

1 2 9 0



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Guilherme Primitivo de Sousa Ferreira

**SOLDADURA POR EXPLOSÃO DE UMA LIGA DE  
ALUMÍNIO A UM AÇO INOXIDÁVEL: OTIMIZAÇÃO  
DO MATERIAL DA PLACA INTERMÉDIA**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica do ramo de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes e pelo Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra/Departamento de Engenharia Mecânica.

Setembro de 2019



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável: otimização do material da placa intermédia.**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Explosion welding of an aluminum alloy to a stainless steel: optimisation of the intermediate plate material.**

Autor

**Guilherme Primitivo de Sousa Ferreira**

Orientadores

**Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**

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

Júri

Presidente	Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

**Coimbra, setembro, 2019**



*“The mind that opens up to a new idea never returns to its original size.”*

Albert Einstein

Aos meus pais.



## **Agradecimentos**

Durante a realização do presente trabalho contei com o apoio de imensas pessoas e instituições e as quais quero expressar o meu agradecimento.

Ao Professor Doutor Ivan Galvão, pela sua orientação, por todo o apoio prestado em todas as ocasiões e por todos ensinamentos passados.

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes pela disponibilidade, empenho e apoio na realização os ensaios experimentais e pelos conhecimentos transmitidos sobre a componente eletrónica e montagem de ensaios.

Ao Professor Doutor Altino Loureiro, agradeço pela disponibilidade apresentada e por todos os ensinamentos transmitidos.

Ao Professor Doutor Rui Leal, agradeço todo o apoio e ensinamentos transmitidos para a realização deste trabalho.

Ao Gustavo Senna agradeço toda a ajuda dada e sugestões ao longo deste realização deste projeto.

Ao Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio (LEDAP) em Condeixa, pela disponibilização das infraestruturas e equipamentos que foram essenciais e fundamentais na realização deste trabalho.

Aos meus pais, familiares, namorada e amigos que ao longo destes anos sempre me apoiaram em todas as decisões tomadas.



## Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo estudar a influência da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga alumínio a um aço inoxidável e a otimização da mesma. Para se perceber o resultado das diferentes placas intermédias, foram analisadas as alterações a nível macroscópico, microestrutural, químico e mecânico.

Para a realização deste trabalho foram realizados dois ensaios experimentais, sendo feito a projeção da placa de alumínio sobre a placa de aço inoxidável e usando duas placas intermédias distintas (aço carbono e liga de nióbio). Foi adotado a configuração paralela totalmente sobreposta para a execução destas soldaduras, em que a distância entre placas foram na ordem de 1,5 vezes a espessura da placa a projetar. O explosivo utilizado para a soldadura foi o ANFO.

Os dois ensaios realizados evidenciaram ligações com boa qualidade, sendo, no entanto, possível observar a formação de compostos intermetálicos nas interfaces de soldadura, exceto na junção do aço carbono ao aço inoxidável. Após a detonação do explosivo, a dureza dos materiais aumentou, sendo mais notório no aço inoxidável. A liga de alumínio sofreu poucas alterações na sua dureza. Os quatro ensaios de tração/corte realizados foram de grande sucesso, uma vez que todas as soldaduras apresentaram uma elevada resistência e a rotura apenas se deu na liga de alumínio.

**Palavras-chave:** Compostos intermetálicos, Janela de soldabilidade, Interface de soldadura, Configuração paralela, Velocidade de detonação, Placa intermédia.



## Abstract

The aim of this work is to study the influence of the intermediate plate on explosion welding of an aluminium alloy to a stainless steel and its optimisation. In order to understand the result of the different intermediate plates, the changes in macroscopic, microstructural, chemical and mechanical level were analysed.

For this work two experimental tests were carried out, being the projection of the aluminium plate on the stainless steel plate and using two distinct intermediate plates (carbon steel and niobium alloy). The full overlapped parallel configuration was adopted for the production of the welds, where the distance between plate was in the order of 1,5 times the thickness of the plate to be projected. The explosive used for the welding was ANFO.

Both tests showed good quality joints, however, it is possible to observe the formation of intermetallic compounds at the welding interfaces, except at the weld of carbon steel to stainless steel. After the explosive detonation, the hardness of the materials increased, being more noticeable in the stainless steel. The aluminium alloy has undergone few changes in hardness. The four tensile/shear tests performed were very successful, since all welds presented a high strength and the rupture only occurred in the aluminium alloy.

**Keywords** Intermetallic compound, Weldability window, Weld interface, parallel configuration, detonation velocity, Intermediate layer.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xv
1. Introdução.....	1
2. Estado de arte.....	3
2.1. Enquadramento histórico .....	3
2.2. Princípio do processo.....	3
2.2.1. Vantagens e desvantagens .....	5
2.2.2. Aplicações do processo .....	5
2.2.3. Configurações alternativas .....	6
2.2.4. Interface da soldadura.....	7
2.2.5. Mecanismos de formações de onda .....	8
2.3. Parâmetros do processo .....	12
2.3.1. Seleção do explosivo .....	13
2.3.2. Rácio de explosivo .....	13
2.3.3. Distância entre placas .....	14
2.4. Janela de Soldabilidade.....	15
2.4.1. Limite esquerdo .....	16
2.4.2. Limite inferior .....	17
2.4.3. Limite Superior.....	17
2.4.4. Limite direito .....	18
2.5. Soldadura por explosão entre o alumínio e o aço inoxidável com uso de placa intermédia.....	19
2.5.1. Morfologia da interface .....	19
2.5.2. Formação de compostos intermetálicos.....	20
3. Procedimento experimental .....	23
3.1. Materiais e equipamentos utilizados.....	23
3.1.1. Materiais utilizados .....	23
3.2. Nomenclatura dos ensaios .....	24
3.3. Montagem experimental .....	25
3.4. Medição da velocidade de detonação .....	27
3.5. Cálculo da velocidade de impacto .....	27
3.5.1. Estimativa da velocidade de impacto .....	28
3.6. Parâmetros de soldadura .....	30
3.7. Caracterização macro e microestrutural.....	30
3.7.1. Preparação das amostras.....	30
3.7.2. Análise SEM/EDS .....	31
3.8. Caracterização mecânica.....	31

3.8.1. Microdureza .....	31
3.8.2. Ensaio de tração-corte.....	32
3.9. Análise fractográfica .....	32
4. Resultados e discussão .....	33
4.1. Enquadramento dos ensaios e construção das janelas de soldabilidade.....	33
4.1.1. Velocidade de Detonação.....	33
4.1.2. Velocidade de Impacto.....	33
4.1.3. Ângulo de colisão.....	34
4.1.4. Janela de soldabilidade.....	35
4.2. Análise macroscópica.....	36
4.2.1. AA/CS/SS-A30 .....	36
4.2.2. AA/N/SS-A30 .....	36
4.3. Análise da interface de soldadura.....	37
4.3.1. AA/CS/SS-A30 .....	37
4.3.2. AA/N/SS-A30 .....	39
4.3.3. Discussão de Resultados .....	41
4.4. Perfis de microdureza .....	44
4.4.1. AA/CS/SS-A30 .....	44
4.4.2. AA/N/SS-A30 .....	45
4.4.3. Discussão de resultados.....	45
4.5. Resistência à tração/corte .....	47
5. Conclusões .....	53
6. Propostas para trabalhos futuros .....	55
Referências bibliográficas .....	57
Apêndice A.....	61
Apêndice B.....	63
Apêndice C.....	65
Apêndice D.....	67
Apêndice E.....	69
Apêndice F .....	71
Apêndice G.....	73
Apêndice H.....	75
Apêndice I.....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Montagem em configuração paralela do processo de soldadura por explosão com placa intermédia.....	4
Figura 2.2. Configuração dupla inclinada. Adaptada de Blazynski (1983).....	6
Figura 2.3. Configuração cilíndrica: a) Explosivo interior. Adaptada de Sun et al. (2011); b) Explosivo exterior. Adaptada de Mendes et al. (2013).....	7
Figura 2.4. Diferentes morfologias de interface numa soldadura níquel-níquel com a variação de velocidade de detonação: a) Interface plana; b) Interface ondulada; c) Interface ondulada. Adaptada de Cowan et al. (1971). ....	7
Figura 2.5. Mecanismo de indentação de jato: a) Deformação resultante da penetração do jato; b) Efeito gerado pela velocidade horizontal da base. Adaptada de Abrahamson (1961). ....	9
Figura 2.6. Mecanismo de formação de onda. Adaptada de Bahrani et al. (1967). ....	9
Figura 2.7. Mecanismo de fluxo instável: a) Instabilidade de Kelvin-Helmholz num escoamento de água; b) Interface de uma soldadura Cu-Ni. Adaptada de Carton (2004). ....	10
Figura 2.8. Mecanismo de formação de vórtices: a) Interface de uma soldadura de Cobre-Aço inoxidável; b) Vórtice de Von Kármán. Adaptado de Carton (2004).....	11
Figura 2.9. Mecanismo de rarefação de onda. Adaptado de Carton (2004).....	11
Figura 2.10. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão com placa intermédia no momento da detonação. Adaptado de Hokamoto et al. (1993). ....	12
Figura 2.11. Influência da variação do rácio de explosivo em soldadura de Alumínio-Cobre: a) R = 1.5; b) R = 2; c) R = 2.5; d) R = 3. Adaptada de Gulenc (2008)...	14
Figura 2.12. Influência da STD na ligação Cobre-Aço inoxidável: a) STD = 0.5h; b) STD = h; c) STD = 2h; d) STD = 3h. Adaptado de Durgutlu et al. (2008) .....	15
Figura 2.13. Conceito da janela de soldabilidade e os seus limites representativos. Adaptado de Blazynski (1983). ....	16
Figura 2.14. Morfologia da interface: a) Aço inoxidável-Cobre; b) Cobre-Alumínio. Adaptado de Aceves et al. (2015) .....	20
Figura 2.15. Diagrama de fases do sistema ferro-alumínio. Adaptada de Reza et al. (2017). ....	21
Figura 2.16. a) Diagrama de fases do sistema nióbio-alumínio. Adaptado de Mahdouk et al. (1998). b) Diagrama de fases do sistema ferro-nióbio. Adaptado de Hajitabar et al. (2017). ....	22
Figura 3.1. Representação da caixa de suporte; b) Montagem experimental. ....	26

Figura 3.2. Cronómetros de precisão. ....	26
Figura 3.3. Sondas utilizadas para medição da velocidade de detonação com os cronómetros. ....	27
Figura 4.1. Calibração da velocidade de impacto no ensaio AA/CS/SS-A30. ....	34
Figura 4.2. Janelas de soldabilidade para os ensaios de AA/CS/SS-A30. ....	35
Figura 4.3. Janelas de soldabilidade para os ensaios de AA/N/SS-A30. ....	35
Figura 4.4. Ensaio AA/CS/SS-A30: a) Vista superior; b) Vista lateral. ....	36
Figura 4.5. Ensaio AA/N/SS-A30: a) Vista superior; b) Vista lateral. ....	37
Figura 4.6. Interface da amostra longitudinal do ensaio AA/CS/SS-A30: a) Interface AA6082-T6, DC05 e AISI 304; b) Interface AA6082-T6 e DC05; c) DC05 e AISI 304. ....	38
Figura 4.7. Análise EDS da amostra AA/CS/SS-A30-L: a) Macrografia da interface AA6082-T6 e DC05; b) Espetro obtido. ....	39
Figura 4.8. Interface da amostra longitudinal do ensaio AA/N/SS-A30: a) Interface AA6082-T6, Nióbio e AISI 304; b) Interface AA6082-T6 e Nióbio; c) Interface Nióbio e AISI 304. ....	40
Figura 4.9. Análise EDS da amostra AA/N/SS-A30-L: a) Macrografia da interface AA6082-T6 e o Nióbio; b) Espetro obtido. ....	41
Figura 4.10. Análise EDS da amostra AA/N/SS-A30-L: a) Macrografia da interface Nióbio e AISI 304; b) Espetro obtido. ....	41
Figura 4.11. Perfis de microdureza obtidos nas diferentes placas no ensaio AA/CS/SS-A30. ....	44
Figura 4.12. Perfis de microdureza obtidos nas diferentes placas no ensaio AA/N/SS-A30. ....	45
Figura 4.13. Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/CS/SS-A30; a) T2; b) T3. ....	48
Figura 4.14. Análise SEM à superfície de fratura do provete AA/CS/SS-A30-T3. ....	49
Figura 4.15. Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/N/SS-A30: a) T2; b) T3. ....	50
Figura 4.16. Análise EDS do provete de tração ao corte do ensaio AA/N/SS-A30-T2: Macrografia da interface; b) Composição do espetro. ....	50
Figura 4.17. Análises SEM às superfícies de fratura dos provetes AA/N/SS-A30: a) T2; b) T3. ....	51

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais compostos intermetálicos do sistema Fe-Al. Adaptada de Kattner & Bourton (1992) e de Reza et al. (2017). .....	22
Tabela 3.1. Composição química nominal do aço AISI 304 (% pond.).....	23
Tabela 3.2. Composição química nominal a liga AA6082-T6 (% pond.).....	23
Tabela 3.3. Composição química nominal do aço carbono DC05 (% pond.).....	23
Tabela 3.4. Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais utilizados. Adaptada de A:S.M: Handbook (1990).....	24
Tabela 3.5. Parâmetros utilizados nas soldaduras realizadas. ....	30
Tabela 4.1. Resultados da medição da velocidade de detonação. ....	33
Tabela 4.2. Valores da velocidade de impacto para os ensaios realizados.....	34
Tabela 4.3. Valores obtidos para o ângulo de colisão de ensaios efectuados.....	35
Tabela 4.4. Comparação de espessura da camada de intermetálicos dos ensaios realizados .....	42
Tabela 4.5. Comparação do comprimento e amplitude médio de onda e respectivos desvios padrão enre as duas interfaces da soldadura AA/CS/SS-A30. ....	42
Tabela 4.6. Tabela de microdureza relativa ao ensaio AA/CS/SS-A30 .....	46
Tabela 4.7. Tabela de microdureza relativo ao ensaio AA/N/SS-A30.....	47
Tabela 4.8. Resultlados de ensaios de tração.....	47



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\Delta x_p(t)$  – Distância percorrida pela placa voadora em função do tempo

$\alpha$  – Ângulo de inclinação na configuração inclinada

$\beta$  – Ângulo de colisão

$\beta_1$  – Ângulo de colisão da placa voadora

$\beta_2$  – Ângulo de colisão das placas voadora e estacionária

$\gamma$  – Ângulo de colisão na configuração inclinada

$\delta$  – Espessura de explosivo

$\rho_i$  – Densidade da placa intermédia

$\rho_e$  – Densidade da placa estacionária

$\rho_v$  – Densidade da placa voadora

$\tau$  – Constante de tempo

A – ANFO

AA/CS/SS – Projeção de alumínio em aço carbono sobre aço inoxidável

AA/N/SS – Projeção de alumínio em nióbio sobre aço inoxidável

C – Massa de explosivo

$C_1, C_2$  – Constantes de calibração

$C_B$  – Velocidade de propagação do som no material

$C_L$  – Velocidade de propagação longitudinal do som no material

$C_p$  – Calor específico a pressão constante

E – Energia de Gurney

EE – Emulsão com EPS

h – Espessura da placa voadora

$h_i$  – Espessura da placa intermédia

HV – Dureza Vickers

$HV_{placa\ estacionária}$  – Dureza Vickers na placa estacionária

$H_{V,placa\ intermédia}$  – Dureza Vickers da placa intermédia

$H_{V,placa\ voadora}$  – Dureza Vickers da placa voadora

$K$  – Condutibilidade térmica

$m_{intermédia}$  – Massa da placa intermédia

$m_{voadora}$  – Massa da placa voadora

$N$  – Constante empírica

$P_{CJ}$  – Pressão de Chapman-Jouguet produzida pela detonação

$R$  – Rácio de explosivo

$Re_T$  – *Reynolds* de transição

$t$  – Instante de tempo

$t_0$  – Instante de tempo inicial

$T_{placa\ estacionária}$  – Temperatura de fusão da placa estacionária

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

$T_M$  – Temperatura de fusão

$t_{Vpcal}$  – Tempo necessário para que a placa voadora atinja a velocidade de projeção calibrada

$V_c$  – Velocidade do ponto de colisão

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

$V_{c,tr}$  – Velocidade de transição

$V_d$  – Velocidade de detonação

$V_p$  – Velocidade de projeção

$V_{p,1}$  – Velocidade de projeção da placa voadora

$V_{p,2}$  – Velocidade de projeção do conjunto das placas voadora e estacionária

$V_{p,i}$  – Velocidade de projeção da placa intermédia

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

$V_{pcal}$  – Velocidade de projeção calibrada

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

---

## Siglas

AA – *Aluminum Alloy*

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ANFO – *Ammonium Nitrate/Fuel Oil*

CEMMPRE – Centro de Engenharia Mecânica Materiais e Processos

CFC – Sistema cristalino cúbico de Faces Centradas

CS – *Carbon Steel*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EDS – *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*

EPS – *Expanded polystyrene*

EW – *Explosive welding*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LEDAP – Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio

MDF – *Medium Density Fiberboard*

MEOV – Microesferas ocas de vidro

MOP – Microesferas ocas poliméricas

N – *Niobium*

PETN – *Pentaerythritol tetranitrate*

RDX – *Research Department X* (ciclotrimetilenotrinitramina)

SEM – *Scanning Electron Microscope*

SS – *Stainless Steel*

STD – *Stand-off Distance*

TNT – Trinitrotolueno

WIF – *Wave interface factor*



## 1. INTRODUÇÃO

A soldadura por explosão é uma tecnologia cada vez mais estudada e utilizada, uma vez que esta permite a soldadura no estado sólido de dois ou mais materiais com propriedades mecânicas distintas, como por exemplo o ponto de fusão.

Neste trabalho foram escolhidos dois materiais base: alumínio e aço inoxidável. Estes materiais têm propriedades físicas e mecânicas muito diferentes, mas são utilizados abundantemente em diversos tipos de indústria, nomeadamente na indústria naval, química, aeronáutica, automóvel, entre outras. A união destes materiais permite aliar a baixa densidade do alumínio com a elevada resistência à corrosão e mecânica do aço inoxidável.

A introdução da placa intermédia tem como objetivo principal facilitar a união de materiais quando esta é muito difícil, reduzindo a energia cinética a dissipar durante o choque entre as placas e, por consequente, permite que a formação dos compostos intermetálicos na interface seja menor. Como placas intermédias foram usadas uma placa de aço carbono DC05, material com boa soldabilidade com o alumínio e com o aço inoxidável, e uma placa de nióbio, material com elevado ponto de fusão.

A obtenção de uma soldadura de boa qualidade está dependente de vários parâmetros, sendo que cada um dos parâmetros se encontra relacionado com os vários componentes do ensaio, em que o explosivo é um componente com maior influência na soldadura por explosão.

Este trabalho tem como principal objetivo estudar a influência da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável e a otimização da mesma e encontra-se dividido em cinco capítulos. No capítulo dois, é exibido o estado da arte onde é, de forma geral, apresentado este processo com a explicação dos diversos parâmetros utilizados. É ainda retratada a ligação entre os dois materiais com recurso a placa intermédia. No capítulo três, são descritos os procedimentos experimentais utilizados, onde estão indicadas as propriedades físicas dos materiais, os equipamentos usados e, por fim, o método utilizado para fazer a análises microestrutural e mecânica das ligações. No capítulo quatro, serão apresentados os resultados assim como a discussão dos

mesmos. Neste capítulo serão ainda apresentados a realização das janelas de soldabilidade para os materiais utilizados e o respetivo enquadramento dos vários ensaios nas suas janelas. É ainda realizada a análise macroscópica, metalográfica e mecânica após a realização dos ensaios e a respetiva discussão de resultados. No quinto capítulo, serão apresentadas as conclusões obtidas com este trabalho e ainda sugestões para a realização de futuros trabalhos.

## **2. ESTADO DE ARTE**

### **2.1. Enquadramento histórico**

O processo de soldadura por explosão foi descoberto acidentalmente, ao contrário de outros métodos de soldadura que apareceram ao longo do seu desenvolvimento. Foi observado pela primeira vez na Primeira Guerra Mundial, quando projeteis acelerados ficavam unidos a superfícies metálicas (Carpenter e Wittman 1975).

No entanto, o primeiro relatório de soldadura por explosão foi apenas publicado em 1944, durante a Segunda Guerra Mundial, por L. R. Carl. Durante um teste de avaliação de explosivos, Carl observou a soldadura de duas placas de latão que foram usadas para posicionar a carga explosiva (Carpenter e Wittman 1975).

A primeira patente para este novo processo de soldadura foi obtida por Philipchuk & Bois (1962). Ficou patenteado um processo que permitia soldar duas superfícies de metais utilizando uma carga explosiva como fonte de energia.

Com este método era possível obter soldaduras resistentes com combinações de materiais com pontos de fusão, expansões térmicas e durezas muito diferentes, levando a um grande e rápido interesse industrial (Blazynski 1983).

O aparecimento da placa intermédia surge nos anos mais recentes com o objetivo de reduzir a energia de colisão na interface, diminuindo a região fundida na zona da interface e prevenindo a formação de compostos intermetálicos frágeis entre os materiais a unir.

É, por isso, importante estudar e desenvolver a utilização da placa intermédia de modo a que seja possível obter soldaduras heterogéneas de maior qualidade.

### **2.2. Princípio do processo**

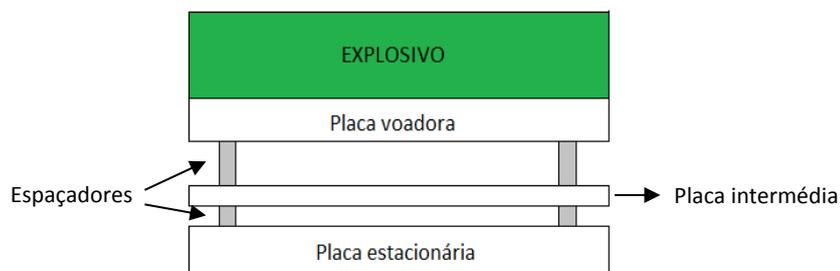
A soldadura por explosão é uma técnica de ligação no estado sólido, em que a união, de dois ou mais materiais, é conseguida através de um impacto oblíquo de alta velocidade entre os materiais, como resultado da detonação controlada de um explosivo. A detonação do explosivo projeta a placa voadora contra a placa base a alta velocidade,

causando pressão na interface e que resulta na ejeção de uma fina película de metal fundido, estabelecendo a ligação (Loureiro et al. 2016).

Considera-se uma técnica realizada no estado sólido, sem ocorrer fusão dos materiais, podendo-se atingir altas temperaturas apenas nas superfícies de união por ação da elevada energia de colisão.

A montagem deste processo é composta por três placas: a placa estacionária, apoiada numa base, a placa voadora, colocada na parte superior, e a placa intermédia, de espessura reduzida e colocada entre a placa estacionária e a voadora. Estes três elementos estão separados pelos espaçadores que permitem manter uma distância designada por “Stand-off Distance” (STD). Por último, o explosivo é colado sobre a placa voadora.

O explosivo é colado de forma uniforme sobre a placa voadora, contido numa caixa de suporte. Após a sua detonação gera-se uma força sobre a placa voadora, causando o seu movimento. A placa projetada é acelerada, em consequência da distância entre as placas, e colide com a placa intermédia. Seguidamente, o conjunto de placas colide com a placa estacionária. Este processo com recurso a placa intermédia (Figura 2.1) é geralmente utilizado em casos em que é difícil reduzir ou controlar a quantidade de compostos intermetálicos frágeis formados na interface.



**Figura 2.1.** Montagem em configuração paralela do processo de soldadura por explosão com placa intermédia.

Para que ocorra a soldadura dos materiais é fundamental que exista a formação do jato metálico. Este fenómeno dá-se com a colisão das placas a alta velocidade que permite a remoção das impurezas das superfícies a unir e promove as ligações interatómicas, originadas durante a colisão. Existem várias teorias para tentar explicar este fenómeno de ligação de materiais, no entanto a mais aceite pela comunidade é a de formação de jato (Cowan e Holtzman 1963).

### **2.2.1. Vantagens e desvantagens**

Para Findik (2011) a soldadura por explosão tem vantagens em relação à soldadura convencional e que são as seguintes:

- Possibilidade de unir materiais com propriedades dissimilares;
- Conseguem-se ligações de elevada resistência mecânica;
- As propriedades dos materiais base são mantidas;
- Permite soldaduras de grandes áreas num curto espaço de tempo;
- Requer um investimento de capital baixo;
- Permite a realização de soldadura por controlo remoto;
- Possibilidade de a soldadura ser realizada fora de ambiente controlado (sem necessidade de utilização de câmara protetora);
- Permite soldar várias espessuras de placas;
- Simplicidade de montagem.

No entanto existem algumas desvantagens neste processo, tais como:

- Os materiais usados devem ter ductilidade e resistência mecânica suficiente para aguentar o processo;
- Os ruídos e rebentamentos produzidos levam a um cuidado e proteção ao nível do operador;
- O uso da técnica na indústria está restringido pelo ruído e vibrações produzidas pela explosão;
- Os materiais a soldar devem ter geometrias simples (plana, cilíndrica e cónica).

### **2.2.2. Aplicações do processo**

Findik (2011) enumera as principais aplicações deste processo e são:

- Junção de canos ou tubos;
- Fabrico de permutadores de calor e reservatórios de alta pressão;
- Junções remotas em ambientes hostis;
- Uniões de materiais dissimilares;
- Fabrico de alhetas de refrigeração;
- Indústria química;

- Indústria naval;
- Indústria criogénica.

### 2.2.3. Configurações alternativas

A configuração paralela, representada na Figura 2.1, é um dos diferentes tipos de configurações existentes. Para além desta configuração, existem outras que permitem obter soldaduras com características geométricas diferentes, em que o objetivo consiste na melhoria das propriedades de soldadura e na obtenção de soldaduras com diferentes configurações.

#### 2.2.3.1. Configuração dupla inclinada

Na Figura 2.2, está representado este tipo de configuração e que tem como principais vantagens a alternativa de variar a velocidade de colisão, o ângulo de colisão e a velocidade de impacto numa gama mais alargada do que na configuração paralela. Esta configuração permite também a utilização de explosivos cuja velocidade de detonação é superior à velocidade do som no material a unir (Blazynski 1983).

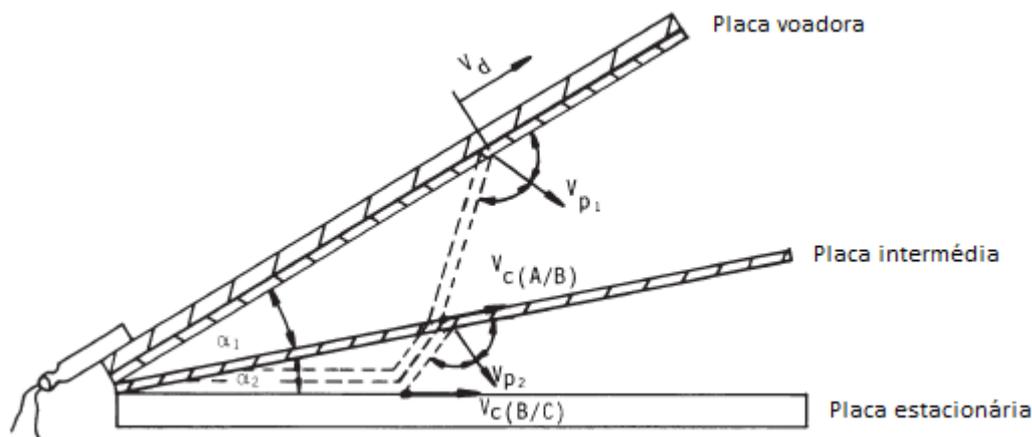
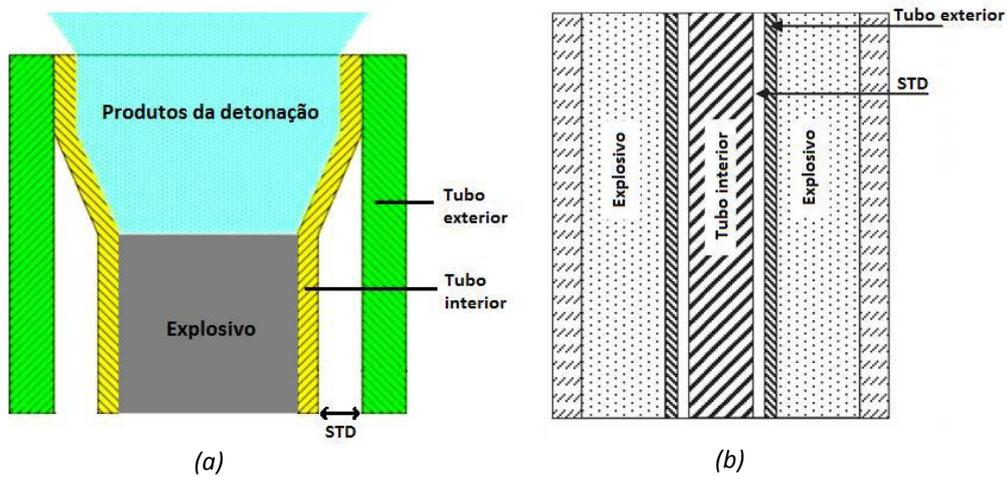


Figura 2.2. Configuração dupla inclinada. Adaptada de Blazynski (1983).

#### 2.2.3.2. Configuração cilíndrica

Na configuração cilíndrica existem duas possibilidades de executar a soldadura, a primeira é colocando o explosivo no interior do tubo e, após a detonação, este dilata até à sua união com o tubo exterior (Figura 2.3a). A segunda possibilidade é o inverso da primeira,

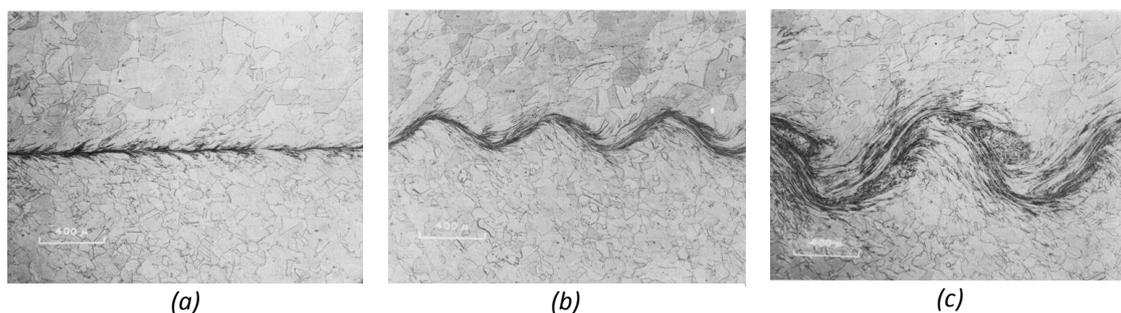
colocando-se o explosivo na parte externa do conjunto e comprimindo assim o tubo exterior até à união deste com o tubo interior (Figura 2.3b).



**Figura 2.3.** Configuração cilíndrica: a) Explosivo interior. Adaptada de Sun et al. (2011); b) Explosivo exterior. Adaptada de Mendes et al. (2013).

#### 2.2.4. Interface da soldadura

Quando se recorre à soldadura por explosão uma característica de extrema importância é a interface. A análise da interface tem influência na qualidade da soldadura e nas suas características. Assim sendo, esta pode assumir dois tipos de interface, plana (Figura 2.4a) ou ondulada (Figura 2.4b e Figura 2.4c), podendo esta última apresentar diversos tipos de onda.



**Figura 2.4.** Diferentes morfologias de interface numa soldadura Níquel-Níquel com a variação da velocidade de detonação: a) Interface plana; b) Interface ondulada; c) Interface ondulada. Adaptada de Cowan et al. (1971).

Para Blazynski (1983) uma interface ondulada numa soldadura significa uma ligação forte. No entanto, estudos como os de Carvalho et al. (2017) apresentaram soldaduras

consistentes de materiais dissimilares e com uma interface plana, mostrando assim que é possível a união de diferentes materiais sem a presença de ondas

### **2.2.5. Mecanismos de formações de onda**

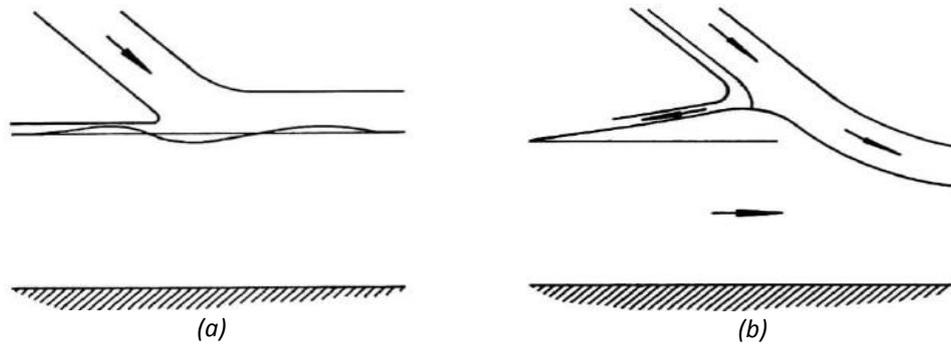
O mecanismo de formação de ondas é talvez o tema mais discutido na soldadura por explosão. Muitos investigadores têm procurado a explicação e a caracterização das ondas formadas na interface, isto por causa da presença do jato metálico na região de colisão e o comportamento parcialmente fluido nesta região como consequência da grande pressão imposta (Blazynski 1983).

Apesar do esforço para se chegar a uma explicação única e consensual para este fenómeno, esta ainda não existe, havendo quatro teorias diferentes Mendes et al. (2013) e são elas:

- Mecanismo de indentação do jato;
- Mecanismo de fluxo instável;
- Mecanismo de formação de vórtices;
- Mecanismo de rarefação de onda.

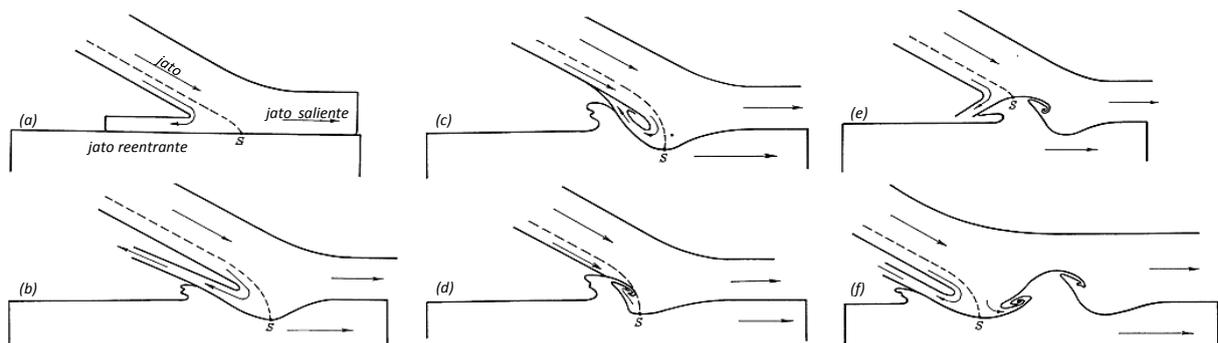
#### **2.2.5.1. Mecanismo de indentação do jato**

Abrahamson (1961) pressupôs que as ondas são formadas por causa da indentação provocada pelo jato na placa estacionária (Figura 2.5a), que forma uma depressão e saliência na frente do ponto de colisão pelo material removido pela indentação (Figura 2.5b). Isto possibilita que o jato passe a saliência e que o processo se torne contínuo ao longo da soldadura.



**Figura 2.5.** Mecanismo de indentação de jato: a) Deformação resultante da penetração do jato; b) Efeito gerado pela velocidade horizontal da base. Adaptada de Abrahamson (1961)

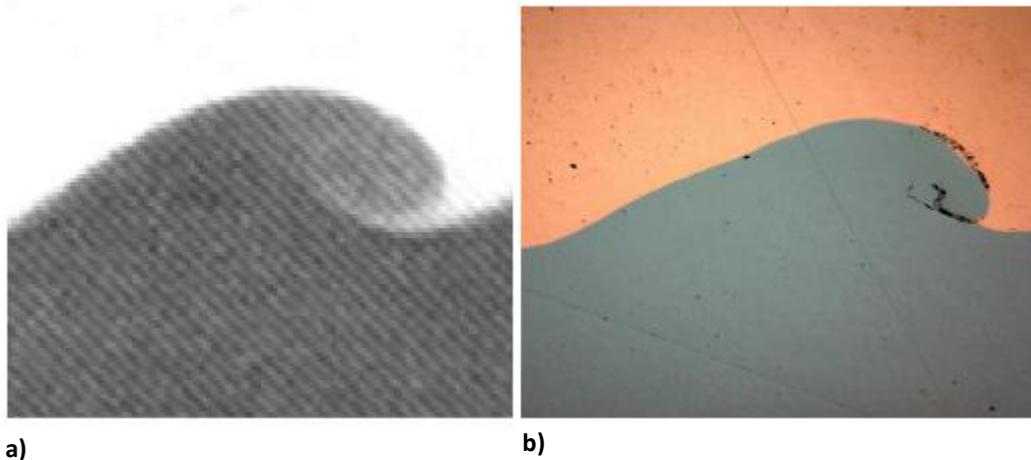
Bahrani et al. (1967) evidenciaram de forma mais detalhada, atribuindo a formação da indentação ao jato reentrante e a formação dos vórtices deve-se ao jato reentrante preso entre a saliência e o jato saliente, como se pode observar na Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Mecanismo de formação de onda. Adaptada de Bahrani et al. (1967).

### 2.2.5.2. Mecanismo de fluxo instável

Neste caso, o processo de formação de ondas é considerado um fenómeno hidrodinâmico próximo ao que acontece na interface entre dois líquidos com diferentes velocidades horizontais, sendo conhecido como a instabilidade de Kelvin-Helmholz (Mendes et al. 2013). Na figura 2.7a) é possível observar a instabilidade de Kelvin-Helmholz presente num escoamento de água, sendo possível constatar as parecências deste escoamento com a interface ondulada presente na figura 2.7b).



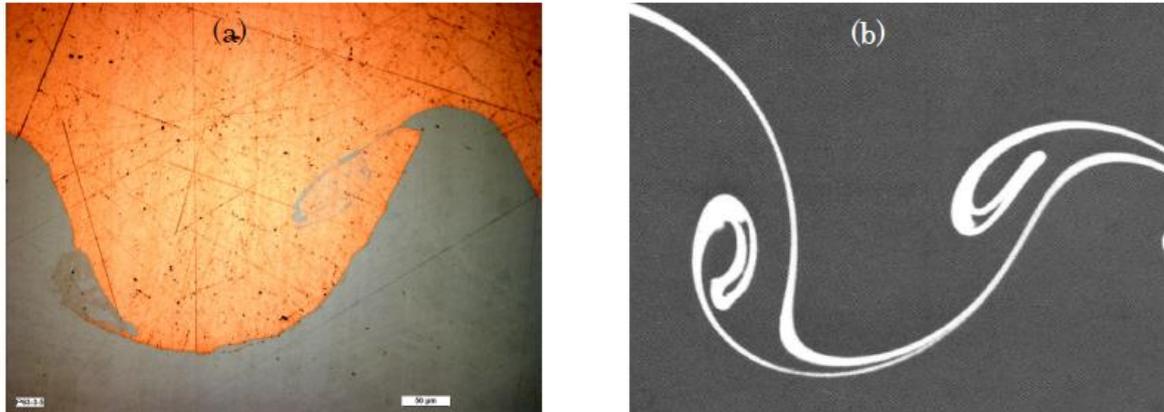
**Figura 2.7.** Mecanismo de fluxo instável: a) Instabilidade de Kelvin-Helmholz num escoamento de água; b) Interface de uma soldadura Cu-Ni. Adaptado de Carton (2004).

No trabalho desenvolvido por Hunt (1968) supõe-se que a presença do jato reentrante é necessária para que se dê a formação das ondas, devido às elevadas pressões originadas no processo, a interface entre o jato reentrante e as placas age como uma interface fluida apresentando a instabilidade de Kelvin-Helmholz. Considerou-se ainda que, as pressões originadas no jato saliente não eram suficientemente altas para se verificar um comportamento fluido característico entre as superfícies de contato. Porém, Robinson (1975) legitima que se os valores de tensões obtidos forem suficientemente elevados se obtém um comportamento típico de fluido.

### **2.2.5.3. Mecanismo de formação de vórtices**

Reid (1974) estudou os mecanismos de formação de ondas e concluiu que este mecanismo era o que mais se aproximava dos resultados obtidos. O pressuposto defende que as ondas são formadas segundo um mecanismo de formação de vórtices, semelhante ao proposto pela teoria de Von Kármán (evento observado num escoamento de fluido viscoso em torno de um obstáculo) no qual o ponto de estagnação aparece como obstáculo e a partir do qual será criado um vórtice no sentido do impacto (Blazynski 1983).

De notar a semelhança entre a interface de soldadura mostrada na Figura 2.8a e a ilustração da formação de um vórtice de Von Kármán, Figura 2.8b.

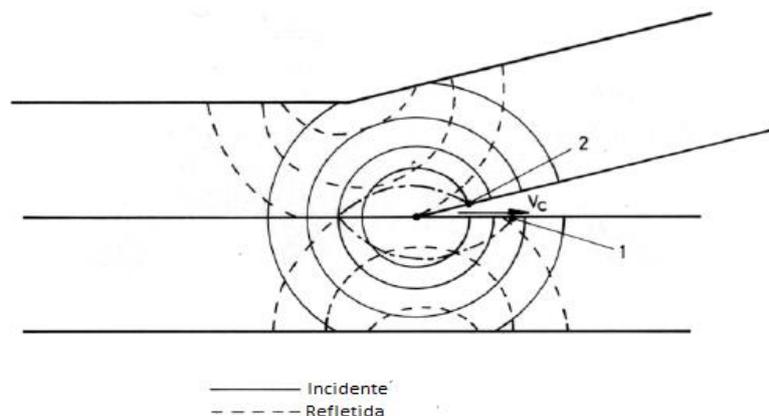


**Figura 2.8.** Mecanismo de formação de vórtices: a) Interface de uma soldadura Cobre-Aço inoxidável; b) Vórtice de Von Kármán. Adaptado de Carton (2004)

#### 2.2.5.4. Mecanismo de rarefação de onda

Este mecanismo é uma alternativa para descrever a interface ondulada, em que esta interface provém da interferência das ondas de rarefação em ambas as placas (Mendes et al. 2013).

Quando se dá a colisão entre as placas são geradas ondas de choque de compressão que se propagam até colidir com a superfície livre externa onde se vão refletir formando as ondas refletidas. Isto vai resultar numa deformação periódica, devido às interações existentes entre as ondas de compressão e as refletidas (Figura 2.9), resultando na formação de ondas na interface (Carton 2004).



**Figura 2.9.** Mecanismo de rarefação de onda. Adaptado de Carton (2004).

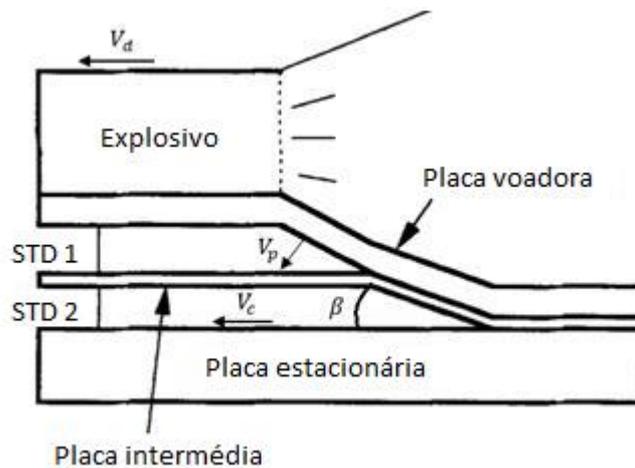
### 2.3. Parâmetros do processo

A Figura 2.10 é uma representação da técnica de soldadura por explosão com placa intermédia.

Existem vários fatores que influenciam o processo de soldadura por explosão e para a sua realização com sucesso é preciso analisar e otimizar os diversos parâmetros que se encontram ligados ao processo, particularmente:

- Velocidade de detonação ( $V_d$ );
- Velocidade de impacto ( $V_p$ );
- Velocidade do ponto de colisão ( $V_c$ );
- Ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ );
- Rácio de explosivo ( $R$ );
- Distância entre placas (STD).

A geometria da configuração, a seleção do explosivo e a distância entre placas têm influência direta nos parâmetros descritos. De referir que em configurações paralelas as velocidades de detonação e do ponto de colisão assumem-se iguais.



**Figura 2.10.** Configuração paralela do processo de soldadura por explosão com placa intermédia no momento da detonação. Adaptada de Hokamoto et al. (1993).

### 2.3.1. Seleção do explosivo

A seleção do explosivo e a velocidade de detonação são importantes para se obter uma boa soldadura. A velocidade de colisão ( $V_c$ ) e a velocidade de impacto ( $V_p$ ) devem ser menores que a velocidade do som no material, que tipicamente ,varia entre os 4500  $m/s$  e 6000  $m/s$  (Findik 2011).

Blazynski (1983) elegeu alguns tipos de explosivos mais usados, que são o *Ammonium Nitrate/Fuel Oil* (ANFO), pó à base de nitroglicerina, TNT-Nitrato de amónio e PETN Nitrato de amónio. Para facilitar a sua distribuição numa camada uniforme estes explosivos são usados em forma de pasta, grão ou pó.

#### 2.3.1.1. Sensibilizantes

Os sensibilizantes são utilizados para induzir a explosão de explosivos, tal como a Emulsão Explosiva que tem uma grande velocidade de detonação, mas uma sensibilidade à explosão muito baixa. A Emulsão Explosiva é então misturada com sensibilizantes com o objetivo de reduzir a densidade da mistura e a velocidade de detonação. Estes sensibilizantes são normalmente microesferas de vidro (MEOV) ou microesferas ocas poliméricas (MOP) (Mendes et al.2013).

#### 2.3.1.2. Iniciadores

Devido à baixa sensibilidade dos explosivos usados, é necessário recorrer a um explosivo mais sensível à detonação de modo a iniciar a explosão. Para os ensaios realizados foi utilizado o *Research Department X* (RDX), explosivo de uso militar e com uma velocidade de detonação de aproximadamente 8750  $\frac{m}{s}$ .

### 2.3.2. Rácio de explosivo

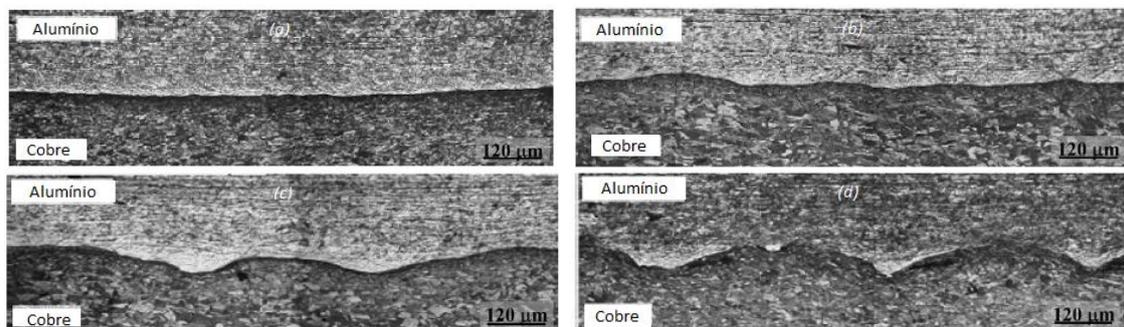
Escolhido o explosivo é preciso também determinar a quantidade de explosivo a utilizar. Esta quantidade é determinada pela razão entre a massa de explosivo ( $C$ ) e a massa da placa voadora ( $M$ ), indicada como o rácio de explosivo ( $R$ ), presente na Equação (2.1)

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

A morfologia da interface é diretamente influenciada pela variação deste parâmetro, como se pode verificar pela Figura 2.11, onde um aumento de rácio de explosivo

provoca uma maior deformação da interface, levando à formação de ondas e aumento de amplitude.

É possível verificar que a passagem da interface lisa (Figura 2.11a e 2.11b) para a ondulada (Figura 2.11c e 2.11d) se dá com o aumento do rácio de explosivo, sendo também possível observar um aumento da amplitude e comprimento de onda. No entanto um aumento excessivo do rácio de explosivo pode levar à fusão excessiva e consequente formação de compostos intermetálicos, dependendo das características dos materiais a unir (Gulenc 2008).



**Figura 2.11.** Influência da variação do rácio de explosivo em soldadura de Alumínio-Cobre: a) R= 1.5; b) R=2; c) R=2.5; d) R=3. Adaptada de Gulenc (2008)

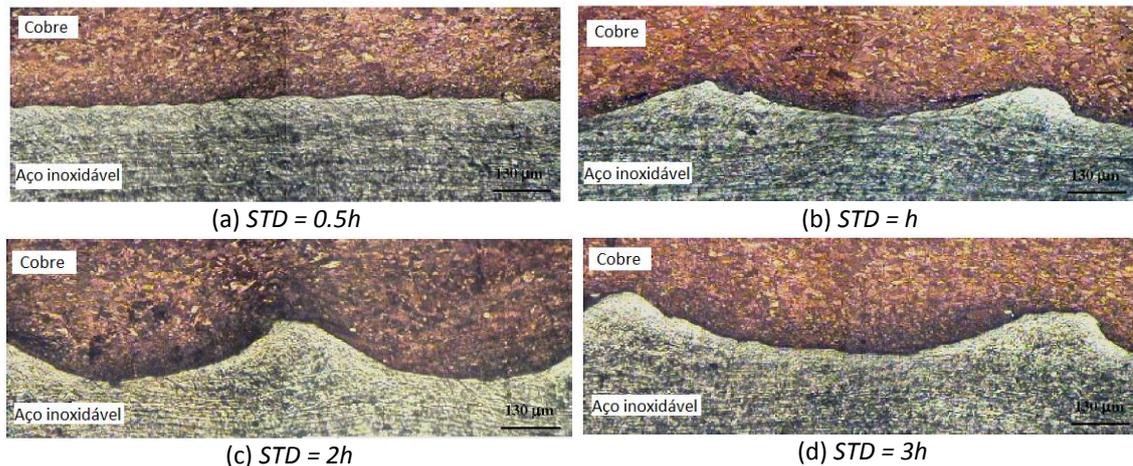
Para que ocorra a ligação com boas propriedades e de modo a evitar a fusão excessiva dos materiais é necessário otimizar o rácio de explosivo de modo a alcançar a energia mínima.

### 2.3.3. Distância entre placas

Outro parâmetro que influencia a morfologia da interface é a distância entre placas (STD). Se esta distância entre placas for suficientemente grande, a placa voadora irá ter mais espaço temporal para acelerar e alcançar uma velocidade terminal, calculada pela equação de Gurney (Blazynski 1983).

Na escolha da distância entre placas, o principal parâmetro é a espessura da placa voadora ( $h$ ), em que a STD deve variar entre  $0,5h$  e  $4h$ , pois para valores inferiores a  $0,5h$  a velocidade de projeção mínima não é atingida. A velocidade de detonação do explosivo também tem importância, uma vez que para maiores velocidades de detonação, e a distância entre placas necessária para que ocorra a união torna-se menor (Blazynski 1983).

Durgutlu et al. (2008) concluíram que para pequenas distâncias entre placas o tipo de interface obtido era plana e que para maiores valores de STD as interfaces observadas eram onduladas. A Figura 2.12 demonstra a influência da variação da distância entre placas.



**Figura 2.12.** Influência da STD na ligação Cobre-Aço inoxidável: a)  $STD = 0.5h$ ; b)  $STD = h$ ; c)  $STD = 2h$ ; d)  $STD = 3h$ . Adaptado de Durgutlu et al. (2008)

## 2.4. Janela de Soldabilidade

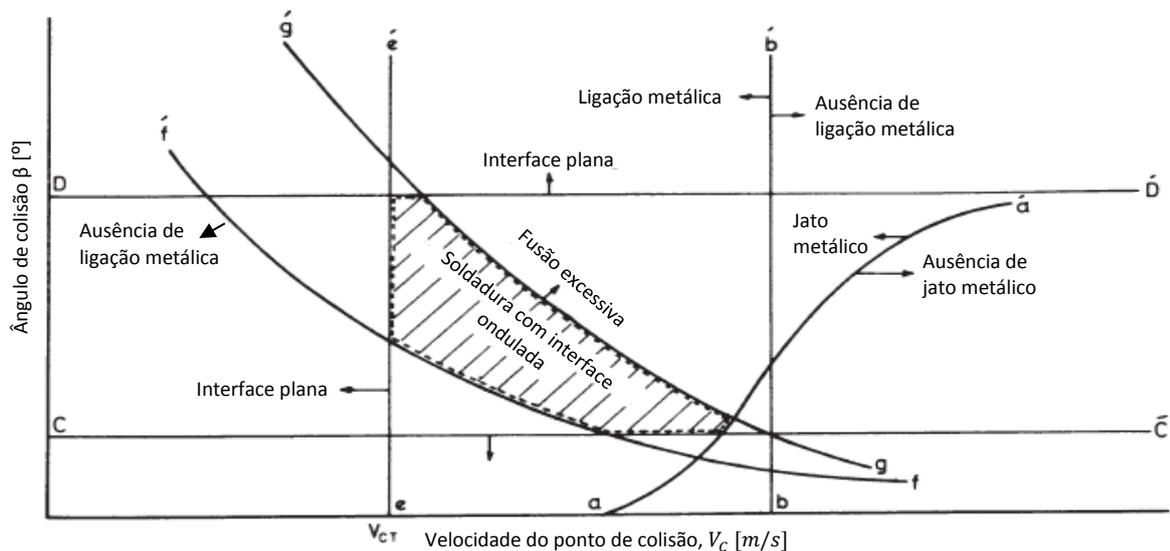
Ao longo de vários anos, diversos autores desenvolveram o conceito de janela de soldabilidade, entre dois materiais, de modo a facilitar na escolha de vários parâmetros deste processo e viabilizar uma representação da influência destes. Este método possibilita estabelecer um intervalo de valores em que há uma maior probabilidade de se obterem soldaduras com melhor qualidade.

Os critérios que definem a janela de soldabilidade relacionam a velocidade do ponto de colisão das placas  $V_c$  e o ângulo de colisão  $\beta$ . Os vários limites considerados na janela de soldabilidade encontram-se assinalados na Figura 2.13.

A região que se encontra a tracejado é obtida através deste conceito, na qual se espera uma soldadura com boas propriedades. Assim, tenciona-se a obtenção de uma velocidade de colisão  $V_c$  e um ângulo de colisão  $\beta$  que, combinados, estejam no interior da janela. Outros conceitos e aproximações foram desenvolvidos por Hokamoto et al. (1993) ou Cowan et al. (1971).

Ainda em relação à figura 2.13, o limite definido pelo ângulo crítico de formação do jato está representado pela linha  $aa'$  proveniente das conclusões de Cowan e Holtzman

(1963). As linhas  $cc'$  e  $dd'$  indicam os ângulos mínimos e máximos do ângulo de colisão, podendo variar dos  $2^\circ$  até aos  $31^\circ$  (Blazynski 1983).



**Figura 2.13.** Conceito da janela de soldabilidade e os seus limites representativos. Adaptado de Blazynski (1983)

### 2.4.1. Limite esquerdo

O limite esquerdo da janela de soldabilidade indica qual o tipo de interface que se espera obter no processo de soldadura e está representado pela linha  $ee'$  da Figura 2.13. Para valores de velocidade do ponto de colisão ( $V_c$ ) abaixo do limite imposto é esperado uma interface plana, enquanto que para valores de  $V_c$  acima deste limite, é de esperar uma interface ondulada (Ribeiro et al. 2014).

A Equação (2.2), desenvolvida por Cowan et al. (1971) para este limite, relaciona o número de Reynolds de transição ( $Re_T$ ) e as propriedades dos materiais a soldar com a velocidade de transição. Para se obter o número de Reynolds de transição, Cowan (1971) fizeram o estudo de diversas soldaduras, tanto similares como dissimilares e obteve um valor médio de 10,6. Na Equação (2.3) a velocidade de transição ( $V_{c,tr}$ ) é expresso em  $[\frac{m}{s}]$ , a densidade dos materiais ( $\rho_v$  e  $\rho_e$ ) é apresentada em  $[\frac{kg}{m^3}]$  e a sua dureza ( $H_{V,placa\ voadora}$  e  $H_{V,placa\ estacionária}$ ) em [Pa].

$$Re_T = \frac{(\rho_v + \rho_e)V_{c,tr}^2}{2(HV_{placa\ voadora} + HV_{placa\ estacionária})} \quad (2.2)$$

$$V_{c,tr} = \left[ \frac{2Re_T(HV_{placa\ voadora} + HV_{placa\ estacionária})}{(\rho_v + \rho_e)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

### 2.4.2. Limite inferior

Este limite indicado pela linha ff' da Figura 2.13 é relativo à velocidade de impacto ( $V_p$ ), de modo a que a pressão de impacto no ponto de colisão ultrapasse a tensão de cedência dos materiais (Ribeiro et al. 2014).

A Equação (2.4) foi apresentada por Deribas e Zakharenko (1974) para o limite inferior da janela de soldabilidade, onde  $\beta$  em [rad] encontra-se em função da dureza (HV), correspondente ao material com maior dureza, da média das densidades dos materiais a soldar ( $\rho$ ), da velocidade mínima do ponto de colisão ( $V_{c,min}$ ) e da constante  $k$  que assume o valor de 0,6 para superfícies limpas e de 1,2 para superfícies incorretamente limpas.

$$\beta = k \sqrt{\frac{HV}{\rho V_c^2}} \quad (2.4)$$

Esta equação possibilita o cálculo do ângulo de colisão mínimo em função da velocidade de colisão para que ocorra a união dos materiais. Para valores de colisão inferiores ao limite resulta numa energia incapaz de deformar plasticamente os materiais e, portanto, não se unem.

### 2.4.3. Limite Superior

A linha gg' da janela de soldadura indica o limite superior, que se refere ao limite máximo de dissipação da energia cinética. Acima deste limite existirá uma fusão excessiva dos materiais.

Carpenter e Wittman (1975) desenvolveram a Equação (2.5) em que a velocidade de impacto se encontra em função de várias propriedades da placa voadora. Apresentam ainda a Equação (2.6) na qual a velocidade de impacto está em função da velocidade do ponto de colisão ( $V_c$ ) e ângulo de colisão ( $\beta$ ), parâmetros referentes à janela

de soldabilidade. Com estas duas equações elaborou-se a Equação (2.7) que define o limite superior da janela de soldabilidade.

$$V_p = \frac{1}{N} \frac{(T_M C_B)^{\frac{1}{2}} (K C_p C_B)^{\frac{1}{4}}}{V_C (\rho_v h)^{\frac{1}{4}}} \quad (2.5)$$

$$V_p = 2V_C \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{N} \frac{(T_M C_B)^{\frac{1}{2}} (K C_p C_B)^{\frac{1}{4}}}{2V_C^2 (\rho_v h)^{\frac{1}{4}}} \quad (2.7)$$

Nas equações descritas acima,  $\beta$  é expresso em [rad],  $V_C$  em [ $\frac{m}{s}$ ],  $h$  [m] refere-se à espessura da placa voadora e  $\rho_v$  à densidade da placa voadora, [ $\frac{g}{cm^3}$ ]. As propriedades térmicas desta mesma placa são a temperatura de fusão do material,  $T_M$  (°C), a velocidade de propagação do som no material,  $c_B$  [ $\frac{m}{s}$ ], o calor específico a pressão constante,  $C_p$  [ $\frac{J}{kg.K}$ ] e a condutibilidade térmica,  $K$  [ $\frac{W}{m.K}$ ]. O coeficiente  $N$  pode assumir o valor de 0,11 apresentado por De Rosset (2006) ou de 0,062 por Ribeiro et al. (2014).

#### 2.4.4. Limite direito

O limite direito está diretamente relacionado com a formação do jato metálico no ponto de colisão das placas e está representado na janela de soldabilidade com a linha  $bb'$ . Para ocorrer uma ligação forte e consistente, é fundamental a formação do jato. Walsh et al. (1953) afirmam que é preciso que a velocidade de propagação do ponto de colisão seja inferior à velocidade de propagação do som no material, que constitui a placa voadora, para se formar o jato intermetálico (Equação (2.8)).

$$V_C < C_B \quad (2.8)$$

---

## 2.5. Soldadura por explosão entre o alumínio e o aço inoxidável com uso de placa intermédia

A soldadura por explosão entre o alumínio e o aço inoxidável com recurso a uma placa intermédia foi abordada por Blazynski (1983) onde este indica algumas materiais a utilizar como placa intermédia, tais como o alumínio puro, cobre, tântalo, titânio níquel e prata.

Hokamoto et al. (1993) estudaram a projeção de alumínio no aço inoxidável, em que a placa intermédia era do mesmo material utilizado para a placa estacionária. Fizeram também variar a espessura da placa intermédia (de milímetro a milímetro). Com este trabalho concluíram que com a adição da placa intermédia a espessura da camada do material fundido na interface reduziu devido à energia dissipada na colisão.

Aceves et al. (2015) estudaram a alteração do número de placas intermédias utilizadas, onde aplicaram duas placas intermédias, uma de alumínio em contacto com alumínio e uma outra, fazendo esta variar entre cobre, titânio ou tântalo em contacto com o aço inoxidável. Observaram que a utilização de mais placas intermédias permitia obter ligações em que a tensão atingida na ligação é superior à tensão de cedência do material mais fraco.

Mais recentemente Elango et al. (2018) estudaram a projeção de um alumínio em aço inoxidável, usando uma configuração inclinada entre a placa voadora e a placa intermédia (liga de cobre) e uma configuração paralela entre a placa intermédia e estacionário, obtendo uma ligação com boas propriedades mecânicas e com baixa formação de intermetálicos.

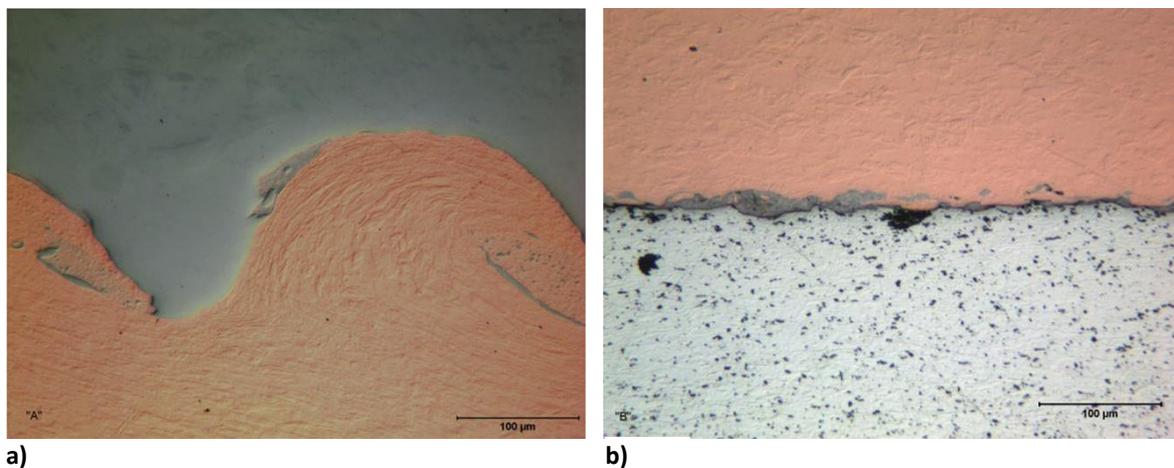
### 2.5.1. Morfologia da interface

Com o objetivo de estudar e prever se uma interface dos materiais a soldar pode ou não apresentar ondas Carvalho et al. (2017) desenvolveram uma equação que relaciona as propriedades físicas dos materiais. *Wave Interface Factor* (WIF) é a designação do parâmetro que relaciona o produto do rácio das densidades duas placas em contato pelo rácio das suas temperaturas de fusão. WIF não indica diretamente se a interface será ondulada ou plana, aponta apenas para a possibilidade de esta ser uma interface ondulada. Significa que, acima de um determinado valor a soldadura será plana e abaixo deste valor poderá ser, ou

não, uma interface ondulada, dependendo dos parâmetros de soldabilidade. O estudo feito aponta o valor de transição 4,2.

$$WIF = \frac{\rho_v T_{placa\ vadora}}{\rho_e T_{placa\ estacionária}} \quad (2.9)$$

Um dos casos estudados e que estão em concordância com os resultados obtidos está apresentado na Figura 2.14. A Figura 2.14a) mostra a interface ondulada da soldadura entre o aço inoxidável e o cobre, que apresenta um  $WIF=1,14$ . Na Figura 2.14b) é possível observar uma interface plana entre a junção do cobre e o alumínio, com um  $WIF=5,44$ .



**Figura 2.14.** Morfologia da interface: a) Aço inoxidável-Cobre; b) Cobre-Alumínio. Adaptado de Aceves et al. (2015)

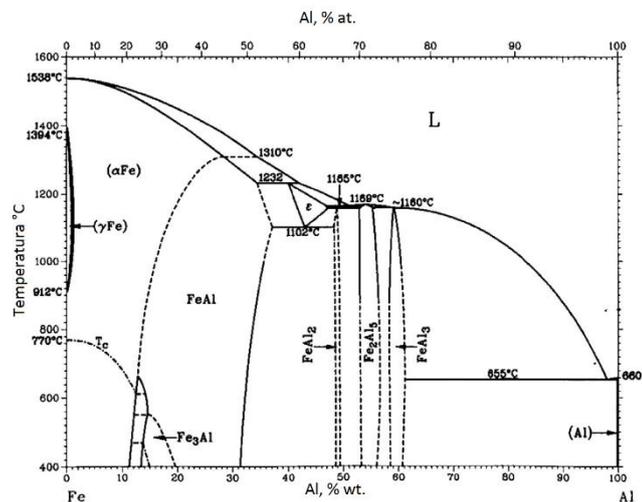
### 2.5.2. Formação de compostos intermetálicos

Embora a soldadura por explosão seja considerada uma tecnologia de ligação no estado sólido, a energia dissipada pelo explosivo durante a detonação provoca um aumento acentuado da temperatura localizada na zona da interface de colisão, que pode levar a uma fusão dos materiais e dar origem à formação de compostos intermetálicos. Estes compostos são fases que contêm dois ou mais elementos, sendo que pelo menos um deles é um metal. Os intermetálicos são normalmente formados com diferentes percentagens dos materiais a unir, sendo que a percentagem de cada elemento nos compostos depende das condições a que estão sujeitos durante a soldadura. Para materiais com baixo ponto de fusão é de se esperar que a sua concentração seja maior nos compostos.

Neste processo de ligação a placa intermédia utilizada vai influenciar diretamente o tipo de compostos intermetálicos formados. A espessura da camada dos intermetálicos é também importante na obtenção de uma ligação com qualidade.

Caso seja utilizado uma placa de aço carbono como placa intermédia é esperado que haja apenas formação de intermetálicos com a placa voadora da liga de alumínio, sendo do tipo  $Fe_xAl_y$ . Estes compostos têm como características uma elevada dureza e uma baixa ductilidade, podendo levar à formação intermetálicos frágeis (Reza et al. 2017).

Na Figura 2.15 é apresentado um diagrama binário de fases ferro-alumínio onde se pode observar os principais compostos que podem ser formados entre o alumínio e o aço carbono.



**Figura 2.15.** Diagrama de fases do sistema ferro-alumínio. Adaptada de Reza et al. (2017)

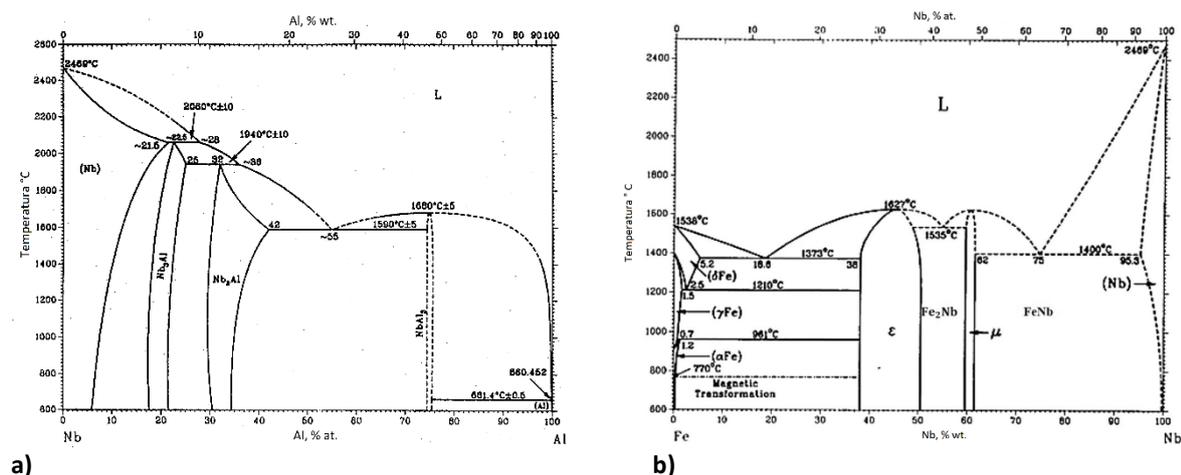
Em relação à placa de nióbio, é esperado que a formação de intermetálicos ocorra nas duas interfaces. Entre a liga de alumínio e a liga de nióbio os compostos formados serão do tipo  $Nb_xAl_y$ . Na outra interface, entre a liga de nióbio e o aço inoxidável, espera-se que os intermetálicos formados sejam do tipo  $Fe_xNb_y$ .

Na Tabela 2.1 estão presentes os principais intermetálicos que se podem formar, bem como a percentagem em peso de alumínio e as durezas características em condições de equilíbrio.

**Tabela 2.1.** Principais compostos intermetálicos do sistema Fe-Al. Adaptada de Kattner & Burton (1992) e de Reza et al. (2017).

Fase	Quantidade de Al (% pond)	Dureza [HV]
$Fe_3Al$	13-20	250-350
$FeAl$	12,8-37	400-520
$FeAl_2$	48-49,4	1000-1050
$Fe_2Al_5$	53-57	1000-1100
$FeAl_3$	58,5-61,3	820-8980

Na Figura 2.16a) e na Figura 2.16b) estão presentes os diagramas binários de fases nióbio-alumínio e ferro-nióbio, respetivamente, sendo possível observar as principais fases que podem ser formadas na união destes materiais.



**Figura 2.16.** a) Diagrama de fases do sistema nióbio-alumínio. Adaptado de Hajitabar et al. (1998). b) Diagrama de fases do sistema ferro-nióbio. Adaptado de Mahdouk et al. (2017).

O diagrama de fases é uma importante ferramenta para a análise dos intermetálicos, no entanto não deve ser tomado como a única referência, pois este não representa as mudanças repentinas de temperatura que podem ocorrer durante o procedimento, podendo estas ter influência na transformação de fases. De salientar ainda que, o aço inoxidável possui outros elementos além do ferro, o que também pode influenciar as fases intermetálicas formadas.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Materiais e equipamentos utilizados

##### 3.1.1. Materiais utilizados

Na realização dos ensaios foram utilizados quatro materiais distintos, o aço inoxidável austenítico AISI 304 (3mm de espessura), a liga de alumínio AA6082-T6 (3mm), o aço carbono DC05 (1mm) e nióbio (1mm). Nas seguintes tabelas estão apresentadas as percentagens, em peso, dos diversos elementos de liga presentes nos materiais em estudo.

Da observação da Tabela 3.1 é possível concluir que o cromo é o principal elemento de liga que constitui o aço inoxidável e é a presença deste elemento que lhe confere a sua resistência à corrosão. Este aço é caracterizado por uma microestrutura austenítica (estrutura cúbica de faces centradas (CFC)). O principal mecanismo de endurecimento dos aços inoxidáveis austeníticos é a deformação a frio.

**Tabela 3.1.** Composição química nominal do aço AISI 304 (% pond.).

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N	Fe
AISI 304	0-0,08	0-2,0	0-1,0	0-0,045	0-0,03	18,0-20,0	8,0-12,0	0,2-0,6	Rem.

Da Tabela 3.2 observa-se que a liga AA6082-T6 tem como principais elementos de liga o magnésio e o silício. Esta liga de alumínio é tratada termicamente, solubilizada, temperada e envelhecida artificialmente.

**Tabela 3.2.** Composição química nominal da liga AA6082-T6 (% pond.).

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

A composição química nominal da placa intermédia do aço carbono encontra-se na Tabela 3.3. A placa intermédia de nióbio apresenta um grau de pureza de 99,6%.

**Tabela 3.3.** Composição química nominal do aço carbono DC05 (% pond.).

	C	Mn	P	S
DC05	Max 0,06	Max 0,35	Max 0,025	Max 0,025

As propriedades mecânicas e térmicas nominais dos materiais utilizados estão indicadas na Tabela 3.4 e, posteriormente, serão utilizadas para obter a janela de soldabilidade.

**Tabela 3.4.** Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais utilizados. Adaptada de A:S.M: Handbook (1990).

Propriedades/Material	AA6082-T6	AISI 304	DC05	Nióbio
Dureza [HV]	114	181	85,5	53,1
Densidade [ $kg/m^3$ ]	2700	8000	7856	8570
Temperatura de fusão [ $^{\circ}C$ ]	650	1450	1497	2468
Calor específico [ $J/(kg.^{\circ}C)$ ]	897	500	470	270
Condutibilidade térmica [ $W/(m.^{\circ}C)$ ]	180	16,2	66,9	52,3
Velocidade Longitudinal (a) [km/s]	6,40	5,77	5,94	5,07
Velocidade Transversal (a) [km/s]	3,15	3,12	3,26	2,09
Velocidade propagação do som [km/s]	5,27	4,51	4,61	4,46

(a) Propriedades referentes à propagação do som.

## 3.2. Nomenclatura dos ensaios

A nomenclatura usada para os ensaios de soldadura por explosão segue a disposição EWXX, em que, “EW” corresponde *Explosive Welding* e “XX” o número sequencial do ensaio, em ordem de realização da soldadura. De acordo com a disposição interna, os ensaios referentes a este trabalho são EW51, EW52.

No presente trabalho cada ensaio é designado pelos materiais de acordo com o sistema utilizado, pelo explosivo usado e pela altura deste. Exemplificando, num ensaio A/B/C-DE, a sigla “A” representa o material utilizado como placa voadora, “B” refere-se ao material utilizado como placa intermédia, “C” corresponde ao material utilizado como base, “D” o tipo de explosivo e “E” a altura do explosivo. Os materiais foram designados como “SS” (*Stainless Steel*) para o aço inoxidável e “AA” (*Aluminum Alloy*) para a liga de alumínio. Para as placas intermédias a sua identificação será “CS” (*Carbon Steel*) para o aço carbono, “N” (*Niobium*) para o nióbio, “A” (ANFO) para o explosivo e “30” para a altura do explosivo. A conversão entre a nomenclatura utilizada internamente para a utilizada neste trabalho apresenta-se no APÊNDICE A.

Na identificação das amostras provenientes da análise metalográfica é usado o sufixo “L” ou “T”, caso seja uma amostra em que se pretenda analisar a componente longitudinal ou transversal da soldadura.

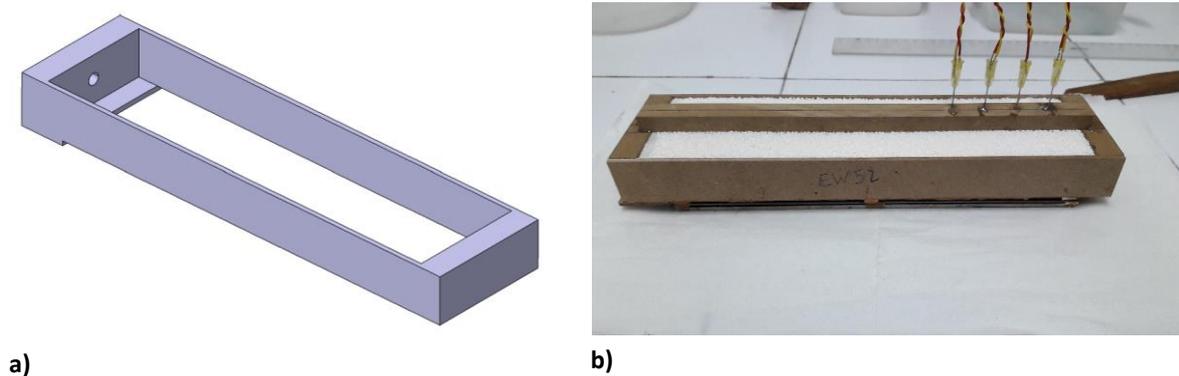
### **3.3. Montagem experimental**

Parte da preparação e montagem dos ensaios foi realizada no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra, sendo os restantes procedimentos, como preparações finais e a execução dos ensaios de soldadura, realizados no Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio (LEDAP) em Condeixa, Coimbra.

Antes da realização dos ensaios, foi necessário lixar as superfícies a unir com o objetivo de eliminar óxidos ou impurezas nas superfícies a soldar. As placas foram preparadas com lixa P320 (grãos por polegada linear).

Foram construídas caixas em *Medium Density Fiberboard* (MDF), consoante as dimensões desejadas (Figura 3.1a)), que contêm o explosivo e os espaçadores que irão definir a STD. Os desenhos estão indicados no APÊNDICE B.

Concluída a preparação das placas e a montagem da caixa, colou-se a placa voadora à caixa de suporte do explosivo pelas extremidades. A configuração escolhida para a realização dos ensaios foi a paralela sobreposta, em que a placa voadora é colocada paralelamente à placa intermédia e à placa estacionária, a uma determinada distância entre todas elas (STD), sendo aplicados seis espaçadores de iguais dimensões, um em cada vértice da superfície e dois no meio das placas a unir. Seguidamente, coloca-se a placa intermédia entre os espaçadores. Por fim, junta-se a placa estacionária à outra extremidade dos espaçadores, pesando-se em seguida o conjunto.

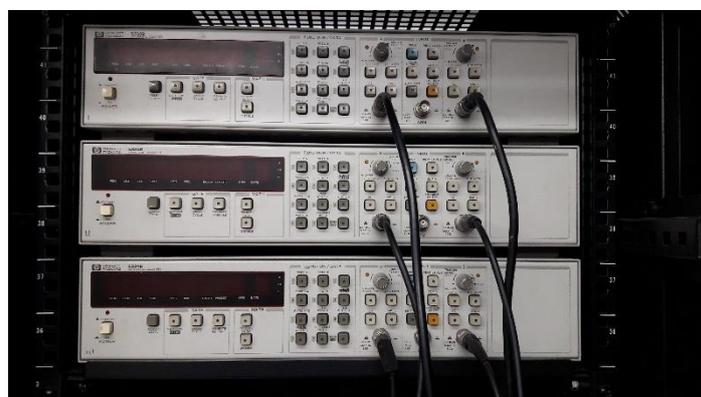


**Figura 3.1.** a) Representação da caixa de suporte; b) Montagem experimental.

O explosivo plástico é colocado na caixa junto ao local onde o detonador será aplicado e faz-se nova pesagem. Finalmente, preenche-se o restante espaço da caixa com o explosivo e procede-se a nova pesagem do sistema (Figura 3.1b)).

Conhecendo a diferença da massa entre as medições e as dimensões da caixa (tendo em atenção ao espaço ocupado pelo explosivo plástico) é possível determinar qual a massa de explosivo utilizado, importante para obter a densidade do explosivo e rácio deste para cada ensaio.

O conjunto de sondas para medição da velocidade de detonação é colocado por cima do explosivo e a restante montagem é feita no interior da câmara de detonação, isto implica a preparação da base, a ligação do conjunto de sondas à fonte de tensão e ao cronómetro de precisão HP universal counter 5334B (Figura 3.2) e a colocação do detonador. A preparação da base consiste na disposição de uma placa de aço sobre areia com o objetivo de absorver alguma energia de impacto.



**Figura 3.2.** Cronómetros de precisão.

### 3.4. Medição da velocidade de detonação

Para a medição da velocidade de detonação das misturas explosivas foram utilizados cronómetros de precisão. Este método consiste no posicionamento de um conjunto de sondas em cima do explosivo e com distâncias pré-definidas, com a ajuda de um suporte feito em MDF e com as dimensões indicadas no APÊNDICE B. As sondas foram feitas a partir de dois fios de cobre revestido e um tubo de aço, que lhes garantia rigidez. Depois da sua montagem, foram conectadas individualmente aos cronómetros. Após a detonação, estes dois fios ficam em curto-circuito e permite que exista a deteção de um sinal nos cronómetros. A primeira sonda permite o arranque dos cronómetros e as restantes sondas interrompem a registo de tempo nos cronómetros à medida que a explosão se propaga.

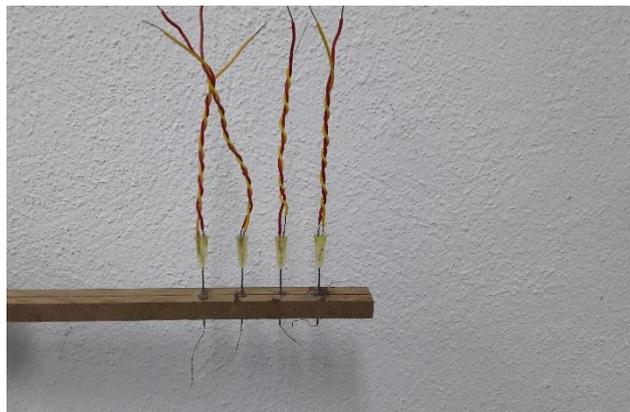


Figura 3.3. Sondas utilizadas para medição da velocidade de detonação com os cronómetros.

### 3.5. Cálculo da velocidade de impacto

Gurney (1943) investigou a aceleração de projeteis com recurso a explosivos de várias configurações diferentes e apresentou o conceito da velocidade característica de Gurney ( $\sqrt{2E}$ ). A energia característica de Gurney ( $E$ ) tem um valor característico para cada explosivo.

Cooper (1997) quando estudou a velocidade característica de Gurney desenvolveu a Equação (3.1), para explosivos ideais, e que pode ser usada em numa maior gama de situações, uma vez que depende somente da velocidade de detonação do explosivo.

$$\sqrt{2E} = \frac{V_d}{2,97} \quad (3.1)$$

Mais tarde, Kennedy (1970) estudou o conceito de Gurney para uma detonação unidimensional com configuração paralela. O seu estudo deu origem à Equação (3.2) apresentada por Blazynski (1983) onde  $R$  representa o rácio de explosivo.

$$V_{p,Gurney} = \sqrt{2E} \left( \frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Outra equação estudada por Findik (2011) relaciona a velocidade de detonação do explosivo, a velocidade de impacto da placa voadora e o ângulo que esta forma relativamente ao plano horizontal (Equação (3.3)).

$$V_p = 2V_d \sin \frac{\beta}{2} \quad (3.3)$$

A velocidade de impacto  $V_p$  das relações impostas anteriormente apresentada considera esta como velocidade terminal depois da aceleração da placa voadora.

### 3.5.1. Estimativa da velocidade de impacto

Para este estudo a velocidade de impacto irá ter duas componentes, a velocidade de impacto da placa voadora sobre a placa intermédia,  $V_{p1}$ , e a velocidade de impacto do conjunto formado pela placa voadora com a intermédia sobre a placa estacionária,  $V_{p2}$ . Para a primeira colisão, a velocidade de impacto depende do espaço de aceleração que tem disponível, sendo que na segunda colisão considera-se que existe conservação de energia cinética no sistema de modo que a velocidade seja constante até ao impacto com a placa estacionária. Assim sendo, é essencial que haja uma determinada distância entre placas para que seja possível obter uma estimativa da velocidade ganha pela placa voadora e, posteriormente, o conjunto placa voadora e intermédia, até ao momento de impacto. Chou e Flis (1986) desenvolveram a Equação (3.4) onde se consegue chegar a uma aproximação da velocidade de impacto para um determinado instante de tempo ( $t$ ).

Na Equação (3.4) o parâmetro  $V_{p,Gurney}$  é obtido pela Equação (3.2),  $t_0$  é o instante inicial (geralmente é igual a zero) e  $\tau$  é uma constante de tempo dada Equação (3.5).

$$V_{p1}(t) = V_{p,Gurney} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t - t_0}{\tau} \right) \right] \quad (3.4)$$

$$\tau = C_1 \frac{MV_{p,Gurney}}{P_{CJ}} + C_2 \quad (3.5)$$

Na equação anterior,  $P_{CJ}$  representa a pressão de Chapman-Jouguet produzida pela detonação (uma característica do explosivo utilizado, que no caso do ANFO é de aproximadamente 5 GPa) e  $M$  corresponde à massa da placa voadora em [kg]. As constantes de calibração  $C_1$  e  $C_2$  têm como objetivo garantir que a placa voadora atinja 80% da velocidade de Gurney, sendo esta a velocidade de projeção calibrada ( $V_{pcal} = 0,8V_{p,Gurney}$ ). O tempo necessário para que a placa voadora atinja esta velocidade ( $T_{V_{pcal}}$ ) é dado pelo tempo necessário para as ondas de choque, que se propagam no interior da placa voadora à velocidade propagação do som longitudinal ( $C_L$ ), percorram uma distância equivalente a oito vezes a espessura da placa (Mendes et al. 2013).

Para a distância percorrida pela placa voadora, realiza-se a integração da Equação (3.4) em ordem ao tempo, obtendo a Equação (3.6) que representa a distância percorrida em função do tempo decorrido.

$$\Delta x_p(t) = V_{p,Gurney} \left[ t + \tau \left( e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right) \right] \quad (3.6)$$

Através das equações acima apresentadas, para um determinado incremento de tempo, é possível calcular a velocidade instantânea da placa bem como a distância percorrida por esta. Deste modo, conhecendo a distância entre as placas é possível determinar a velocidade no momento do impacto.

Para a segunda colisão, aplicando a equação da conservação da energia cinética para a colisão de dois corpos, presente na Equação (3.7), é possível calcular a velocidade de colisão entre o conjunto placa voadora e placa intermédia, com a placa estacionária.

$$\frac{1}{2} m_{voadora} V_{p1}^2 + \frac{1}{2} m_{intermédia} V_{pi}^2 = \frac{1}{2} (m_{voadora} + m_{intermédia}) V_{p2}^2 \quad (3.7)$$

Note-se que a velocidade de colisão da placa intermédia no momento de colisão dos dois corpos é nula, assim sendo a Equação (3.7) assume a forma indicada na Equação (3.8).

$$V_{p2} = \sqrt{\frac{m_{voadora} V_{p1}^2}{m_{voadora} + m_{intermédia}}} \quad (3.8)$$

### 3.6. Parâmetros de soldadura

Os parâmetros utilizados em cada ensaio encontram-se na Tabela 3.5 Para todos os ensaios realizados foi utilizada uma STD de 4,5 milímetros entre a placa voadora e a placa intermédia, equivalente a 1,5 vezes a espessura da placa voadora. A distância entre a placa intermédia e a placa estacionária, tendo em consideração a relação usada na distância anterior, foi tida como 1,5 milímetros.

**Tabela 3.5.** Parâmetros utilizados nas soldaduras realizadas.

Soldadura	AA/CS/SS-A30	AA/N/SS-A30
Placa Voadora	AA6082-T6	AA6082-T6
Placa Intermédia	DC05	Nióbio
Placa Estacionária	AISI 304	AISI 304
Espessura placa voadora [mm]	3	3
Espessura placa intermédia [mm]	1	1
Espessura placa estacionária [mm]	3	3
Massa placa voadora [g]	142	143
Massa placa intermédia [g]	135	154
Massa placa estacionária [g]	414	415
Explosivo utilizado	ANFO	ANFO
Altura do explosivo [mm]	30	30
Rácio de explosivo	3,08	2,93

### 3.7. Caracterização macro e microestrutural

Depois da realização dos ensaios foram feitas análises macro e microestrutural das soldaduras. A análise macroestrutural foi documentada com fotografias e para a análise microestrutural foi utilizado um microscópio ótico Leica DM 4000 MLED com a câmara incluída Leica MC 120HD, onde o registo fotográfico foi feito através do *software Leica Application suite*. Foram ainda realizadas medições da espessura da camada intermetálica, do comprimento e da amplitude de onda, recorrendo ao *software* de medição *ImageJ*.

#### 3.7.1. Preparação das amostras

Após a realização dos ensaios, foi analisada a microestrutura, a fim de observar a influência dos parâmetros utilizados em cada um dos ensaios. De cada ensaio realizado

foram retiradas duas amostras para análise, uma amostra no sentido longitudinal (em relação ao sentido da detonação) e outra transversal. O local de onde foram retiradas as amostras em cada um dos ensaios encontra-se disponível no APÊNDICE C.

Para uma melhor compreensão na análise das amostras, foi acrescentado na nomenclatura a posição desta em relação à velocidade de detonação. A conversão entre a nomenclatura utilizada internamente e utilizada neste trabalho está presente no APÊNDICE C.

Escolhidos os locais a analisar e recolhidas as amostras, estas foram colocadas em resina epoxy e, de seguida, preparadas com lixas P180, P320, P600, P1000 e P2500. Para o polimento das amostras recorreu-se a uma solução de partículas de diamante de 6 µm, 3 µm e 1 µm de dimensão.

### **3.7.2. Análise SEM/EDS**

De modo a analisar a composição química da interface, foram feitas análises químicas por *Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM/EDS) utilizando um microscópio eletrónico de varrimento *Zeiss-Gemini 2* (SEM – *Scanning Electron Microscope*). O SEM permite aprofundar a caracterização microestrutural relativamente ao microscópio ótico e o EDS permite fazer a análise química.

Os resultados obtidos nos espetros exprimem-se em percentagem de atómica dos componentes e, para esta análise, foram ignorados os elementos residuais presentes na amostra (carbono e oxigénio).

## **3.8. Caracterização mecânica**

### **3.8.1. Microdureza**

Para caraterizar os materiais base e as soldaduras foram realizadas medições de microdureza utilizando um microdurómetro *Struers-Duramin 2*. Nestas medições, foi aplicado uma carga de 200 gramas durante 15 segundos, à exceção das medições realizadas nos compostos intermetálicos.

Para os materiais base, as medições foram feitas numa amostra de modo a obter o valor da sua microdureza média. Para as soldaduras, estas foram feitas, em amostras da secção longitudinal das soldaduras, ao longo de uma linha perpendicular à direção da

detonação. As distâncias entre as indentações que foram utilizadas para criar o perfil de microdureza em todos os ensaios encontram-se no APÊNDICE D.

As regiões onde ocorreu a formação de compostos intermetálicos foram submetidas a uma carga inferior de modo a garantir que as indentações fossem apenas realizadas nestas regiões. Foi então aplicada uma carga de 25 gramas durante 15 segundos.

### **3.8.2. Ensaios de tração-corte**

O estudo do comportamento mecânico dos provetes à tração-corte permite avaliar a resistência e a ductilidade das ligações. Para realizar os ensaios foi utilizado o equipamento SHIMADZU AGS-X 100kN plus com um sistema ótico ARAMIS da GOM – *Optical measuring techniques*. No APÊNDICE E estão indicadas as dimensões necessárias dos provetes maquinados para que os testes se realizem. Antes do teste, as amostras foram preparadas criando um padrão preto aleatório sobre a superfície das amostras pintada previamente de branco, a fim de permitir a recolha de dados por correlação digital de imagem. A velocidade de realização dos ensaios foi de 1 mm/min. Por fim, é feito o tratamento de dados de maneira a determinar a força máxima aplicada aos provetes.

## **3.9. Análise fractográfica**

Após a realização dos ensaios tração-corte aos provetes, as fraturas destes foram estudadas e analisadas por SEM, para uma melhor compreensão do tipo de fratura que está presente nos provetes. Foram ainda realizadas análises químicas das superfícies de fratura por EDS.

Os resultados obtidos nos espectros encontram-se em percentagem atómica dos componentes, onde foram ignorados os elementos resíduos presentes na amostra (carbono e oxigénio) para uma mais fácil análise.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Enquadramento dos ensaios e construção das janelas de soldabilidade

#### 4.1.1. Velocidade de Detonação

Nos ensaios realizados foram efetuadas medições de velocidade de detonação. Através dos tempos obtidos nos cronómetros e das distâncias medidas previamente entre as sondas (APÊNDICE D), foi possível, por meio de um gráfico distância-tempo (APÊNDICE F), calcular a velocidade de detonação para cada soldadura realizada. O declive da reta obtido representa a velocidade de detonação. Na Tabela 4.1 estão presentes a posição das sondas (d), os tempos (t) e a velocidade média atingida.

Uma das sondas do primeiro ensaio não registou o tempo, no entanto, o cálculo da velocidade fez-se na mesma.

**Tabela 4.1.** Resultados da medição da velocidade de detonação.

AA/CS/SS-A30		AA/N/SS-A30	
d [mm]	t [ $\mu$ m]	d [mm]	t [ $\mu$ m]
0	0	0	0
19,84	-	19,78	10,457
19,58	20,820	20,02	22,271
20,46	32,397	19,98	33,601
<b><math>V_d</math> [m/s]</b>	1862	1789	

#### 4.1.2. Velocidade de Impacto

Para calcular a velocidade de impacto utilizaram-se os parâmetros indicados na secção 3.5. As constantes de calibração  $C_1$  e  $C_2$  foram calculadas de maneira a que a curva da velocidade de impacto em função do tempo passe pelo ponto determinado pelos valores de  $t_{V_{pcal}}$  e  $V_{pcal}$ . A Figura 4.1 mostra o gráfico, relativo ao ensaio AA/CS/SS-A30, que permite obter a velocidade de impacto para uma determinada distância percorrida pela placa

voadora. Na Tabela 4.2 estão assinaladas as velocidades de impacto para as soldaduras que foram realizadas.

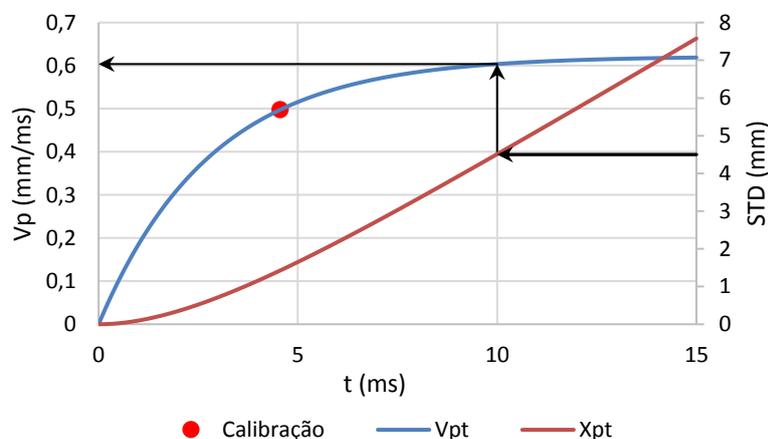


Figura 4.1. Calibração da velocidade de impacto no ensaio AA/CS/SS-A30.

Tabela 4.2. Valores da velocidade de impacto para os ensaios realizados.

Ensaio	AA/CS/SS-A30		AA/N/SS-A30	
Velocidade de impacto [m/s]	$V_{p1}$	$V_{p2}$	$V_{p1}$	$V_{p2}$
	603,8	432,3	571,3	396,4

No ensaio AA/CS/SS-A30 a STD utilizada foi de 4,5 milímetros e interpolando com a curva de posição  $X(t)$ , descobre-se o instante de tempo que demora à placa voadora a percorrer essa distância. Tendo o instante de tempo em que se dá o impacto e fazendo nova interpolação com a curva da velocidade  $V_p(t)$ , descobre-se a velocidade da placa voadora nesse instante e conseqüentemente a velocidade de impacto.

No APÊNDICE G encontram-se todos os parâmetros necessários para se conseguir desenhar este gráfico e ainda para o outro ensaio realizado e o seu respetivo gráfico.

### 4.1.3. Ângulo de colisão

Com os valores encontrados da velocidade de detonação do explosivo e da velocidade de impacto e com base na Equação (2.6), assinalada na secção 2.4.3, consegue-se estimar o valor do ângulo de colisão ( $\beta$ ). Na Tabela 4.3 estão indicados os ângulos de

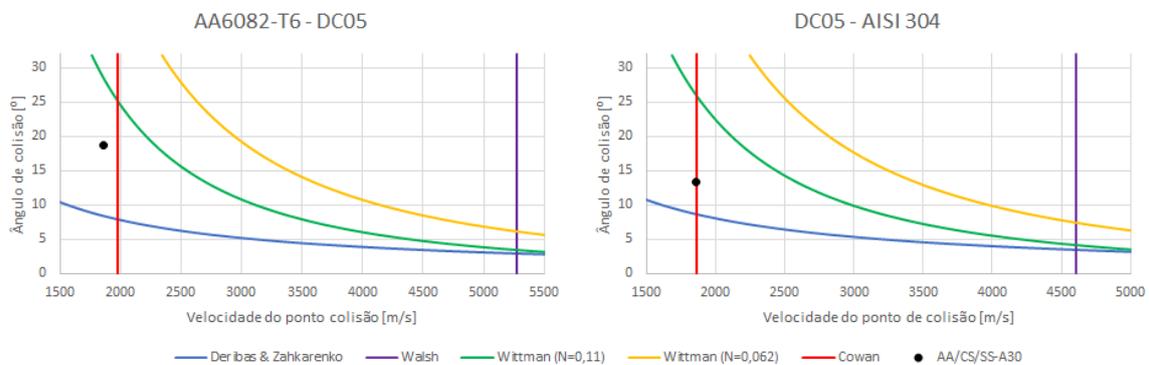
colisão das duas soldaduras realizadas. A obtenção destes valores permite então enquadrar os ensaios na janela de soldabilidade.

**Tabela 4.3.** Valores obtidos para o ângulo de colisão dos ensaios efetuados.

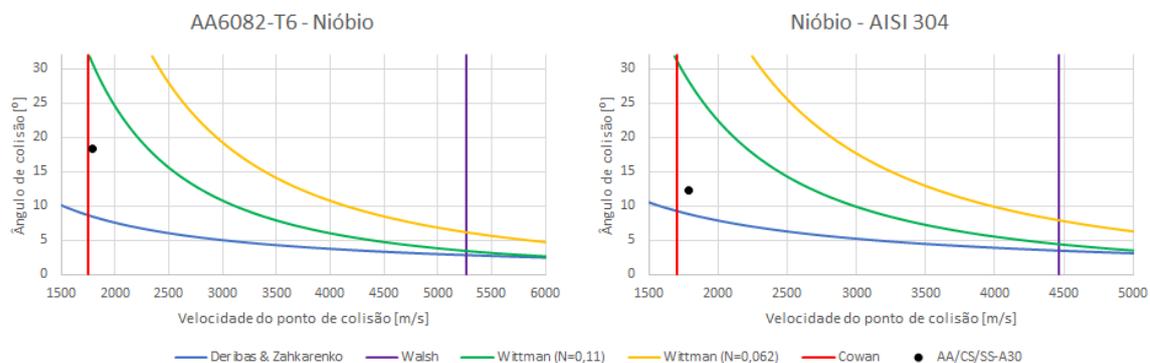
Ensaio	AA/CS/SS-A30		AA/N/SS-A30	
Angulo de Colisão [°]	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
	18,67	13,34	18,38	12,22

#### 4.1.4. Janela de soldabilidade

A janela de soldabilidade foi concebida para os dois sistemas elaborados neste trabalho. Na Figura 4.2 estão representadas duas janelas, resultado do primeiro ensaio (AA/CS/SS-A30), uma delas para a placa voadora (AA6082-T6) e a placa intermédia (aço carbono DC05) e a outra corresponde à janela entre a placa intermédia (aço carbono DC05) e a placa estacionária (AISI 304). A Figura 4.3 é referente ao outro ensaio (AA/N/SS-A30), sendo a primeira janela apresentada entre a placa voadora (AA6082-T6) e a placa intermédia (nióbio) e a segunda janela entre a placa intermédia (nióbio) e a placa estacionária (AISI 304).



**Figura 4.2.** Janelas de soldabilidade para os ensaios de AA/CS/SS-A30.



**Figura 4.3.** Janelas de soldabilidade para os ensaios de AA/N/SS-A30.

Após a construção da janela de soldabilidade, procedeu-se aos enquadramentos dos ensaios realizados, conseguindo-se assim obter a sua localização relativamente aos limites impostos e fazendo-se uma comparação com os resultados obtidos com a sua posição teórica na janela.

## 4.2. Análise macroscópica

### 4.2.1. AA/CS/SS-A30

Na Figura 4.4a) está apresentada a ligação obtida, aparentando ser uniforme ao longo do seu comprimento. Observam-se ainda dois aspetos distintos: no local onde se inicia a detonação, ocorreu deformação excessiva das placas devido ao tipo de explosivo iniciador, como indicado pela seta; na ponta final das placas deu-se uma extinção da explosão. É possível observar também na Figura 4.4b) a existência de uma curvatura nas placas causada pela grande quantidade de energia libertada durante a explosão.

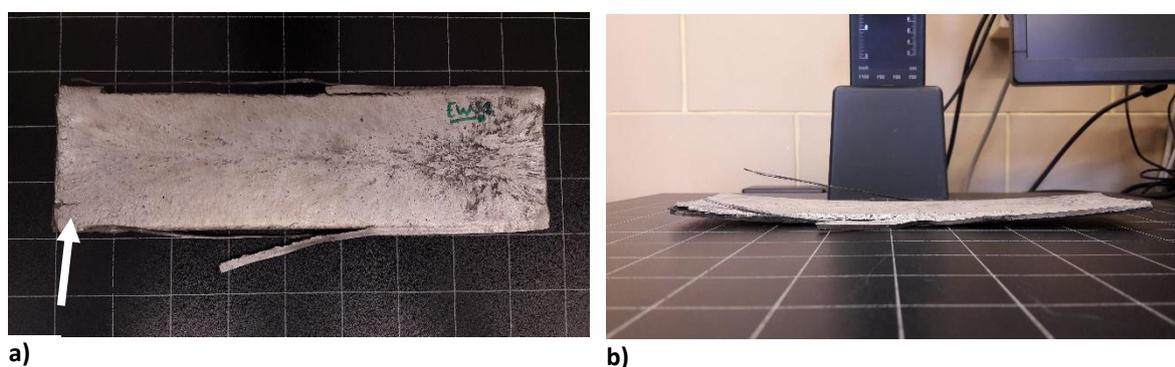


Figura 4.4. Ensaio AA/CS/SS-A30: a) Vista superior; b) Vista lateral.

### 4.2.2. AA/N/SS-A30

A Figura 4.5 revela que a soldadura obtida foi bem-sucedida, sendo também uniforme ao longo do seu comprimento. É possível ainda ver que este ensaio é muito idêntico ao ensaio anterior: uma grande deformação nas placas na parte inicial da detonação e a extinção da explosão no final da soldadura. Existe também a formação de uma curvatura das placas causadas pelo mesmo motivo que no outro teste.

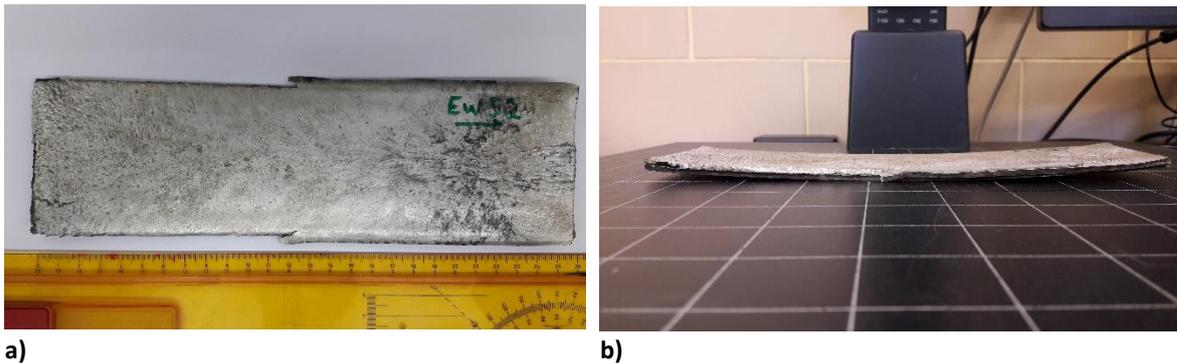


Figura 4.5. Ensaio AA/N/SS-A30: a) Vista superior; b) Vista lateral.

### 4.3. Análise da interface de soldadura

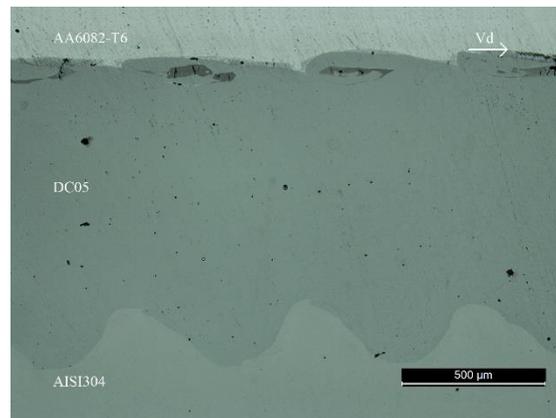
#### 4.3.1. AA/CS/SS-A30

A Figura 4.6a) mostra a morfologia das interfaces da soldadura com placa intermédia de aço carbono. É possível observar pela Figura 4.6b) a formação de uma interface ondulada entre a liga de alumínio e o aço carbono. De notar também que é visível a formação de algumas cavidades no material, estas sugerem que houve fusão do material. As regiões de transição apenas se encontram presente numa interface, entre a placa de alumínio e a placa de aço carbono e com valores de microdureza que variam de 402,7 HV até 898 HV. A Figura 4.6c) ilustra a interface entre o aço carbono e o aço inoxidável, onde se observa as ondas bem definidas formadas entre estes dois aços e sem região de transição.

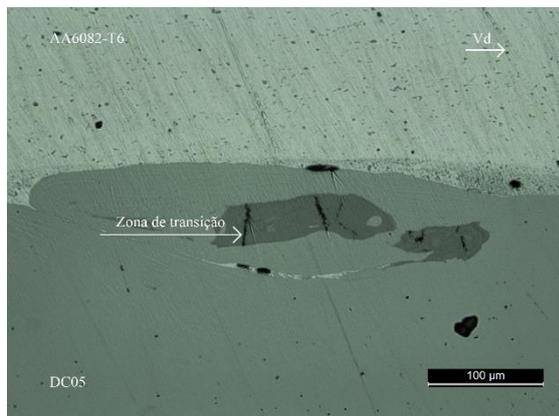
Para esta interface e de acordo com a janela de soldabilidade apresentado na Figura 4.2., o limite esquerdo da soldura não foi respeitado e, por isso, seria de se esperar uma interface plana entre o alumínio e o aço carbono. No entanto, tal não foi observado e a interface obtida é ondulada. Para a janela de soldabilidade do aço carbono com aço inoxidável todos os limites foram cumpridos, apontando para a formação de uma interface ondulada e confirmada durante a observação microscópica

Os tipos de ondas formadas nestas duas interfaces são distintas uma da outra. Na interface entre o alumínio e o aço carbono as ondas obtidas são encaracoladas, tipicamente alcançadas em soldaduras onde a densidade dos materiais usados é consideravelmente diferente. Para a interface entre o aço carbono e o aço inoxidável é possível observar que as ondas formadas são melhor definidas, com maior comprimento e

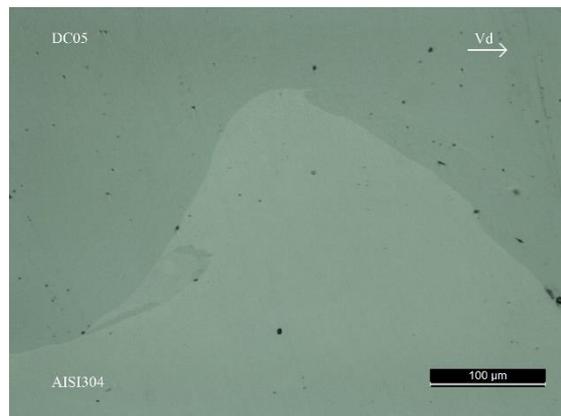
amplitude de onda, normalmente obtidas entre materiais com composições mais homogêneas (Carvalho et al. 2019).



a)



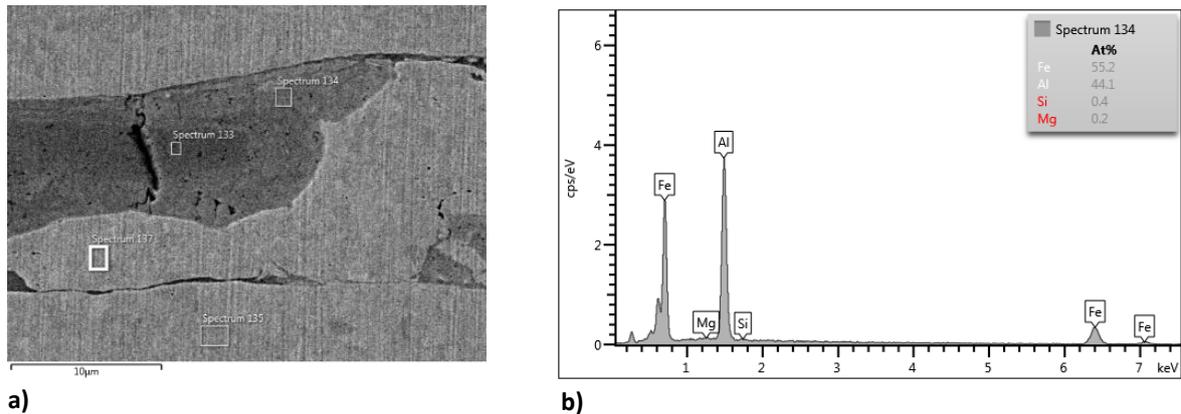
b)



c)

**Figura 4.6.** Interface da amostra longitudinal do ensaio AA/CS/SS-A30: a) Interface AA6082-T6, DC05 e AISI304; b) Interface AA6082-T6 e DC05; c) Interface DC05 e AISI 304.

Na Figura 4.7 encontra-se a localização e os resultados obtidos pela análise EDS para o ensaio AA/CS/SS-A30-L, respetivamente. Para o espetro presente na região intermetálica formada entre a liga de alumínio e o aço carbono, foi observado uma percentagem atómica de 55,2% de alumínio e de 44,1% de ferro tendo este ensaio os valores mais elevados de percentagem atómica de ferro de todos os realizados. Os restantes espectros presentes na Figura 4.7a) encontram-se no APÊNDICE H.



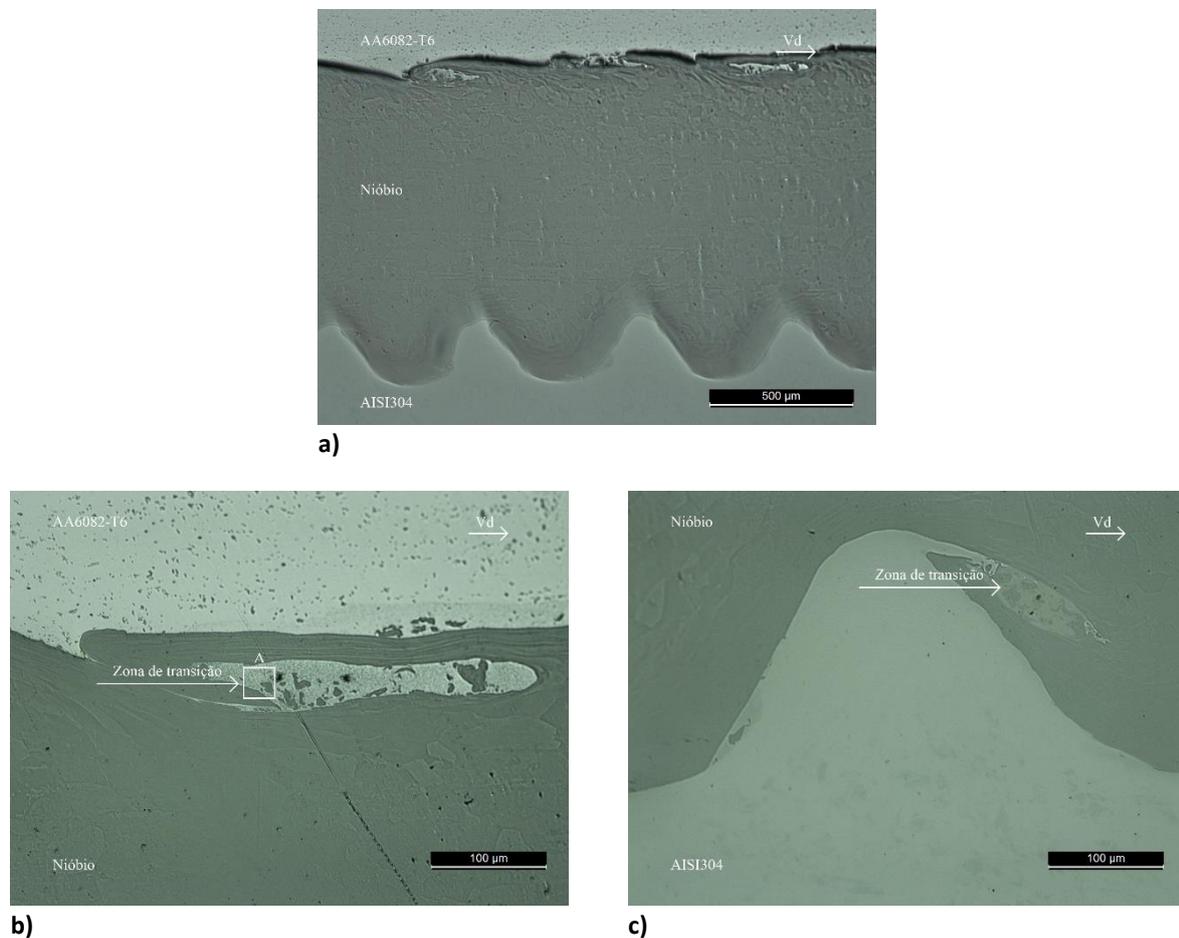
**Figura 4.7.** Análise EDS da amostra AA/CS/SS-A30-L: a) Macrografia da interface AA6082-T6 e DC05; b) Espectro obtido.

#### 4.3.2. AA/N/SS-A30

A morfologia das interfaces da soldadura com a placa intermédia de nióbio encontra-se na Figura 4.8a). É possível observar a formação das interfaces onduladas, mais detalhadamente entre a liga de alumínio e o nióbio como entre este e o aço inoxidável, respetivamente na Figura 4.8b) e Figura 4.8c).

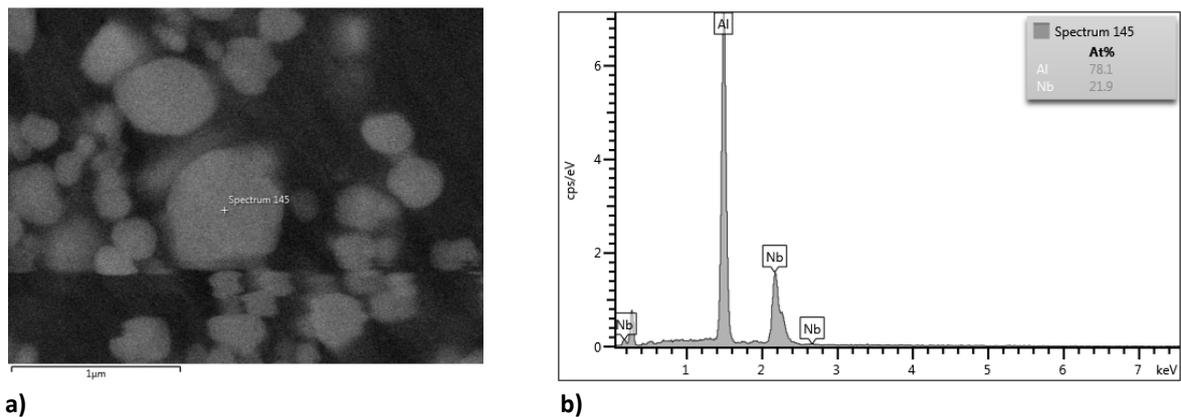
Para este ensaio, as duas janelas presentes respeitaram todos os limites, indicando que a energia fornecida ao sistema seria suficiente para que as soldaduras fossem de boa qualidade, e seria de se esperar a existência de duas interfaces onduladas, tal como se veio a observar.

Esta soldadura apresenta zonas de transição nas duas interfaces, para a interface da placa voadora com a placa intermédia há uma pequena variação da microdureza, tendo um valor máximo de 207,5 HV. Na interface entre a placa intermédia e a placa estacionária a variação dos valores foi bem maior, tendo um valor mínimo registado de 375, 2 HV e um máximo de 947,9 HV.



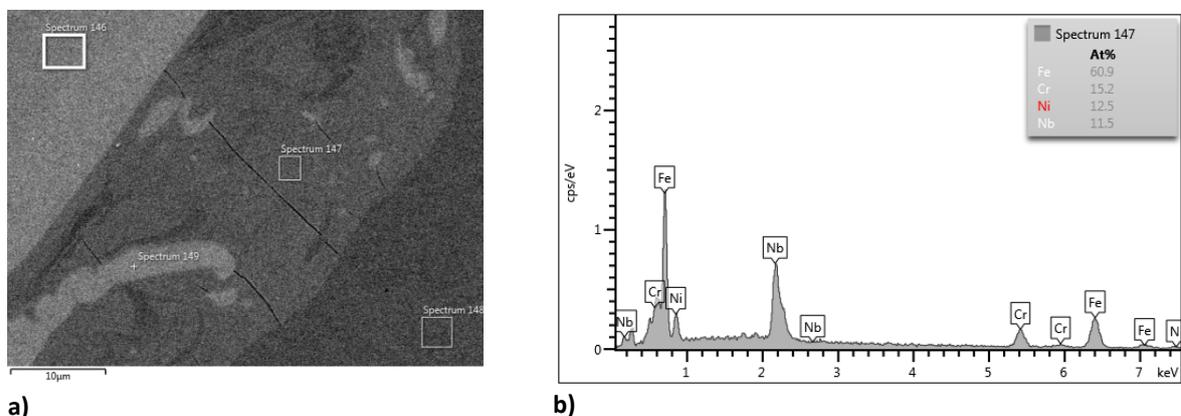
**Figura 4.8.** Interface da amostra longitudinal do ensaio AA/N/SS-A30: a) Interface AA6082-T6, Nióbio e AISI304; b) Interface AA6082-T6 e Nióbio; c) Interface Nióbio e AISI 304.

Foram realizadas análises EDS nas zonas intermetálicas presentes nas duas interfaces. A Figura 4.9a) é a ampliação A da Figura 4.8b) onde foram realizados os testes à região intermetálica da interface entre as ligas de alumínio e de nióbio. Da figura destaca-se a existência de uma matriz escura (alumínio) e de regiões mais claras dispersas pela matriz (mistura de alumínio e nióbio). O espectro apresentado pela Figura 4.9b) indica que foi obtida uma percentagem atômica de 78,1% de alumínio e de 21,9% de nióbio.



**Figura 4.9.** Análise EDS da amostra AA/N/SS-A30-L: a) Macrografia da interface AA6082-T6 e o Nióbio; b) Espectro obtido

Para as zonas intermetálicas existentes entre a interface de nióbio e de aço inoxidável foram realizadas também análises de EDS cujos resultados se encontram representados na Figura 4.10. De realçar a fissuração presente na zona intermetálica (Figura 4.10a)) É também possível observar as percentagens conseguidas através do espectro da Figura 4.10b. Os valores mais elevados de percentagem atômica foram de 11,5% para o nióbio e de 60,9% de ferro. Os restantes espectros presentes na Figura 4.10a) encontram-se no APÊNDICE I.



**Figura 4.10.** Análise EDS da amostra AA/N/SS-A30-L: a) Macrografia da interface Nióbio e AISI 304; b) Espectro obtido

### 4.3.3. Discussão de Resultados

Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores das velocidades de detonação, do rácio de explosivo e ainda a espessura média das regiões intermetálicas entre o alumínio e a placa intermédia. A variação da camada de intermetálicos é muito grande para os dois ensaios pois existem zonas que não apresentam intermetálicos e outras com estes compostos,

sendo nestas regiões que as medições foram efetuadas. Da Tabela 4.4 é possível observar que para aproximadamente os mesmo valores de velocidade de detonação e de rácio de explosivo, o ensaio AA/N/SS-A30 apresenta uma espessura maior de camada de intermetálicos entre a interface da placa voadora e a placa intermédia. Para a interface entre a placa intermédia e a placa estacionária não foram feitas medições uma vez que a interface entre o aço carbono e o aço inoxidável não apresentou uma camada de intermetálicos.

**Tabela 4.4.** Comparação da espessura da camada de intermetálicos dos ensaios realizados.

	AA/CS/SS-A30-L	AA/N/SS-A30-L
$V_d$ [m/s]	1862	1789
R	3,08	2,93
Espessura [ $\mu\text{m}$ ]	17,79	20,69

Na Tabelas 4.5 estão indicados os valores médios de comprimento e amplitude de onda, e os respetivos desvios padrão. Ao analisar os dados recolhidos é possível concluir que os materiais se comportaram de modo idêntico, isto é, os valores de comprimento e de amplitude médio de onda entre a interface da placa voadora e da placa intermédias, são bastante semelhantes nos dois casos em estudo. O mesmo acontece para os valores obtidos de ambas as interfaces entre a placa intermédia e a placa estacionária.

**Tabela 4.5.** Comparação do comprimento e amplitude médio de onda e respetivos desvios padrão entre as duas interfaces da soldadura AA/CS/SS-A30.

	Comprimento de onda médio [ $\mu\text{m}$ ]	Amplitude de onda médio [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio padrão [Comprimento]	Desvio padrão [Amplitude]
Interface AA/CS	653,753	91,951	68,601	14,069
Interface CS/SS	596,164	211,994	52,836	16,543
Interface AA/N	578,822	96,049	109,758	11,724
Interface N/SS	544,110	240,241	36,052	16,193

Na amostra AA/CS/SS-A30 analisada por EDS, os valores obtidos variam entre 44,1% e 65,8% de percentagem atómica de alumínio presentes nas regiões intermetálicas. De acordo com o diagrama de fases ferro-alumínio (Figura 2.15), estes valores levam a entender que as fases formadas possam ser  $Fe_3Al$  e  $FeAl$ , no entanto, os valores de dureza obtidos não vão ao encontro do que é apresentado pela Tabela 2.1., sendo por isso difícil afirmar com certeza de que estamos perante estes intermetálicos.

A amostra AA/N/SS-A30 tem zonas intermetálicas nas duas interfaces, no entanto, só é possível tentar identificar os intermetálicos formados na interface da liga de alumínio com o nióbio, uma vez que devido à presença de outros elementos químicos nos intermetálicos da interface entre o nióbio e o aço inoxidável, como por exemplo o níquel e o crómio, torna a sua determinação mais difícil.

Aybey et al. (2017) estudaram o efeito do tempo de espera na produção de compósitos de intermetálicos de  $Nb - NbAl_3$  através da sinterização com ativação elétrica e obteve a formação de intermetálicos  $NbAl_3$ , cuja microdureza variou desde os 145 HV aos 451 HV, dependendo do tempo que os materiais estavam sujeitos à corrente elétrica. Relacionado a composição química obtida na região intermetálica (78,1% de alumínio e 21,9% de nióbio), o diagrama de fases nióbio-alumínio da Figura 2.16a) e ainda os valores microdureza obtidos nesta amostra (entre 128,5HV e 207,5HV) é possível que para esta interface o intermetálico formado seja o  $NbAl_3$ .

## 4.4. Perfis de microdureza

### 4.4.1. AA/CS/SS-A30

Na figura 4.11 está representado o gráfico que corresponde ao perfil de microdureza do ensaio AA/CS/SS-A30 e onde as medições foram feitas perpendicularmente ao sentido da detonação da secção da amostra longitudinal. No mesmo gráfico estão ainda representadas as durezas médias dos materiais base, com valores de 114HV para a liga de alumínio, de 85,5 HV para o aço carbono e 18HV para o aço inoxidável. Neste ensaio observou-se que o aumento da microdureza na liga de alumínio AA6082-T6 não foi significativo, apresentando uma microdureza média de 122,7 HV. No que diz respeito ao aço carbono DC05 e ao aço inoxidável AISI 304, registou-se um aumento de microdureza localizado perto da interface entre estes dois materiais, tendo atingido o valor máximo de 350,2 HV no aço inoxidável. A microdureza média destes aços foi de 130,2 HV para o aço carbono e de 307,9 HV para o aço inoxidável, valores consideravelmente maiores do que a dureza média dos materiais base.

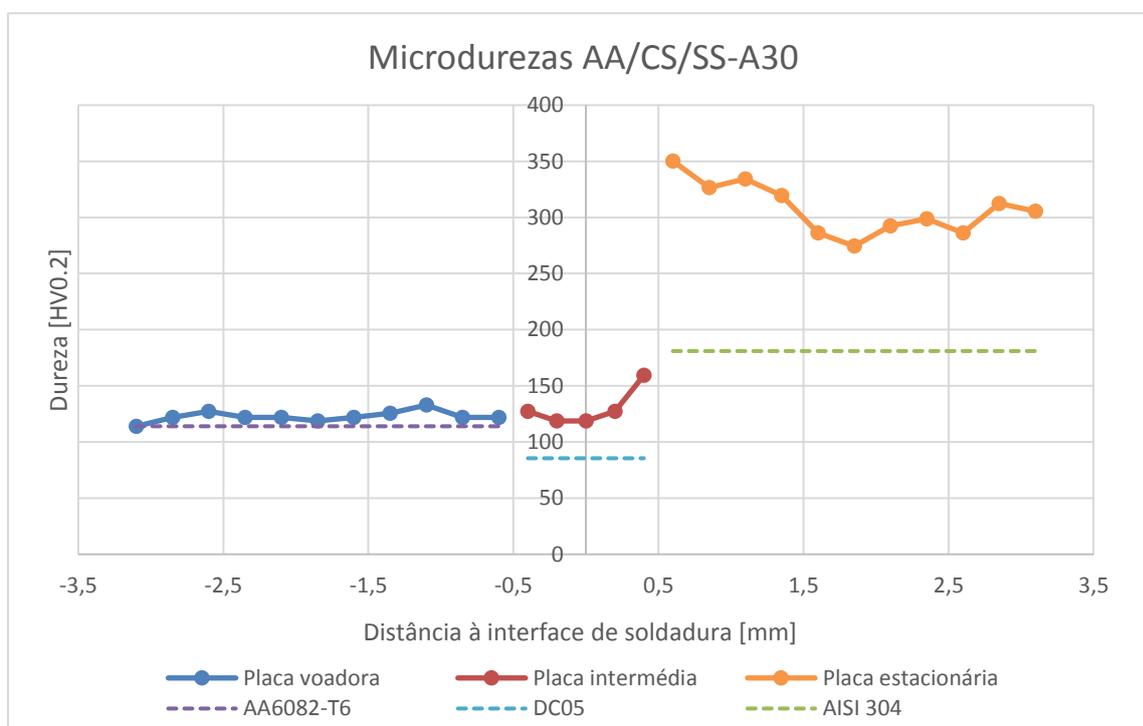


Figura 4.11. Perfis de microdureza obtidos nas diferentes placas no ensaio AA/CS/SS-A30.

#### 4.4.2. AA/N/SS-A30

A Figura 4.12 ilustra o gráfico respetivo ao perfil de microdureza do ensaio AA/N/SS-A30, à semelhança do ensaio anterior, as microdurezas foram realizadas numa amostra longitudinal. As microdurezas dos materiais base são as mesmas que as do ensaio anterior, apenas com a diferença do nióbio que apresentou uma microdureza de 53,1HV. A liga de alumínio manteve, de um modo geral, o seu valor de dureza idêntico e apresentou pouca variação ao longo do perfil, com uma microdureza média de 123 HV. De modo idêntico ao ensaio anterior, o aço inoxidável e a placa intermédia, nióbio, tiveram um aumento de maior dureza junto à interface destes, tendo obtidos valores máximos de 358,6 HV e 108,1 HV respetivamente. A microdureza média destes materiais foi de 86,5HV, para o nióbio e de 318,2 HV, para o aço inoxidável, valores que revelam um endurecimento do material.

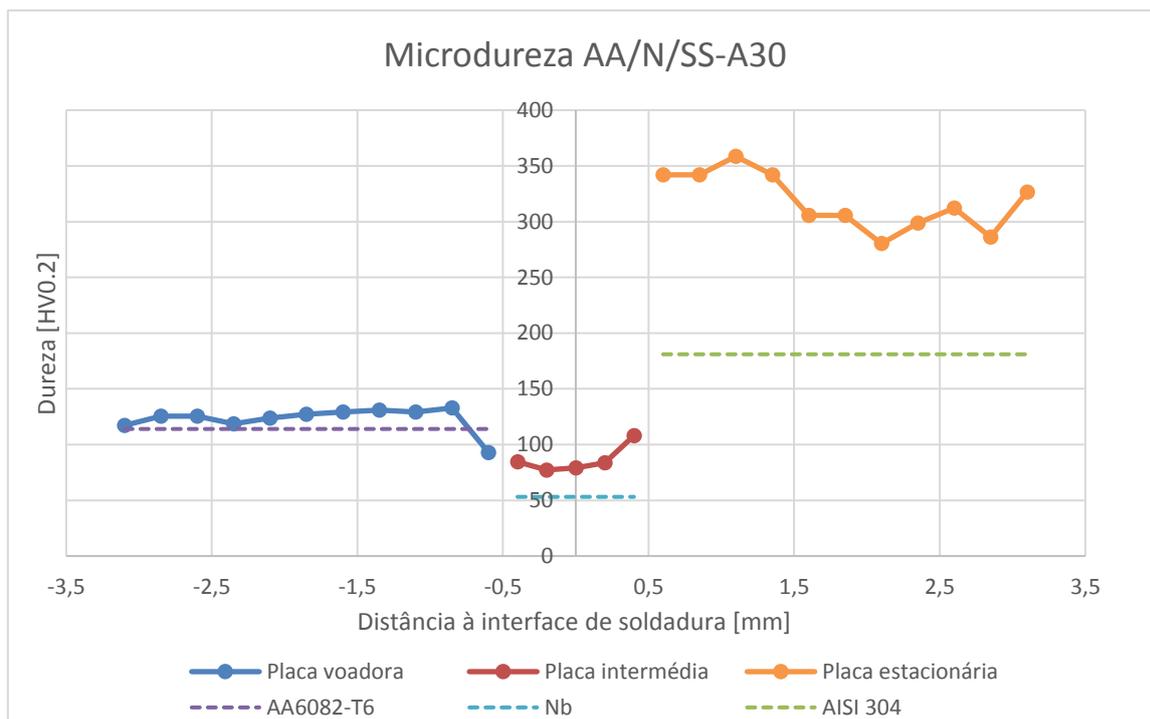


Figura 4.12. Perfis de microdureza obtidos nas diferentes placas no ensaio AA/CS/SS-A30.

#### 4.4.3. Discussão de resultados

Na Tabela 4.6 estão os valores de microdureza relativos ao ensaio realizado com a placa intermédia de aço carbono. De modo a fazer uma comparação entre os materiais

utilizados, foi feita uma variação da microdureza, resultado da razão entre a microdureza média do material base com a microdureza média do material depois da soldadura, apresentado em percentagem. O mesmo foi feito para a variação da microdureza máximo, substituindo o valor de microdureza média após a soldadura pelo seu valor máximo registado. É possível observar então que o material que sofreu um maior aumento de microdureza média foi o aço inoxidável, tendo, no entanto, o aço inoxidável o maior aumento máximo.

**Tabela 4.6.** Tabela de microdureza relativa ao ensaio AA/CS/SS-A30.

		AA/CS/SS-A30
AA6082-T6	Microdureza média [HV]	122,7
	Aumento médio [%]	7,6
	Aumento máximo [%]	16,5
DC05	Microdureza média [HV]	130,2
	Aumento médio [%]	53,0
	Aumento máximo [%]	86,3
AISI 304	Microdureza média [HV]	307,9
	Aumento médio [%]	70,1
	Aumento máximo [%]	93,5

A Tabela 4.7 é referente ao ensaio com a placa intermédia de nióbio. Verifica-se que o aço inoxidável é, e à semelhança da soldadura anterior, o material com maior aumento médio de dureza. Sobre a liga de alumínio, o aumento médio de dureza foi praticamente o mesmo. Isto deve-se ao facto de o principal mecanismo de endurecimento no aço inoxidável ser trabalho mecânico a frio, contrariamente ao do alumínio, que consiste na formação de precipitados endurecedores.

**Tabela 4.7.** Tabela de microdureza relativo ao ensaio AA/N/SS-A30.

		AA/N/SS-A30
AA6082-T6	Microdureza média [HV]	123,0
	Aumento médio [%]	7,9
	Aumento máximo [%]	16,5
Nióbio	Microdureza média [HV]	86,5
	Aumento médio [%]	62,9
	Aumento máximo [%]	103,6
AISI 304	Microdureza média [HV]	318,2
	Aumento médio [%]	75,8
	Aumento máximo [%]	98,1

Nos dois casos as placas intermédias sofreram grandes alterações nos valores de microdureza, sendo que, que a mais sofreu com a soldadura foi a placa intermédia da liga de nióbio.

#### 4.5. Resistência à tração/corte

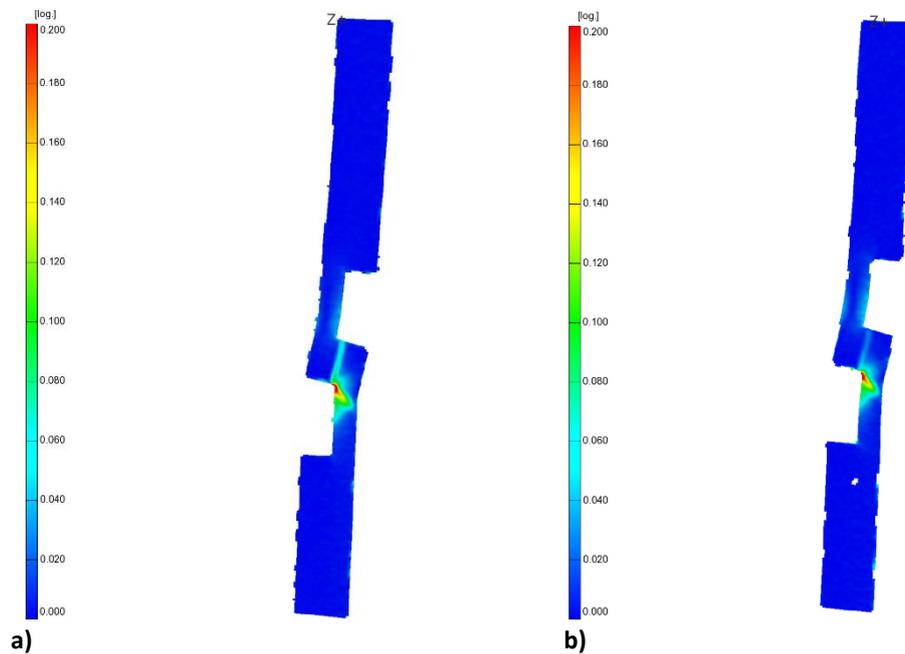
As ligações foram submetidas a um ensaio de tração-corte. Para o efeito, foram maquinados três provetes de cada soldadura, mas apenas se realizou o teste de tração a dois deles.

Na Tabela 4.8 estão indicados os valores de força máxima obtidos no ensaio de tração-corte e o local de rotura de cada provete.

**Tabela 4.8.** Resultados dos ensaios de tração.

Provete	Força máxima [N]	Local de rotura
AA/CS/SS-A30-T2	11364	AA6082-Material base
AA/CS/SS-A30-T3	11529	AA8082-Material base
AA/N/SS-A30-T2	8778	AA6082-Zona da ligação
AA/N/SS-A30-T3	11035	AA6082-Material base

Na Figura 4.13 estão apresentados os mapeamentos das deformações locais equivalentes de Von-Mises, no instante que antecede a fratura dos provetes do ensaio AA/CS/SS-A30. É possível observar que existe uma maior deformação junto ao entalhe que foi feito durante a maquinação dos provetes, local onde estes acabaram por partir.

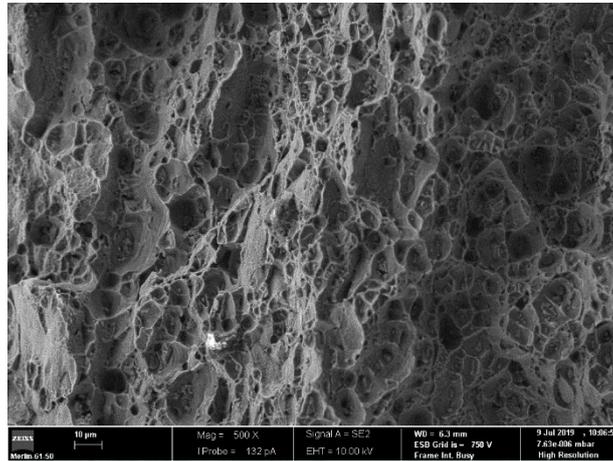


**Figura 4.13.** Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/CS/SS-A30: a) T2 b) T3

Ao comparar os dois ensaios de tração realizados para esta soldadura não é visível uma grande diferença, havendo um comportamento semelhante, tanto a nível das deformações locais de Von-Mises, como ao nível dos valores força máxima aplicada ao provete.

Da observação dos resultados obtidos é possível evidenciar a produção de soldaduras com bom comportamento mecânico, uma vez que estas fraturaram fora da zona de ligação.

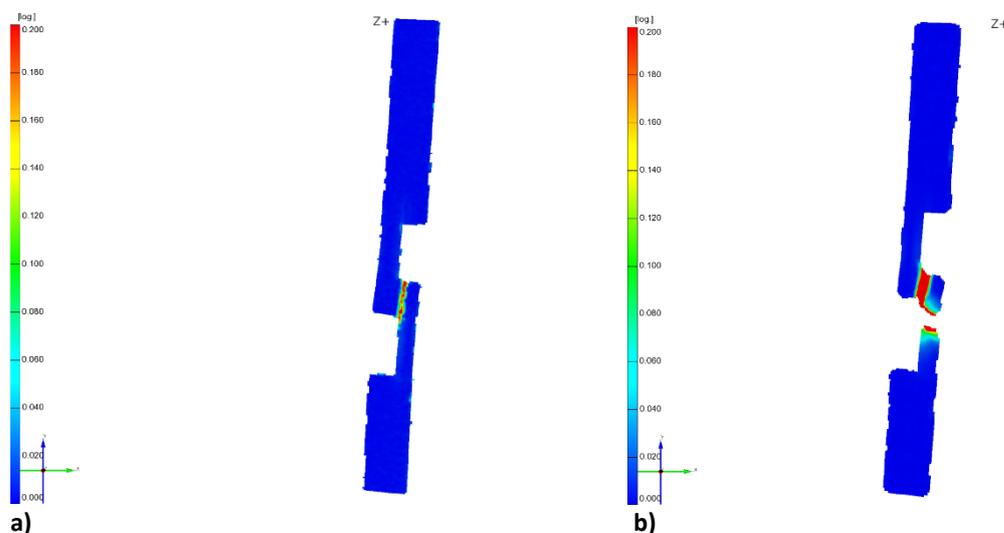
A Figura 4.14 mostra a análise SEM realizada à superfície de fratura, onde é possível observar a formação de uma zona de *dimples*, com muitas cavidades e um aspeto fibroso, o que demonstra que o tipo de rotura que se desenvolveu no ensaio AA/CS/SS-A30-T3 é dúctil.



**Figura 4.14.** Análise SEM à superfície de fratura do provete AA/CS/SS-A30-T3

Os provetes provenientes do ensaio AA/N/SS-A30 têm duas zonas de rotura diferentes, embora ambos se tenham fraturado pela liga de alumínio. Para o provete AA/N/SS-A30-T2, a fratura deu-se no alumínio, mas no centro da soldadura, rompendo o material diagonalmente. O provete AA/N/SS-A30-T3 tem uma região de fratura semelhante aos provetes do ensaio anterior, ou seja, perto do entalhe feito na preparação do provete e fora da zona de ligação.

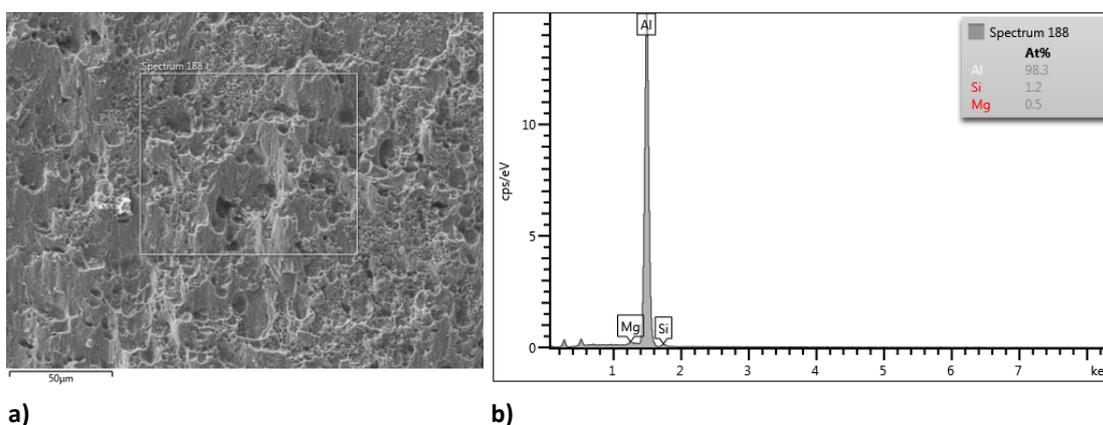
O mapeamento das deformações locais de Von-Mises no momento anterior à fratura dos provetes que foi retirado da soldadura AA/N/SS-A30 para este ensaio estão presentes na Figura 4.15a). A Figura 4.15b) mostra o instante a seguir à fratura do provete, pois o momento anterior da fratura poderia levar à ideia errada de que este se teria partido pela soldadura.



**Figura 4.15.** Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/N/SS-A30: a) T2; b) T3

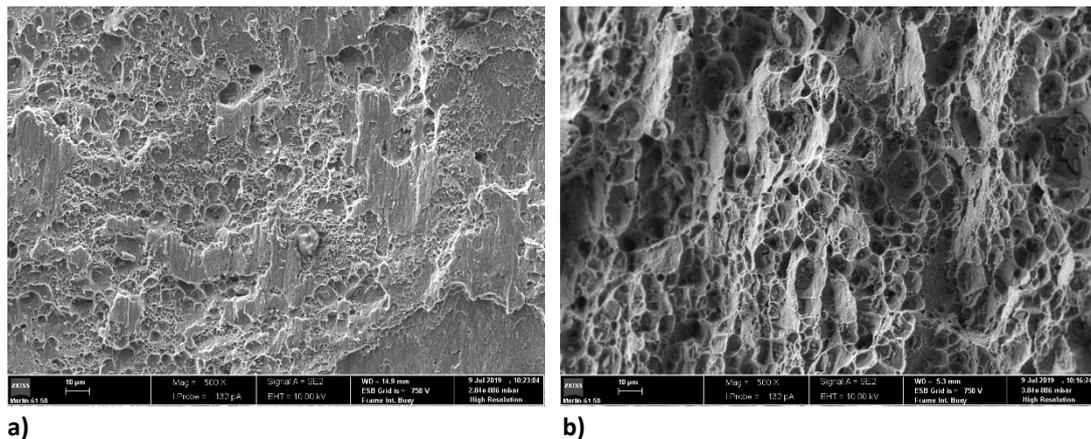
Ao observar e analisar a Tabela 4.9, anteriormente mostrada, é possível verificar que o valor de força máxima presente no ensaio de tração AA/N/SS-A30-T3 é semelhante aos outros testes de tração, valores médios de 11,4kN. No ensaio AA/N/SS-A30-T2 a força máxima é consideravelmente menor, cerca de 8,8 kN, o que representa uma redução de 22,4% da força máxima.

A Figura 4.16 mostra a análise EDS realizada à superfície de fratura do provete de tração AA/N/SS-A30-T2, onde é possível observar que a composição do espectro é essencialmente de alumínio, comprovando assim que a rotura do provete se deu na liga de alumínio AA6082-T6 e não devido a um problema de fragilidade dos intermetálicos.



**Figura 4.16.** Análise EDS do provete de tração ao corte do ensaio AA/N/SS-A30-T2: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.

Na Figura 4.17a) é indicada a análise SEM realizada à superfície de corte também do provete de tração AA/N/SS-A30-T2, é possível observar a formação de zonas de *dimples*, formadas por toda a amostra e que sugere uma rotura dúctil do material no ensaio AA/N/SS-A30. A Figura 4.17b corresponde à análise SEM feita à superfície de fratura do ensaio de tração AA/N/SS-A30-T3, que em termos de aspeto é muito idêntico ao SEM do ensaio AA/CS/SS-A30, indicando assim que o tipo de fratura presente é dúctil.



**Figura 4.17.** Análises SEM às superfícies de fratura dos provetes AA/N/SS-A30: a) T2; b) T3

Carvalho et al. (2019) estudaram a influência da placa intermédia na soldadura por explosão a nível microestrutural e o comportamento mecânico entre o alumínio-aço carbono e alumínio-aço inoxidável. Concluíram que a soldadura entre o alumínio e o aço inoxidável, sem o uso da placa intermédia, tinha más propriedades mecânicas ou, simplesmente, não havia ligação entre estes dois materiais.

Machado (2018) investigou o efeito da placa intermédia na soldadura entre uma liga de alumínio e um aço inoxidável, utilizando uma chapa de alumínio como placa intermédia. Obteve ligações de boa qualidade e boas propriedades mecânicas, com uma interface ondulada entre a placa voadora (alumínio) e a placa intermédia (alumínio). No entanto, obteve uma interface plana entre a placa intermédia (alumínio) e a placa estacionária (aço inoxidável).

Comparando estes resultados com os resultados obtidos nesta dissertação pode-se afirmar que a soldadura por explosão entre o alumínio e o aço inoxidável beneficia do uso da placa intermédia, e que as suas propriedades mecânicas foram ainda melhoradas com a realização deste trabalho.



## 5. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho consistiu em estudar o efeito da placa intermédia e a otimização da mesma na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável. A realização deste trabalho tornou possível retirar as seguintes conclusões:

As soldaduras das placas de alumínio a aço inoxidável com as duas diferentes placas intermédias (aço carbono e nióbio) foram bem conseguidas.

Os ensaios realizados encontram-se dentro da janela de soldabilidade, à exceção da janela de alumínio com aço carbono, onde o limite esquerdo, que caracteriza o tipo de interface a obter, não foi respeitado.

As duas soldaduras apresentam formação de compostos intermetálicos nas interfaces. Porém, enquanto que na soldadura obtida com a placa intermédia de nióbio houve formação de fases intermetálicos nas duas interfases, na soldadura obtida com a placa intermédia de aço carbono apenas se formaram fases intermetálicas na interface entre o alumínio e este material.

Os ensaios foram realizados com uma velocidade de detonação e rácio de explosivo semelhante, é possível observar que a espessura da camada de intermetálicos formada é superior no ensaio que utilizou a placa intermédia de nióbio.

Os ensaios de tração-corte revelaram que foram obtidas soldaduras com qualidade, tendo os provetes partido todos pelo alumínio.

A placa intermédia que apresentou melhores propriedades foi a placa de aço carbono, sendo também a placa mais económica e mais acessível entre as duas.



## 6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo e otimização da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável pode ser alvo de uma instigação mais detalhada, utilizando outras placas intermédias, com o objetivo de perceber se este impede a formação de compostos intermetálicos na interface;

Realização de ensaios com uma configuração inclinada, uma vez que este tipo de montagem permite que a velocidade de impacto e a velocidade do ponto de colisão sejam inferiores;

Estudar a utilidade do conceito da janela de soldabilidade em soldaduras que utilizem placa intermédia;

Efetuar análises por difração de raios X nas zonas com intermetálicas de modo a obter a identificação das fases que as compõem;

No futuro, caso o explosivo escolhido seja ANFO, preparar a mistura de nitrato de amónio com combustível no LEDAP, para que o explosivo tenha sempre as mesmas propriedades.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.S.M. Handbook, Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Specialpurpose Materials, 10th ed. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 1990.

Abrahamson, G. R. (1961), "Permanent Periodic Surface Deformations Due to a Traveling Jet", *Journal of Applied Mechanics*, 28, 519-528.

Aceves, S. M., Loza, F., Elmer, J. W., Huber, R. (2015), "Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage", *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 1490-1503.

Aybey, M., Yener, T., Ipek, M., Zeytin, S. (2017) "Effect of Holding Time on the Production of Nb-NbAl<sub>3</sub> Intermetallic Composites via Electric-Current-Activated Sintering.", *Materiali in Tehnologije*, 51, 55-58.

Bahrani, A. S., Black, T. J., Crossland, B. (1967), "The Mechanics of Wave Formation in Explosive Welding", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering*, 296, 123-136.

Carpenter, S. H., Wittman, R. H. (1975), "Explosion Welding", *Annual Review of Materials Science*, 5, 177-199.

Carton, E. P. (2004), "Wave Forming Mechanisms in Explosive Welding", *Materials Science Forum*, 465-466, 219-224.

Carvalho, G.H.S.F.L., Galvão, I., Mendes, R., Leal, R.M. (2019) "Microstruture and Mechanical Behaviour of Aluminium-Carbon Steel and Aluminium-Stainless Steel Clads Produced With an Aluminium Interlayer.", *Materials Characterization*, 155, 109819.

Carvalho, G.H.S.F.L., Leal, R.M., Mendes, R., Galvão, I. (2017) "Effect of the Flyer Material on the Interface Phenomena in Aluminium and Copper Explosive Welds.", *Materials Design*, 122, 172-183

Chou, P.C., Flis, W.J., "Recent Developments in Shaped Charge Technology.", *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, 11, 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, 3145-3155.

Cowan, G. R., Holtzman, A. H. (1963), “Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding”, *Journal of Applied Physics*, 34, 928-939.

De Rosset, W. S. (2006), “Analysis of Explosive Bonding Parameters”, *Materials and Manufacturing Processes*, 21, 634-638.

Deribas, A. A., Zakharenko, I. D. (1974), “Surface Effects with Oblique Collisions between Metallic Plates”, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 10, 358-367.

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, 1480-1484.

Elango, E., Saravanan, S., Raghukandan, K. (2018), “Effect of Post Weld Heat Treatment on Al 5052-SS 316 Explosive Cladding with Copper Interlayer”, *Materials Science Forum*, 910, 35-40.

Findik, F. (2011), “Recent Developments in Explosive Welding”, *Materials and Design*, 32, 1081-1093.

Gulenc, B. (2008), “Investigation of Interface Properties and Weldability of Aluminum and Copper Plates by Explosive Welding Method”, *Materials and Design*, 29, 275-278.

Gurney, R. W., U.S. Army Ballistic Research Laboratory. (1943). “The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shell, Grenades”, Aberdeen Proving Ground, Md: Ballistic Research Laboratories.

Hajitabar, A., Moosavy, H. (2017) “Electron Beam Welding of Difficult-to-Weld Austenitic Stainless Steel/Nb-Based Alloy Dissimilar Joints Without Interlayer”, *Vacuum*, 146, 170-178.

Hokamoto, K., Izuma, T., Fujita, M. (1993), “New Explosive Welding Technique to Weld”, *Metallurgical Transactions A*, 24, 2289-2297.

Hunt, J. N. (1968), “Wave Formation in Explosive Welding”, *Philosophical Magazine*, 17, 669-680.

Kattner, U.R., Burton, B.P., (1992), Al-Fe (Aluminum - Iron). In *ASM Metals Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams*.

Kennedy, J. E. (1970), “Gurney Energy of Explosives: Estimation of the Velocity and Impulse Imparted to Driven Metal”, Report No. SC-RR-70-790.

---

Loureiro, A., Mendes, R., Ribeiro, J.B., Leal, R.M., Galvão I. (2016) “Effect of Explosive mixture on Quality of Explosive Welds of Copper to Aluminium.”, *Materials and Design*, 95, 256-267.

Machado, L. (2018), “Efeito da Placa Intermédia na Soldadura por Explosão de uma Liga de Alumínio a um Aço Inoxidável”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Mahdouk, K., Gachon, J., Bourden, L., (1998) “Enthalpies of Formation of the Al-Nb Intermetallic Compounds.”, *Journal of Alloys and Compounds*, 268, 118-121.

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, 182-192.

Mendes, R., Ribeiro, J., Plaksin, I., Campos, J., Tavares, B. (2014), “Differences between the Detonation Behavior of Emulsion Explosives Sensitized with Glass or with Polymeric Micro-Balloons”, *Journal of Physics: Conference Series*, 500, 052030

Philipchuk, V. & Bois, F.L., 1962. 3,024,526.

Reid, S. R. (1974), “A Discussion of the Mechanism of Interface Wave Generation in Explosive Welding”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 16, 399-400.

Reza, M., Bakhtiari, H., Ali-Asghar, S., Khalaj, G., Majid, S. (2017), “Effect of Stand-Off Distance on the Mechanical and Metallurgical Properties of Explosively Bonded 321 Austenitic Stainless Steel - 1230 Aluminum Alloy Tubes 2. Materials and Research Method”, *Materials Research*, 20, 291-302.

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, 052038.

Robinson, J. L. (1975), “The Mechanics of Wave Formation in Impact Welding”, *Philosophical Magazine*, 31, 587-597.

Sun, X. J., Tao, J., Guo, X. (2011), “Bonding Properties of Interface in Fe/Al Clad Tube Prepared by Explosive Welding”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 21, 2175-2180.

Walsh, J. M., Shreffler, R. G., Willing, F. J. (1953), “Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions”, *Journal of Applied Physics*, 24, 349-359.

encontrada. Apêndice A Erro! A origem da referência não foi encontrada.

---

## APÊNDICE A

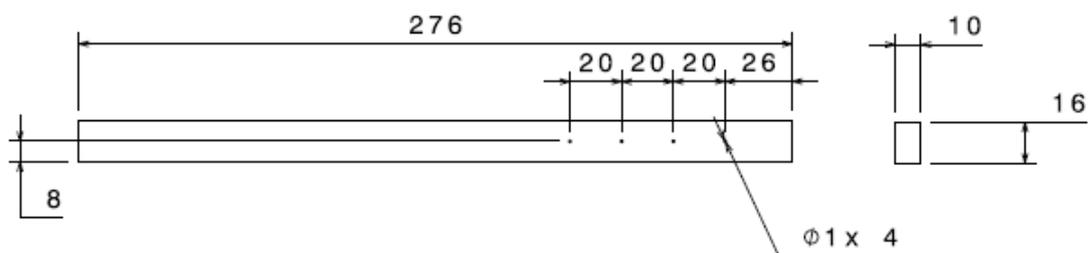
- Conversão de nomenclaturas:

Nomenclatura geral	EW51	EW52
Nomenclatura utilizada neste trabalho	AA/CS/SS	AA/N/SS

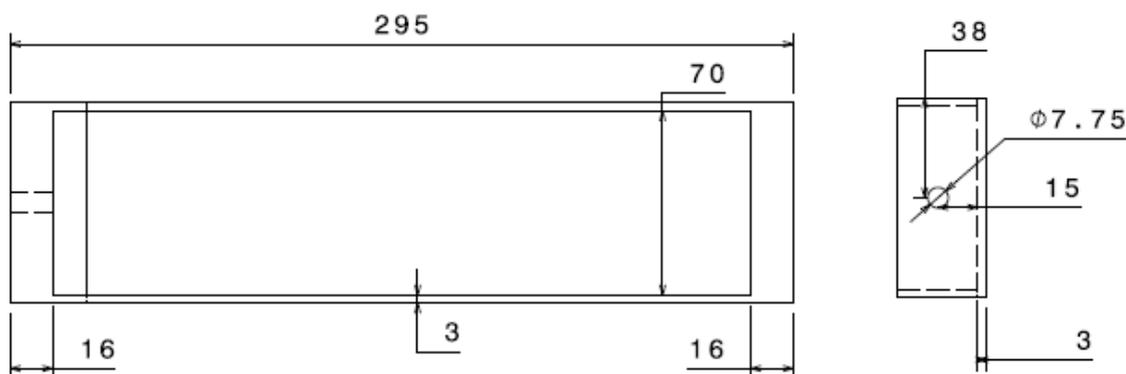


## APÊNDICE B

- Suporte sondas



- Caixa para o ensaio AA/CS/SS-A30 e AA/N/SS-A30



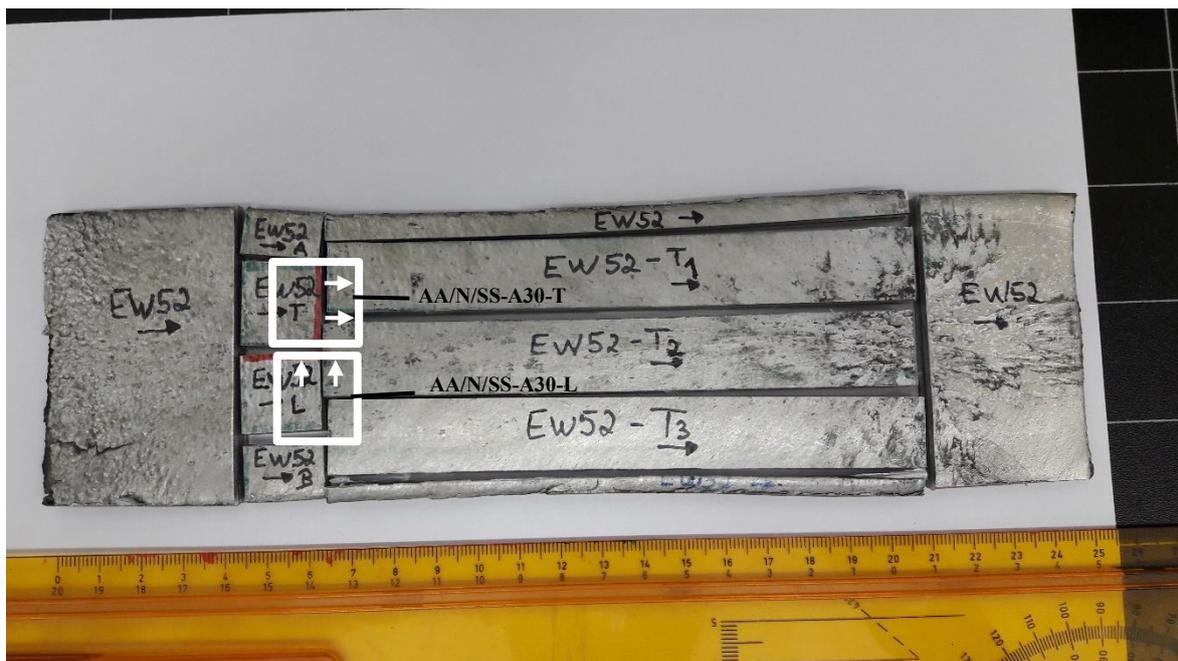


## APÊNDICE C

- Local das amostras colocadas em resina do ensaio AA/CS/SS-A30



- Local das amostras colocadas em resina do ensaio AA/N/SS-A30

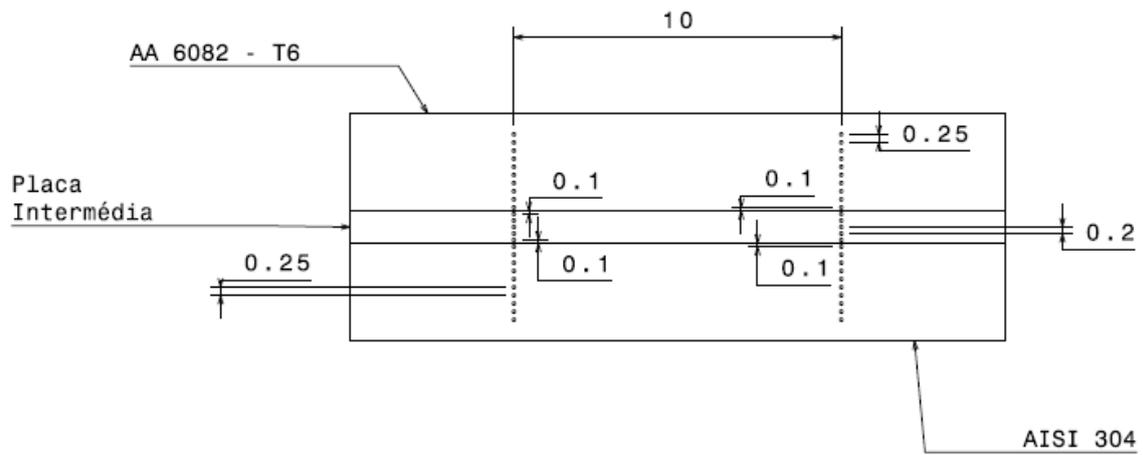


- **Nomenclatura das amostras**

<b>Nomenclatura geral</b>	<b>Nomenclatura utilizada nesta dissertação</b>
EW51T	AA/CS/SS-A30-T
EW51L	AA/CS/SS-A30-L
EW52T	AA/N/SS-A30-T
EW52L	AA/N/SS-A30-L

## APÊNDICE D

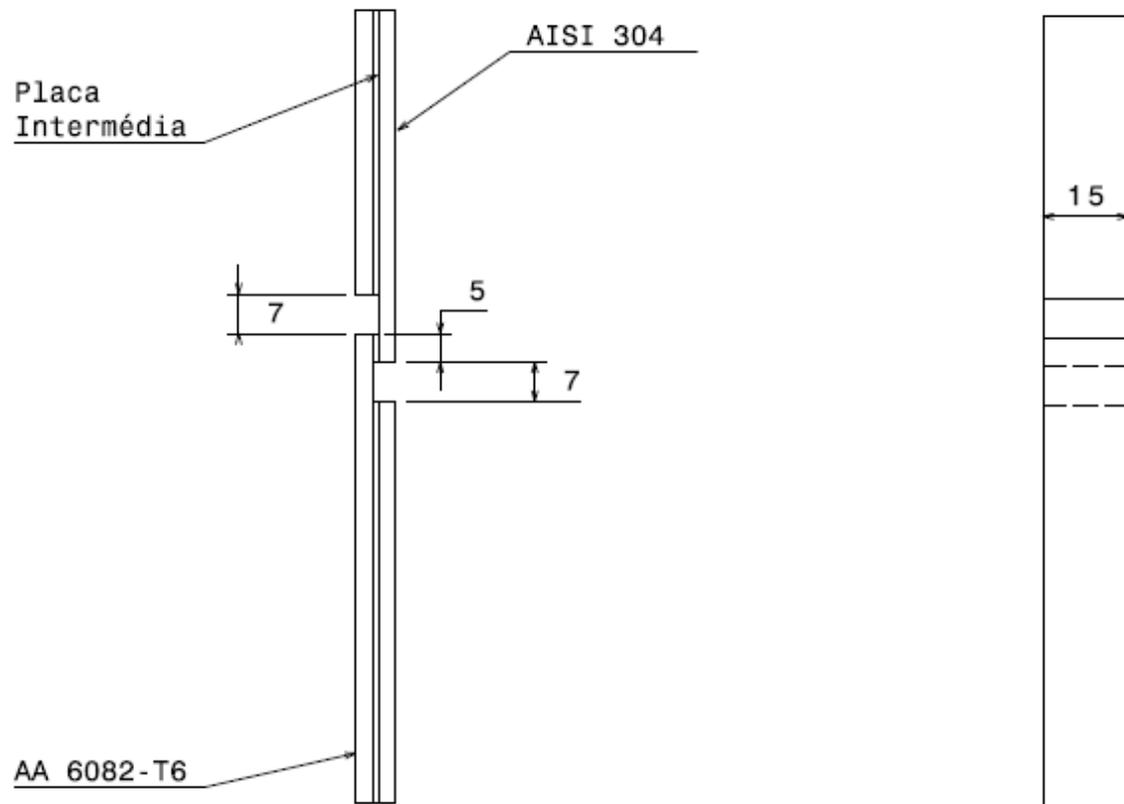
- AA/CS/SS-A30 e AA/N/SS-A30





## APÊNDICE E

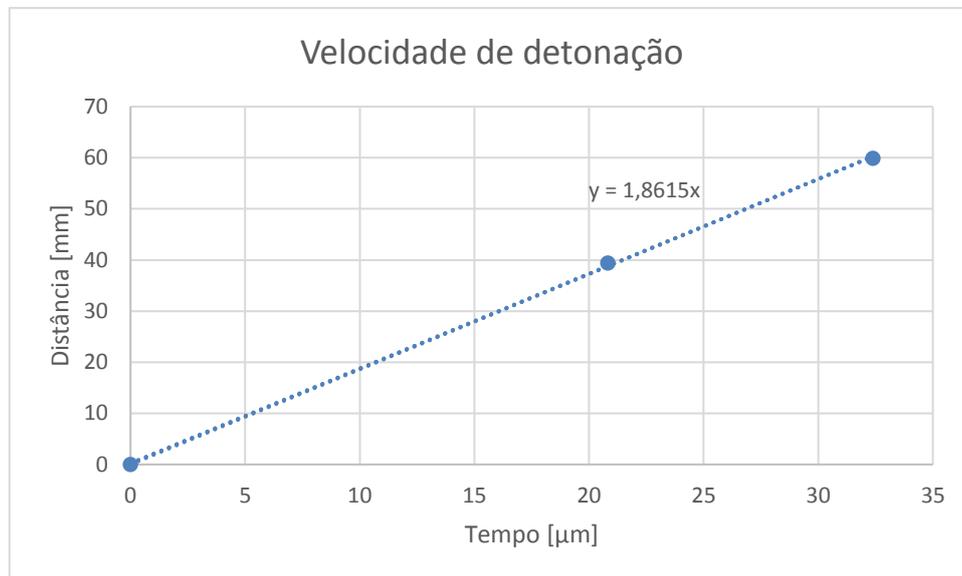
- Desenho dos provetes para os ensaios de tração ao corte



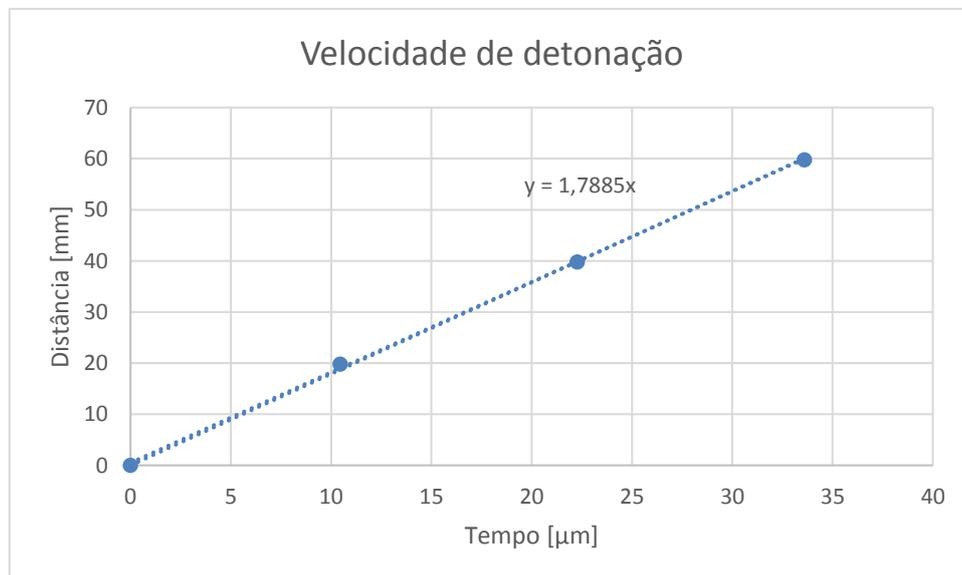


## APÊNDICE F

- **AA/CS/SS-A30**



- **AA/N/SS-A30**



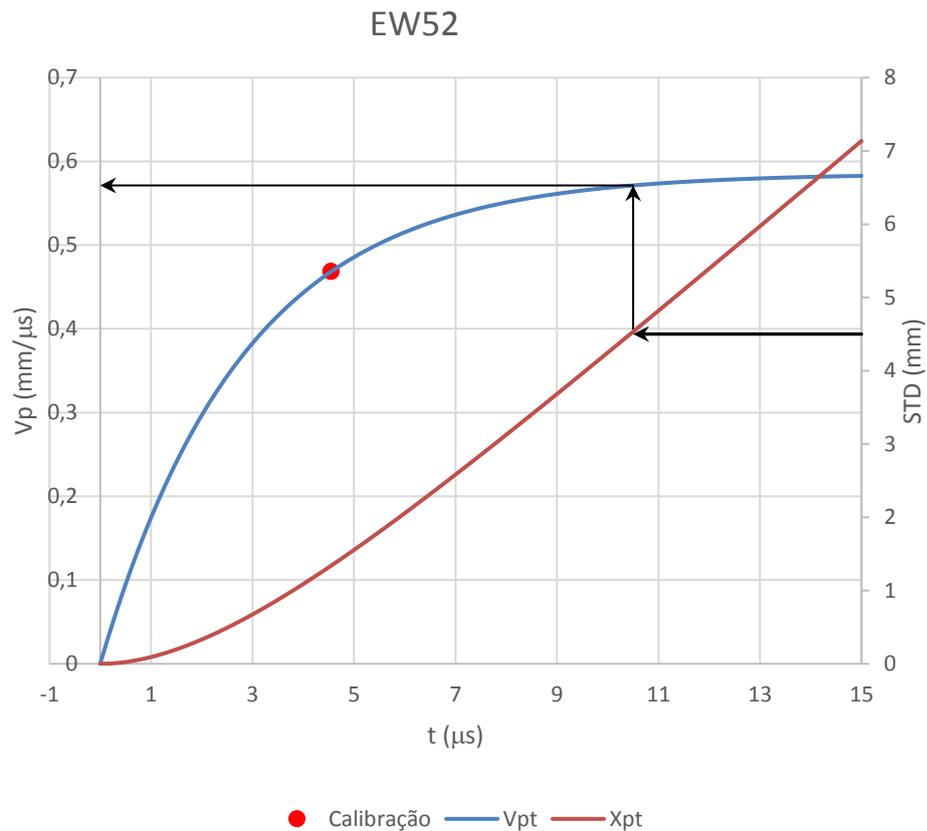


## APÊNDICE G

- Parâmetros necessários para a obtenção dos gráficos de velocidade de impacto e deslocamento em função do tempo

	AA/CS/SS-A30	AA/N/SS-A30
$\sqrt{2E}$ [m/s]	626,8	602,2
$P_{CJ}$ [GPa]	5,0	5,0
$V_{p,Gurney}$ [m/s]	621,9	585,6
$V_{p,cal}$ [m/s]	497,5	468,5
$T_{Vpcal}$ [m/s]	4,55	4,55
$\tau$ [ $\mu$ s]	2,83	2,83
$C_1$	0	0
$C_2$	2,83	2,83
$V_{p1}$ [m/s]	603,8	571,3
$V_p$ [m/s]	432,3	396,4

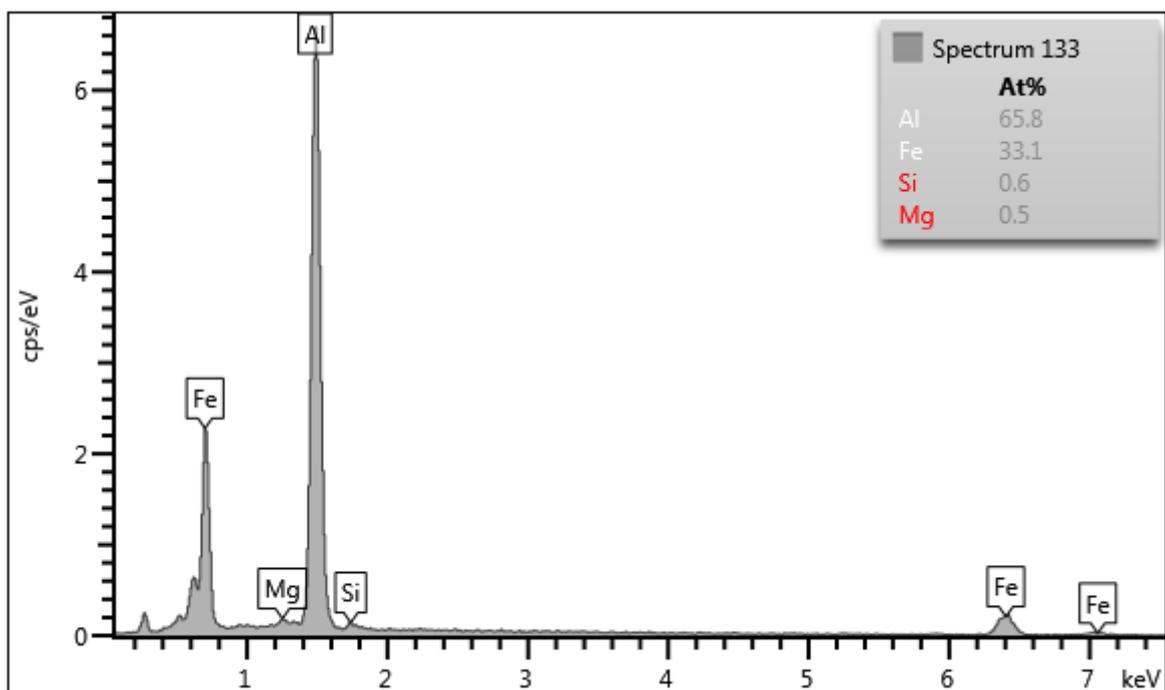
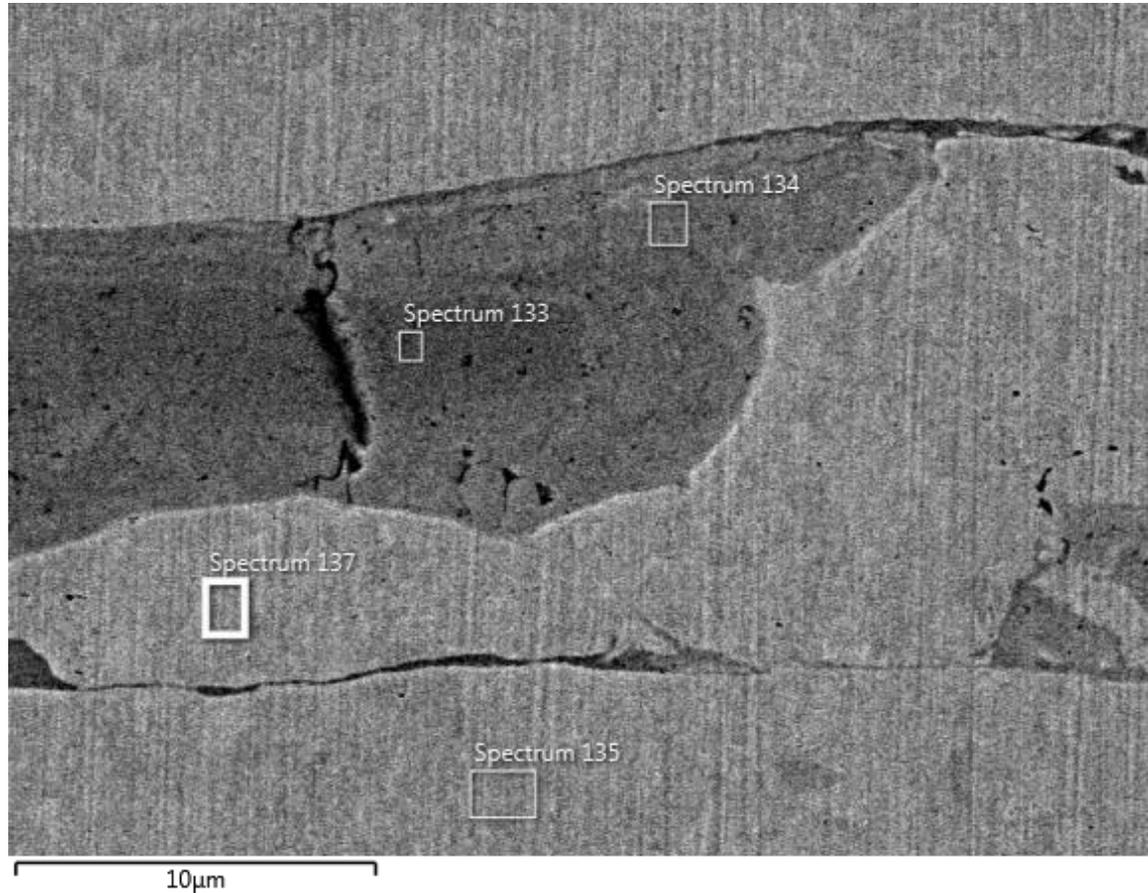
- Velocidade de impacto do ensaio AA/N/SS-A30



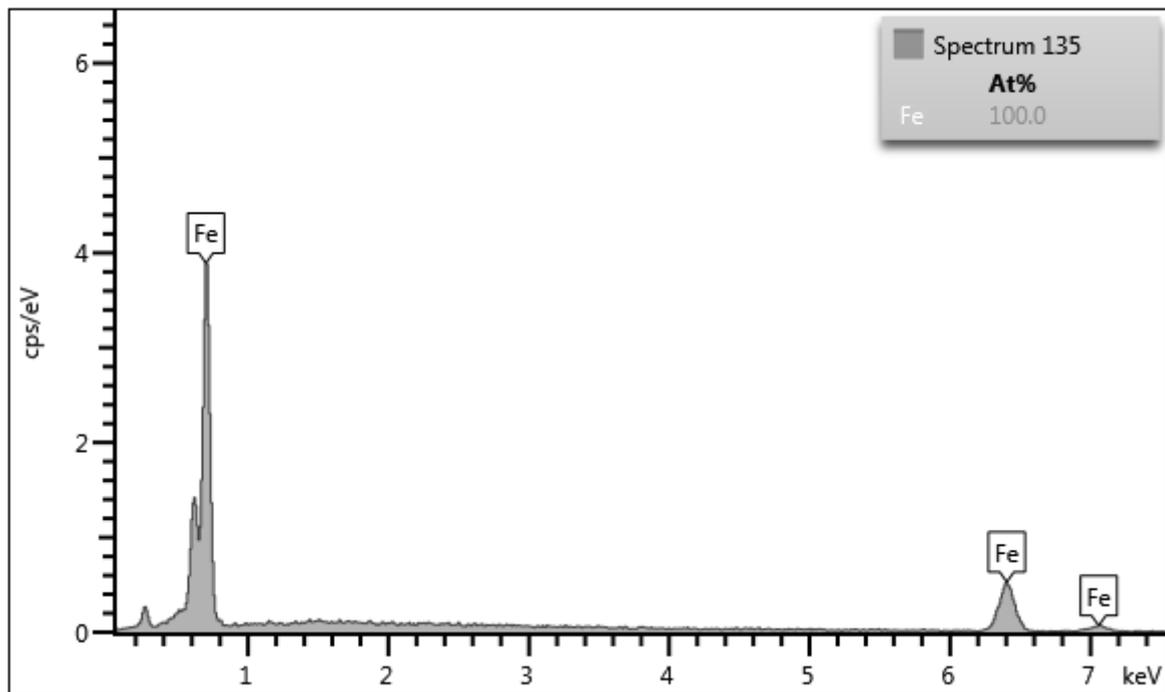
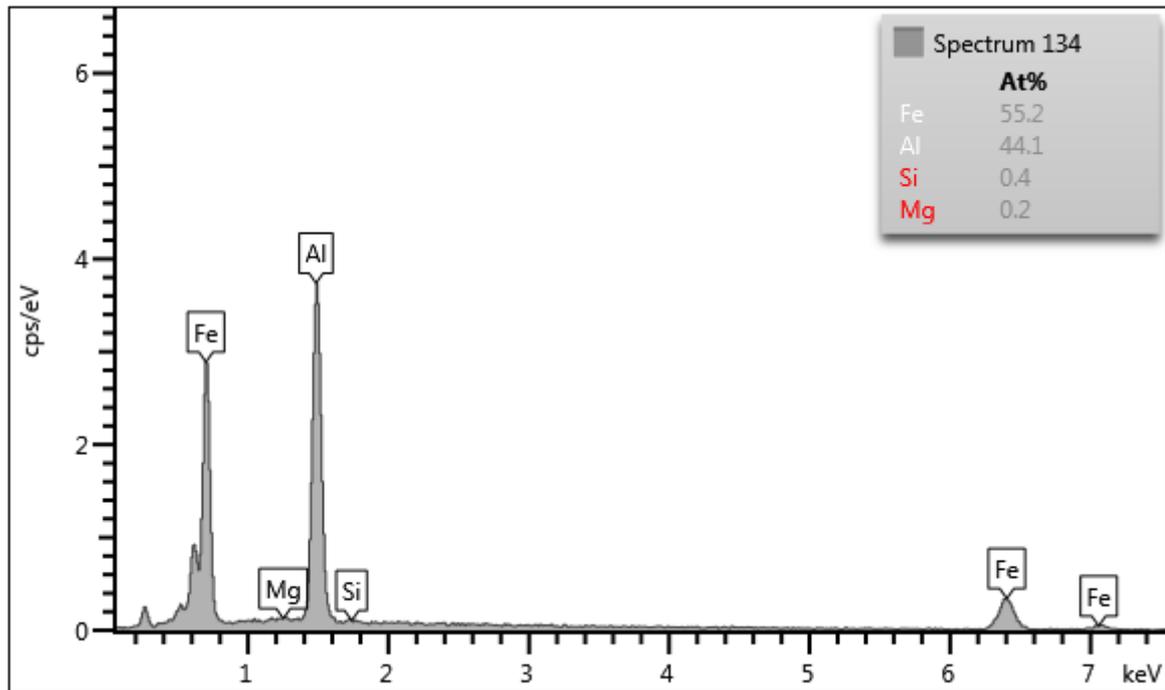


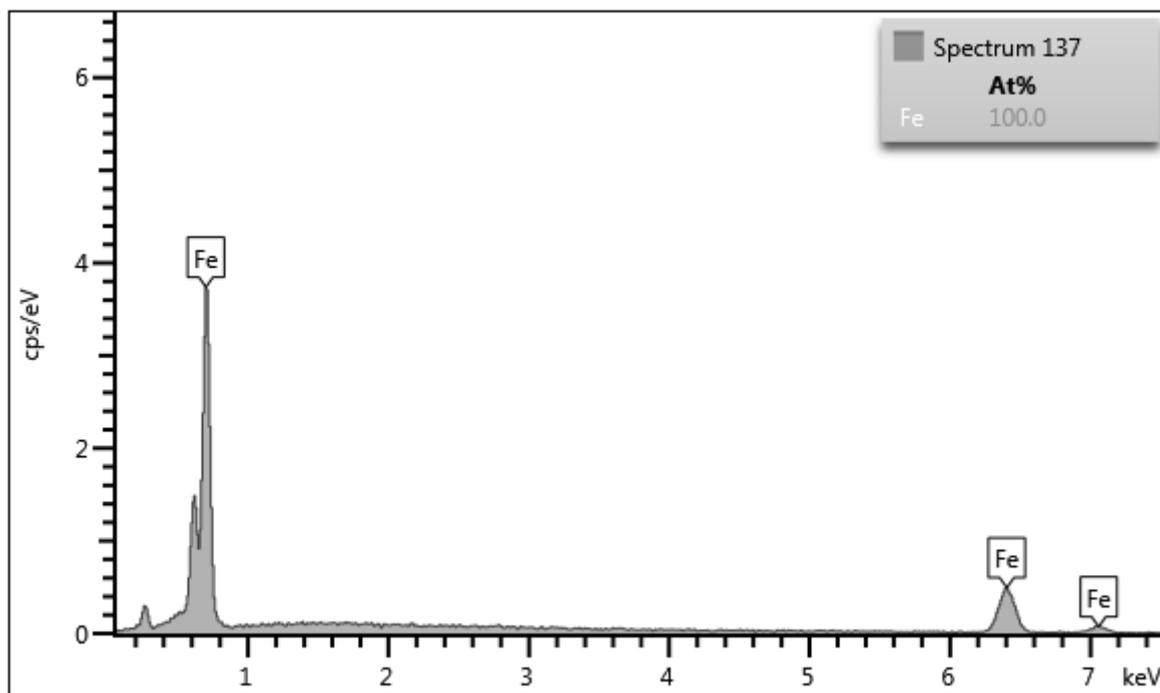
## APÊNDICE H

- Espectros da região intermetálica alumínio/aço carbono



Soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável: otimização do material da placa intermédia

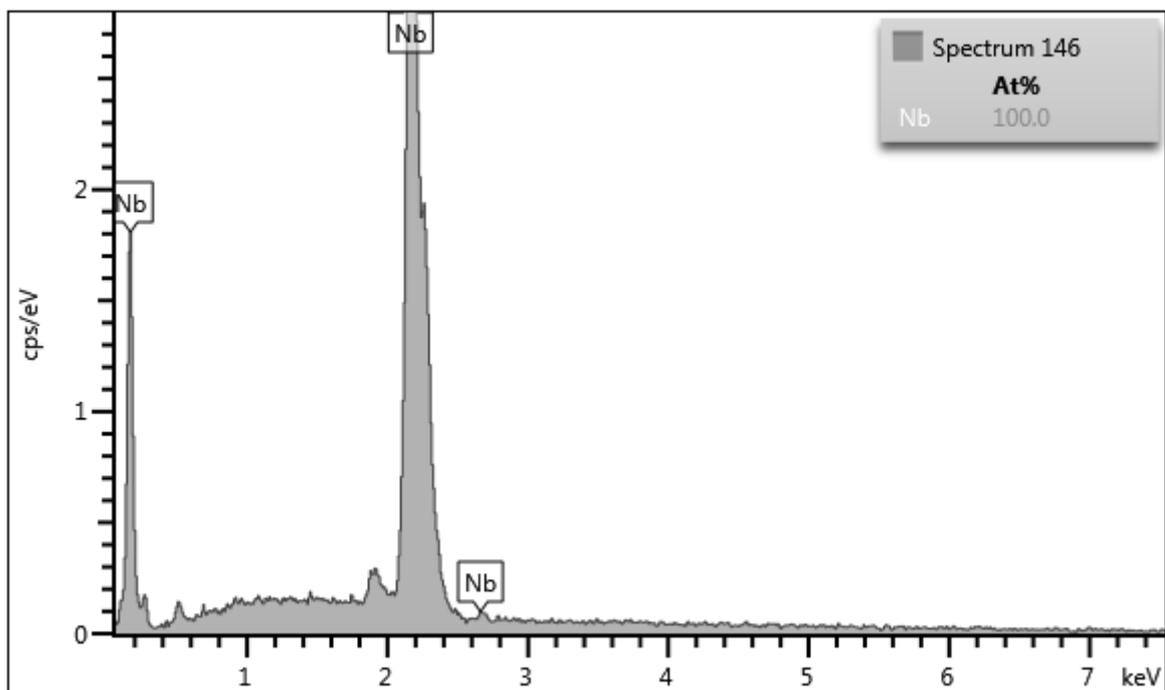
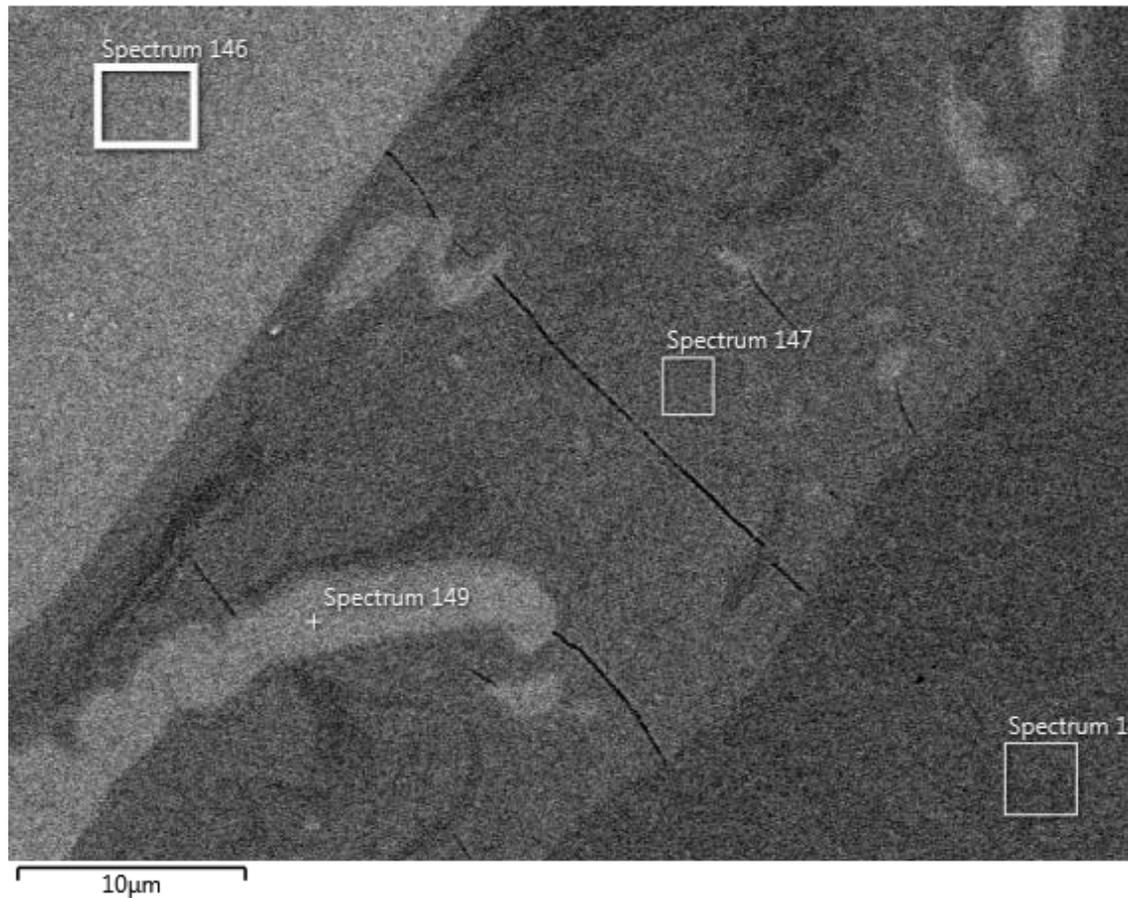






## APÊNDICE I

- Espectros da região intermetálica nióbio/aço inoxidável



Soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável: otimização do material da placa intermédia

