadas com 15mm de altura.



- Caixas utilizadas com 25mm de altura.

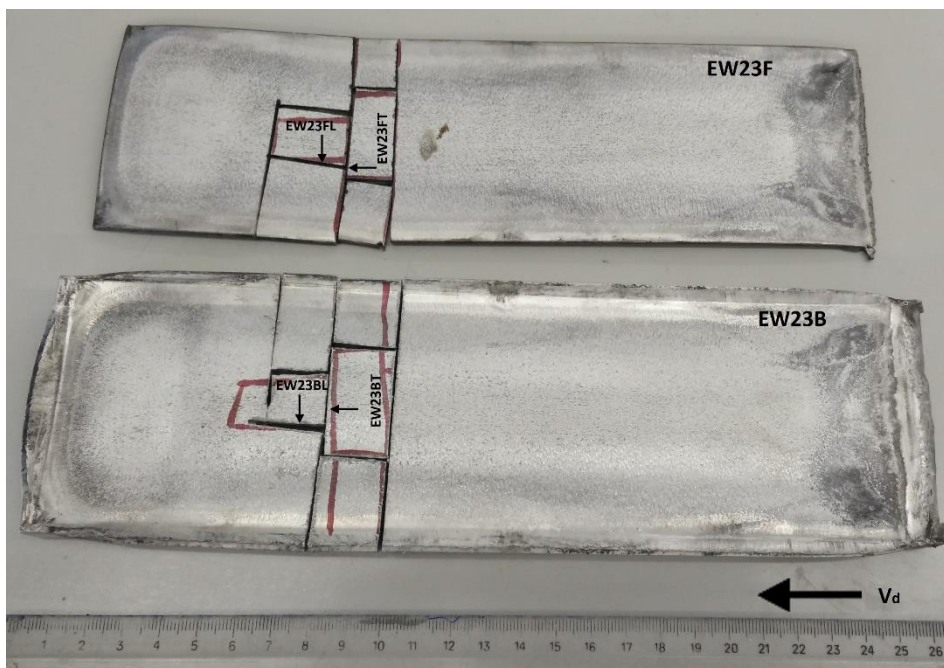


- Peças de fixação das sondas.

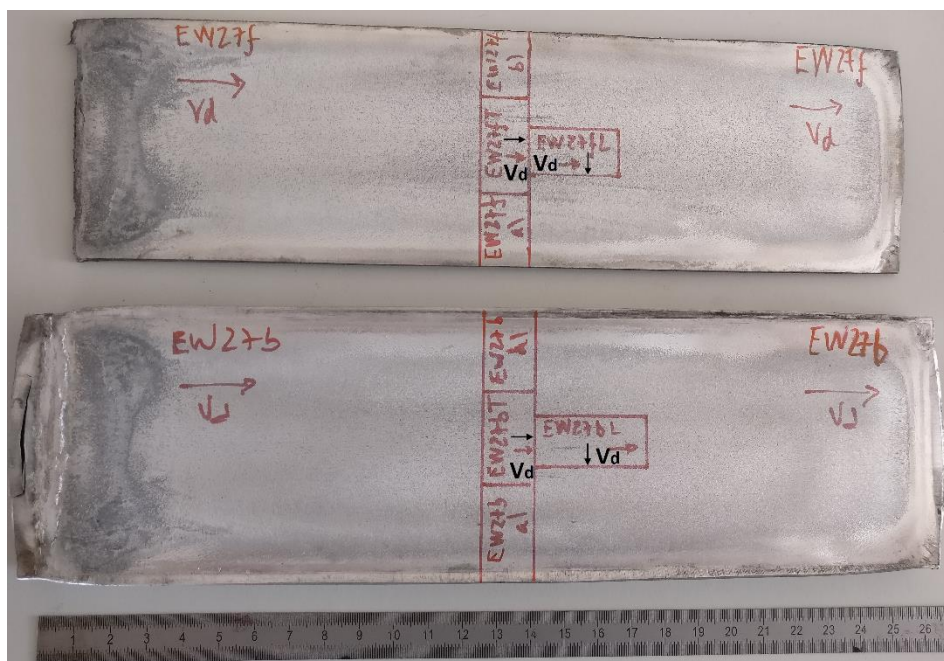


## APÊNDICE B

- Preparação dos provetes do ensaio EW23.



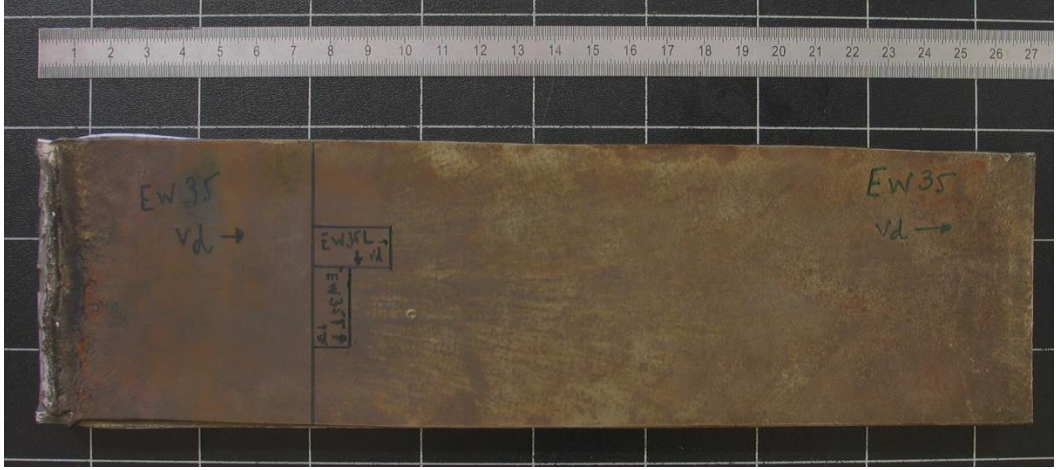
- Preparação dos provetes do ensaio EW27.



- Preparação dos provetes do ensaio EW29.



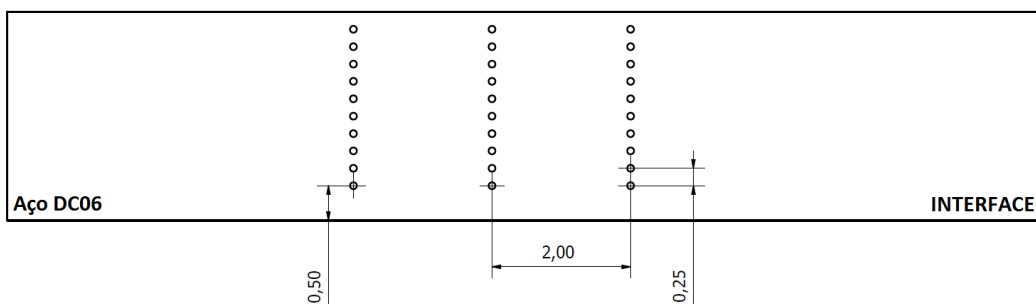
- Preparação dos provetes do ensaio EW35.



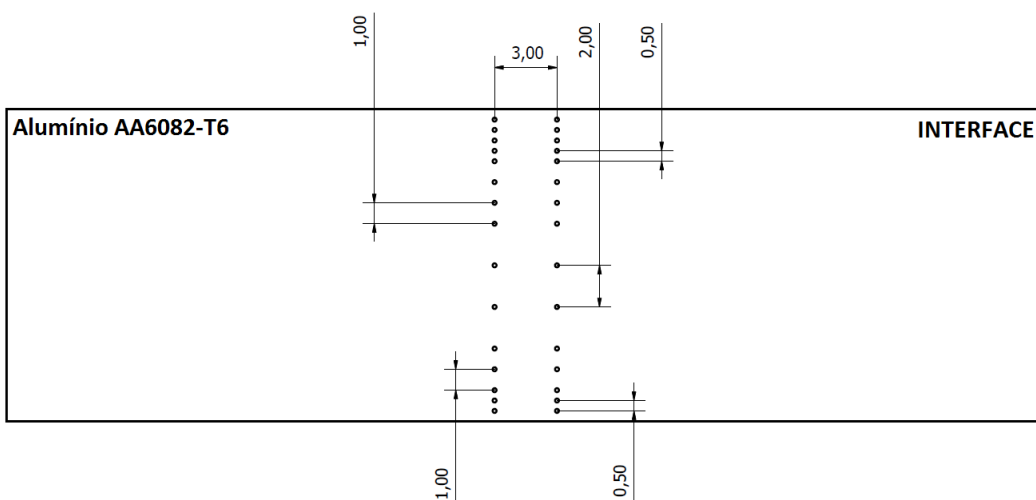


## APÊNDICE C

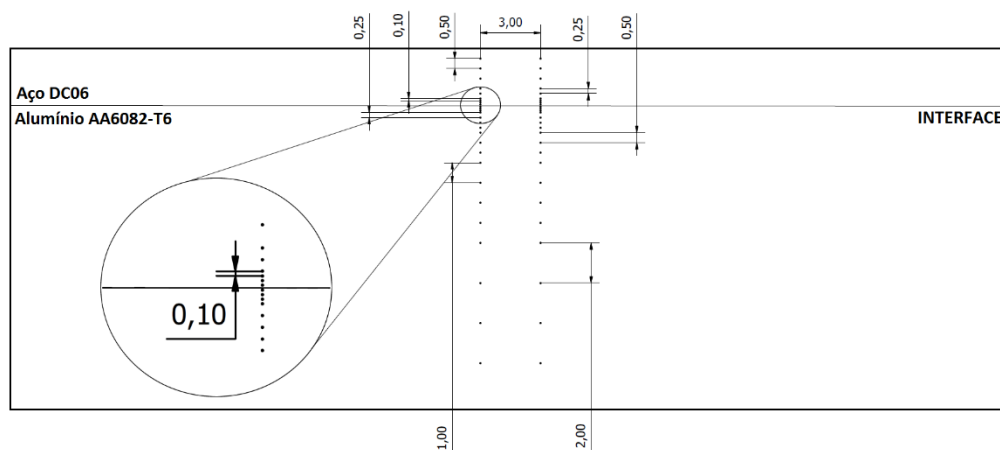
- Perfil de durezas utilizado para placas voadoras.



- Perfil de durezas utilizado para placas base.



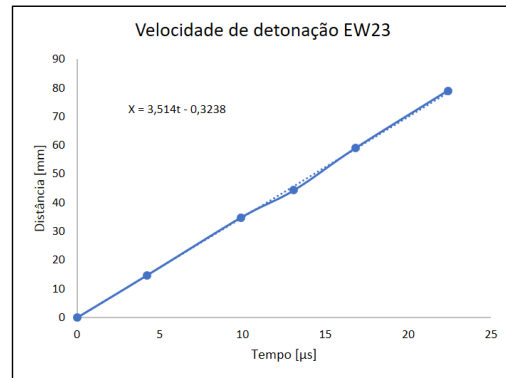
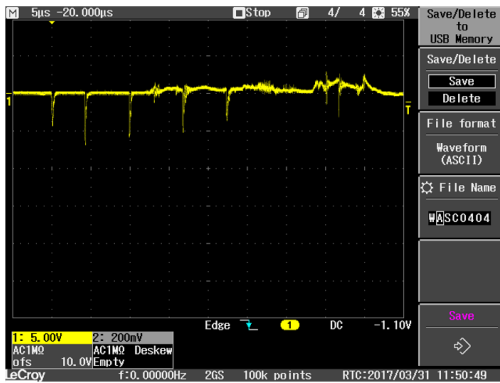
- Perfil de durezas utilizado para soldaduras com sucesso.



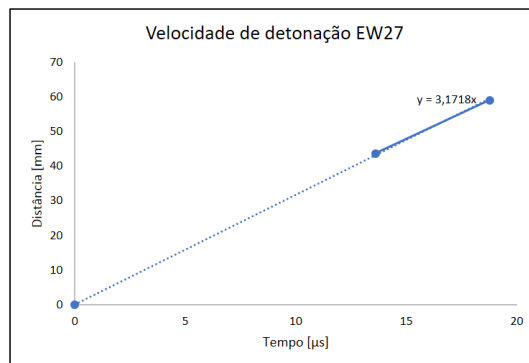
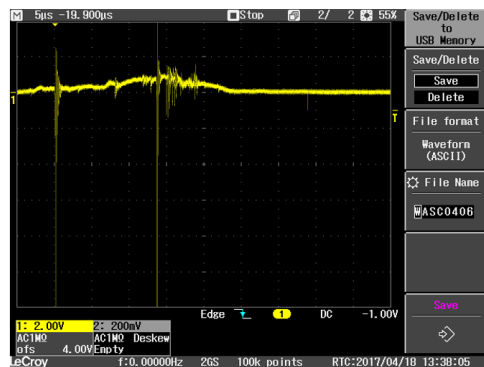


## APÊNDICE D

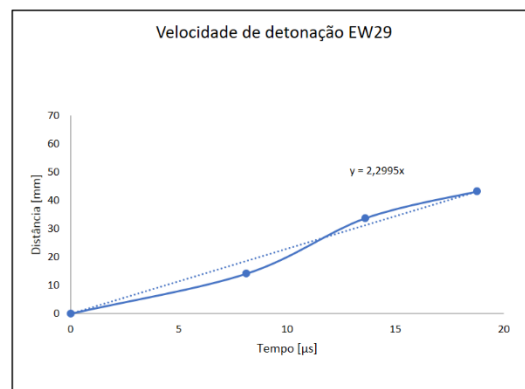
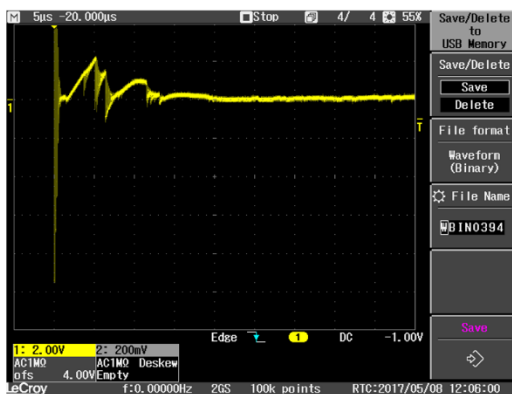
- Medição no osciloscópio e enquadramento das velocidades do EW23.



- Medição no osciloscópio e enquadramento das velocidades do EW27.



- Medição no osciloscópio e enquadramento das velocidades do EW29.





## APÊNDICE E

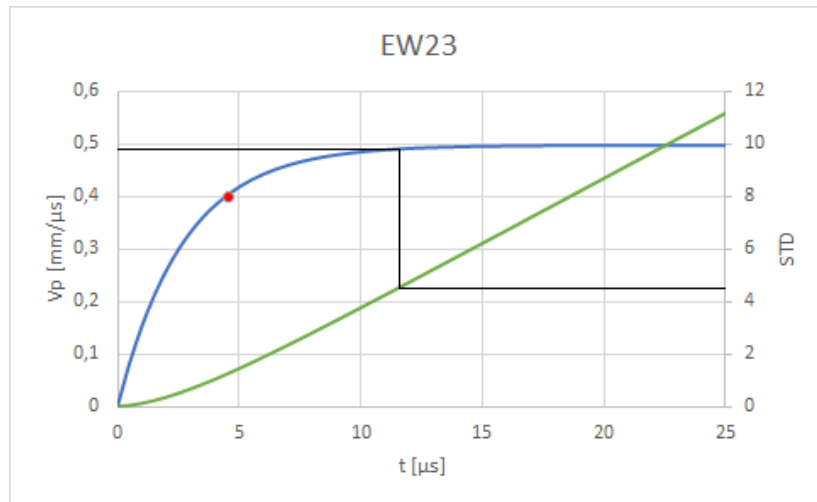
Tabela A.1. Parâmetros para cálculo da velocidade de Gurney.

	<b>EW23</b>	<b>EW27</b>	<b>EW29</b>	<b>EW35</b>
$\sqrt{2E}$	1,183	1,068	0,774	0,698
$p_{cj}$	4	4	3	3
$V_{p,Gurney}[m/s]$	497,26	372,65	403,35	295,62
$V_{p,cal}[m/s]$	397,81	298,12	322,68	236,5
$t_{vcal} [\mu s]$	4,57			
$t [\mu s]$	11,49	12,37	13,74	16,56
$\tau$	2,72	2,3	2,87	1,57
<b>C1</b>	0,0135	0,0152	0,0116	0,0095
<b>C2</b>	0,01	0,01	0,33	0,06
$V_p [m/s]$	489,95	452,35	400,08	295,61

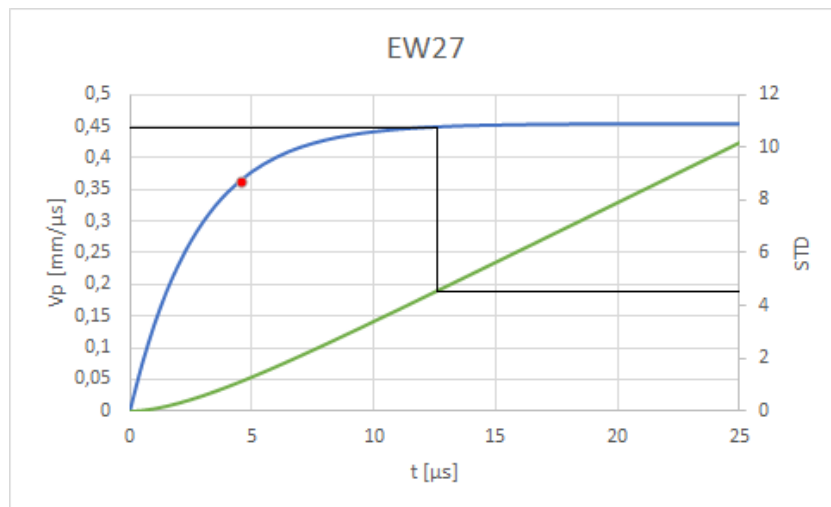


## APÊNDICE F

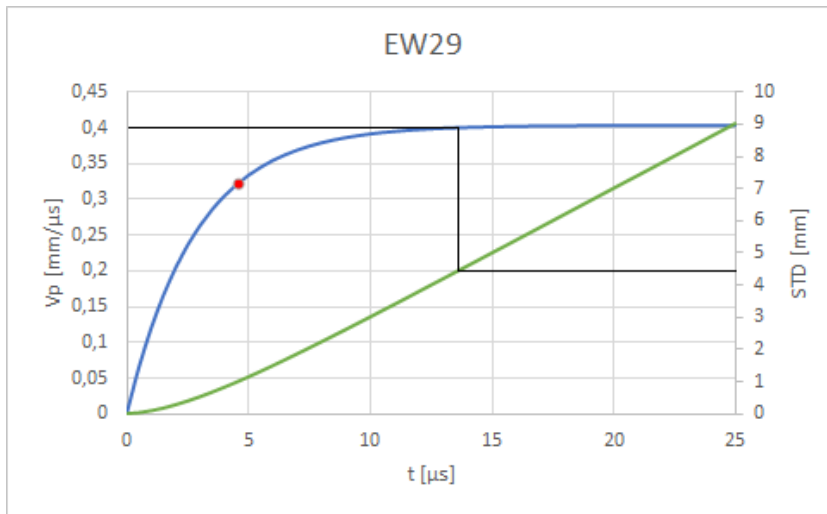
- EW23.



- Ew27.



- Ew29.



- Ew35.

