

Luís Manuel Dias Machado

Efeito da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável

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

Julho, 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Efeito da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável

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

Autor

Luís Manuel Dias Machado

Orientadores

Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro

Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal

Júri

Presidente Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor Auxiliar Da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro
Professor Associado com Agregação da Universidade de
Coimbra

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

Coimbra, julho, 2018

“Study while others are sleeping; work while others are loafing; prepare while others are wishing”

William Arthur Ward

Agradecimentos

Na realização da presente dissertação contei com o apoio de múltiplas pessoas e instituições as quais estou profundamente grato. Correndo o risco de não fazer referência a todos os contributos, deixo expresso os meus agradecimentos:

Ao Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro, pela sua orientação, pelo apoio prestado em todas as ocasiões e por todos ensinamentos transmitidos.

Ao Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal, pela sua disponibilidade, pela sua constante boa disposição, pelas opiniões e criticas fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes pela sua disponibilidade na realização dos ensaios experimentais e pelos ensinamentos transmitidos relativamente a componente eletrónica e montagem dos ensaios.

Ao Gustavo Senna agradeço toda a ajuda prestada e pelas sugestões sugeridas ao longo da realização deste trabalho.

Aos elementos da sala de investigação pela forma como me acolheram no grupo e pelo auxílio prestado nas mais variadas situações.

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

Aos meus pais e familiares por todo o apoio que me forneceram ao longo destes anos e que sempre me apoiaram em todas as decisões tomadas.

Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi o estudo da influência da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável. De modo a analisar o efeito da inclusão da placa intermédia, foram estudadas as alterações a nível macroscópico, microestrutural, químico e mecânico.

Neste trabalho foram realizados cinco ensaios, sendo feito um ensaio inicial em que a placa de aço inoxidável foi projetada sobre a placa de alumínio. Nos restantes ensaios foi realizada a projeção no sentido inverso, sendo usada uma placa intermédia em metade dos ensaios realizados, com projeção de alumínio sobre aço inoxidável. A configuração utilizada na realização dos ensaios descritos foi a paralela totalmente sobreposta, na qual a distância a que as placas se encontram inicialmente é de 1,5 vezes a espessura da placa a projetar.

Os ensaios realizados sem placa intermédia não produziram ligação de qualidade, sendo que apenas nos ensaios em que foi inserida a placa intermédia é que ocorreu ligação dos materiais. Em todos os ensaios realizados foi possível observar a formação de compostos intermetálicos na interface de soldadura, os quais são de maior dureza e conduzem ao aumento da fragilidade da ligação. A dureza dos materiais a unir aumentou com a realização dos ensaios, de forma mais perceptível no aço inoxidável, não sendo observável grande diferença na dureza das ligas de alumínio. Os ensaios de tração/corte realizados sobre soldaduras com placa intermédia têm elevada resistência, havendo principalmente rotura ao longo da placa intermédia no caso da ligação realizada com ANFO. No ensaio realizado com *primer*, a soldadura apresentou resistência mecânica mais baixa.

Palavras-chave: Rácio de explosivo, Velocidade de detonação, Ângulo de colisão, Compostos intermetálicos, Janela de soldabilidade, Interface da soldadura.

Abstract

The main objective of this work was the study of the influence of the intermediate plate in the explosive welding of an aluminium alloy to a stainless steel. To analyse the effect of the inclusion of the intermediate plate, the changes at macroscopic, microstructural, chemical and mechanical level were studied.

In this work five tests were carried out, and an initial test was carried out in which the stainless steel plate was designed on the aluminium plate. In the remaining tests, the projection was performed in the reverse direction, using an intermediate plate in half of the tests carried out, with aluminium projection on stainless steel. The configuration used in performing the tests described was the fully overlapping parallel, in which the distance at which the plates initially meet is 1.5 times the thickness of the plate to be designed.

The assays performed without the intermediate plate did not obtain bonding, and only in the tests in which the intermediate plate was inserted did the bonding of the materials occur. In all the tests, it was possible to observe the formation of intermetallic compounds at the welding interface, which are harder and lead to increased brittleness of the bond. The hardness of the materials to be bonded increased with the performance of the tests, more noticeably in the stainless steel, not being observable a great difference in the hardness of the aluminium alloys. The tensile tests performed on welds with intermediate plate have high strength, with mainly breaking along the intermediate plate in the case of connection with ANFO. In the test carried with primer, the weld presented lower mechanical resistance.

Keywords Explosive ratio, Detonation velocity, Collision angle, Intermetallic compound, Weldability window, Weld interface

Índice

Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas.....	xvii
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. Aplicação do processo	5
2.2.3. Configurações alternativas	6
2.2.4. Caraterísticas da interface	7
2.2.5. Mecanismos de formação de ondas.....	7
2.3. Parâmetros do processo	11
2.3.1. Seleção do explosivo	12
2.3.2. Rácio de explosivo	12
2.3.3. Distância entre placas.....	13
2.4. Janela de Soldabilidade	14
2.4.1. Limite esquerdo	15
2.4.2. Limite inferior	16
2.4.3. Limite superior	17
2.4.4. Limite direito	17
2.5. Soldadura por explosão entre o alumínio e o aço inoxidável com uso de placa intermédia.....	18
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
3.1.2. Equipamentos utilizados	24
3.2. Nomenclatura dos Ensaios.....	24
3.3. Montagem experimental	25
3.4. Medição da velocidade de detonação.....	26
3.5. Cálculo da velocidade de impacto.....	28

3.5.1.	Estimativa da velocidade de impacto	29
3.6.	Parâmetros utilizados	31
3.7.	Ensaio metalográfico.....	31
3.7.1.	Preparação das amostras.....	31
3.7.2.	Ataque químico	32
3.7.3.	Análise química SEM/EDS.....	33
3.8.	Ensaio mecânico	33
3.8.1.	Microdureza.....	33
3.8.2.	Ensaio de tração ao corte	33
4.	Resultados e discussão	35
4.1.	Análise dos materiais base.....	35
4.2.	Enquadramento dos ensaios e construção das janelas de soldabilidade.....	36
4.2.1.	Velocidade de Detonação.....	36
4.2.2.	Velocidade de Impacto.....	36
4.2.3.	Ângulo de colisão	37
4.2.4.	Janela de soldabilidade	38
4.3.	Análise macroscópica	40
4.3.1.	SS/AA-EE20	40
4.3.2.	AA/SS-PE15	40
4.3.3.	AA/SS-A20.....	41
4.3.4.	AA/AA/SS-A25.....	42
4.3.5.	AA/AA/SS-PE15	42
4.4.	Análise das interfaces	43
4.4.1.	SS/AA-EE20	43
4.4.2.	AA/SS-PE15	44
4.4.3.	AA/SS-A20.....	45
4.4.4.	AA/AA/SS-A25.....	46
4.4.5.	AA/AA/SS-PE15	48
4.4.6.	Discussão de resultados	49
4.5.	Perfis de microdureza.....	50
4.5.1.	Configuração SS/AA.....	50
4.5.2.	Configuração AA/SS.....	51
4.5.3.	Configuração AA/AA/SS.....	53
4.5.4.	Discussão de resultados	54
4.6.	Ensaio de tração / corte.....	55
5.	Conclusões	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
	APÊNDICE A	67
	APÊNDICE B.....	69
	APÊNDICE C.....	71

APÊNDICE D.....	73
APÊNDICE E.....	75
APÊNDICE F.....	77
APÊNDICE G.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Montagem em configuração paralela do processo de soldadura por explosão. Adaptada de Han et al. (2003).	4
Figura 2.2. Configuração inclinada. Adaptada de Blazynski (1983).	6
Figura 2.3. Configuração cilíndrica: a) Explosivo exterior. Adaptada de Mendes et al. (2013); b) Explosivo interior. Adaptada de Sun et al. (2011).	7
Figura 2.4. Diferentes tipos de interface numa soldadura Niquel-Niquel, com variação da velocidade de detonação: a) $Vd=1365$ m/s; b) $Vd=1790$ m/s; c) $Vd=2800$ m/s. Adaptada de Cowan et al. (1971).	7
Figura 2.5. Mecanismo de indentação do jato: a) Deformação proveniente da penetração do jato; b) Efeito gerado pela velocidade horizontal da base. Adaptada de Abrahamson (1961).	8
Figura 2.6. Mecanismo de formação de onda. Adaptada de Bahrani et al. (1967).	9
Figura 2.7. Mecanismo de fluxo instável: a) interface de soldadura Ti-SS (Manikandan et al. 2008); b) Instabilidade de Kelvin-Helmholz num escoamento de água (Carton 2004).	9
Figura 2.8. Mecanismo de formação de vórtices: a) Soldadura CU-SS; b) Vortices de von Kármán. Adaptada de Carton (2004).	10
Figura 2.9. Mecanismo de rarefação da onda. Adaptada de Carton (2004).	11
Figura 2.10. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão no momento da detonação. Adaptada de Hokamoto et al. (1993).	11
Figura 2.11. Influencia da variação do rácio de explosivo em soldaduras de Ti-SS: a) $R=1.2$; b) $R=1.5$; c) $R=2.0$; d) $R=2.5$; e) $R=3.0$. Adaptada de Kahraman et al. (2005).	13
Figura 2.12. Influência da variação da STD na ligação Cu-SS. Adaptada de Durgutlu et al. (2005).	14
Figura 2.13. Janela de soldabilidade e seus limites representativos. Adaptada de Blazynski (1983).	15
Figura 2.14. Interface das soldaduras para a placa intermédia de: a) 0,2 mm; b) 0,5 mm; c) 1,0 mm; d) 2,0 mm. Adaptada de Han et al. (2003).	19
Figura 2.15. Metalografia longitudinal da interface. Adaptada de Aceves et al. (2015). ..	20

Figura 2.16. Diagrama de fases do sistema ferro-alumínio. Adaptada de Kattner & Burton (1992).	21
Figura 3.1. a) Conjunto montado; b) Representação da montagem experimental	25
Figura 3.2. a) Osciloscópio digital; b) Cronómetros de precisão.	26
Figura 3.3. a) Sonda individual; b) Esquema elétrico da medição da velocidade de detonação.....	27
Figura 3.4. Sondas utilizadas para medição da velocidade de detonação com os cronómetros.	28
Figura 3.5. Representação esquemática da configuração. Adaptada de Manikandan et al. (2008).	29
Figura 4.1. Microestrutura dos materiais base: a) AISI 304; b) AA6082-T6.....	35
Figura 4.2. Calibração da velocidade de impacto no ensaio SS/AA-EE20.....	37
Figura 4.3. Janela de soldabilidade para os ensaios de SS/AA	38
Figura 4.4. Janela de soldabilidade para os ensaios de AA/SS	39
Figura 4.5. Janelas de soldabilidade para os ensaios de AA/AA/SS.....	39
Figura 4.6. Ensaio SS/AA-EE20: a) Posição de impacto; b) Vista das superfícies de impacto, placa estacionária na parte superior e placa estacionária na parte inferior.	40
Figura 4.7. Ensaio AA/SS-PE15 na posição de impacto.....	41
Figura 4.8. Ensaio AA/SS-A20 na posição de impacto.....	42
Figura 4.9. Ensaio AA/AA/SS-A25 na posição de impacto.....	42
Figura 4.10. Ensaio AA/AA/SS-PE15 na posição de impacto.....	43
Figura 4.11. Microestrutura das amostras dos ensaios SS/AA-EE20: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.	43
Figura 4.12. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/SS-PE15: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.....	44
Figura 4.13. Análise EDS da amostra AA/SS-PE15-VL: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.....	45
Figura 4.14. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/SS-A20: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.....	46
Figura 4.15. Análise EDS da amostra AA/SS-A20-VL: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.....	46
Figura 4.16. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/AA/SS-A25: a) Interface AA6082-T6 e AA1050; b) Interface AA1050 e AISI 304.....	47

Figura 4.17. Análise EDS da amostra AA/AA/SS-A25-L: a) Macrografia da interface; b) Espectro obtido.	47
Figura 4.18. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/AA/SS-PE15: a) Interface AA6082-T6 e AA1050; b) Interface AA1050 e AISI 304.	48
Figura 4.19. Análise EDS da amostra AA/AA/SS-PE15-L: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.	49
Figura 4.20. Amplitude das ondas formadas na interface AA6082-T6 e AA1050 em comparação com o rácio de explosivo utilizado.	50
Figura 4.21. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio com a configuração SS/AA	50
Figura 4.22. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/SS-PE15.	51
Figura 4.23. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/SS-A20.	52
Figura 4.24. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/AA/SS-A25.	53
Figura 4.25. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/AA/SS-PE15.	54
Figura 4.26. Curva tensão-alongamento para os ensaios de tração ao corte realizados.....	56
Figura 4.27. Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/AA/SS-A25: a) T1; b) T2; c) T3.....	57
Figura 4.28. Análise EDS dos provetes de tração ao corte do ensaio AA/AA/SS-A25: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.	57
Figura 4.29. Análise SEM à superfície de fratura do provete AA/AA/SS-A25.....	58
Figura 4.30. Análise macrográfica dos provetes do ensaio AA/AA/SS-PE15 com o tipo de rotura indicados: a) T1; b) T2; c) T3.....	58
Figura 4.31. Análise SEM à superfície de fratura do provete AA/AA/SS-PE15: a) Zona dos alvéolos; b) <i>Dimples</i> de corte; c) Zona de fratura frágil.	59
Figura 4.32. Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/AA/SS-PE15: a) T1; b) T2; c) T3.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Principais compostos intermetálicos do sistema Fe-Al. Adaptada de Kattner & Burton (1992) e de Reza et al. (2017)	22
Tabela 3.1 Composição química nominal do aço AISI 304 (% peso).....	23
Tabela 3.2 Composição química nominal da liga AA6082-T6 e AA1050 (% peso).	23
Tabela 3.3 Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais utilizados. Adaptada de A.S.M: Handbook (1990).	24
Tabela 3.4 Parâmetros utilizados nos ensaios realizados	31
Tabela 4.1. Medições das velocidades de detonação	36
Tabela 4.2. Valores da velocidade de impacto para os ensaios sem placa intermédia.....	37
Tabela 4.3. Valores da velocidade de impacto para os ensaios com placa intermédia	37
Tabela 4.4. Valores obtidos para o ângulo de colisão dos ensaios sem placa intermédia	37
Tabela 4.5. Valores obtidos para o ângulo de colisão dos ensaios com placa intermédia	38
Tabela 4.6 Influência da velocidade de detonação e do rácio de explosivo na interface	49
Tabela 4.7 Medidas de microdureza relativos aos ensaios sem placa intermédia	54
Tabela 4.8 Medidas de microdureza relativos a ensaios com placa intermédia	55
Tabela 4.9 Resultados dos ensaios de tração.....	56

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

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

α – Ângulo de inclinação na configuração inclinada

β – Ângulo de colisão

β_1 – Ângulo de colisão da placa voadora

β_2 – Ângulo de colisão do conjunto das placas voadora e estacionária

γ – Ângulo de colisão na configuração inclinada

δ – Espessura de explosivo

ρ_i – Densidade da placa intermédia

ρ_e – Densidade da placa estacionária

ρ_v – Densidade da placa voadora

τ – Constante de tempo

A – ANFO

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

AA/SS – Projeção de alumínio em 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

H_V – Dureza Vickers

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

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

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

K – Condutibilidade térmica

$m_{voadora}$ – Massa da placa voadora

$m_{intermédia}$ – Massa da placa intermédia

N – Constante empírica

PE – *Primer* com EPS

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

R – Rácio de explosivo

Re_T – *Reynolds* de transição

SS/AA – Projeção de aço inoxidável em alumínio

t – Instante de tempo

t_0 – Instante de tempo inicial

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

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

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 cubico de Faces Centradas

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 – microsferas ocas poliméricas

PETN – *Pentaerythritol tetranitrate*

RDX – *Research Department X* (ciclotrimetilenotrinitramina)

SEM – Scanning Electron Microscope

SS – *Stainless Steel*

STD – Distância entre placas (*stand of distance*)

TNT – Trinitrotolueno

WIF – *Wave interface factor*

1. INTRODUÇÃO

A união de materiais dissimilares tem crescido significativamente devido às vantagens que este processo gera na indústria, principalmente na soldadura de material diferentes. De facto, deixa de ser necessária a ligação aparafusada, rebitada ou colada em algumas aplicações, que são os principais métodos para unir materiais dissimilares utilizado na atualidade.

A soldadura no estado solido é um método de união de materiais dissimilares que permite obter ligação de componentes sem perda das propriedades de ambos os materiais, possibilitando a união materiais com ponto de fusão muito distintos.

A utilização da placa intermédia surgiu com os objetivos principais de possibilitar a união de materiais que não era possível unir diretamente, reduzir a energia cinética a dissipar durante o impacto e deste modo reduzir os compostos intermetálicos formados na interface.

Os materiais base utilizados neste trabalho, alumínio e aço inoxidável, são dois materiais com propriedades físicas e mecânicas muito distintas, mas que se encontram conjugados várias vezes nos processos do dia-a-dia, nomeadamente ao nível da indústria automóvel, naval, aeronáutica, química, entre outras. Com a união dos dois materiais considerados, é possível associar a baixa densidade do alumínio com a elevada resistência mecânica e à corrosão do aço inoxidável.

O método usado no presente trabalho para a união dos dois materiais é detentor de vários parâmetros a ter em consideração que influenciam diretamente a qualidade e o comportamento de cada união. Cada um dos parâmetros encontra-se relacionado com os vários componentes do ensaio, em que o explosivo é um dos componentes com maior influência na soldadura por explosão.

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. Após este capítulo, é exposto no segundo capítulo o estado de arte que consiste na apresentação desta tecnologia com a explicação dos vários parâmetros utilizados, sendo os aspetos de maior importância a interface de soldadura e a janela de soldabilidade. Neste capítulo, será ainda abordada a ligação entre os dois materiais com a utilização da placa intermédia. No terceiro capítulo

será explicado o procedimento experimental, no qual serão indicadas as propriedades físicas dos materiais a utilizar, os equipamentos utilizados, o modo de realização dos ensaios experimentais, assim como o método utilizado para fazer a análise metalográfica e a mecânica. No quarto capítulo, será realizada simultaneamente a apresentação e discussão de resultados obtidos. Inicialmente serão apresentados os materiais base, com as respetivas análises metalográfica e mecânica, de seguida será realizado o enquadramento da janela de soldabilidade para os materiais e configurações utilizadas, assim como o enquadramento dos vários ensaios nas respetivas janelas. Neste capítulo, será, ainda, abordada a análise macroscópica, metalográfica e mecânica para os vários ensaios, assim como a respetiva discussão de resultados. No quinto e último capítulo, serão indicadas as conclusões atingidas com a realização deste trabalho, assim como a sugestão de propostas para trabalhos a realizar futuramente.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Enquadramento histórico

A soldadura por explosão em oposição a outros métodos de soldadura, não surgiu por desenvolvimento, mas sim pela observação, tendo sido notado nos testes balísticos nos quais fragmentos provenientes de projeteis acelerados ficavam unidos as superfícies metálicas (Blazynski, 1983).

O primeiro relatório publicado sobre a soldadura por explosão surgiu no ano de 1944 e foi escrito por L. R. Carl, onde observou a junção de duas placas de latão que teriam sido usadas para posicionar a carga explosiva (Carpender & Wittman, 1975).

Philipchuk & Bois (1962) obtiveram a primeira patente para o processo de soldadura por explosão, na qual indicaram que este era um processo que permitia soldar duas superfícies de metal recorrendo a cargas explosivas como fonte energética.

A introdução da placa intermédia surgiu com vários propósitos, sendo os principais a redução da energia de colisão na interface, com diminuição da região fundida na zona da interface e a formação de compostos intermetálicos, ou seja, a utilização de uma placa intermédia que não promova a formação de compostos intermetálicos com os restantes materiais a unir.

O desenvolvimento da utilização da placa intermédia nos últimos anos tornou-se um fator de elevada importância de modo a ser possível obter soldaduras heterogéneas de maior qualidade.

2.2. Princípio do processo

A soldadura por explosão consiste na ligação no estado sólido, em que a união de dois ou mais materiais é efetuada através de impacto a elevada velocidade, proveniente da detonação controlada de um explosivo. Este método é de elevada importância para a realização de soldaduras de materiais com propriedades distintas, especialmente para combinações de materiais com diferentes pontos de fusão.

Como se trata de um processo quase instantâneo, considera-se que é realizado a temperatura ambiente, sem que ocorra fusão dos materiais, sendo possível de ocorrer aumentos de temperaturas localizados onde exista elevada energia de colisão.

A montagem do processo inclui a placa estacionária, que é apoiada numa base, a placa intermédia, de espessura reduzida que é colocada entre a placa estacionária e a voadora, que será colocada na parte superior. Estes três componentes são separados pelos espaçadores, que permitem manter uma distância inicial entre as várias placas, designada por *Stand-off distance* (STD). Por fim é aplicado o explosivo, que é colocado sobre a placa voadora.

O explosivo é colocado uniformemente sobre a placa voadora, sendo delimitado por uma caixa de suporte. Ao ser detonado, gera uma força sobre a placa voadora, provocando assim o seu movimento. A placa voadora é acelerada, através da distância entre as placas, até à colisão com a placa intermédia. Em seguida, este conjunto de placas (voadora e intermedia) vai colidir com a placa estacionária. Na Figura 2.1. está representada a configuração mais corrente para este processo. Note-se que, na maioria dos casos não existe placa intermédia, decorrendo o processo só com a placa voadora e estacionária. A geometria com placa intermédia é usada nos casos em que é difícil reduzir ou controlar a quantidade de compostos intermetálicos frágeis na interface.



Figura 2.1. Montagem em configuração paralela do processo de soldadura por explosão. Adaptada de Han et al. (2003).

Existe um fenómeno que é de carácter essencial para a ocorrência da união das placas, que é a formação do jato. Este promove a remoção de impurezas das superfícies a unir e posteriormente as ligações interatómicas, que são geradas devido as pressões geradas durante a colisão. Para a explicação do fenómeno de ligação dos materiais foram formuladas várias teorias, sendo que a mais aceite pela comunidade é que o fenómeno da formação de jato que se segue à colisão oblíqua de placas a alta velocidade é fundamental na soldadura por explosão (Cowan & Holtzman 1963).

2.2.1. Vantagens e desvantagens

Segundo Findik (2011), Blazynski (1983) e Carpenter & Wittman (1975), as principais vantagens do processo de soldadura por explosão são:

- Possibilidade de unir materiais com propriedades físicas muito dissimilares;
- Processo de baixo investimento de capital;
- Propriedades do material de base são mantidas;
- Realiza soldadura de grandes áreas em curto espaço de tempo;
- Permite a soldadura fora de ambiente controlado (sem necessidade de utilização de câmara protetora);
- Possibilidade de soldadura por controlo remoto;
- Simplicidade do processo;
- Possibilidade de soldar varias espessuras de placas;

As desvantagens apontadas por Findik (2011) são:

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

2.2.2. Aplicação do processo

Com base em Blazynski (1983) e Findik (2011), as principais aplicações para este processo são:

- Junção de tubos;
- Fabrico de permutadores de calor;
- Uniões remotas em ambientes hostis;
- Construção de reservatórios de pressão;
- União de materiais dissimilares;
- Fabrico de alhetas de refrigeração;
- Indústria naval;
- Indústria química;

- Indústria criogénica.

2.2.3. Configurações alternativas

Além da configuração apresentada na Figura 2.1., conhecida como configuração paralela, são também utilizados outros tipos de configurações que permitem obter soldaduras de características diferentes, em que o principal objetivo é melhorar as propriedades da soldadura e conseguir obter soldaduras com diferentes configurações.

2.2.3.1. Configuração dupla inclinada

Para este tipo de configuração (Figura 2.2), Blazynski (1983) apontou como principais vantagens a possibilidade de variar a velocidade de colisão, ângulo de colisão e a velocidade de impacto numa gama mais alargada que no caso da configuração paralela. É ainda possível utilizar explosivos cuja velocidade de detonação seja superior a velocidade do som no material a unir, sendo que estes são mais consistentes e mais fáceis de manobrar.

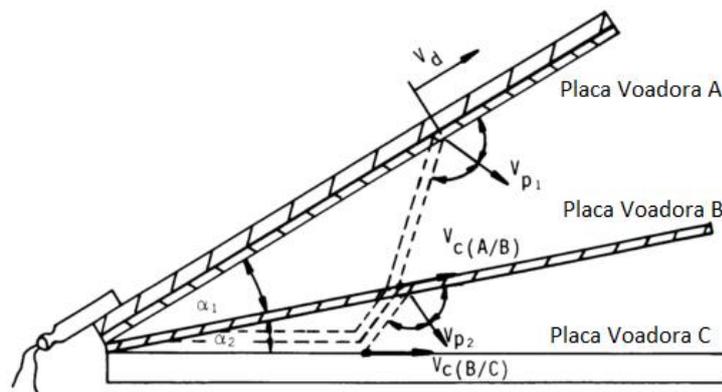


Figura 2.2. Configuração inclinada. Adaptada de Blazynski (1983).

2.2.3.2. Configuração cilíndrica

Relativamente a este tipo de configuração, o explosivo poderá ser colocado no exterior do conjunto e o tubo exterior é comprimido até a união deste com o tubo interior (Figura 2.3a), assim como pode ser colocado no interior do tubo interior, e quando ocorre a detonação, este será dilatado até a colisão com o tubo exterior (Figura 2.3b).

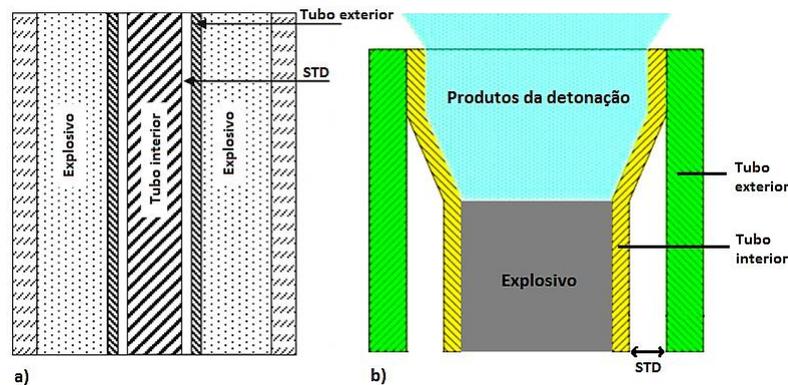


Figura 2.3. Configuração cilíndrica: a) Explosivo exterior. Adaptada de Mendes et al. (2013); b) Explosivo interior. Adaptada de Sun et al. (2011).

2.2.4. Características da interface

Na soldadura por explosão, a análise da interface é um dos aspectos mais discutidos, tendo grande influência na qualidade da união. A soldadura por explosão pode gerar essencialmente dois tipos de interface, plana (Figura 2.4a) ou ondulada (Figura 2.4b e Figura 2.4c), na qual é possível serem gerados vários tipos de onda.

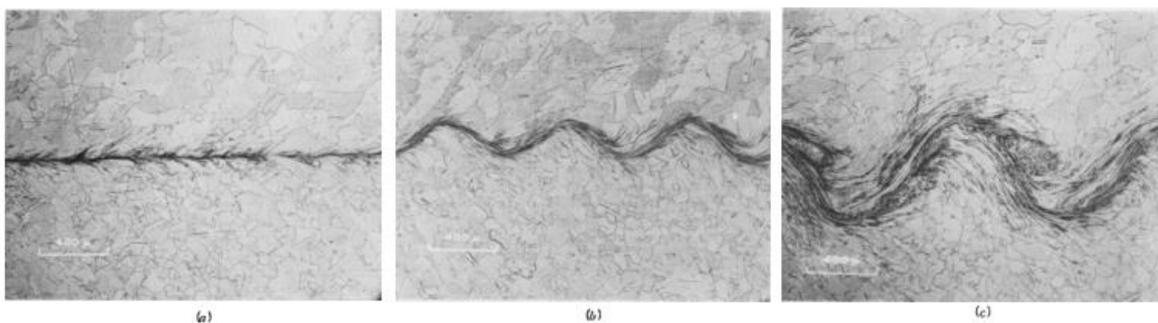


Figura 2.4. Diferentes tipos de interface numa soldadura Níquel-Níquel, com variação da velocidade de detonação: a) $V_d=1365$ m/s; b) $V_d=1790$ m/s; c) $V_d=2800$ m/s. Adaptada de Cowan et al. (1971).

Blazynski (1983) defende que a presença de ondas na interface é sinónimo de uma ligação consistente, sendo que para a interface plana também já foram observadas soldaduras com união consistente, mostrando assim que a presença de ondas não é estritamente necessária para obter uma união consistente.

2.2.5. Mecanismos de formação de ondas

O mecanismo de formação de ondas é um aspecto largamente discutido devido a extrema dificuldade em analisar o desenvolvimento do processo, pois o processo ocorre numa área muito reduzida e acontece muito rápido.

Foram elaboradas várias teorias para tentar explicar o mecanismo de formação de ondas, não existindo uma teoria consensual.

Mendes et al. (2013) referenciou como principais mecanismos de formação de onda:

- 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) definiu que o mecanismo que conduz a formação de ondas deve-se a indentação do jato, que tende a penetrar a base (Figura 2.5a), com formação uma depressão e uma saliência na frente do ponto de colisão (Figura 2.5b). Quando o jato penetrar a parte da placa base mais a esquerda, este terá de penetrar uma maior quantidade de material base de modo a manter a depressão e eventualmente produzir de um regime permanente, no qual a indentação do jato será capaz de anular o efeito de movimento do material base.

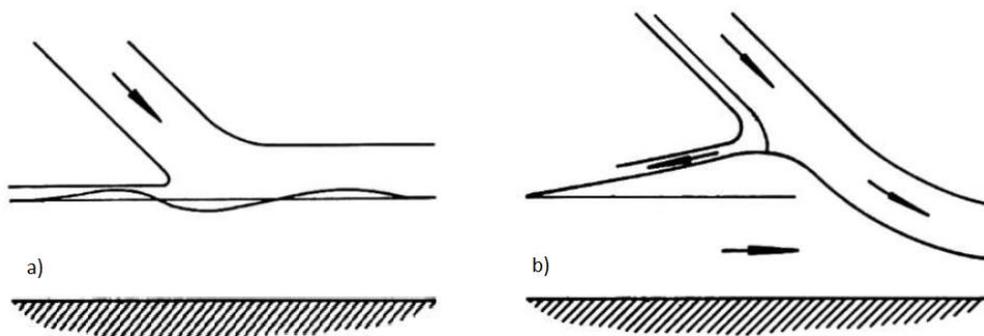


Figura 2.5. Mecanismo de indentação do jato: a) Deformação proveniente da penetração do jato; b) Efeito gerado pela velocidade horizontal da base. Adaptada de Abrahamson (1961).

Bahrani et al. (1967) analisou a teoria proposta por Abrahamson (1961) e observou que esta negligenciava o efeito da pressão no ponto de estagnação. Com base neste parâmetro, observou que a formação da indentação provinha do jato reentrante e a formação dos vórtices devia-se ao jato reentrante aprisionado entre a saliência e o jato saliente, como é possível de observar na Figura 2.6.

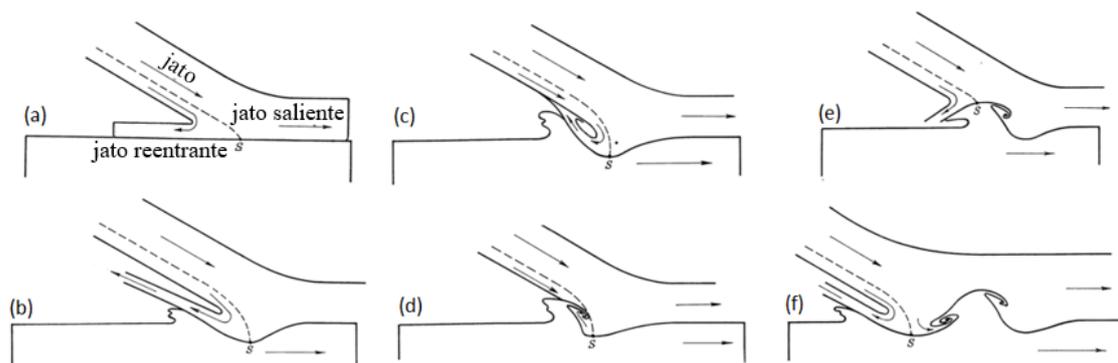


Figura 2.6. Mecanismo de formação de onda. Adaptada de Bahrani et al. (1967).

2.2.5.2. Mecanismo de fluxo instável

Este mecanismo considera o processo de formação de ondas é como um fenómeno hidrodinâmico semelhante ao que ocorre na superfície de contacto entre dois fluídos com diferentes velocidades horizontais, conhecido como instabilidade de Kelvin-Helmholz. Na Figura 2.7b está representado um escoamento de água onde se encontra representado a instabilidade de Kelvin-Helmholz, na Figura 2.7a é apresentada uma interface ondulada onde é possível de observar a semelhança com este escoamento.

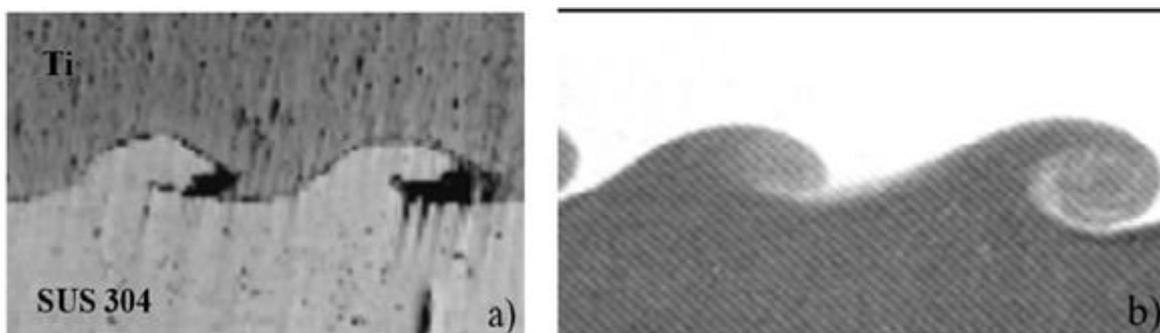


Figura 2.7. Mecanismo de fluxo instável: a) interface de soldadura Ti-SS (Manikandan et al. 2008); b) Instabilidade de Kelvin-Helmholz num escoamento de água (Carton 2004).

Hunt (1968) considerou que o jato reentrante é necessário, pois devido as elevadas pressões geradas durante o processo, a interface entre o jato reentrante e as placas comportava-se como uma interface fluida, exibindo a instabilidade de Kelvin-Helmholz. Observou também que as pressões geradas no jato saliente não eram suficientemente altas para produzir um comportamento fluido característico entre as superfícies de contacto.

Robinson (1975) defende que se a gama de tensões atingida for suficientemente elevada, será observável um regime invíscido na zona de impacto e que a interface ondulada

observável na zona de impacto deve-se à instabilidade de Kelvin-Helmholz presente na camada inferior ao ponto de impacto.

2.2.5.3. Mecanismo de formação de vórtices

Reid (1974) analisou todos os mecanismos de formação de ondas e concluiu que o melhor se aproximava dos valores experimentais obtidos até a data era o mecanismo de formação de vórtices. O mecanismo de formação de vórtices é semelhante ao proposto pela teoria de von Kármán (fenómeno observável no escoamento de um fluido viscoso em torno de um obstáculo) no qual o ponto de estagnação aparece como sendo um obstáculo, a partir do qual será gerado o vórtice no sentido de impacto (Blazynski 1983).

Na Figura 2.8a é indicada uma soldadura entre cobre e aço inoxidável, que comparando com o mecanismo de formação de vórtices de von Kármán, indicado na Figura 2.8b, observa-se semelhanças entre as duas figuras.

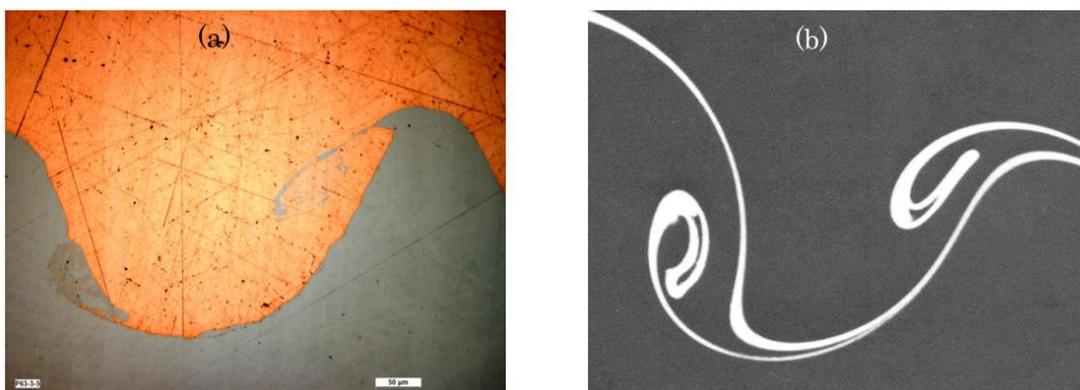


Figura 2.8. Mecanismo de formação de vórtices: a) Soldadura CU-SS; b) Vortices de von Kármán. Adaptada de Carton (2004).

2.2.5.4. Mecanismo de rarefação da onda

Blazynski (1983) mencionou o mecanismo de rarefação da onda como uma alternativa para descrever a interface ondulada, em que a interface ondulada provém da interferência das ondas de rarefação em ambas as placas (Mendes et al. 2013).

No instante de colisão das placas é originada uma onda de choque de compressão que se propagam até colidir com a superfície livre externa onde vão refletir formando as ondas refletidas. Entre as ondas de compressão e as refletidas existirá interação (Figura 2.9), resultando numa deformação periódica da interface, provocando a formação de ondas na interface. (Carton 2004).

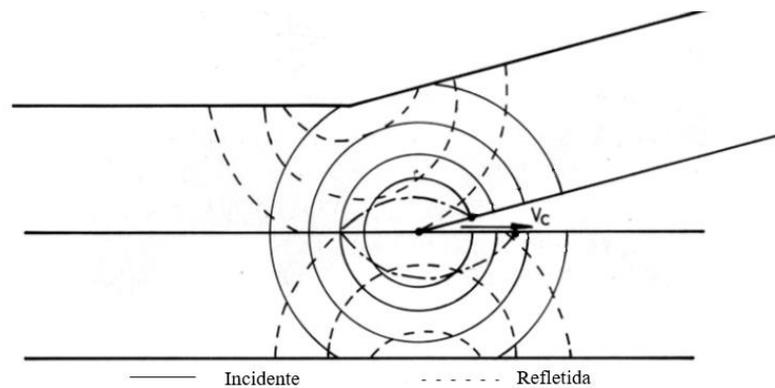


Figura 2.9. Mecanismo de rarefação da onda. Adaptada de Carton (2004).

2.3. Parâmetros do processo

Na Figura 2.10. encontra-se representado o processo de soldadura por explosão com placa intermédia, o qual, para ser realizado com sucesso é necessário analisar e otimizar os diversos parâmetros que se encontram ligados ao processo, pois após o início do processo, não é possível efetuar alterações dos vários parâmetros, nomeadamente:

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

Para controlar e variar estes parâmetros é necessário efetuar a seleção do explosivo, da distância entre placas e da geometria da configuração.

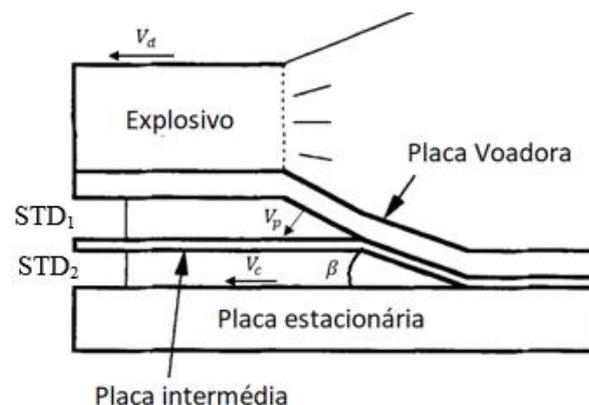


Figura 2.10. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão no momento da detonação. Adaptada de Hokamoto et al. (1993)

2.3.1. Seleção do explosivo

O primeiro fator na escolha do explosivo é a velocidade de detonação do mesmo, que geralmente deve pertencer ao intervalo entre os 1500 m/s e 3500 m/s. Esta limitação de velocidades deve-se às limitações referentes aos materiais e configuração considerada, em que a velocidade máxima a considerar não pode ser superior a velocidade de propagação do som no material. Os explosivos utilizados devem ser maleáveis ao ponto de ser facilmente espalhados numa camada uniforme e sem porosidades e serem sensíveis o suficiente para propagar a explosão à mínima espessura.

Para a realização de soldaduras por explosão, os tipos de explosivo mais correntemente usados são o *Ammonium Nitrate/Fuel Oil* (ANFO), pó à base de nitroglicerina, TNT-Nitrato de amónio e PETN- Nitrato de amónio. Estes explosivos são usados em forma de pasta, grão ou pó, de modo a facilitar a sua distribuição numa camada uniforme (Blazynski 1983).

2.3.1.1. Sensibilizantes

Os sensibilizantes são usados como indutores da explosão para alguns explosivos, como o caso da Emulsão Explosiva que possui uma sensibilidade à explosão muito baixa e uma velocidade de detonação muito elevada. De modo a reduzir a velocidade de detonação, a Emulsão Explosiva é misturada com sensibilizantes de modo a reduzir a densidade da mistura obtida, pois a velocidade de detonação varia na razão direta da densidade (Mendes et al. 2013). Portanto, o uso de sensibilizantes como as microesferas de vidro (MEOV) ou microesferas ocas poliméricas (MOP) irão reduzir a densidade do explosivo, reduzindo a velocidade de detonação (Mendes et al. 2014).

2.3.1.2. Iniciadores

Devido a baixa sensibilidade dos explosivos utilizados, é inserido um explosivo mais sensível à detonação de modo a iniciar a explosão, para os ensaios realizados, no caso em estudo foi utilizado o *Research Department X* (RDX) que é um explosivo de uso militar, com uma velocidade de detonação de aproximadamente 8750 m/s.

2.3.2. Rácio de explosivo

Quando se efetua a seleção do explosivo é necessário ter em conta a quantidade de explosivo que será utilizada. Esta quantidade, definida como rácio de explosivo, é

determinada pela razão entre a massa do explosivo (C) e a massa da placa voadora (M), como indicado na Equação (2.1)

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

A variação deste parâmetro irá influenciar diretamente a morfologia da interface, sendo que na Figura 2.11. observa-se que com o aumento do rácio de explosivo, existe um aumento da deformação da interface, levando a formação de ondas e aumento da amplitude.

É possível observar que com o aumento do rácio de explosivo existe uma passagem da interface de lisa para ondulada, sendo possível sinalizar um aumento da amplitude e comprimento da onda com o rácio de explosivo. Dependendo do tipo de materiais a unir, um aumento excessivo do rácio de explosivo pode conduzir à fusão excessiva dos materiais e formação de compostos intermetálicos Gulenc (2008).

Para obter soldaduras com boas propriedades é então necessário otimizar o rácio de explosivo, de modo a obter a energia mínima para que ocorra a ligação e evitar a fusão excessiva da interface.

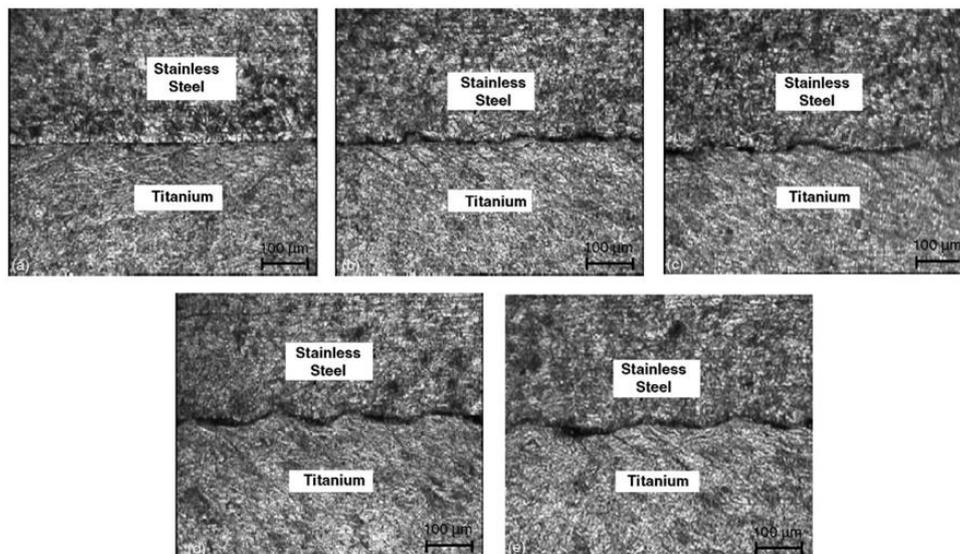


Figura 2.11. Influencia da variação do rácio de explosivo em soldaduras de Ti-SS: a) R=1.2; b) R=1.5; c) R=2.0; d) R=2.5; e) R=3.0. Adaptada de Kahraman et al. (2005)

2.3.3. Distância entre placas

A distância entre placas (STD) é um parâmetro que também influencia a morfologia da interface. Após o intervalo de tempo em que os gases da detonação expandem

sete vezes a espessura do explosivo, será atingida uma velocidade terminal, determinada pela equação de Gurney, que será explicada mais a frente (Blazynski 1983).

Para a definição da distância entre placas, a espessura da placa voadora (h) é considerada como parâmetro principal, sendo que a STD pode ser entre $0,5h$ e $4h$, sendo que para valores inferiores a $0,5h$, a distância é insuficiente, pois não será atingida a velocidade de projeção mínima. Outro parâmetro que influencia a distância entre placas é a velocidade de detonação do explosivo, sendo que para velocidades de detonação maiores, a distância entre placas necessária para que ocorra a união torna-se menor.

A Figura 2.12 representa a influência da variação da distância entre placas na ligação de cobre e aço inoxidável, sendo que para valores de STD na ordem de $0,5h$, a interface tem tendência a ser plana, enquanto que para valores maiores, a interface torna-se ondulada, sendo que com o aumento da STD, observa-se um aumento da amplitude e comprimento das ondas.

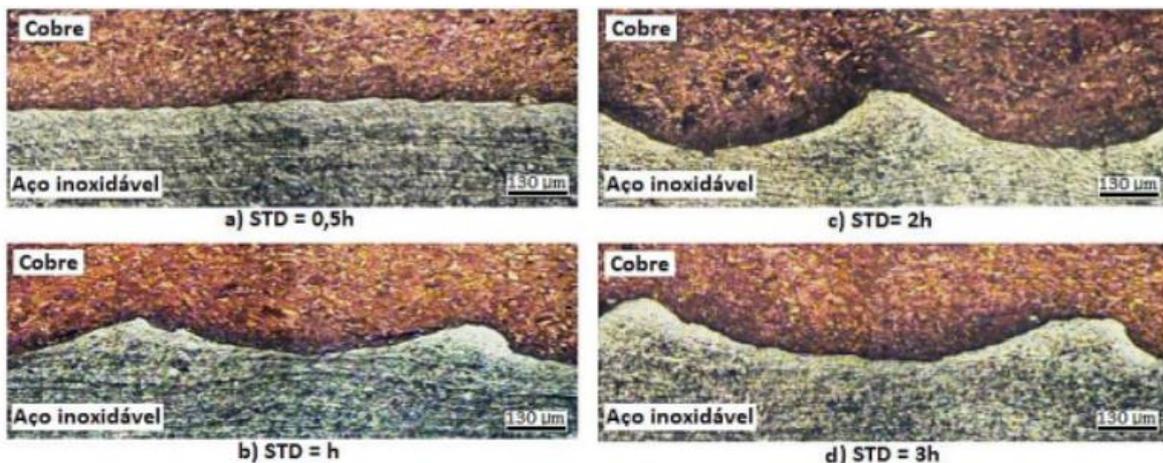


Figura 2.12. Influência da variação da STD na ligação Cu-SS. Adaptada de Durgutlu et al. (2005).

2.4. Janela de Soldabilidade

De modo a auxiliar na seleção dos vários parâmetros e a sua representação, vários autores desenvolveram ao longo dos anos, o conceito de janela de soldabilidade. Esta ferramenta permite gerar um intervalo de valores nos quais a probabilidade de obter soldaduras com qualidade é maior.

Os critérios que limitam a janela de soldabilidade mais utilizada hoje em dia relacionam a velocidade de colisão das placas V_c e o ângulo de colisão β . Na Figura 2.13. é

indicada a janela de soldabilidade com os vários limites considerados durante o seu desenvolvimento.

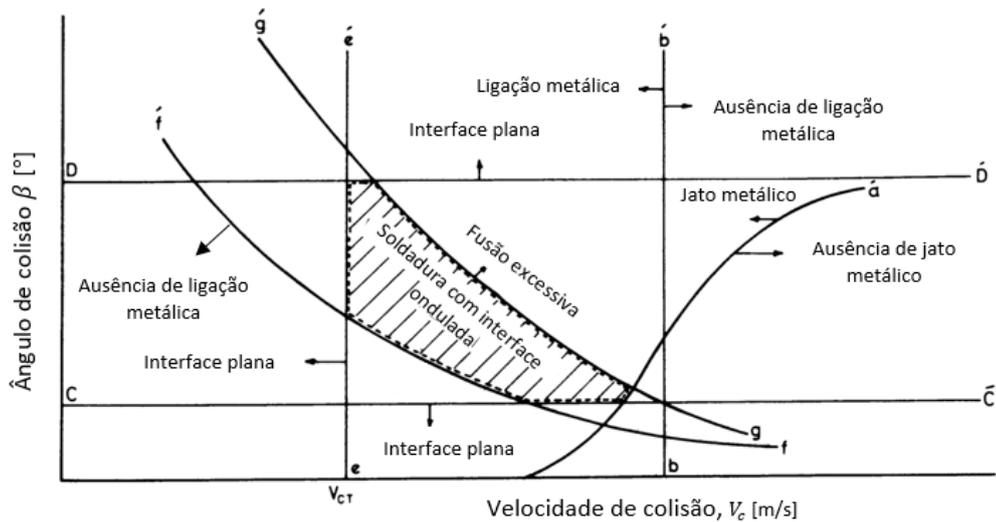


Figura 2.13. Janela de soldabilidade e seus limites representativos. Adaptada de Blazynski (1983).

O conceito de janela de soldabilidade permite a obtenção de uma região delimitada, na qual se espera que ocorra soldadura. Assim, pretende-se a obtenção de uma velocidade de colisão V_c e um ângulo de colisão β que, conjugados estejam no interior da janela. Foram desenvolvidas outras aproximações para a obtenção da janela de soldabilidade como a utilizada por Hokamoto et al. (1993) ou a apresentada por Cowan et al. (1971).

A linha aa' refere-se ao limite definido pelo ângulo crítico de formação de jato metálico, que representa os resultados obtidos por Cowan & Holtzman (1963). As linhas cc' e dd' representam os ângulos mínimo e máximo do ângulo de colisão. O ângulo mínimo é considerado como 2° - 3° e o ângulo máximo de 31° . (Blazynski 1983).

2.4.1. Limite esquerdo

O limite esquerdo da janela de soldabilidade, representado com a linha ee' na Figura 2.13, representa o tipo de interface a gerar no processo de soldadura, como indicado na figura. Para valores de velocidade de colisão (V_c) inferiores ao limite imposto é esperado que a interface seja plana, enquanto que para valores superiores, é espectável que a interface seja ondulada.

Cowan et al. (1971) definiu para este limite a Equação (2.2) na qual relaciona o número de Reynolds de transição (Re_T) e as propriedades dos materiais a unir com a velocidade de transição. O número de Reynolds de transição igual a 10,6 foi obtido através

do estudo de várias soldaduras tanto similares como dissimilares, sendo uma média dos valores obtidos. Na Equação (2.3) a velocidade de transição ($V_{c,tr}$) é representada em [m/s], a densidade (ρ_v e ρ_e) dos materiais é expressa em [kg/m³] e a sua dureza ($H_{V,placa\ voadora}$ e $H_{V,placa\ estacionária}$) em [MPa].

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

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

2.4.2. Limite inferior

O limite inferior representado com a linha ff' encontra-se relacionado com a velocidade de impacto (V_p), de modo a que a pressão de impacto no ponto de colisão exceda a tensão cedência dos materiais (Ribeiro et al. 2014).

Deribas & Zakharenko (1974) propuseram a Equação (2.4) para o limite inferior da janela de soldabilidade, em que o ângulo de colisão β expresso em [rad] encontra-se em função da dureza (H_V), correspondente ao material de maior dureza, da média das densidades dos materiais a unir, da velocidade de colisão mínima ($V_{c,min}$) e de uma constante k que toma o valor de 0,6 para superfícies limpas e 1,2 para superfícies limpas incorretamente.

$$\beta = k \sqrt{\frac{2H_V}{(\rho_v + \rho_e)V_{c,min}^2}} \quad (2.4)$$

A Equação (2.4) permite obter o ângulo de colisão mínimo em função da velocidade de colisão para que ocorra junção dos materiais. Para valores de colisão inferiores a este limite, a energia fornecida ao sistema é insuficiente para a obtenção da soldadura.

2.4.3. Limite superior

Este limite, indicado na janela de soldabilidade com a linha gg', refere-se ao limite máximo de dissipação de energia cinética, acima do qual será gerada uma camada contínua de material fundido.

A Equação (2.5) desenvolvida por Wittman (1973) onde a velocidade de impacto (V_p) encontra-se em função de várias propriedades referentes ao material a ser projetado.

Como se pode observar a Equação (2.5) não se encontra definida nos parâmetros necessários para que possa ser analisada na janela de soldabilidade, assim sendo, considerando a Equação (2.6) apresentada por Blazynski (1983) que relaciona a velocidade de colisão com os parâmetros pertencentes a janela de soldabilidade, formou-se a Equação (2.7) que é a equação que delimita o limite superior da janela de soldabilidade.

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

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

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

Nas equações acima indicadas, β é expresso em [rad], V_C em [m/s], h [m] é a espessura da placa voadora e ρ_v a densidade da placa voadora, [g/cm³]. As propriedades térmicas do material a ser projetado são a temperatura de fusão do material, T_M (°C), a velocidade de propagação do som no material, C_B [m/s], a condutibilidade térmica, K [W/(m.K)] e o calor específico a pressão constante, C_P [J/(kg.K)]. O coeficiente N trata-se de uma constante empírica, em que o seu valor é discutido por vários autores, sendo indicado como 0,11 (Rosset 2006) ou 0,062 (Ribeiro et al. 2014).

2.4.4. Limite direito

Este limite encontra-se diretamente relacionado com a formação do jato metálico e é indicado na janela de soldabilidade com a linha bb'. É referente uma aproximação

desenvolvida por Walsh et al. (1953), indicada na Equação (2.8), onde indica que a velocidade de colisão deve ser menor que a velocidade de propagação do som no material (C_B). Wiley et al. (1971) desenvolveu uma equação semelhante, onde definiu que a velocidade de colisão deve ser inferior a $1,25C_B$. Outras aproximações foram realizadas, como a indicada por Cowan and Holtzman (1963), definida pela linha aa' e já abordada anteriormente.

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

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

Blazynski (1983) aborda a soldadura por explosão entre alumínio e aço inoxidável com aplicação de placa intermédia, em que com base nos seus estudos, indica alguns componentes a utilizar como placa intermedia, podendo essa ser de alumínio puro, cobre, tântalo, titânio, níquel e prata.

Cutter (2006) indicou uma tabela de ensaios de soldadura já realizados onde indica a compatibilidade da soldadura de vários materiais sendo que os materiais mais indicados para a utilização como placa intermédia seriam a prata, o tântalo e o nióbio.

Hokamoto et al. (1993) efetuou um estudo no qual realizou a projeção de alumínio no aço fazendo variar a espessura da placa intermédia, sendo esta do mesmo material utilizado como placa estacionária. Com este trabalho observou que a introdução da placa intermédia reduz a espessura de material fundido formado na interface, pois reduz a energia dissipada na colisão.

Han et al. (2003) estudou a influência da espessura da placa intermédia de alumínio AA1050 na soldadura entre o alumínio AA5083 e o aço SS41, do qual observou que a presença da placa intermédia melhora as propriedades. Observaram que quanto maior for a espessura da placa intermédia maior é a espessura de compostos intermetálicos formados. Relativamente ao tipo de compostos intermetálicos formados observaram que eram do tipo $FeAl_3$, como indicado na Figura 2.14. É possível observar também a presença de fissuras para a placa intermédia de 2,0 mm que segundo os autores, deve-se a diferença dos coeficientes de expansão térmica dos materiais a unir.

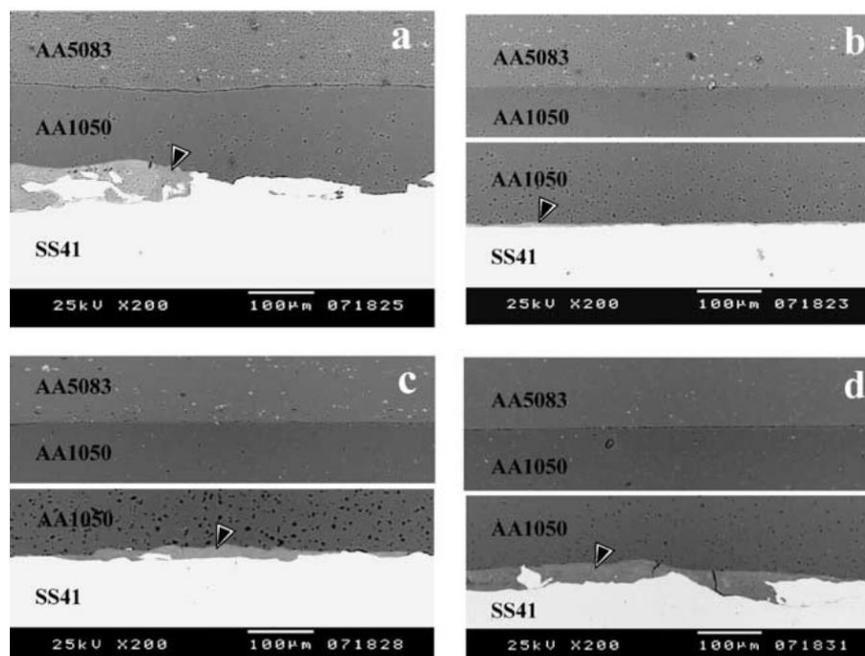


Figura 2.14. Interface das soldaduras para a placa intermédia de: a) 0,2 mm; b) 0,5 mm; c) 1,0 mm; d) 2,0 mm. Adaptada de Han et al. (2003).

Aceves et al. (2015) efetuou o seu estudo em que alterou o número de placas intermédias utilizadas, utilizando neste caso, duas placas intermédias, uma de alumínio em contacto com o alumínio e outra variável entre cobre, titânio ou tântalo em contacto com o aço inoxidável. Neste estudo foi possível observar que com a utilização de mais de uma placa intermédia é possível obter ligações em que a tensão atingida na ligação é superior a tensão de cedência do material mais fraco. Elango et al. (2017) efetuou o estudo da projeção de alumínio em aço inoxidável, com uma placa intermédia de cobre, sendo que neste caso, a configuração aplicada foi inclinada entre a placa voadora e intermédia e paralela entre a placa intermédia e a placa estacionária, tendo sido obtida uma ligação com baixa formação de intermetálicos e com boas propriedades mecânicas.

2.5.1. Morfologia da interface

A interface de soldadura depende dos materiais usados como placa voadora, intermédia e estacionária e outros dos parâmetros do processo.

Carvalho et al. (2017) desenvolveu uma expressão que relaciona as propriedades dos dois materiais de modo a prever quando a interface poderá ou não apresentar ondas. Este parâmetro denomina-se *Wave Interface Factor* (WIF) e relaciona o produto do rácio das densidades das duas placas em contacto na interface, pela razão das temperaturas de fusão

das mesmas. Quanto menor for o valor da relação maior será a probabilidade de se formar ondas na interface, o valor de transição foi definido como 4,2 abaixo do qual a interface pode ser, ondulada, em função dos parâmetros.

$$WIF = \frac{\rho_v T_{placa\ voadora}}{\rho_e T_{placa\ estacionaria}} \quad (2.9)$$

Na Figura 2.15 observa-se a interação de várias interfaces numa só soldadura. É possível observar que existem diferentes tipos de interface para as diferentes uniões, a soldadura entre o aço inoxidável e o cobre (WIF=1,14) apresenta uma interface ondulada, a união entre o cobre e o alumínio (WIF=5,44) possui uma interface plana, em relação as duas ligas de alumínio observa-se uma interface ondulada, como seria de esperar, pois WIF é próximo de 1. Como se pode observar pelos valores indicados, o valor de WIF apresenta um bom resultado na determinação da interface da soldadura.

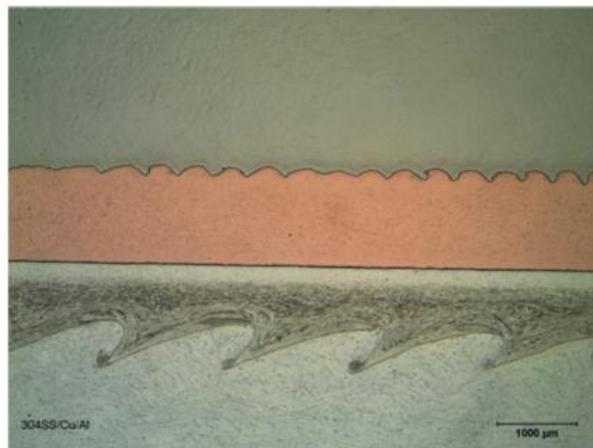


Figura 2.15. Metalografia longitudinal da interface. Adaptada de Aceves et al. (2015).

2.5.2. Formação de compostos intermetálicos

Apesar de ser considerado como um processo de ligação no estado sólido, devido à energia dissipada pelo explosivo durante a explosão há um aumento acentuado da temperatura na zona da interface de colisão, na qual poderá haver fusão dos materiais e formação de compostos intermetálicos dependendo da combinação das ligas utilizadas. Estes compostos intermetálicos são fases que contêm 2 ou mais elementos, sendo que pelo menos um deles é um metal. A percentagem de cada elemento nos compostos vai depender das condições a que estão sujeitos durante a soldadura, sendo que no caso de

materiais com ponto de fusão baixo é de esperar que possuam uma maior concentração nos compostos.

A formação de intermetálicos irá estar diretamente dependente da placa intermédia utilizada.

Para a placa de alumínio AA1050, será esperada a formação de intermetálicos na sua interface com o aço inoxidável, sendo fases de elevada dureza e baixa ductilidade do tipo Fe_xAl_y .

As principais fases que podem ser formadas na união entre o alumínio e o aço inoxidável podem ser observados no diagrama binário de fases ferro-alumínio apresentado na Figura 2.16.

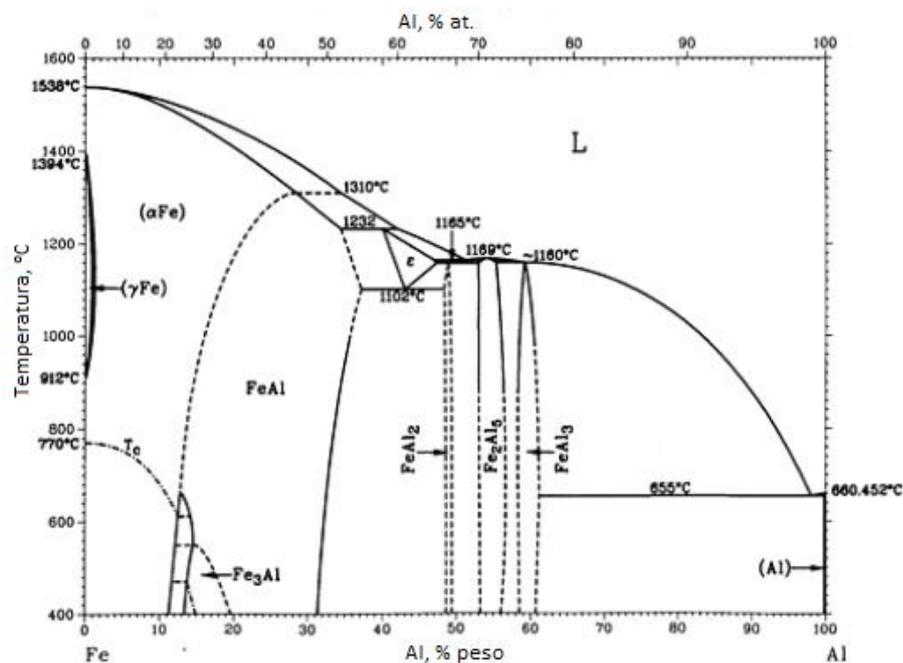


Figura 2.16. Diagrama de fases do sistema ferro-alumínio. Adaptada de Kattner & Burton (1992).

O diagrama de fases é uma ferramenta importante para a análise dos intermetálicos, mas não deve ser considerado como referência única, pois devido as variações repentinas de temperatura observadas na soldadura, é possível ocorrer variações na transformação de fase. Na Tabela 2.1 é indicado os principais intermetálicos a serem formados, bem como a sua percentagem em peso de alumínio e as suas 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 (% peso)	Dureza [HV]
Fe_3Al	13 - 20	250 - 350
FeAl	12,8 - 37	400 - 520
FeAl_2	48 - 49,4	1000 - 1500
Fe_2Al_5	53 - 57	1000 - 1100
FeAl_3	58,5 - 61,3	820 - 980

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais e equipamentos utilizados

3.1.1. Materiais utilizados

Nos ensaios realizados foram utilizados três materiais distintos, o aço inoxidável AISI 304 (Tabela 3.1), a liga de alumínio AA6082-T6 e AA1050 (Tabela 3.2). Nas tabelas seguintes estão indicadas as percentagens, em peso, dos diversos elementos de liga presentes na composição dos materiais considerados.

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

	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.

Observando a Tabela 3.1 conclui-se que o crómio é o elemento de liga com maior concentração do aço inoxidável e é a presença deste elemento que lhe atribui a sua elevada resistência à corrosão. Este aço possui uma microestrutura austenítica (cúbica de faces centradas (CFC)). Os aços inoxidáveis austeníticos possuem como principal mecanismo de endurecimento a deformação a frio.

Tabela 3.2 Composição química nominal da liga AA6082-T6 e AA1050 (% peso).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	V	Ti	Al
AA6082-T6	0,7- 1,3	0,50	0,10	0,40- 0,10	0,6- 1,2	0,25	0,20	-	0,10	Rem.
AA1050	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	0,05	0,05	0,03	99,5

Com base na Tabela 3.2 observamos que a liga AA6082-T6 têm como principais elementos de liga o silício e o magnésio. Esta liga é tratada termicamente, solubilizada, temperada e envelhecida artificialmente.

Na Tabela 3.3 estão indicadas as propriedades mecânicas e térmicas nominais dos materiais utilizados, que serão utilizadas para a obtenção da janela de soldabilidade.

Tabela 3.3 Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais utilizados. Adaptada de A.S.M: Handbook (1990).

Propriedades / Material	AISI 304	AA6082-T6	AA1050
Dureza [Hv]	188	118,5	40
Dureza [MPa]	1843,72	1162,13	392,28
Densidade [kg/m ³]	8000	2700	2705
Temperatura de fusão [°C]	1450	650	657
Calor específico [J/(kg.°C)]	500	897	900
Condutibilidade térmica [W/(m.°C)]	16,2	180	227
Velocidade Longitudinal [km/s]	5,77	6,40	6,38
Velocidade Transversal [km/s]	3,12	3,15	3,16
Velocidade propagação do som [km/s]	4,51	5,27	5,23

3.1.2. Equipamentos utilizados

Todos os equipamentos utilizados na realização das tarefas essenciais à realização deste trabalho estão apresentados na tabela indicada no APÊNDICE A.

3.2. Nomenclatura dos Ensaiois

A nomenclatura utilizada para os ensaios de soldaduras por explosão segue a configuração EWXX, na qual, “EW” representa *Explosive Welding* e “XX” representa no número sequencial do ensaio, em ordem de realização da soldadura. De acordo com a numeração interna utilizada, os ensaios referentes a este trabalho são EW36, EW37, EW39 ,EW41 e EW45

Neste trabalho cada ensaio é designado pelos materiais de acordo com o sistema utilizado, pelo explosivo aplicado e pela altura deste. Por exemplo, num ensaio A/B/C-DE, a sigla “A” é referente ao material utilizado como placa voadora, “B” representa o material utilizado como placa intermédia, “C” representa o material utilizado como base, a sigla “D” é referente ao tipo de explosivo e “E” é refente a altura de explosivo utilizado para o ensaio. Os materiais base a utilizar estão identificados como “SS” para o aço inoxidável e “AA” para a liga de alumínio AA6082-T6. Para a placa intermédia a designação será “AA” pois refere-se a liga de alumínio AA1050. A conversão entre a nomenclatura utilizada internamente e a utilizada neste trabalho encontra-se representada no APÊNDICE A.

Para identificação das amostras provenientes da análise metalográfica, é aplicado o sufixo “L” ou “T”, caso se trate de uma amostra em que se pretenda analisar a componente longitudinal ou transversal da soldadura. Para as amostras cuja união não foi observada, é indicado o tipo de placa a que pertence, sendo “V” para o caso em que se trata da placa voadora e “E” para o caso da placa estacionária.

3.3. Montagem experimental

Parte da preparação e montagem dos ensaios foi realizada no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra, o remanescente da montagem e preparação assim como a execução dos ensaios de soldadura foram realizados no Laboratório de Energética e Detónica - Associação de Apoio (LEDAP) em Condeixa, Coimbra.

Após o corte é necessário lixar as superfícies a unir, utilizando uma sequência de lixas P180 e P320, de modo a remover a camada de óxidos ou impurezas.

As caixas que contêm o explosivo e os espaçadores que irão determinar a STD são feitas em *Medium Density Fiberboard* (MDF), de acordo com as dimensões desejadas. Os desenhos das caixas encontram-se no APÊNDICE B.

Após a preparação das placas e montagem da caixa, a placa voadora é colada à caixa de suporte nas suas extremidades. Como a configuração adotada para a realização dos ensaios é a paralela sobreposta, são aplicados quatro espaçadores de iguais dimensões, um em cada vértice da superfície a unir. De seguida, caso seja utilizada a placa intermédia no ensaio, esta é colocada entre os espaçadores. Por último, une-se a placa estacionária à outra extremidade dos espaçadores, ficando com a configuração indicada na Figura 3.1a), sendo observável o perfil desta na Figura 3.1b), procedendo-se de seguida a pesagem do conjunto.

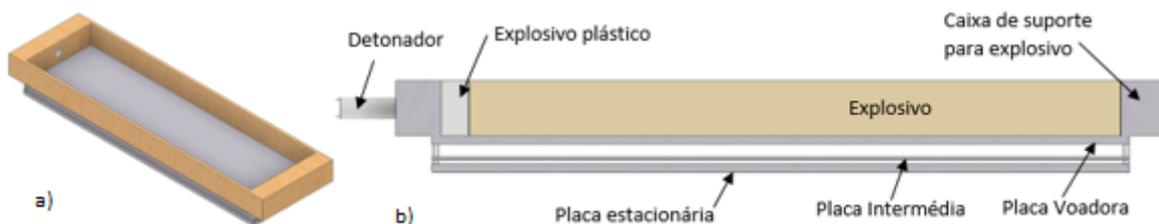


Figura 3.1. a) Conjunto montado; b) Representação da montagem experimental

Após a caixa ser montada, coloca-se o explosivo plástico na caixa junto ao local onde será aplicado o detonador (Figura 3.1b)) e efetua-se uma nova pesagem. Por fim, preenche-se o remanescente da caixa com o explosivo e efetua-se nova pesagem do sistema.

Com base na massa calculada na pesagem inicial do conjunto, é possível determinar qual a massa de explosivo utilizado, que será de grande importância para o registo da densidade do explosivo e cálculo do rácio utilizado para cada ensaio.

Posteriormente é colocado o conjunto de sondas de medição da velocidade de detonação acima do explosivo e a restante montagem do sistema é realizada no interior da câmara de detonação, isto é, preparação da base, ligação do conjunto de sondas à fonte de tensão e ao osciloscópio digital (Figura 3.2a)) ou cronómetro (Figura 3.2b)) e colocação do detonador. A preparação da base consiste na colocação de uma placa de aço sobre areia de modo a absorver alguma da energia de impacto.

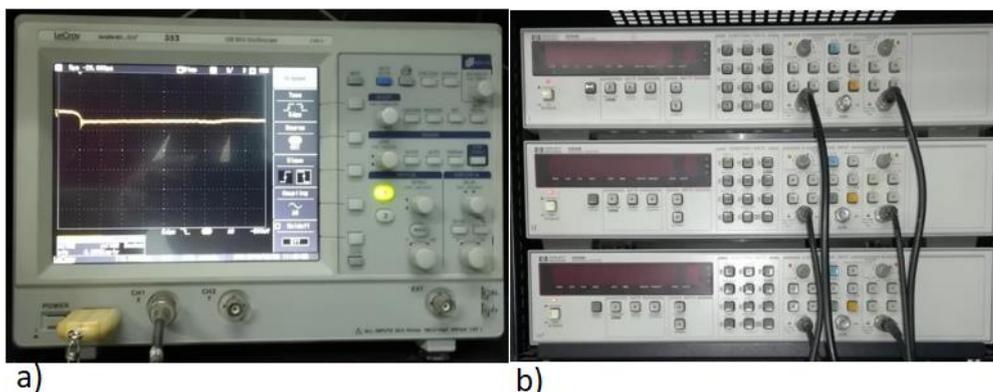


Figura 3.2. a) Osciloscópio digital; b) Cronómetros de precisão.

3.4. Medição da velocidade de detonação

Foram utilizados dois métodos para a medição da velocidade de detonação dos explosivos utilizados. Ambos os métodos consistem no posicionamento de um conjunto de sondas em cima do explosivo a distâncias pré-definidas, com recurso a um suporte em MDF com as dimensões indicadas no APÊNDICE B.

Na Figura 3.3a) está representada uma sonda relativa aos ensaios com uso do osciloscópio, sendo que cada sonda é constituída por um condensador ($1\mu\text{F}$), uma resistência ($1\text{M}\Omega$), um díodo semiconductor que não permite a passagem de uma diferença de potencial inferior a 40 V , um fio de cobre revestido e por um tubo de aço com diâmetro

externo de 0,9 milímetros (ponta de seringa). O método de construção de uma sonda deste género, encontra-se representado na Figura 3.3b).

Depois de construídas todas as sondas, estas são colocadas em paralelo e é efetuada a união dos vários condensadores a um fio condutor, repetindo-se este mesmo procedimento para as resistências e tubo de aço, ficando no fim apenas 3 ligações do conjunto (Figura 3.3 c)). De seguida é aplicada uma resistência (47 Ω) entre o fio condutor que une os tubos de aço e os condensadores. O fio que provém das resistências é ligado a uma fonte de alimentação de 20 V, sendo o neutro ligado ao tubo de aço. O fio que une os condensadores é ligado ao núcleo de cobre do sinal do osciloscópio digital e a tela externa é ligada ao tubo de aço, como indicado na Figura 3.3b).

No momento em que a onda de detonação atinge cada uma das sondas dá-se o contacto entre o fio de cobre e o tubo de aço, criando um curto-circuito que leva à descarga do condensador e que faz emitir um sinal no osciloscópio. À medida que a detonação se propaga, são emitidos os restantes sinais. Com base nas distâncias pré-definidas e nos tempos registados, é possível determinar a velocidade de detonação do explosivo utilizado.

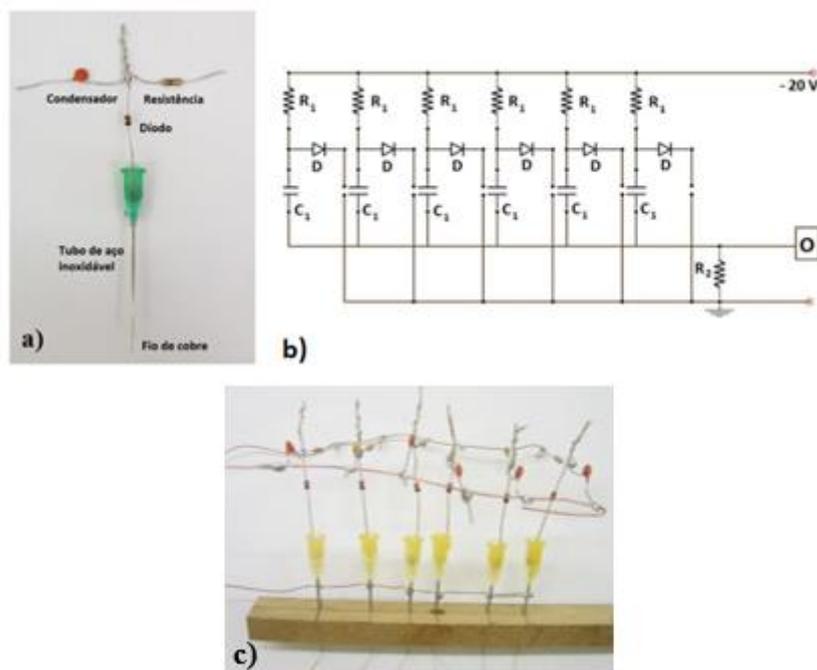


Figura 3.3. a) Sonda individual; b) Esquema elétrico da medição da velocidade de detonação

Para o método de medição em que se usam os cronómetros de precisão, as sondas possuem um esquema simples, existindo apenas dois componentes, o fio de cobre revestido e o tubo de aço, sendo cada um destes componentes ligado a um fio condutor, como indicado na Figura 3.4. Após a sua montagem, estas são conectadas individualmente aos cronómetros, sendo a primeira sonda o arranque dos cronómetros e as restantes interrompem o respetivo cronómetro associado a cada sonda.

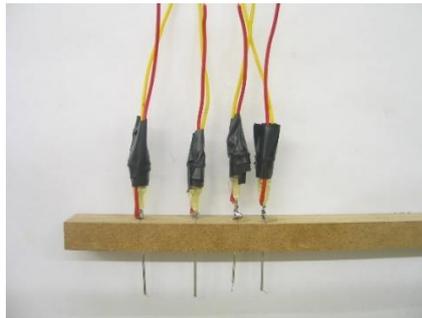


Figura 3.4. Sondas utilizadas para medição da velocidade de detonação com os cronómetros.

3.5. Cálculo da velocidade de impacto

Gurney (1943) através de testes realizados com explosivos em várias configurações analisou a aceleração de projéteis, onde introduziu o conceito da velocidade característica de Gurney ($\sqrt{2E}$), este conceito depende da energia característica de Gurney (E) que possui um valor característico para cada explosivo.

Cooper (1997) analisou a velocidade característica de Gurney e desenvolveu uma correlação (Equação (3.1)) que pode ser aplicada para uma maior gama de situações, pois depende apenas da velocidade de detonação do explosivo considerado.

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

Kennedy (1970) analisou o conceito de Gurney para uma detonação unidimensional com configuração paralela, onde desenvolveu a Equação (3.2) que foi rearranjada por Blazynski (1983) em que R representa o rácio de explosivo.

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

Manikandan et al. (2008) desenvolveu uma relação de modo a determinar a velocidade de impacto entre a placa voadora e intermédia e posteriormente entre a placa intermédia e a estacionária. Na Figura 3.5 está representado um esquema das velocidades de impacto e respetivos ângulos de colisão para a configuração utilizada.

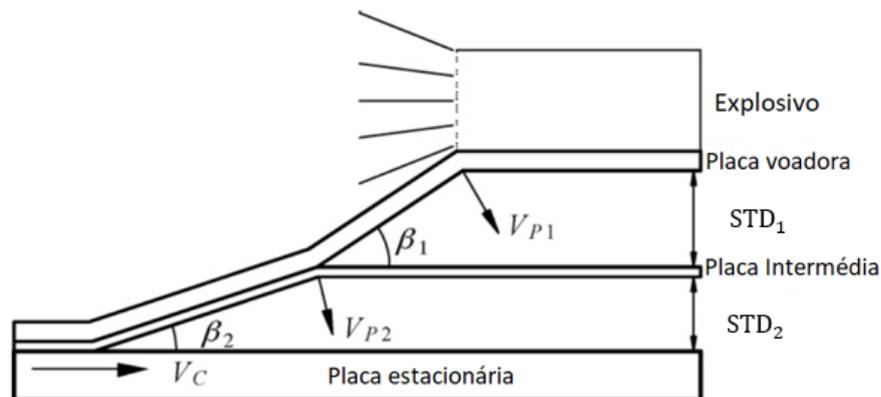


Figura 3.5. Representação esquemática da configuração. Adaptada de Manikandan et al. (2008).

3.5.1. Estimativa da velocidade de impacto

A velocidade de impacto irá possuir duas componentes, a velocidade de impacto da placa voadora na placa intermédia designada como V_{p1} e a velocidade de impacto do conjunto composto pela placa voadora e placa intermédia na placa estacionária, designado por V_{p2} . A velocidade de impacto para a primeira colisão irá estar dependente do espaço em que a aceleração possa ocorrer, sendo que na segunda colisão irá ser considerado que existe conservação da energia cinética do sistema de modo que velocidade será constante até ao impacto com a placa estacionária. Deste modo, é necessária uma determinada distância entre placas de modo a ser possível realizar uma estimativa da velocidade adquirida pela placa voadora, e posteriormente o conjunto placa voador e intermédia, até ao momento de impacto. A aproximação da velocidade de impacto para um determinado instante de tempo (t) pode ser calculada pela Equação (3.3) desenvolvida por Chou and Flis (1986).

Na Equação (3.3) o parâmetro $V_{p,Gurney}$ é o valor determinado na Equação (3.2), t_0 é o instante inicial (geralmente igual a zero) e τ é uma constante de tempo dada pela Equação (3.4).

$$V_{p1}(t) = V_{p,Gurney} \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right] \quad (3.3)$$

$$\tau = C_1 \frac{MV_{p,Gurney}}{P_{CJ}} + C_2 \quad (3.4)$$

Nesta equação, P_{CJ} corresponde à pressão de Chapman-Jouguet produzida pela detonação (sendo esta característica do explosivo utilizado, sendo no nosso caso aproximadamente igual a 5 GPa para o ANFO e 7 GPa para a emulsão) e M representa a massa da placa da placa voadora em [kg]. C_1 e C_2 são constantes de calibração, que tem como objetivo garantir que a placa voadora atinge 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 atinja esta velocidade ($t_{V_{pcal}}$) é o tempo necessário para que as ondas de choque, que se propagam na placa à velocidade de 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, efetua-se a integração da Equação (3.3) em ordem ao tempo, ficando assim com a Equação (3.5) que traduz a distância percorrida em função do tempo decorrido.

$$\Delta x_p(t) = V_{p,Gurney} \left[t + \tau(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1) \right] \quad (3.5)$$

Com base nas equações acima indicadas, considerando um incremento de tempo, é possível determinar a velocidade instantânea da placa e também a distância por esta percorrida. Com base neste método, é possível determinar a velocidade da placa no momento de impacto, sabendo a distância a que as placas se encontram inicialmente.

Para a segunda colisão, considerando a equação de conservação da energia cinética para a colisão de dois corpos, indicada na Equação (3.6), é possível determinar a velocidade de colisão entre o conjunto placa voadora e placa intermédia, com a placa estacionária.

$$\frac{1}{2} m_{Voadora} V_{p1}^2 + \frac{1}{2} m_{intermédia} V_{pi}^2 = \frac{1}{2} (m_{Voadora} + m_{intermédia}) V_{p2}^2 \quad (3.6)$$

De referir que a velocidade de colisão da placa intermédia (V_{pi}) no momento da colisão dos dois corpos é nula, assim sendo a Equação (3.6) toma a forma indicada na Equação (3.7).

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

3.6. Parâmetros utilizados

Os parâmetros utilizados em cada ensaio realizado estão representados na Tabela 3.4. Para todos os ensaios sem placa intermédia foi utilizada uma STD de 4,5 milímetros, sendo que esta é equivalente a 1,5 vezes a espessura da placa voadora. Nos ensaios com placa intermédia, foi mantida a STD de 4,5 milímetros entre a placa voadora e a intermédia. A distância entre a placa intermédia e a placa estacionária, considerando a relação usada para a distância anterior, foi considerada como 1,5 milímetros.

Tabela 3.4 Parâmetros utilizados nos ensaios realizados

Soldadura	SS/AA-EE20	AA/SS-PE15	AA/SS-A20	AA/AA/SS-A25	AA/SS-PE15
Placa Voadora	AISI 304	Al6082-T6	Al6082-T6	Al6082-T6	Al6082-T6
Placa intermédia	----	----	----	Al1050	Al1050
Placa estacionaria	Al6082-T6	AISI 304	AISI 304	AISI 304	AISI 304
Espessura placa voadora [mm]	3	3	3	3	3
Espessura placa intermédia [mm]	----	----	----	1	1
Espessura placa estacionária [mm]	3	3	3	3	3
Explosivo utilizado	Emulsão + EPS	Primer + EPS	ANFO	ANFO	Primer + EPS
Densidade explosivo	656,78	515,36	828,70	800,2	493,40
Altura explosivo [mm]	20	15	20	25	15
Rácio de explosivo	0,516	0,954	1,874	2,483	0,913

3.7. Ensaio metalográficos

3.7.1. Preparação das amostras

Depois de realizadas as soldaduras, foram realizadas análises microestruturais de modo a observar a influência na microestrutura dos parâmetros utilizados em cada um dos ensaios. De cada ensaio cuja ligação não se manteve após a soldadura foram retiradas

quatro amostras, sendo uma amostra no sentido longitudinal relativamente ao sentido de detonação e outra no sentido transversal tanto para a placa voadora como para a placa estacionária. Nos ensaios com sucesso foram retiradas duas amostras para análise, uma amostra no sentido longitudinal e outra no sentido transversal. O local de onde foram retiradas as amostras em cada um dos ensaios está representado no APÊNDICE C.

De modo a simplificar e melhorar a compreensão na análise das amostras, foi adicionado à nomenclatura a posição desta relativamente à velocidade de detonação e nos casos em que a ligação não se manteve após a soldadura foi adicionado o componente ao qual a amostra pertence. Assim, a nomenclatura assume a forma A/B/C-DE-FG, na qual F corresponde ao local da amostra, podendo este assumir a letra V se a amostra for retirada da placa voadora e a letra E para a placa estacionária. A letra G representa o sentido da amostra relativamente à velocidade de detonação podendo ser L (longitudinal) ou T(transversal).

A conversão entre a nomenclatura utilizada internamente e a utilizada neste trabalho, esta representada no APÊNDICE C.

Após selecionadas as amostras a analisar, estas foram colocadas em resina epoxy para facilitar a preparação e posteriormente realizou-se a passagem sequencial nas lixas P180, P320, P600, P1000 e P2500, sendo estas passagens sempre realizadas perpendicularmente à passagem anterior. De seguida, recorreu-se a uma solução com partículas de diamante de 6 μm , 3 μm e 1 μm de diâmetro para efetuar o polimento das amostras.

3.7.2. Ataque químico

De modo a revelar a microestrutura dos materiais foram utilizados dois ataques químicos de composições diferentes. No que se refere à liga de alumínio AA6082-T6, foi utilizado o reagente “Weck’s” que é composto por uma solução com 100 ml de H_2O (água), 4 g de KMnO_4 (permanganato de potássio) e 1 g de NaOH (hidróxido de sódio), sendo este ataque realizado por imersão de 40 segundos à temperatura ambiente. Para obter a microestrutura do aço AISI 304 foi utilizado um ataque químico eletrolítico, em que foi utilizada uma solução contendo 10% de $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (ácido oxálico) e 90% de água ligada a uma fonte de tensão de 6 V. Para este ataque, a peça é colocada no polo positivo e a solução no polo negativo, sendo o ataque por imersão durante 60 segundos.

3.7.3. Análise química SEM/EDS

Com o objetivo de avaliar a composição química da interface, foram realizadas análises químicas por Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDS).

Os resultados apresentados nos espectros encontram-se representados nas suas percentagens mássicas, sendo que para esta análise, foram ignorados os elementos residuais presentes na amostra (carbono e oxigénio).

3.8. Ensaaios mecânicos

3.8.1. Microdureza

Foram realizadas medições de microdureza de forma a caracterizar os materiais base e as soldaduras. Nas medições de microdureza realizadas nas placas, a carga utilizada foi de 200 gramas durante 15 segundos, com exceção das medições realizadas nos compostos intermetálicos.

No caso dos materiais base, as medições da microdureza foram realizadas em diversos pontos do provete de modo a medir a microdureza média dos materiais de base.

No APÊNDICE D encontram-se representadas as distâncias entre indentações utilizadas para a representação do perfil de microdureza em todos os ensaios realizados.

Nas regiões onde se formaram compostos intermetálicos as indentações foram realizadas com uma carga inferior de modo a garantir que as indentações fossem apenas realizadas no composto. Foi então utilizada uma carga de 25 gramas durante 15 segundos.

3.8.2. Ensaios de tração ao corte

A análise do comportamento mecânico dos provetes à tração permite estudar a resistência ao corte das soldaduras efetuadas. Para este estudo foram analisadas as soldaduras consistentes.

Para efetuar este teste é necessário maquinar os provetes com as dimensões indicadas no APÊNDICE E e efetuar a pintura da superfície de análise com uma camada de tinta branca e posteriormente borrifada com tinta preta. Este procedimento auxilia na geração da malha representativa no extensóptico, nomeadamente o *Software* de análise ARAMIS, para o estudo das deformações locais em função da carga. No fim do ensaio, é realizado o

tratamento de dados de modo a obter-se o gráfico tensão de corte-alongamento da soldadura, bem como as propriedades mecânicas. Para o cálculo da tensão de corte foi efetuado o coeficiente entre a força de tração e a área da secção de corte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise dos materiais base

A microestrutura dos materiais base é uma característica de elevada importância, pois permite comparar com as alterações desenvolvidas na soldadura e compreender o comportamento do material em função das solicitações impostas.

Na Figura 4.1a) está representada a microestrutura do aço inoxidável AISI 304 onde é possível observar que o grão possui uma dimensão irregular, com fronteiras de grão bem delimitadas e com formação de precipitados nas fronteiras de grão, presumivelmente carbonetos de cromo. Na Figura 4.1b) pode observar-se a microestrutura da liga de alumínio AA6082-T6, onde é possível observar um tamanho de grão bastante variável, com fronteiras de grão bem definidas e com tendencial alongamento na direção de laminagem.

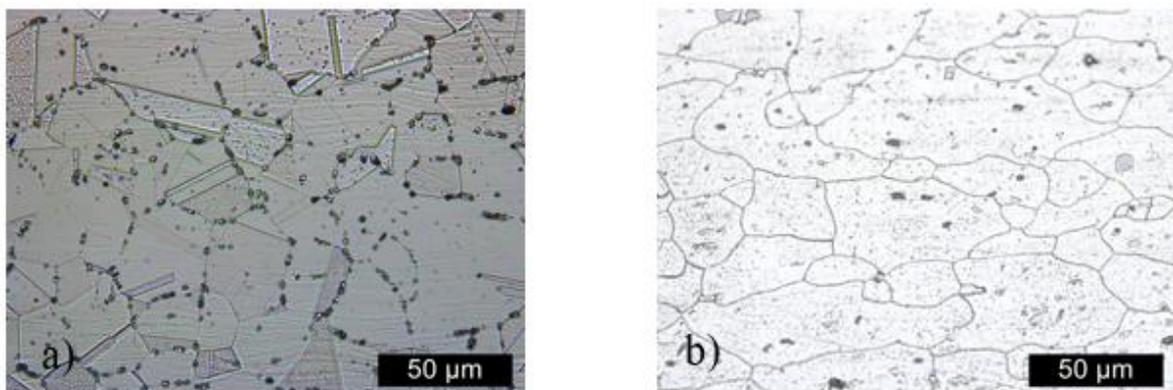


Figura 4.1. Microestrutura dos materiais base: a) AISI 304; b) AA6082-T6.

Os materiais em questão possuem microdureza média de 188 HV para o aço inoxidável, 118,5 HV para a liga de alumínio AA6082-T6 e de 40 HV para a liga de alumínio AA1050.

4.2. Enquadramento dos ensaios e construção das janelas de soldabilidade

4.2.1. Velocidade de Detonação

Em todos os ensaios efetuados a medição da velocidade foi realizada, sendo que para o ensaio realizado com o ANFO para uma espessura de 20 milímetros não foi possível obter medições pois este estagnou antes de atingir o fim das placas. Para os cálculos necessários a realizar nas próximas secções para este ensaio, irá considerar-se a velocidade de detonação igual à obtida no ensaio AA/AA/SS-A25. Através do sinal registado no osciloscópio e dos tempos obtidos nos cronómetros, foi possível obter a velocidade para cada ensaio realizado. Na Tabela 4.1 é possível observar para os vários ensaios, a posição das sondas (d) e os tempos (t), com o calculo da velocidade média atingida. No APÊNDICE F é indicado detalhadamente toda a informação adquirida.

Tabela 4.1. Medições das velocidades de detonação

SS/AA-EE20		AA/SS-PE15		AA/AA/SS-A25		AA/AA/SS-PE15	
d [mm]	t [μ s]	d [mm]	t [μ s]	d [mm]	t [μ s]	d [mm]	t [μ s]
0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	4,6	14,64	4,76	9,94	5,20	15,2	5,9
34,74	11,1	34,88	12,02	24,32	13,11	35,28	17,5
59,02	18,9	45,04	15,88	44,20	22,71	45,44	23,4
78,9	25,3	59,82	20,80			60,64	30,6
		79,66	27,96			80,12	36,9
Vd [m/s]	3108	2836		1938		2055	

4.2.2. Velocidade de Impacto

A velocidade de impacto foi determinada com base nos parâmetros indicados na Secção 3.5. as constantes C_1 e C_2 foram calculadas de modo a que a curva da velocidade de impacto em função do tempo cruzasse o ponto de calibração definido pelos valores de $t_{V_{pcal}}$ e V_{pcal} . Na Figura 4.2. é indicado o gráfico que permite obter a velocidade de impacto para uma determinada distância percorrida pela placa voadora para o ensaio SS/AA-EE20. No gráfico é possível observar as duas curvas relativas a velocidade de impacto e a distância percorrida pela placa voadora. Na Tabela 4.2 é indicada a velocidade de impacto obtida por este método para todos os ensaios realizados sem placa intermédia, na Tabela 4.3 é indicada a velocidade de impacto para os ensaios com placa intermédia.

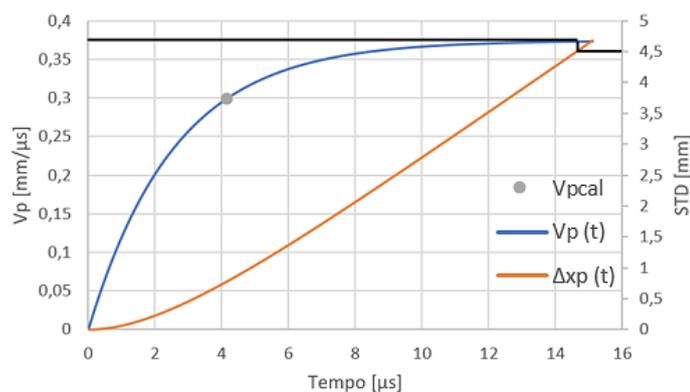


Figura 4.2. Calibração da velocidade de impacto no ensaio SS/AA-EE20.

Tabela 4.2. Valores da velocidade de impacto para os ensaios sem placa intermédia

Ensaio	SS/AA-EE20	AA/SS-PE15	AA/SS-A20
Velocidade de Impacto [m/s]	372,7	503,1	533,2

Tabela 4.3. Valores da velocidade de impacto para os ensaios com placa intermédia

Ensaio	AA/AA/SS-A25		AA/AA/SS-PE15	
	V_{p1}	V_{p2}	V_{p1}	V_{p2}
Velocidade de Impacto [m/s]	580,7	503,6	356,4	308,3

No APÊNDICE G são indicados todos os parâmetros necessários a obtenção dos gráficos de velocidade de impacto e deslocamento em função do tempo assim como os gráficos de cada ensaio realizado.

4.2.3. Ângulo de colisão

O ângulo de colisão foi determinado com base na Equação (2.6), indicada na secção 2.4.3, a qual tem em consideração a velocidade de detonação do explosivo e a velocidade de impacto calculada na secção anterior. Na Tabela 4.4 é indicado o ângulo de colisão para os ensaios sem placa intermédia, enquanto que na Tabela 4.5 são indicados os ângulos de colisão para os ensaios com placa intermédia. Depois da obtenção deste valor, é possível enquadrar os vários ensaios na janela de soldabilidade.

Tabela 4.4. Valores obtidos para o ângulo de colisão dos ensaios sem placa intermédia

Ensaio	SS/AA-EE20	AA/SS-PE15	AA/SS-A20
Ângulo de Colisão [°]	6,87	10,18	15,82

Tabela 4.5. Valores obtidos para o ângulo de colisão dos ensaios com placa intermédia

Ensaio	AA/AA/SS-A25		AA/AA/SS-PE15	
	β_1	β_2	β_1	β_2
Ângulo de Colisão [°]	17,24	14,94	9,95	8,60

4.2.4. Janela de soldabilidade

A janela de soldabilidade foi elaborada para os quatro sistemas realizados neste trabalho. Na Figura 4.3 a janela corresponde à configuração em que o aço inoxidável é a placa voadora e a liga de alumínio AA6082-T6 é a placa estacionária, na qual apenas foi realizado um ensaio (SS/AA-EE20). Na Figura 4.4 a janela é referente ao sistema inverso em que a placa voadora é a liga de alumínio AA6082-T6 e o aço inoxidável é a placa estacionária em que foram realizados dois ensaios (AA/SS-PE15 e AA/SS-A20). Na Figura 4.5 estão representadas as duas janelas para o caso em que é utilizada a liga de alumínio AA1050 como placa intermédia, sendo apresentada a janela entre a placa voadora (AA6082-T6) e a intermédia (AA1050) e a janela entre a placa intermédia (AA1050) e a placa estacionária (AISI 304).

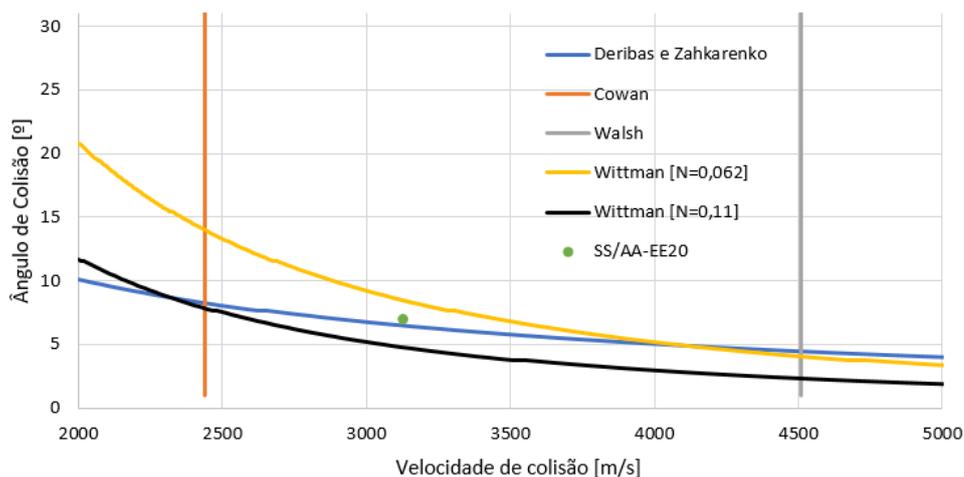


Figura 4.3. Janela de soldabilidade para os ensaios de SS/AA

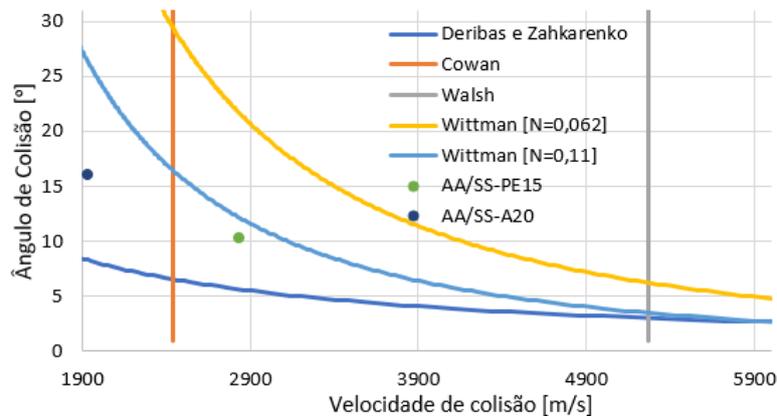


Figura 4.4. Janela de soldabilidade para os ensaios de AA/SS

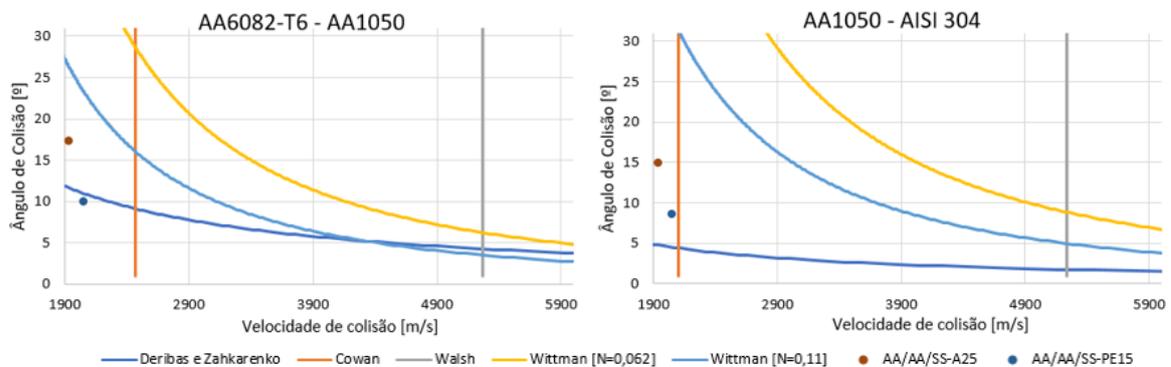


Figura 4.5. Janelas de soldabilidade para os ensaios de AA/AA/SS

Na Figura 4.3 observa-se que o ensaio realizado encontra-se acima da janela se for considerado $N=0,11$ para o limite de Wittman, assim sendo, era esperado que ocorresse fusão excessiva da interface, sendo observada separação das placas logo após o processo de soldadura.

Na Figura 4.4 estão representados os dois ensaios realizados para esta configuração, onde se observa o cumprimento de todos os limites por parte do ensaio AA/SS-PE15, em que se observou união dos materiais após a soldadura, havendo separação destes durante o corte dos provetes. Relativamente ao ensaio AA/SS-A20, o limite que não foi respeitado foi o pertencente à formação de ondas na interface, sendo que mesmo sem o cumprimento deste limite, os materiais permaneceram unidos após a soldadura, havendo separação das placas durante a preparação para análise metalográfica.

Na Figura 4.5 ambos os ensaios indicados não respeitam o limite esquerdo da janela de soldabilidade, sendo esperada a obtenção de uma interface plana. Para o ensaio

AA/AA/SS-PE15, a soldadura entre as ligas de alumínio é esperada que a energia fornecida seja inferior à necessária para a ligação, não sendo o observável no ensaio, pois ambos os ensaios permaneceram unidos mesmo após o corte dos provetes.

4.3. Análise macroscópica

4.3.1. SS/AA-EE20

Este ensaio foi realizado com o objetivo de conseguir obter uma soldadura em que a placa voadora fosse a de aço inoxidável, em que relativamente aos ensaios realizados no ano anterior a diferença principal foi a espessura da placa estacionária.

Pela análise da Figura 4.6a) observa-se que no local onde ocorre a iniciação da detonação, ocorreu deformação excessiva da placa voadora devido ao tipo de explosivo iniciador, como indicado pela seta. Na Figura 4.6b) observa-se que a energia fornecida ao sistema foi superior a necessária para a realização do ensaio observando-se deformação acentuada da placa estacionária.

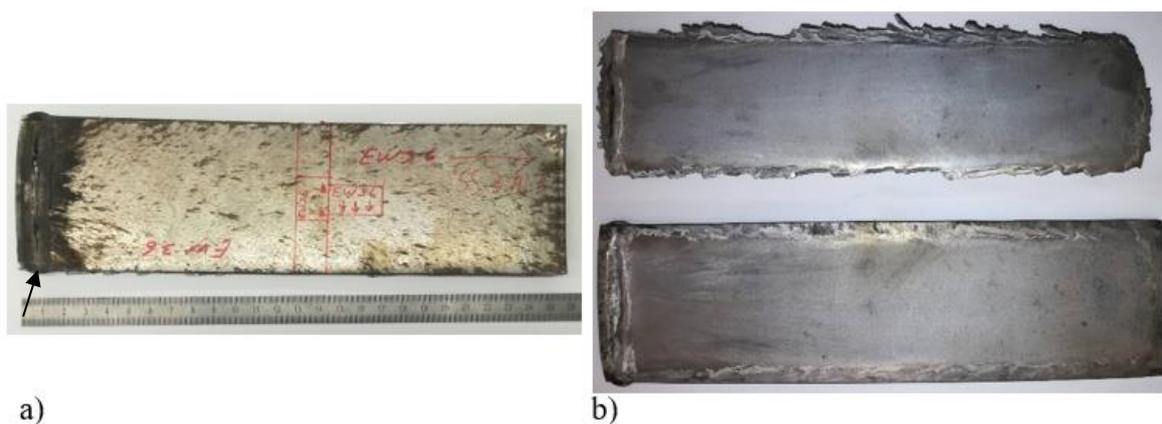


Figura 4.6. Ensaio SS/AA-EE20: a) Posição de impacto; b) Vista das superfícies de impacto, placa estacionária na parte superior e placa estacionária na parte inferior.

4.3.2. AA/SS-PE15

Para este ensaio foi utilizada uma mistura explosiva com velocidade de detonação inferior à do ensaio anterior, de modo a obter uma soldadura viável para a configuração AA/SS. Após o ensaio de soldadura, as placas permaneceram unidas até a realização das operações de corte, onde ocorreu separação das placas.

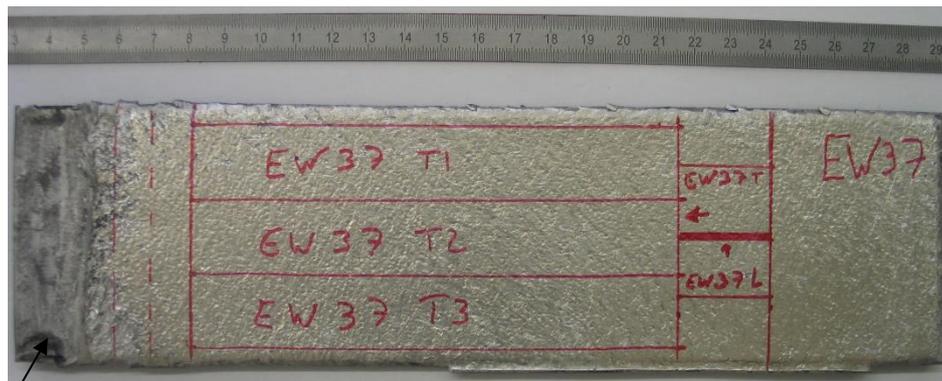


Figura 4.7. Ensaio AA/SS-PE15 na posição de impacto.

Na Figura 4.7 é possível observar que na parte inicial ocorreu um elevado dano, indicado pela seta na imagem, causado pelo explosivo iniciador na placa voadora. Sendo uma solução possível a redução volumétrica desse explosivo. Este ensaio encontra-se enquadrado na janela de soldabilidade, contudo a soldadura não apresentou sucesso. Isto mostra que a janela de soldabilidade não garante que para ensaios que respeitem todos os limites, seja obtida uma soldadura de qualidade.

4.3.3. AA/SS-A20

O resultado do ensaio foi diferente do esperado devido ao explosivo utilizado, pois este explosivo tinha propriedades diferentes das esperadas, não efetuando a detonação completa em toda a extensão para a espessura considerada, como se pode observar na Figura 4.8, onde a soldadura ocorreu até ao limite marcado com as setas. Desta soldadura ainda foi possível retirar as amostras para a análise metalográfica sendo que na amostra longitudinal foi possível observar união das duas placas até as operações de polimento. Como não foi possível efetuar a medição da velocidade de detonação para este ensaio, a velocidade considerada por aproximação foi a obtida no ensaio AA/AA/SS-A25. Para esta velocidade, analisando a janela de soldabilidade observa-se que este ensaio se encontra à esquerda da janela, e se enquadra em todos os limites exceto no referente ao tipo de interface, embora fosse de esperar que a soldadura obtivesse sucesso.



Figura 4.8. Ensaio AA/SS-A20 na posição de impacto.

4.3.4. AA/AA/SS-A25

Neste ensaio foi introduzida a placa intermédia de alumínio como ilustrado na Figura 4.9. Para este ensaio foi aumentada a espessura de explosivo de modo a conseguir obter a detonação completa do explosivo e conseguir obter a velocidade de detonação para este explosivo. Com base nesta velocidade, enquadrando nas duas janelas de soldabilidade, veja-se Figura 4.5, seria de esperar que a soldadura fosse realizada com sucesso e que ambas as interfaces fossem planas.

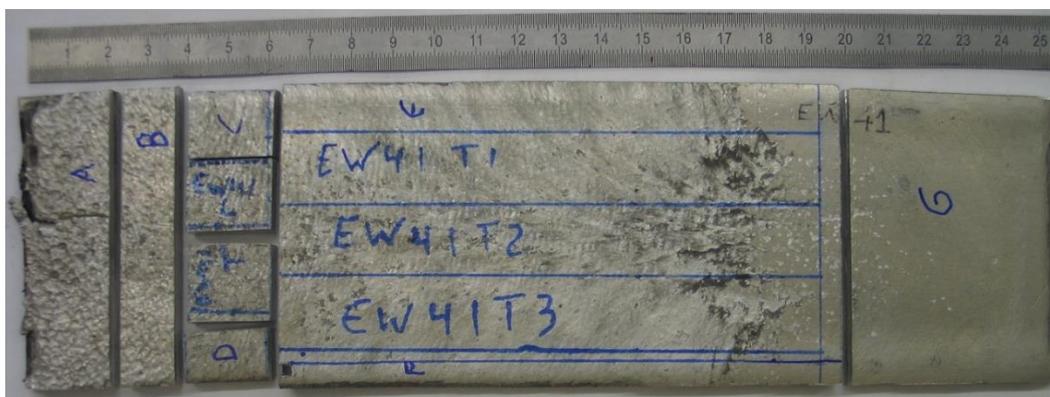


Figura 4.9. Ensaio AA/AA/SS-A25 na posição de impacto.

4.3.5. AA/AA/SS-PE15

Neste ensaio foi realizado uma aproximação ao ensaio anterior em que se aumentou a concentração de EPS no explosivo de modo a reduzir a velocidade de detonação para valores próximos do atingido com o ANFO. O valor de velocidade foi superior ao atingido pelo ANFO, veja-se Tabela 4.1, mas tendo em consideração as janelas de soldabilidade, verifica-se que os ensaios respeitam os mesmos limites, pelo que são ensaios semelhantes embora com variação do tipo de explosivo.

Na Figura 4.10 é possível observar que com a utilização das novas caixas, o efeito do explosivo plástico iniciador na placa voadora é diminuído, não ocorrendo destruição da parte inicial do ensaio.

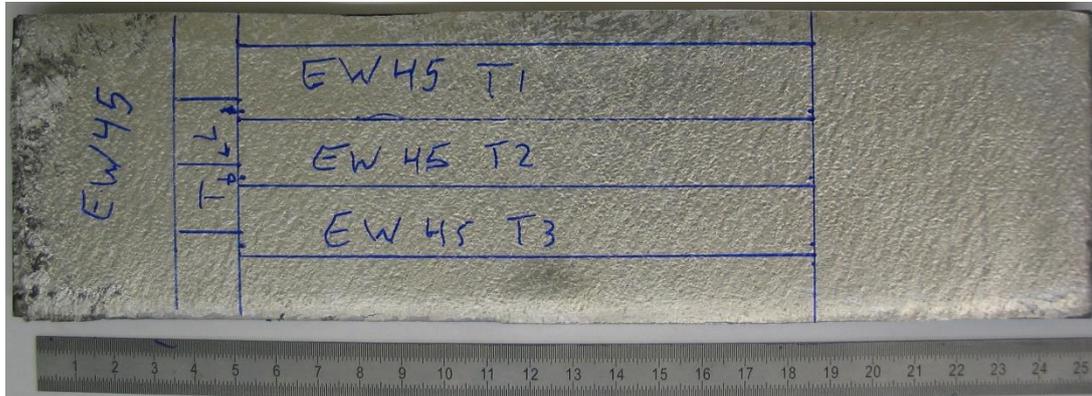


Figura 4.10. Ensaio AA/AA/SS-PE15 na posição de impacto.

4.4. Análise das interfaces

4.4.1. SS/AA-EE20

Na Figura 4.11 estão apresentadas as interfaces de impacto para o ensaio SS/AA-EE20. Observa-se deformação do material da placa voadora, como se vê na Figura 4.11a), com deformação dos grãos junto a interface. Para a placa estacionária, indicada na Figura 4.11b), a deformação sofrida provocou o alongamento dos grãos na proximidade da interface, como referenciado na imagem com setas.

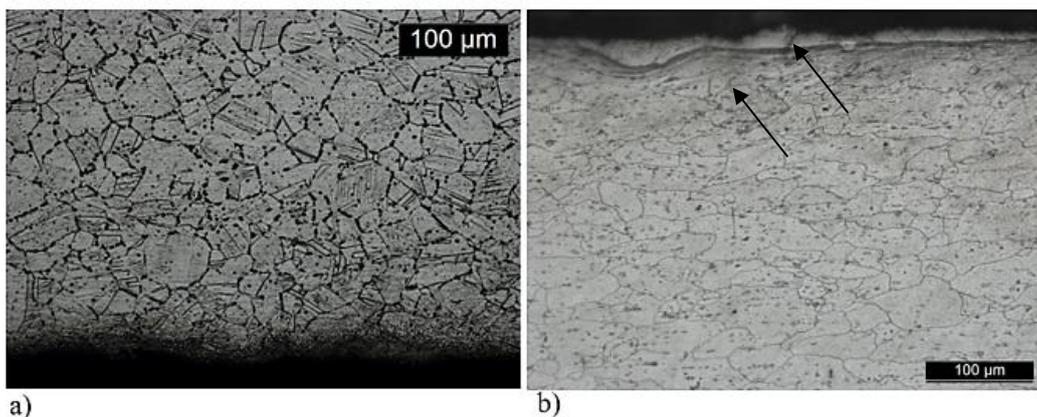


Figura 4.11. Microestrutura das amostras dos ensaios SS/AA-EE20: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.

Na Figura 4.11 b) é ainda possível observar uma camada intermédia continua proveniente de produtos da fusão dos materiais. Esta camada possui uma espessura média de 8,97 μm , com uma microdureza a variar entre 477,6 HV e 639,3 HV. De realçar a presença de fissuras nesta camada, o que sugere o carater frágil da camada.

4.4.2. AA/SS-PE15

Na Figura 4.12 é possível observar que ocorreu deformação acentuada tanto na placa voadora como na placa estacionária. Na placa voadora observa-se o alongamento dos grãos, veja-se Figura 4.12 a), com deformação dos grãos junto a interface na placa estacionaria, como observável na Figura 4.12 b), conforme indicam as setas. É ainda possível observar uma camada continua de material fundido na interface com o alumínio, presumivelmente frágil, pois apresenta algumas fissuras. A provável presença desta camada ainda no estado líquido, aquando do retorno das ondas de choque refletidas na superfície das placas, onde essas agora de tensão de tração, deverá ser responsável pela separação das placas. Observa-se a existência de uma camada intermédia continua de material fundido na interface da placa voadora, com uma espessura de 12,2 μm , que, em comparação com o ensaio anterior, apresenta um aumento da espessura. A microdureza da camada de material fundido variou entre 318,2 HV e 611,7 HV.

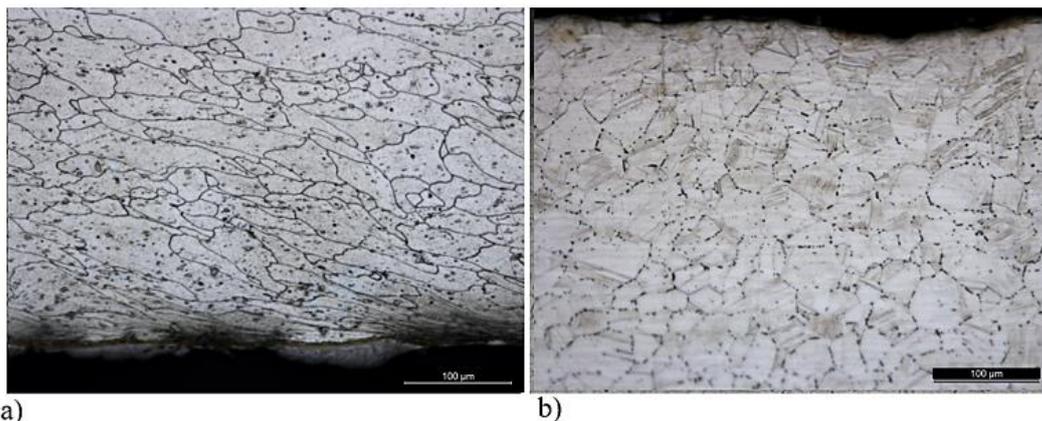


Figura 4.12. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/SS-PE15: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.

De modo a verificar se esta camada de material corresponde a um composto intermetálico, foi realizada a análise EDS na interface. Na Figura 4.13 a) está representado

o local de análise realizado na interface, sendo apresentado na Figura 4.13 b) os principais componentes do espectro, sendo neste caso os elementos predominantes o alumínio e o ferro, com 74,6 % em peso e 18,8 % em peso respectivamente. Relativamente a percentagem atômica de alumínio e ferro, observou-se os valores de 84,8 % e 10,3 %, respetivamente, que comparando com a Tabela 2.1 não é possível definir nenhuma fase em concreto. Nesta análise foi também detetada a presença de crómio, silício e magnésio, sendo estes provenientes do aço inoxidável no caso do crómio e os restantes provenientes do alumínio.

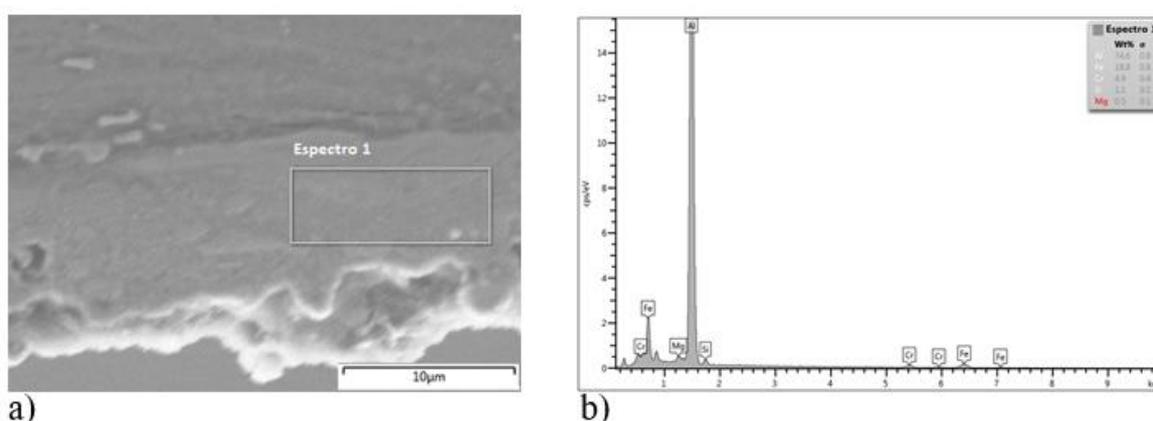


Figura 4.13. Análise EDS da amostra AA/SS-PE15-VL: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.

4.4.3. AA/SS-A20

Neste ensaio observou-se que ocorreu a união dos materiais que foi rompida durante as operações de preparação das amostras. A partir da observação da Figura 4.14 a) verifica-se a deformação significativa sofrida pelo alumínio com alongamento generalizado dos grãos, sendo também possível visualizar uma deformação na placa estacionária com alongamento do grão junto a interface, como indicado na Figura 4.14 b).

A camada de material fundido neste ensaio tem espessura inferior aos restantes ensaios realizados, da ordem de 5,3 μm , com descontinuidades ao longo do seu comprimento, sendo apenas observada a formação desta camada na interface da placa voadora, conforme se indica com uma seta na Figura 4.14 a). Esta camada apresenta uma variação de microdureza entre 273,2 HV e 564,9 HV.

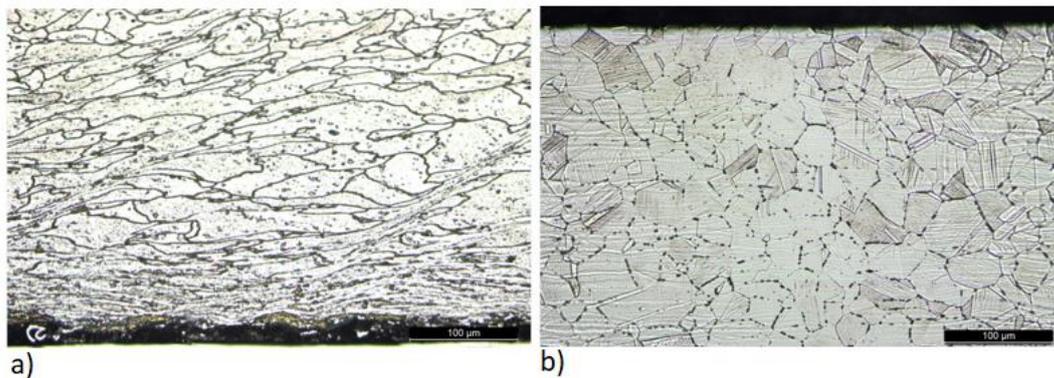


Figura 4.14. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/SS-A20: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.

Na Figura 4.15 a) é indicado o local de análise, sendo indicada na Figura 4.15 b) a percentagem em peso dos vários elementos constituintes, tendo sido observada principalmente a presença de alumínio e silício, devendo-se este facto principalmente a localização e dimensão da zona de análise, não tendo incidido exclusivamente na camada de intermetálicos, mas sim sobre a placa voadora, demonstrado assim uma grande concentração destes dois componentes.

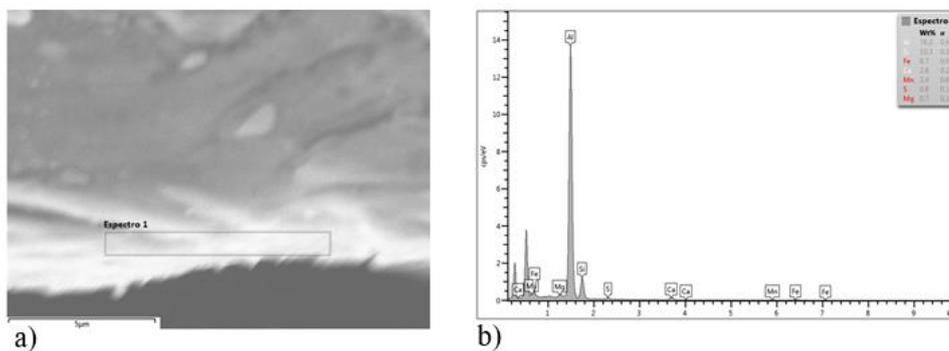


Figura 4.15. Análise EDS da amostra AA/SS-A20-VL: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.

4.4.4. AA/AA/SS-A25

A Figura 4.16 ilustra a morfologia da interface da soldadura com placa intermédia. Na Figura 4.16 a) observa-se a formação de uma interface ondulada entre as duas ligas de alumínio, contrariamente ao indicado pelo limite de Cowan, a placa voadora e a placa intermédia, sem fusão substancial de qualquer das ligas de alumínio. A Figura 4.16 b) ilustra a interface entre a placa intermédia e o aço inoxidável, na qual se observa uma interface plana, com formação de uma camada contínua de material fundido de

espessura média de 13,4 μm , com a presença de fissuras, conforme indicado com setas na Figura 4.16b). Esta camada de material fundido possui uma microdureza a variar entre 395,8 HV e 712,0 HV, sendo indicação segura de que se trata de um composto intermetálico.

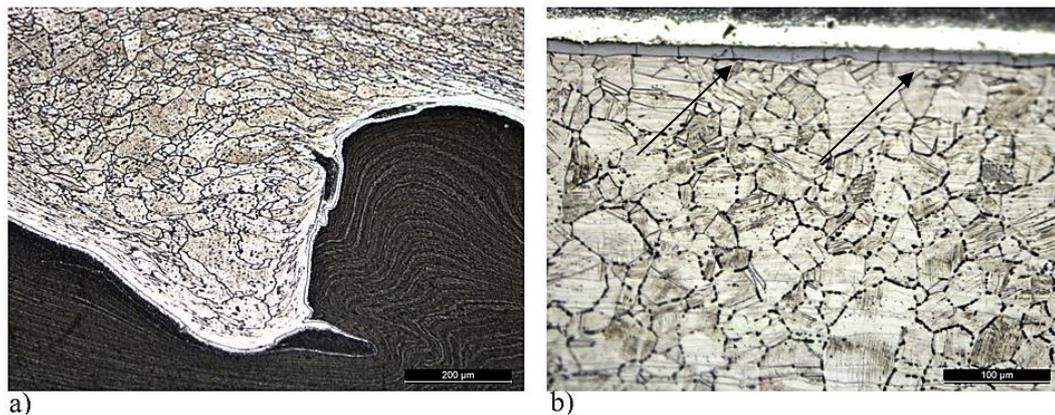


Figura 4.16. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/AA/SS-A25: a) Interface AA6082-T6 e AA1050; b) Interface AA1050 e AISI 304.

Na Figura 4.17 a) e na Figura 4.17 b) encontra-se a localização e os resultados obtidos pela análise EDS para o ensaio AA/AA/SS-A25-L, respetivamente. Para o espectro apresentado neste ensaio, foi observada uma percentagem em peso de 57,0 % de alumínio e de 32,5 % de ferro. Tendo este ensaio os valores mais elevados de percentagem de ferro dos ensaios realizados. No que se refere a percentagem atómica, observou-se 73,1 % de alumínio e 20,1 % de ferro, que pela análise do diagrama de fases, o composto presente nesta camada é FeAl_3 , não sendo possível afirmar a sua certeza devido aos valores de microdureza desta camada não serem coincidentes com os valores da fase.

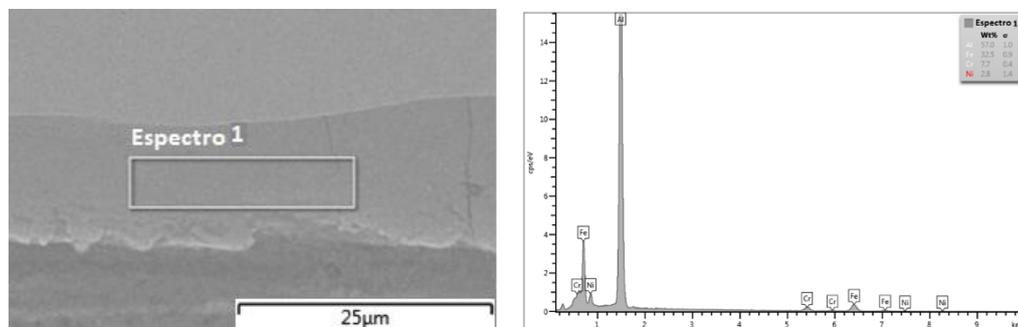


Figura 4.17. Análise EDS da amostra AA/AA/SS-A25-L: a) Macrografia da interface; b) Espectro obtido.

4.4.5. AA/AA/SS-PE15

Neste ensaio observou-se que a amplitude e o comprimento das ondas geradas na interface entre as duas ligas de alumínio diminuíram, Figura 4.18 a). Na Figura 4.18 b) observa-se uma interface plana entre a liga de alumínio AA1050 e o aço inoxidável. Relativamente à espessura média da camada formada, observa-se que ocorreu uma redução desta relativamente ao ensaio AA/AA/SS-A25, tendo neste caso, uma espessura de 8,8 μm e uma microdureza a variar entre 526,3 HV e 854,3 HV, sendo observados vários pontos da interface em que a espessura da camada intermédia é nula.

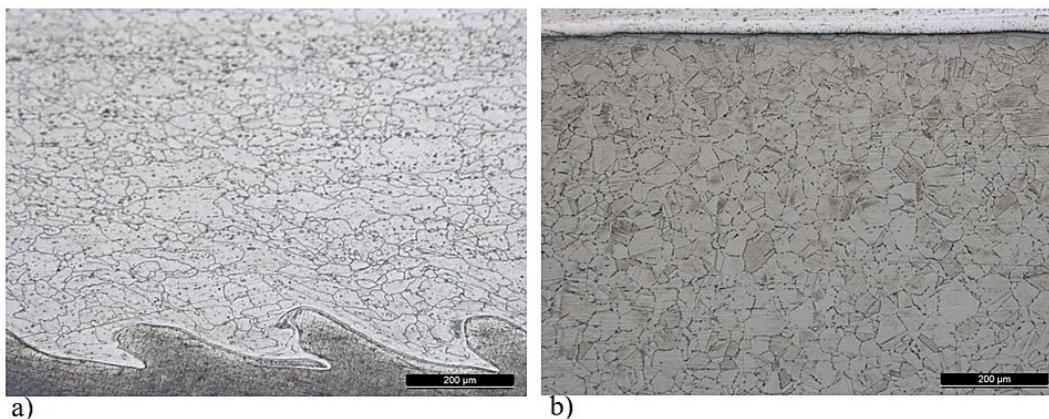


Figura 4.18. Microestrutura das amostras longitudinais dos ensaios AA/AA/SS-PE15: a) Interface AA6082-T6 e AA1050; b) Interface AA1050 e AISI 304.

A Figura 4.19 a), indica o local onde foi realizado o EDS, sendo observada na Figura 4.19 b) a composição em percentagem de peso em que os principais constituintes são o alumínio e o ferro, com as percentagens de 82,8 % e 13,2 %, respetivamente. Para as percentagens atómicas observou-se os valores de 89,7 % de alumínio e 7,5 % de ferro, sendo que por comparação com os valores da literatura não foi possível obter uma fase em concreto.

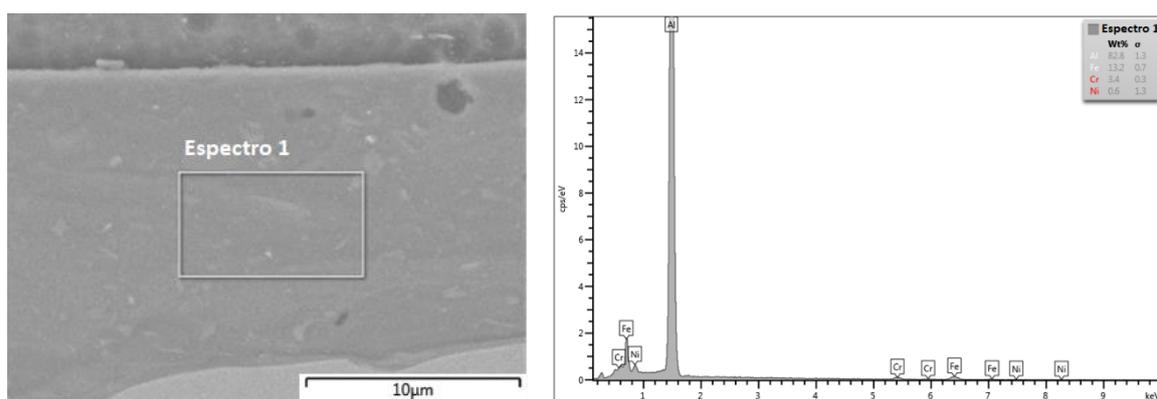


Figura 4.19. Análise EDS da amostra AA/AA/SS-PE15-L: a) Macrografia da interface; b) Composição do espectro.

4.4.6. Discussão de resultados

Na Tabela 4.6 estão indicados os valores das velocidades de detonação e do rácio de explosivo em comparação com a espessura da camada de intermetálicos, onde é possível observar que dentro de cada explosivo utilizado, a espessura da camada de intermetálicos aumenta com o aumento do rácio de explosivo e velocidade de detonação.

Tabela 4.6 Influência da velocidade de detonação e do rácio de explosivo na interface

	AA/SS-A20	AA/AA/SS-A25	AA/AA/SS-PE15	AA/SS-PE15	SS/AA-EE20
V_d [m/s]	1938	1938	2055	2836	3108
R	1,874	2,483	0,913	0,954	0,516
Esp [mm]	5,34	13,37	8,64	12,24	8,97

Observa-se que independentemente da localização na janela de soldabilidade, indicada na secção 4.2.4 existe a formação de uma camada de intermetálicos.

Em todas as amostras analisadas por EDS, a presença de outros elementos foi observada, como por exemplo, silício, níquel e crómio, que implicam que os compostos formados na interface não apresentem uma composição binária do tipo Fe_xAl_y , mas sim uma composição mais complexa, dificultando a sua definição.

Para os ensaios da configuração AA/AA/SS é possível observar a formação de ondas na interface formada entre as ligas de alumínio AA6082-T6 e AA1050. Na Figura 4.20 é efetuada a comparação entre a amplitude de onda formada entre as duas ligas de alumínio com o rácio de explosivo utilizado. Sendo observado que com o aumento do

rácio de explosivo, a amplitude das ondas também aumenta. A mesma conclusão foi obtida por Kahraman et al. (2005) onde no estudo da união entre titânio e aço inoxidável, observou que o aumento do rácio de explosivo, conduziu ao aparecimento das ondas numa fase inicial ($R=1,5/2$), levando com o aumento da sua amplitude para um rácio de explosivo superior ($R=2/3$).

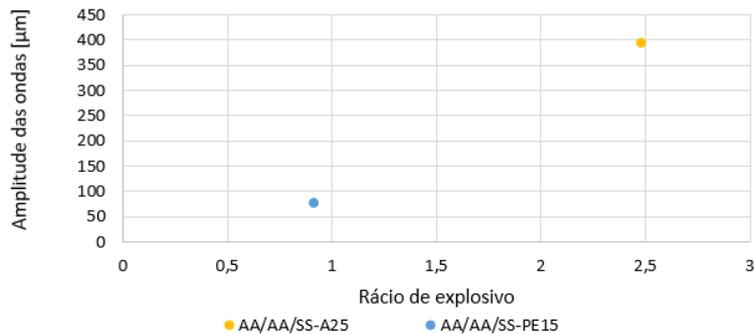


Figura 4.20. Amplitude das ondas formadas na interface AA6082-T6 e AA1050 em comparação com o rácio de explosivo utilizado.

4.5. Perfis de microdureza

4.5.1. Configuração SS/AA

Os perfis de microdureza obtidos nas medições realizadas nas placas voadora e estacionária no ensaio onde foi realizada a projeção do aço inoxidável no alumínio encontram-se representados na Figura 4.21.

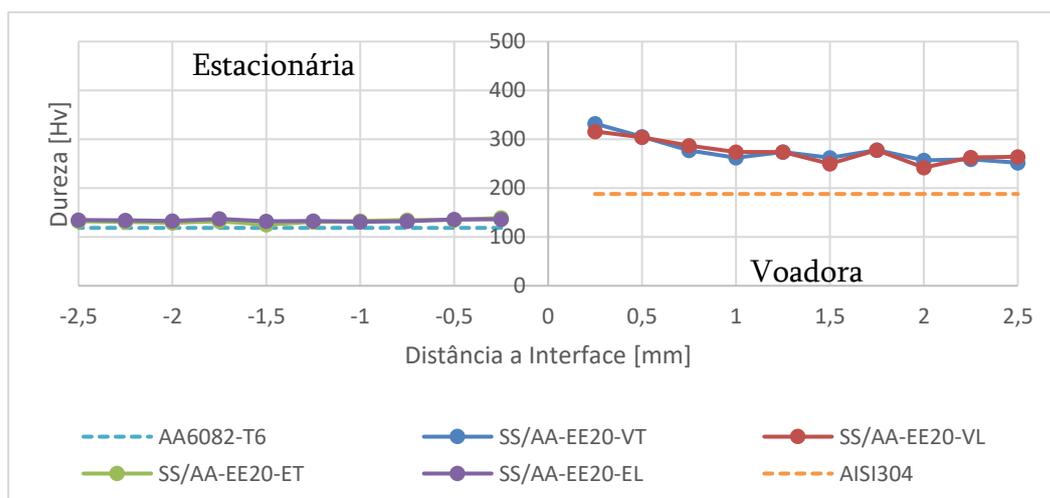


Figura 4.21. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio com a configuração SS/AA

No gráfico é possível observar a variação da microdureza ao longo do perfil para ambas as placas e ainda a sua comparação com o material base.

Para a placa voadora observa-se que ocorreu uma grande variação da microdureza, sendo mais acentuada próxima da interface, devido a ocorrência de maiores deformações junto a interface, levando a uma diferença de 144 HV relativamente ao material base. Ao longo do perfil também se observou uma grande variação da microdureza, sendo a diferença entre os valores máximo e mínimo de 80 HV. Ente as medições na direção longitudinal e transversal não foi observada diferença significativa.

Na placa estacionária a variação da microdureza é menor e mantém-se razoavelmente constante ao longo do perfil, sendo observada uma microdureza média de 133 HV. Esta menor variação deve-se ao facto de o alumínio não sofrer endurecimento por deformação, apenas por tratamento térmico.

4.5.2. Configuração AA/SS

4.5.2.1. AA/SS-PE15

Na Figura 4.22 está representado o perfil de microdureza relativo ao ensaio AA/SS-PE15, onde se pode observar que a diferença entre os dois perfis de microdureza longitudinal e transversal da amostra é pouco significativa.

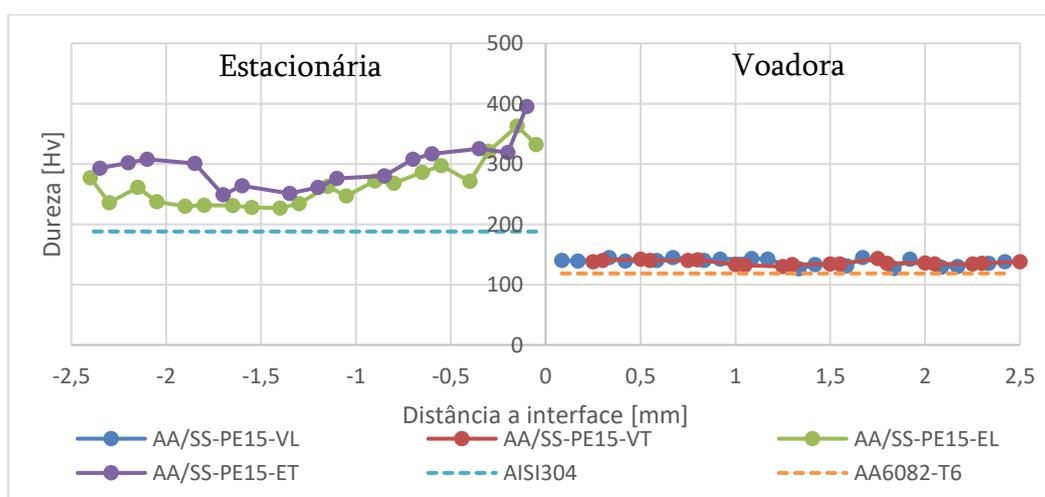


Figura 4.22. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/SS-PE15.

Ao relacionar o perfil de microdureza deste ensaio com o da configuração SS/AA observamos que o alumínio mantém um perfil de microdureza constante em ambos os casos e com valores de microdureza semelhantes, ao contrário do aço inoxidável que quando é projetado tem um perfil de microdureza quase linear e tem um endurecimento inferior. O alumínio apresentou uma microdureza média de 137 HV e o aço inoxidável registou um máximo de 395 HV nas proximidades da interface.

4.5.2.2. AA/SS-A20

Para este ensaio foi utilizada a mesma configuração que no ensaio anterior, sendo a única diferença ao nível do explosivo utilizado, sendo usado um explosivo diferente e com maior espessura. Na Figura 4.23 é possível observar o perfil de microdurezas nas direções longitudinal e transversal para o ensaio.

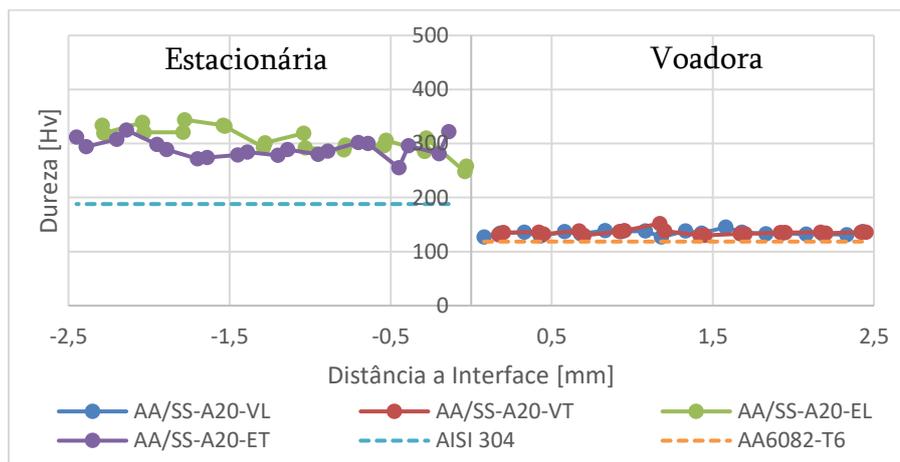


Figura 4.23. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/SS-A20.

Ao relacionar este ensaio com o anterior da mesma configuração, observamos que o perfil de microdureza para a placa estacionária de aço inoxidável é muito diferente do anterior, mantendo um perfil de microdureza bastante constante em todo o perfil, sendo observado os valores de microdureza maiores nas proximidades da extremidade oposta a interface, com o valor máximo de 344 HV, em oposição ao observável no ensaio anterior. Para a placa voadora de alumínio observa-se que o perfil não sofreu grandes alterações relativamente ao material base, tendo apenas aumentado a microdureza residualmente, tendo uma microdureza média de 134,9 HV.

4.5.3. Configuração AA/AA/SS

4.5.3.1. AA/AA/SS-A25

Na Figura 4.24 encontra-se representado o gráfico relativo ao perfil de microdureza do ensaio AA/AA/SS-A25, no qual é possível observar as microdurezas relativas ao perfil longitudinal e transversal. Para este ensaio observou-se que o aumento de microdureza nas ligas de alumínio AA6082-T6 e AA1050 não foi muito significativo, em que a microdureza média é de 130,7 HV e 47,5 HV, respetivamente. Relativamente ao aço inoxidável, observou-se um aumento de microdureza localizado perto da interface, tendo atingido o valor de 457 HV.

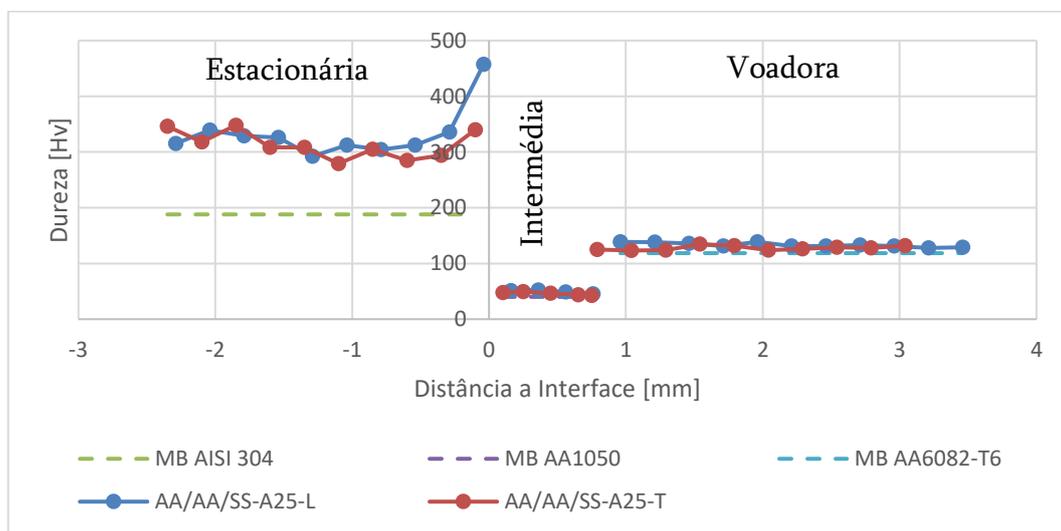


Figura 4.24. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/AA/SS-A25.

4.5.3.2. AA/AA/SS-PE15

Na Figura 4.25 está representado o perfil de microdurezas para o ensaio AA/AA/SS-PE15 no qual são indicadas as curvas relativas ao perfil longitudinal e transversal.

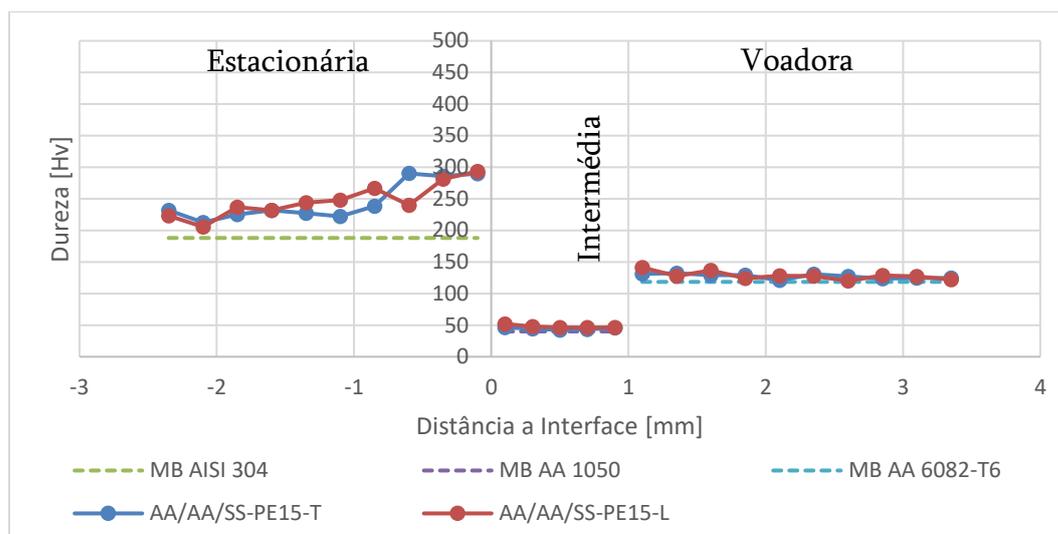


Figura 4.25. Perfis de microdureza obtidos na placa voadora e estacionária no ensaio AA/AA/SS-PE15.

É possível observar relativamente ao ensaio anterior que a placa estacionária de aço inoxidável sofreu um endurecimento menor, tendo um máximo de 293,4 HV. Relativamente às placas de alumínio, AA6082-T6 e AA1050, o perfil de microdureza é pouco variável ao longo do perfil, tendo como valores de microdureza médios de 127,9 HV e 46,1 HV, respetivamente.

4.5.4. Discussão de resultados

Na Tabela 4.7 estão indicados os valores de microdureza relativos aos ensaios em que não se usou placa intermédia. De modo a efetuar uma comparação entre os vários materiais utilizados, o aumento de microdureza foi colocado em percentagem. Deste modo é possível comparar os vários materiais, onde se observa que o material onde ocorreu um maior aumento de microdureza foi o aço inoxidável.

Tabela 4.7 Medidas de microdureza relativos aos ensaios sem placa intermédia

		SS/AA-EE20	AA/SS-PE15	AA/SS-A20
AA6082-T6	Microdureza média [HV]	132,6	137,0	134,9
	Aumento médio [%]	11,9	15,6	13,8
	Aumento máximo [%]	17,3	22,4	28,3
AISI 304	Microdureza média [HV]	275,5	278,9	299,0
	Aumento médio [%]	46,5	48,4	59,1
	Aumento máximo [%]	76,6	110,1	83,0

Na Tabela 4.8 estão indicados os valores de microdureza relativos aos ensaios em que foi introduzida a placa intermédia. Nestes ensaios verificou-se que o aço inoxidável continua a ser o material mais influenciado ao nível do aumento da microdureza, em que se

verificou um aumento muito acentuado da microdureza. Relativamente as ligas de alumínio utilizadas, observa-se que não ocorreram grandes variações ao nível da microdureza.

Tabela 4.8 Medidas de microdureza relativos a ensaios com placa intermédia

		AA/AA/SS-A25	AA/AA/SS-PE15
AA6082-T6	Microdureza média [HV]	130,7	127,9
	Aumento médio [%]	10,3	7,9
	Aumento máximo [%]	17,3	19,1
AA1050	Microdureza média [HV]	45,7	46,1
	Aumento médio [%]	18,6	15,0
	Aumento máximo [%]	30,0	30,0
AISI 304	Microdureza média [HV]	322,7	246,2
	Aumento médio [%]	71,6	30,9
	Aumento máximo [%]	143,1	56,1

Pela análise dos dados indicados nas tabelas acima, conclui-se que as ligas de alumínio utilizadas neste trabalho não sofrem grande variação ao nível da microdureza, enquanto que o aço inoxidável possui uma grande variação no que se refere a este parâmetro, como já seria de esperar, pois neste procedimento são aplicadas grandes deformações a frio, o principal mecanismo de endurecimento do aço inoxidável.

4.6. Ensaios de tração / corte

Os ensaios em que foi utilizada a placa intermédia foram os únicos a partir dos quais foi possível a obtenção de provetes, sendo para o estudo em questão, obtidos seis provetes para os ensaios de tração / corte, três de cada soldadura. Para estes provetes foram analisadas as curvas de tensão-alongamento para cada ensaio, como indicado na Figura 4.26.

Há uma grande diferença entre os provetes retirados do ensaio AA/AA/SS-A25 e do AA/AA/SS-PE15, sendo que é possível visualizar uma maior tensão suportada para o ensaio realizado com ANFO.

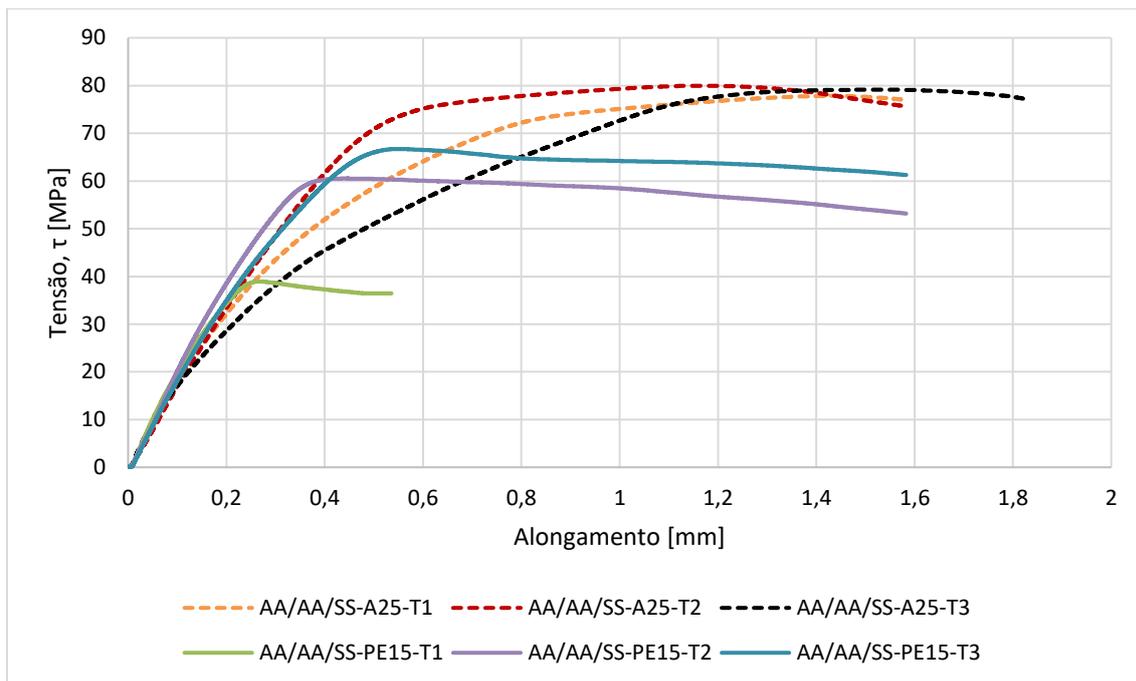


Figura 4.26. Curva tensão-alongamento para os ensaios de tração ao corte realizados.

Na Tabela 4.9 estão indicadas as tensões máximas obtidas, o alongamento na tensão máxima e local de rotura para cada provete.

Tabela 4.9 Resultados dos ensaios de tração

Provete	Tensão máxima [MPa]	Alongamento da tensão máxima [mm]	Local de rotura
AA/AA/SS-A25-T1	77,8	1,45	Placa intermédia
AA/AA/SS-A25-T2	80,0	1,17	Placa intermédia
AA/AA/SS-A25-T3	79,1	1,53	Placa intermédia
AA/AA/SS-PE15-T1	39,0	0,27	Interfaces e placa intermédia
AA/AA/SS-PE15-T2	60,5	0,44	Interfaces e placa intermédia
AA/AA/SS-PE15-T3	66,7	0,54	Interface

Na Figura 4.27 estão representados os mapeamentos das deformações locais de Von-Mises no momento que antecipou a fratura dos provetes para o ensaio AA/AA/SS-A25. Nestes provetes é possível observar uma secção de corte diagonal na placa intermédia, o que provoca o corte de material na secção não pertencente às interfaces de soldadura

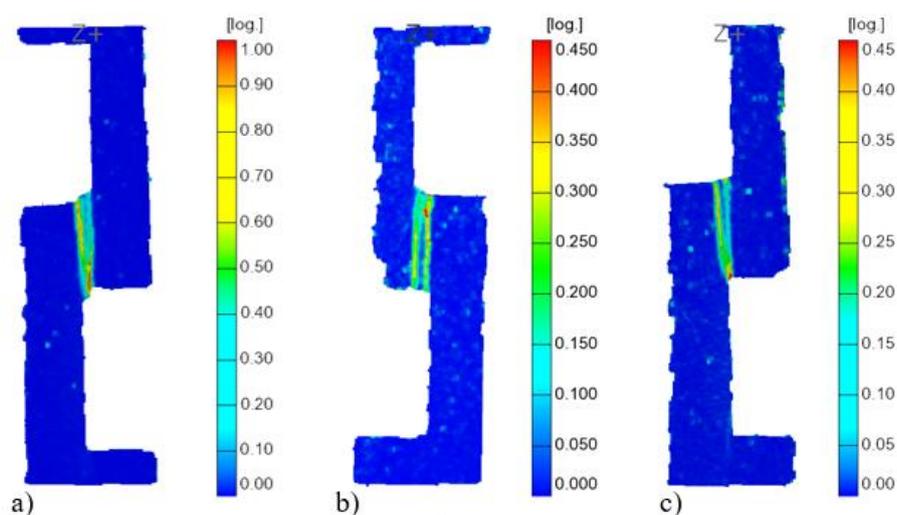


Figura 4.27. Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/AA/SS-A25: a) T1; b) T2; c) T3.

Na comparação dos três ensaios da soldadura realizada com ANFO não é observável grande diferença, tendo todos obtido um comportamento semelhante, tanto ao nível das tensões já indicadas anteriormente, como ao nível das deformações locais de Von-Mises, apenas se destacando o provete AA/AA/SS-A25-T1, que obteve uma maior deformação antes de atingir a rotura.

Com estes resultados conclui-se que as ligações formadas entre os vários materiais são mais resistentes que o material utilizado como placa intermédia, neste caso, a liga de alumínio AA1050.

Na Figura 4.28 apresenta-se a análise EDS realizada à superfície de corte, onde é possível observar que a composição do espectro é essencialmente de alumínio, verificando-se assim que a rotura aconteceu na liga de alumínio AA1050.

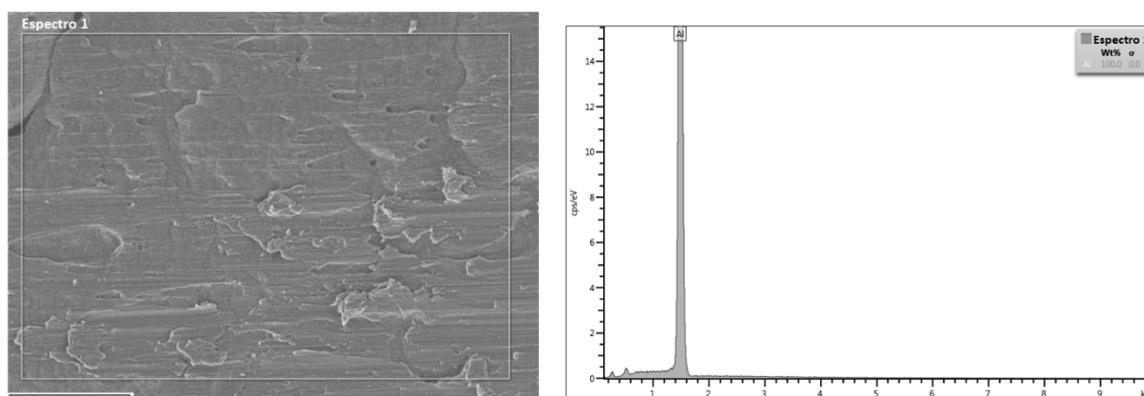


Figura 4.28. Análise EDS dos provetes de tração ao corte do ensaio AA/AA/SS-A25: a) Macrográfia da interface; b) Composição do espectro.

Na Figura 4.29 é indicada a análise de SEM realizada à superfície de corte deste ensaio, observando-se a formação de *dimples* de corte, o que demonstra que o tipo de rotura que se desenvolveu no ensaio AA/AA/SS-A25 é do tipo dúctil.

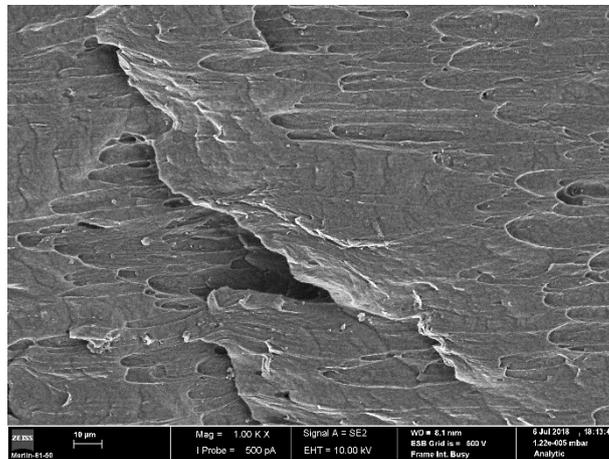


Figura 4.29. Análise SEM à superfície de fratura do provete AA/AA/SS-A25

Para os provetes provenientes do ensaio AA/AA/SS-PE15 observa-se uma grande variação nas secções de corte, tendo três tipos de rotura, arrancamento nas interfaces entre as ligas de alumínio, entre a liga de alumínio AA1050 e aço inoxidável e corte diagonal na placa intermédia. A análise macroscópica destes provetes é ilustrada na Figura 4.30 onde são indicadas quais as áreas onde ocorreu cada tipo de rotura. O arrancamento na interface dos alumínios é referenciado com a letra “A”, o corte diagonal na liga de alumínio AA1050 com a letra “B” e a rotura na interface entre o aço inoxidável e a liga de alumínio AA1050 com a letra “C”.

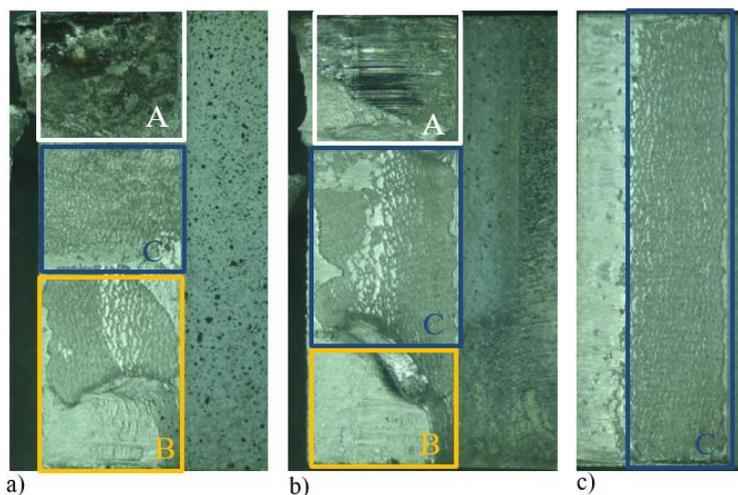


Figura 4.30. Análise macrográfica dos provetes do ensaio AA/AA/SS-PE15 com o tipo de rotura indicados: a) T1; b) T2; c) T3.

Na análise SEM realizada para estes provetes, indicada na Figura 4.31 são observadas as várias superfícies de fratura, sendo indicada na Figura 4.31a) a zonas com formação de alvéolos, que indica locais onde ocorreu rotura dúctil da superfície; na Figura 4.31 b) observa-se uma zona de elevada deformação de corte, com *dimples* alongados e na Figura 4.31c) é indicada uma zona de rotura frágil característica da rotura na camada de compostos intermetálicos.

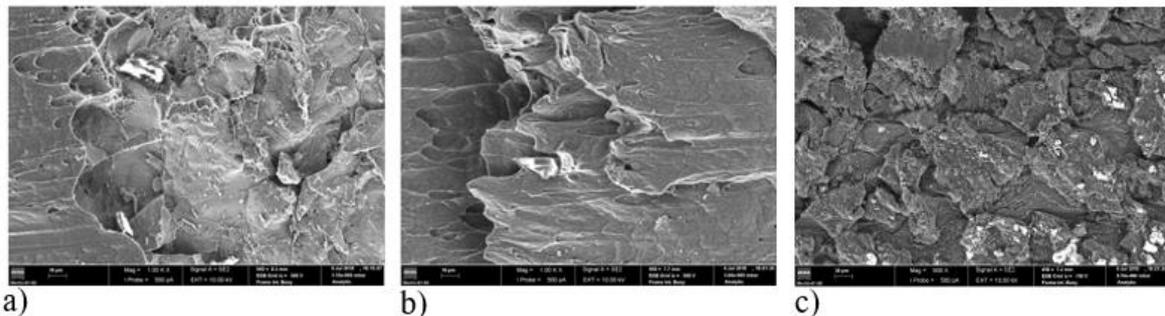


Figura 4.31. Análise SEM à superfície de fratura do provete AA/AA/SS-PE15: a) Zona dos alvéolos; b) *Dimples* de corte; c) Zona de fratura frágil.

Os mapeamentos das deformações locais de Von-Mises no momento que antecedeu a fratura dos provetes retirados da soldadura AA/AA/SS-PE15 para este ensaio estão indicados na Figura 4.32.

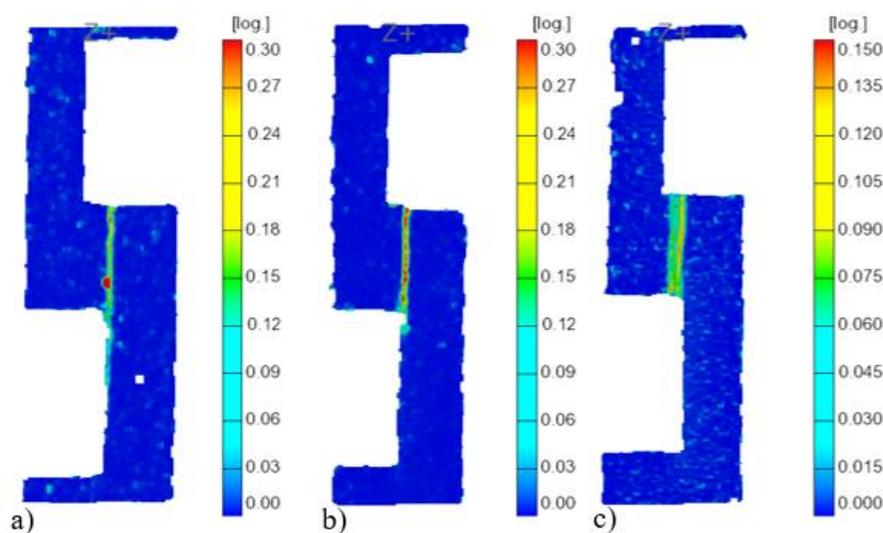


Figura 4.32. Deformações locais de Von-Mises para os provetes do ensaio AA/AA/SS-PE15: a) T1; b) T2; c) T3

Relativamente ao mapeamento das deformações locais de Von-Mises, os dados obtidos apenas se podem aplicar a toda a secção transversal no caso do provete AA/AA/SS-PE15-T3 pois foi o único em que se observou uma secção constante de corte. Para os

restantes provetes, as deformações apenas se podem aplicar a uma parte do provete, nomeadamente a rotura na interface entre as ligas de alumínio.

5. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho é estudar o efeito da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável e o trabalho realizado permitiu retirar as seguintes conclusões:

A configuração aço inoxidável sobre alumínio não permitiu obter soldadura;

Os ensaios que se encontram acima da janela de soldabilidade não produziram ligação e formaram uma camada continua de compostos intermetálicos na interface;

Em todos os ensaios realizados foi observada a formação de compostos intermetálicos na interface;

Para ensaios com velocidades de detonação semelhantes, a espessura da camada de intermetálicos é superior quando se aumenta o rácio de explosivo;

Nos ensaios em que se observa ondas a amplitude destas depende diretamente do rácio de explosivo utilizado;

A utilização da placa intermédia de alumínio possibilitou a obtenção de soldadura com qualidade.

- **Propostas para trabalhos futuros:**

De modo a poder aprofundar o estudo do efeito da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável sugere-se a utilização de placas intermédias de chumbo ou de nióbio com vista a verificar se estes impedem a formação de compostos intermetálicos na interface;

Utilização de outros explosivos com menor velocidade de detonação;

Incorporação da configuração inclinada nos ensaios realizados, pois esta configuração permite obter uma velocidade de impacto e velocidade do ponto de colisão inferior;

Executar uma análise pormenorizada da janela de soldabilidade com a realização de ensaios em que se obtenha as condições referentes aos quatro limites da janela, de modo a poder testar a exatidão da utilização da janela de soldabilidade;

Verificar a validade da utilização do conceito de janela de soldabilidade em soldaduras com placa intermedia;

Para os ensaios futuros em que o explosivo a utilizar seja ANFO, efetuar a mistura de nitrato de amónio com combustível no LEDAP, de modo a obter sempre as mesmas propriedades físicas para o explosivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahamson, GR. "Permanent Periodic Surface Deformations Due to a Traveling Jet." *Journal of Applied Mechanics*, 1961, pp. 519–28, doi:10.1115/1.3641777.
- Aceves, S. M. et al. "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*, 2015, doi:10.1016/j.ijhydene.2014.11.038.
- A.S.M. Handbook, Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Specialpurpose Materials, 10th ed. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 1990.
- Bahrani, A. S., et al. "The Mechanics of Wave Formation in Explosive Welding." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 296, no. 1445, 1967, pp. 123–36, doi:10.1098/rspa.1967.0010.
- Bichenkov, Ye. I., et al. "Explosion Welding." *Annual Review of Materials Science*, vol. 6, 1975, pp. 177–200, doi:10.1146/annurev.ms.05.080175.001141.
- Blazynski, T. Z. *Explosive Welding, Forming and Compaction*. 1983, <https://books.google.com/books?id=bUrqCAAAQBAJ&pgis=1>.
- Carton, E. "Wave Forming Mechanisms in Explosive Welding." *Materials Science Forum*, vol. 465–466, 2004, pp. 219–24, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.465-466.219.
- Carvalho, G. H. S. F. L., et al. "Effect of the Flyer Material on the Interface Phenomena in Aluminium and Copper Explosive Welds." *Materials and Design*, vol. 122, Elsevier Ltd, 2017, pp. 172–83, doi:10.1016/j.matdes.2017.02.087.
- Chou, P. C., and Flis, W. J., "Recent Developments in Shaped Charge Technology." *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 11, no. 4, 1986, pp. 99–114, doi:10.1002/prop.19860110402.
- Cooper, P. W., *Explosives Engineering*. 1997.
- Cowan, G. R., et al. "Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosion-Clad Metals." *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 2, no. 11, 1971, pp. 3145–55, doi:10.1007/BF02814967.
- Cowan, G. R., and Holtzman, A. H., "Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding." *Journal of Applied Physics*, vol. 34, no. 4, 1963, pp. 928–39, doi:10.1063/1.1729565.
- Cutter, D., "What You Can Do With Explosion Welding." *Welding Journal*, vol. 85, no. July, 2006, pp. 38–43.
- De Rosset, W. S. "Analysis of Explosive Bonding Parameters." *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 21, no. 6, 2006, pp. 634–38, doi:10.1080/10426910600611136.

- Deribas, A. A., and Zakharenko. I. D. "Surface Effects with Oblique Collisions between Metallic Plates." *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 10, no. 3, 1974, pp. 358–67, doi:10.1007/BF01463767.
- Durgutlu, A., et al. "Examination of Copper/Stainless Steel Joints Formed by Explosive Welding." *Materials and Design*, vol. 26, no. 6, 2005, pp. 497–507, doi:10.1016/j.matdes.2004.07.021.
- Elango, E., et al. "Effect of Post Weld Heat Treatment on Al 5052-SS 316 Explosive Cladding with Copper Interlayer." *Materials Science Forum*, vol. 910 MSF, 2017, pp. 35–40, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.910.35.
- Eta, V. Philipchuk. *March 13, 1962*. 1962.
- Findik, F.. "Recent Developments in Explosive Welding." *Materials and Design*, vol. 32, no. 3, Elsevier Ltd, 2011, pp. 1081–93, doi:10.1016/j.matdes.2010.10.017.
- Gulenc, B. "Investigation of Interface Properties and Weldability of Aluminum and Copper Plates by Explosive Welding Method." *Materials and Design*, vol. 29, no. 1, 2008, pp. 275–78, doi:10.1016/j.matdes.2006.11.001.
- Gurney, R. W. "The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shell, Grenades." *Development*, no. 14, 1943.
- Han, J. H., et al. "Effect of Interlayer Thickness on Shear Deformation Behavior of AA5083 Aluminum Alloy/SS41 Steel Plates Manufactured by Explosive Welding." *Journal of Materials Science*, 2003, doi:10.1023/A:1021197328946.
- Hokamoto, K., et al. "New Explosive Welding Technique to Weld." *Metallurgical Transactions A*, vol. 24, no. 10, 1993, pp. 2289–97, doi:10.1007/BF02648602.
- Hunt, J. N. "Wave Formation in Explosive Welding." *Philosophical Magazine*, vol. 17, no. 148, 1968, pp. 669–80, doi:10.1080/14786436808223020.
- Kahraman, N., et al. "Joining of Titanium/Stainless Steel by Explosive Welding and Effect on Interface." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, no. 2, 2005, pp. 127–33, doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.045.
- Kennedy, J. E. "Gurney Energy of Explosives: Estimation of the Velocity and Impulse Imparted to Driven Metal." *Report No. SC-RR-70-790*, 1970.
- Manikandan, P., et al. "Control of Energetic Conditions by Employing Interlayer of Different Thickness for Explosive Welding of Titanium/304 Stainless Steel." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 195, no. 1–3, 2008, pp. 232–40, doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.05.002.
- Mendes, R., et al. "Differences between the Detonation Behavior of Emulsion Explosives Sensitized with Glass or with Polymeric Micro-Balloons." *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 500, no. 5, 2014, doi:10.1088/1742-6596/500/5/052030.
- Mendes, R., et al. "Effect of Explosive Characteristics on the Explosive Welding of Stainless Steel to Carbon Steel in Cylindrical Configuration." *Materials and Design*, vol. 51, Elsevier Ltd, 2013, pp. 182–92, doi:10.1016/j.matdes.2013.03.069.
- Reid, S. R. "A Discussion of the Mechanism of Interface Wave Generation in Explosive Welding." *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 16, no. 6, 1974, pp.

- 399–400, doi:10.1016/0020-7403(74)90014-9.
- Reza, M., et al. “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*, vol. 20, no. 2, 2017, pp. 291–302, doi:10.1590/1980-5373-MR-2016-0516.
- Ribeiro, J. B., et al. “Review of the Weldability Window Concept and Equations for Explosive Welding.” *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, doi:10.1088/1742-6596/500/5/052038.
- Robinson, J. L. “The Mechanics of Wave Formation in Impact Welding.” *Philosophical Magazine*, vol. 31, no. 3, 1975, pp. 587–97, doi:10.1080/14786437508226540.
- Srivastava, Niraj, et al. *Explosive Welding of SS304 and Al6061 Using Copper as Interlayer – Development of Trial Methodology and Its Optimisation*. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.830-831.306.
- Sun, X. J., et al. “Bonding Properties of Interface in Fe/Al Clad Tube Prepared by Explosive Welding.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 21, no. 10, The Nonferrous Metals Society of China, 2011, pp. 2175–80, doi:10.1016/S1003-6326(11)60991-6.
- Walsh, J. M., et al. “Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions.” *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 3, 1953, pp. 349–59, doi:10.1063/1.1721278.

APÊNDICE A

- Equipamentos utilizados para cada tarefa

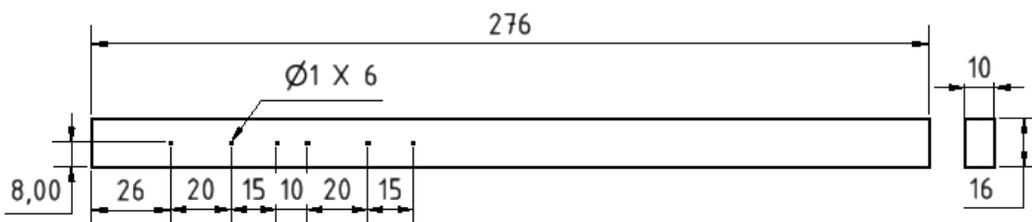
Tarefa	Equipamento
Realização de soldaduras	Camara de detonação do LEDAP
Medição de velocidade	Osciloscio digital LeCry WAvejet 352; HP universal counter 5334B
Análise microestrutural	Microscopio ótico Leica DM 4000 MLED, com câmara incluída Leica MC 120HD. Cujo resisto fotográfico é realizado no software Leica <i>Application suite</i>
Medição de espessura da camada intermetálica	Software de medição <i>ImageJ</i>
Análise SEM/EDS	Microscópio eletrónico de varrimento <i>Zeiss-Gemini 2 (SEM-Scanning Electron Microscope)</i>
Avaliação de microdurezas	Microdurómetro <i>Struers-Duramin 2</i>
Ensaio de tração/corte	SHIMADZU AGS-X 100kNXplus; Sistema ótico ARAMIS da GOM – <i>Optical measuring techniques</i>

- Conversão da nomenclatura geral para a usada nesta dissertação

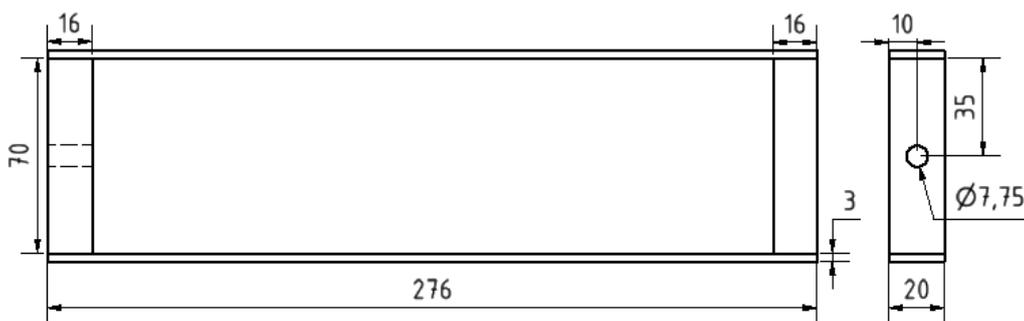
Nomenclatura Geral	EW36	EW37	EW39	EW41	EW45
Nomenclatura utilizada nesta dissertação	SS/AA-EE20	AA/SS-PE15	AA/SS-A20	AA/AA/SS-A25	AA/AA/SS-PE15

APÊNDICE B

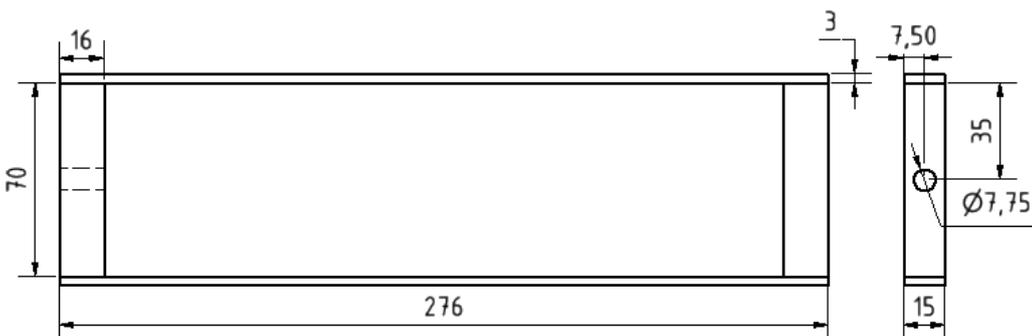
- Suporte sondas



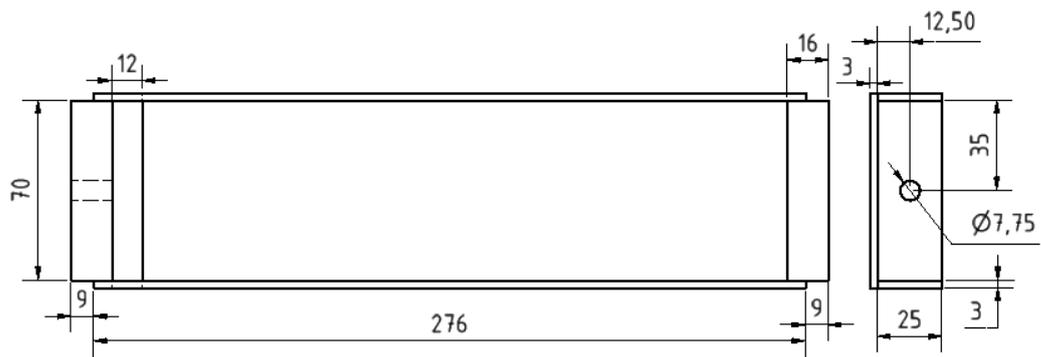
- Caixa para o ensaio SS/AA-EE20 e AA/SS-A20



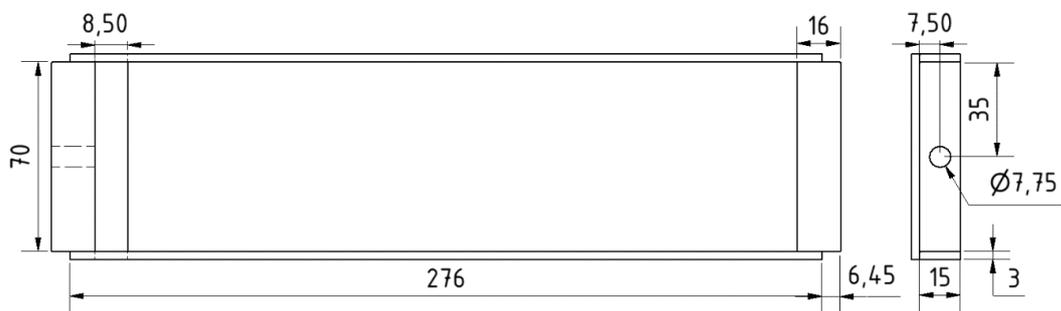
- Caixa para o ensaio AA/SS-PE15



- Caixa para o ensaio AA/AA/SS-A25

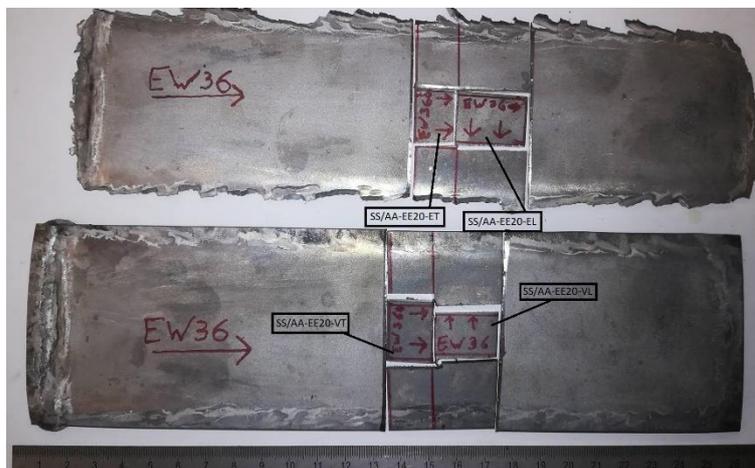


• Caixa para o ensaio AA/AA/SS-PE15



APÊNDICE C

- Local das amostras colocadas em resina do ensaio SS/AA-EE20



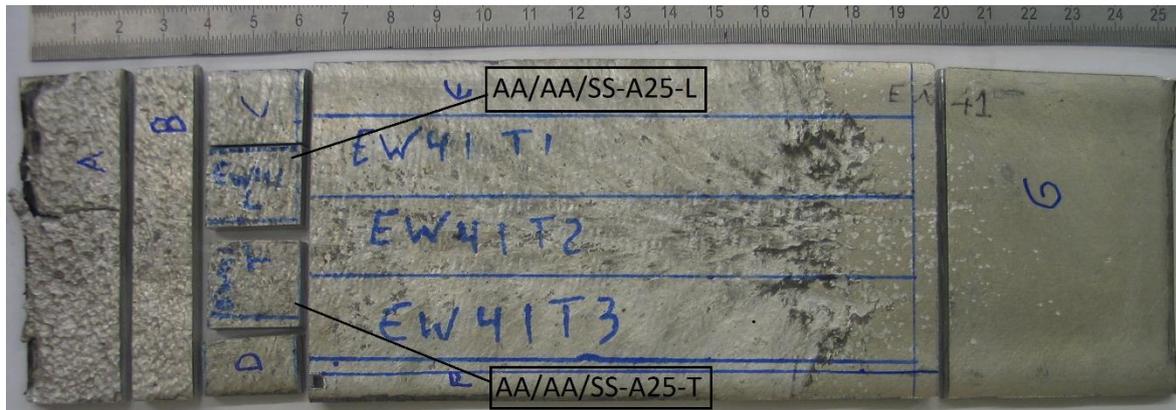
- Local das amostras colocadas em resina do ensaio AA/SS-PE15



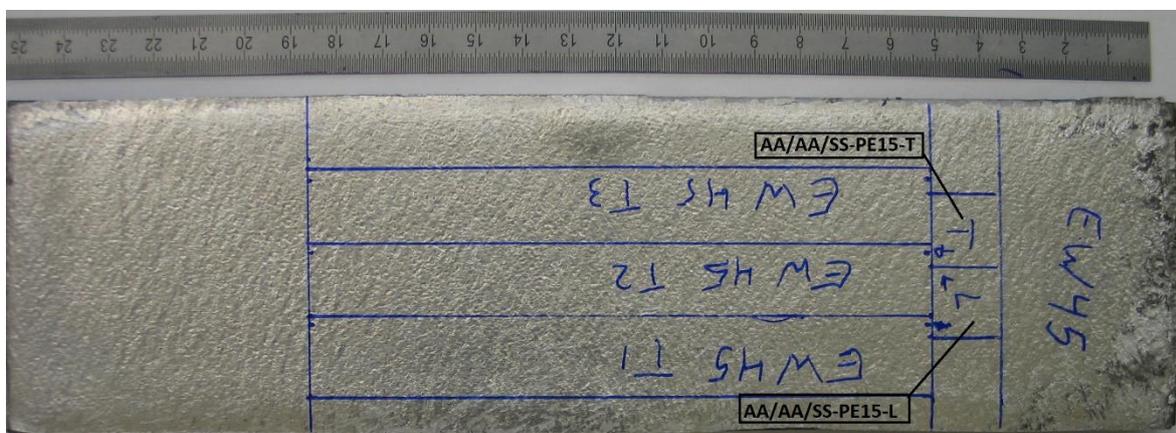
- Local das amostras colocadas em resina do ensaio AA/SS-A20



- Local das amostras colocadas em resina do ensaio AA/AA/SS-A25



- Local das amostras colocadas em resina do ensaio AA/AA/SS-PE15

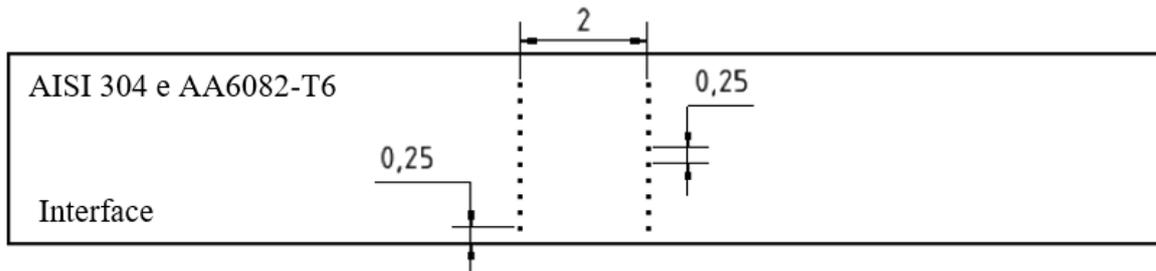


- Nomenclatura das amostras

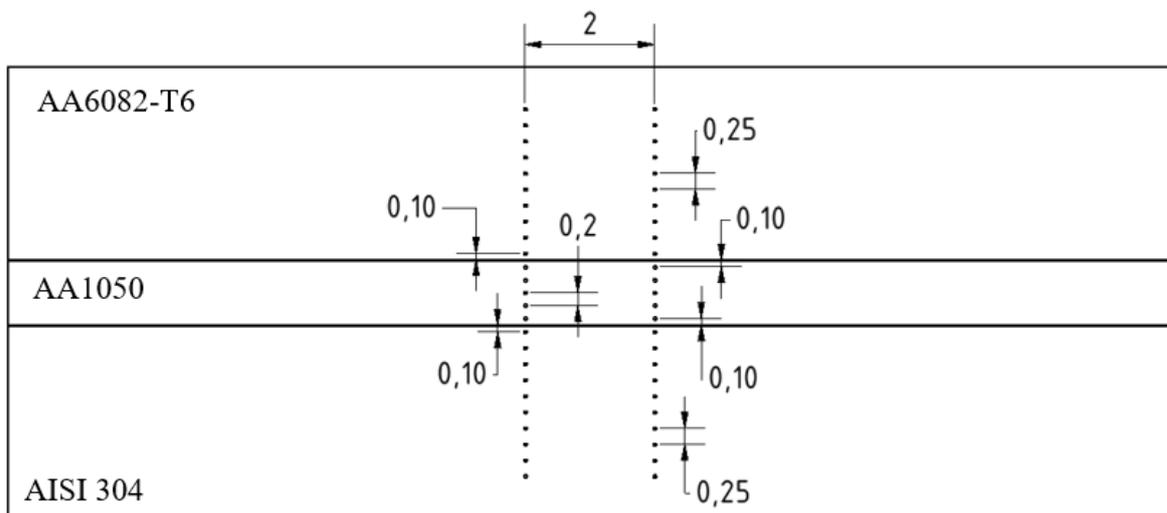
Nomenclatura Geral	Nomenclatura utilizada nesta dissertação	Nomenclatura Geral	Nomenclatura utilizada nesta dissertação
EW36BL	SS/AA-EE20-EL	EW39L	AA/SS-A20-L
EW36BT	SS/AA-EE20-ET	EW39BT	AA/SS-A20-ET
EW36FL	SS/AA-EE20-VL	EW39FT	AA/SS-A20-VT
EW36FT	SS/AA-EE20-VT	EW41L	AA/AA/SS-A25-L
EW37BL	AA/SS-PE15-EL	EW41T	AA/AA/SS-A25-T
EW37BT	AA/SS-PE15-ET	EW45L	AA/AA/SS-PE15-L
EW37FL	AA/SS-PE15-VL	EW45T	AA/AA/SS-PE15-T
EW37FT	AA/SS-PE15-VT		

APÊNDICE D

- SS/AA-EE20, AA/SS-PE15 e AA/SS-A20

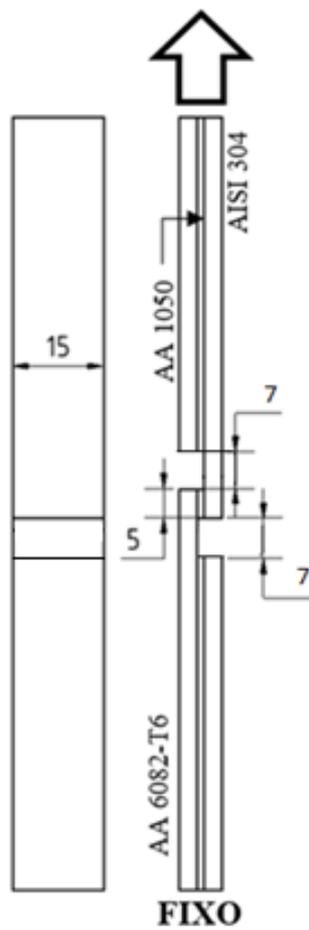


- AA/AA/SS-A25 e AA/AA/SS-PE15



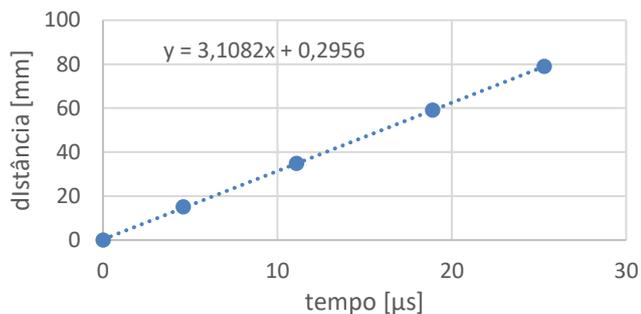
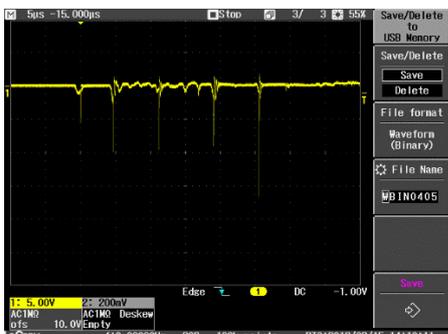
APÊNDICE E

- Desenho dos provetes para os ensaios de tração ao corte

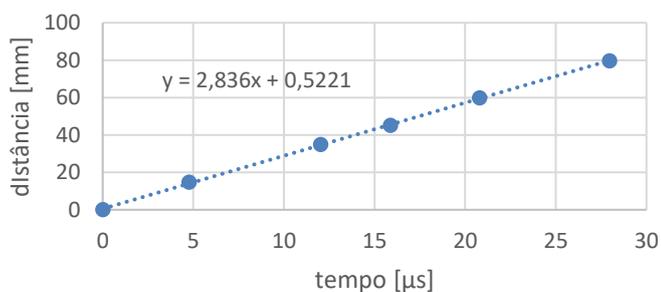
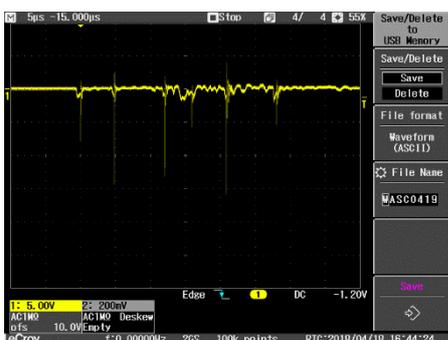


APÊNDICE F

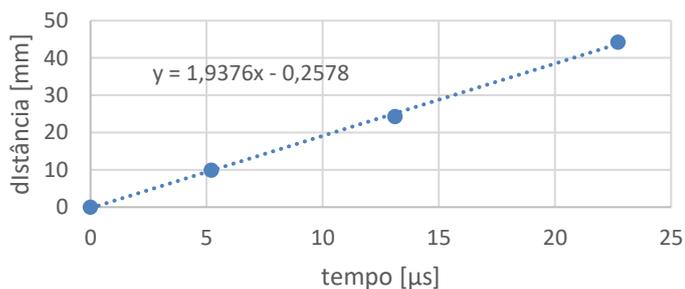
- **SS/AA-EE20**



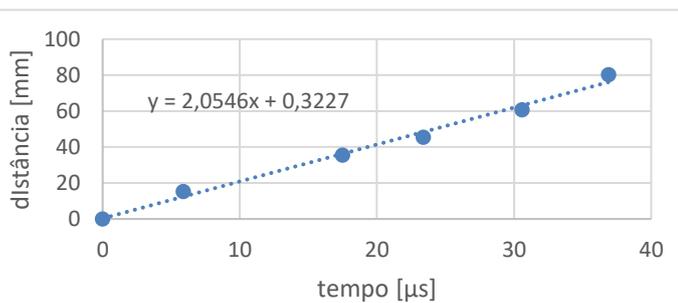
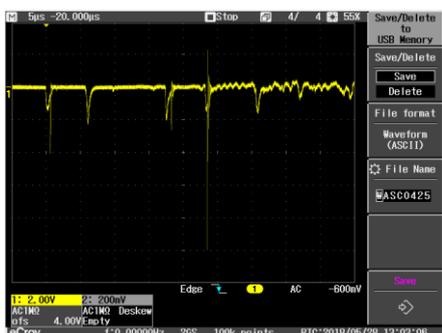
- **AA/SS-PE15**



- **AA/AA/SS-A25**



- **AA/AA/SS-PE15**

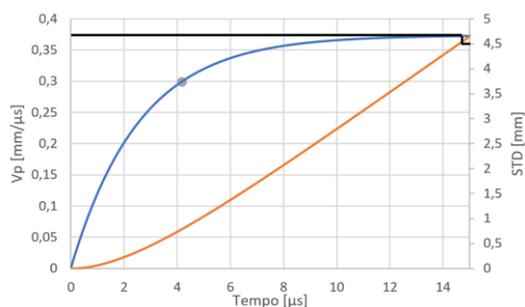


APÊNDICE G

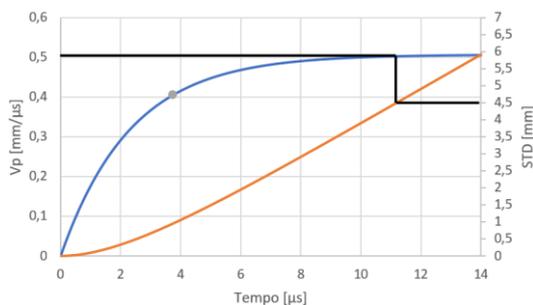
- **Parâmetros necessários para a obtenção dos gráficos de velocidade de impacto e deslocamento em função do tempo**

	SS/AA-EE20	AA/SS-PE15	AA/SS-A20	AA/AA/SS-A25	AA/AA/SS-PE15
$\sqrt{2E}$ [m/s]	1046,5	954,9	652,4	652,4	691,8
P_{cj} [GPa]	7,0	7,0	5,0	5,0	7,0
$V_{p,Gurney}$ [m/s]	374,0	507,3	538,8	589,0	357,0
$V_{p,cal}$ [m/s]	299,2	405,8	431,0	471,2	285,6
$T_{Vp,cal}$ [μ s]	4,16	3,75	3,75	3,75	3,75
τ [μ s]	2,58	2,33	2,33	2,33	2,33
C_1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
C_2	2,58	2,33	2,33	2,33	2,33
V_{p1} [m/s]	372,7	503,1	533,2	580,7	356,4
V_{p2} [m/s]	-----	-----	-----	503,6	308,3

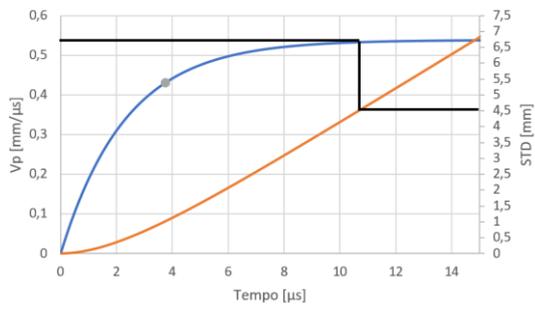
- **Velocidade de impacto do ensaio SS/AA-EE20**



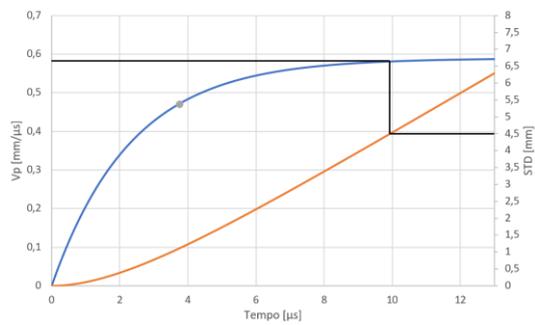
- **Velocidade de impacto do ensaio AA/SS-PE15**



- **Velocidade de impacto do ensaio AA/SS-A20**



- **Velocidade de impacto do ensaio AA/AA/SS-A25**



- **Velocidade de impacto do ensaio AA/AA/SS-PE15**

