



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Soldaduras Similares e Dissimilares, por Explosão, de AA 6082-T6 e Aço AISI 304

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

Similar and Dissimilar Explosion Welds of AA 6082-T6 and AISI 304

Autor

José Pedro dos Santos Nogueira Aguilar Nunes

Orientadores

Altino de Jesus Roque Loureiro

Ricardo António Lopes Mendes

Júri

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

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

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

Coimbra, Setembro, 2016

“O objetivo de vida de um homem não é viver sem problemas, é viver
entusiasmado”

Um individuo qualquer, num dado instante de tempo.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Altino Loureiro, possuidor de grandes qualidades didáticas, transmitindo facilmente o seu vasto conhecimento, agradeço todo o seu apoio, assim como a sua maneira invulgar de estimular as pessoas a serem rigorosas. Todos os seus ensinamentos foram sem dúvida valiosos.

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes, agradeço o seu incrível apoio na parte experimental. Mostrou-me que o rigor tem que ser uma constante em qualquer tipo de trabalho e que devemos procurar sempre evoluir não só a nível do método de trabalho mas também a nível do conhecimento.

Ao Professor Doutor Rui Leal, agradeço todo o apoio prestado, a sua boa disposição e o seu sentido crítico, que me levou a confirmar sempre os dados que eu tinha como garantidos.

Ao LEDAP, pela disponibilização dos meios para a realização do trabalho experimental.

Ao Doutor Carlos Leitão e à Engenheira Inês, agradeço pelos esclarecimentos no laboratório e de todas as outras dúvidas. Grato também pela vossa boa disposição.

Aos meus colegas da “sala do conhecimento”, pela boa disposição, em especial ao David e ao Cláudio por todas as vezes que me lembraram a *password* dos computadores.

Ao Daniel Vitorino, agradeço pelo trabalho que fizemos em equipa.

Ao Gustavo Senna Carvalho, por toda a ajuda, disponibilidade e esclarecimentos ao longo de todo o desenrolar do trabalho, e pela amizade demonstrada.

Ao Senhor Fernando o meu profundo agradecimento. Foi, sem dúvida, um elemento indispensável à realização da parte experimental, ajudando-me todas as vezes que necessitei. Estou-lhe grato pela disponibilidade que sempre demonstrou e também pela sua boa disposição.

Aos meus amigos, sem eles este percurso não tinha o mesmo sabor.

Aos meus pais. À minha irmã, por ser quem é.

À minha mãe, por tudo.

Obrigado a todos.

Resumo

O Alumínio e o Aço são dos materiais mais utilizados industrialmente. Cada um apresenta propriedades extremamente úteis, o Alumínio tem elevada resistência à corrosão e baixa densidade, e o Aço possui elevada resistência mecânica, elevada resistência a altas temperaturas e, para o caso do Aço Inoxidável, alta resistência à corrosão também.

Devido à elevada diferença entre as suas temperaturas de fusão, a combinação destes dois materiais por processos de soldadura por fusão, ditos convencionais, é impossível.

O objetivo deste trabalho é iniciar o estudo da ligação destes dois materiais através do processo de soldadura por explosão. Já era conhecida a dificuldade de obter ligação entre estes dois materiais através da configuração plana convencional. Ainda assim, tratando-se de uma primeira abordagem, foi a configuração utilizada para perceber as dificuldades existentes na ligação destes dois materiais.

Foi construída a Janela de Soldabilidade, para ligação similar Alumínio-Alumínio e dissimilar Alumínio-Aço, para melhor preparar as condições experimentais. Foram realizados cinco ensaios, onde o Alumínio foi sempre o material projetado. Em dois destes ensaios foi obtida ligação entre as placas, ainda assim, uma ligação de baixa resistência. Apenas um dos ensaios se localizou dentro da Janela de Soldabilidade mas não apresentou ligação. Foi dado maior ênfase ao estudo da ligação dissimilar Alumínio-Ferro.

Foram utilizadas três composições de explosivo. A composição apenas de ANFO, sigla para *Ammonium Nitrate Fuel Oil*, não apresentou uma detonação completa e apresentou a menor velocidade de detonação. As outras composições, (ANFO+Eex) e (ANFO+(Eex+DE)), sendo Eex a abreviatura para emulsão explosiva e DE a designação para micro-esferas ocas de polímero, apresentaram detonação homogénea, registando-se a maior velocidade de detonação para a composição (ANFO+(Eex+De)). Apenas nos ensaios onde se utilizaram as composições ANFO e (ANFO+Eex) se obteve ligação. Ainda assim, nenhuma das composições utilizadas é ótima para o resultado final pretendido, uma soldadura por explosão com qualidade.

Verificou-se que o aumento do Rácio de explosivo conduz ao aumento da velocidade de impacto e, por conseguinte, também ao aumento do ângulo de colisão. Com o aumento do Rácio de explosivo aumenta também a quantidade de compostos intermetálicos na zona da interface entre as placas e também a dureza final das placas que colidem.

Palavras-chave: Soldadura por Explosão, Emulsão Explosiva, Alumínio, Aço Inoxidável, Configuração Plana, Compostos Intermetálicos.

Abstract

Explosion Welding is an effective method of joining various metals and alloys.

The aim of this research is to initiate the study of dissimilar weld aluminum-stainless steel, AA 6082-T6 - AISI 304, and analyze the influence of the welding parameters on the final result using this method. Also an analysis has been made for similar weld aluminum-aluminum.

The Weldability Window was studied for the two kinds of joints.

Five experimental test were made, always being used aluminum as the flyer plate.

Three explosive compositions were tested. The first one had only Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO), the second one was a ammonium nitrate-based emulsion with ANFO, and the third one was composed of a ammonium nitrate-based emulsion with ANFO and hollow polymer microballons as a sensitizing agent. These compositions didn't give good results.

All the results obtained show that increasing the explosive ratio, increases the impact velocity of the flyer, and, in consequence, also the collision angle increases. A larger quantity of intermetallic compounds on the interface and a higher final hardness on the colliding plates is also observed with the increase of explosive ratio.

Keywords Explosion Welding, Aluminium, Stainless Steel, Parallel configuration, Intermetallic compounds.

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	x
Simbologia e Siglas	xi
Simbologia.....	xi
Siglas	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. Estado da arte.....	3
2.1. Análise Histórica.....	3
2.2. Princípio do Processo.....	4
2.2.1. Mecanismo de Formação da Interface Ondulada	6
2.2.2. Parâmetros Fundamentais do Processo.....	7
2.3. Janela de Soldabilidade.....	10
2.3.1. Limites da Janela de Soldabilidade - Equações.....	11
2.3.2. Estimativa de V_p e enquadramento dos ensaios	14
2.4. Características da Interface Alumínio-Ferro.....	15
2.4.1. Morfologia da Interface	15
2.4.2. Fases Intermetálicas na Interface.....	15
2.4.3. Perfil de Dureza Característico.....	17
2.5. Vantagens do Processo	18
2.6. Desvantagens do Processo	18
2.7. Combinações de Materiais Possíveis.....	19
2.8. Aplicações do Processo	19
2.9. Técnicas de Soldadura por Explosão	20
2.10. Soldadura por Impulso Magnético	21
3. Procedimento Experimental	22
3.1. Caracterização Química e Microestrutural dos Materiais.....	22
3.1.1. Dimensões das Placas.....	23
3.1.2. Nomenclatura das Amostras.....	24
3.2. Montagem Experimental.....	25
3.3. Medição da Velocidade de Detonação.....	27
3.4. Parâmetros de Soldadura	29
3.5. Metalografia.....	29
3.5.1. Preparação das Amostras.....	29
3.5.2. Ataque Químico.....	30
3.5.3. Análise Microestrutural	30
3.5.4. Análise Química	30
3.6. Análise Mecânica.....	31
3.6.1. Micro-dureza	31

4.	Apresentação de resultados e discussão	32
4.1.	Enquadramento dos Ensaios na Janela de Soldabilidade.....	32
4.1.1.	Velocidade de Detonação	32
4.1.2.	Velocidade de Projeção	33
4.1.3.	Ângulo de Colisão	34
4.1.4.	Relação entre Variáveis	34
4.1.5.	Enquadramento dos Ensaios.....	35
4.2.	Análise Macroscópica.....	37
4.2.1.	Montagem Experimental	37
4.2.2.	Efeito do Rácio de explosivo nas Superfícies das Placas.....	38
4.3.	Análise Microscópica	41
4.3.1.	Soldadura Al-Fe.....	41
4.3.2.	Soldadura Al-Al.....	46
4.3.3.	Análise dos Compostos Intermetálicos	47
4.4.	Análise de Dureza	53
4.4.1.	Soldadura EW 14-Al.Fe-3.3	53
4.4.2.	Soldadura EW 15-Al.Fe-5.3	53
4.4.3.	Ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3	55
5.	Conclusões.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	Apêndice A – CAIXAS DE EXPLOSIVO DE MDF	62
	Apêndice B – CAIXAS DE EXPLOSIVO DE PMMA	64
	Apêndice C – DESENHO DO SUPORTE PARA SONDAS	65
	Apêndice D – DADOS PARA CALIBRAÇÃO	67
	Apêndice E – JANELAS DE SOLDABILIDADE	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de interface: (a) interface Linear (Zlobin, et al., 2014); (b) interface Ondulada (Zlobin, et al., 2014).	5
Figura 2.2. Ilustração dos parâmetros de soldadura (Mousavi, et al., 2008).	6
Figura 2.3. Influência do Rácio de explosivo na interface entre placas Ti/AISI 304 (Mousavi, et al., 2008).	8
Figura 2.4. Influência da STD na interface entre placas Cu/St (Durgutlu, et al., 2008).	9
Figura 2.5. (a) Janela de Soldabilidade baseada em Vc e β (Mendes, et al., 2013); (b) Janela de Soldabilidade baseada em Vc e ΔKE (Hokamoto, et al., 1993).	10
Figura 2.6. Janela de Soldabilidade (Lysak, et. al, 2011).	11
Figura 2.7. Morfologia da interface de soldadura Al-Fe. (Xian-jun, et al., 2011)	15
Figura 2.8. Diagrama de equilíbrio Al-Fe. (Carvalho, 2015)	16
Figura 2.9. Perfil de dureza de uma soldadura Al-Fe. (Li, et al., 2015)	17
Figura 2.10. Combinações possíveis utilizando soldadura por explosão (Fonte: AWS handbook – Chapter 6).	19
Figura 2.11. Técnica de soldadura por explosão utilizando uma placa intermédia (Hokamoto, et al., 1993).	20
Figura 2.12. Técnica de soldadura por explosão debaixo de água (Hokamoto, et al., 2008).	20
Figura 2.13. Soldadura por explosão utilizando entalhes na placa base (Li, et al., 2015). ..	21
Figura 2.14. Esquema de montagem de tubular utilizando SIM (Ben-Artzy, et al., 2014). ..	21
Figura 3.1. Microestrutura do Aço AISI 304.	23
Figura 3.2. Microestrutura do Alumínio 6082-T6.	23
Figura 3.3. Amostras já cortadas do ensaio EW 14-Al.Fe-3.3	25
Figura 3.4. Componentes do ensaio experimental: (a) Montagem das sondas; (b) Caixa de Explosivo; (c) Montagem Final.	27
Figura 3.5. (a) Esquema elétrico para medição da velocidade de detonação; (b) Detalhe de uma sonda; (c) Montagem experimental do conjunto de sondas.	27
Figura 3.6. Medições realizadas no ensaio EW 15-Al.Fe-5.3 registadas no osciloscópio digital LeCroy Wavejet 352.	28
Figura 3.7. Montagem experimental dos sistema de medição da Vd utilizando 4 sondas. ..	29
Figura 4.1. Gráfico de calibração para o ensaio EW 21-Al.Fe-5.3.	33

Figura 4.2. Efeito do parâmetro N na Janela de Soldabilidade: (a) N=0,11; (b) N=0,062..	36
Figura 4.3. Efeito da placa de apoio no resultado final da soldadura: (a) EW 14-Al.Fe-3.3 - Detalhe no início da ligação; (b) EW 15-Al.Fe-5.3 – Detalhe no início da ligação; (c) Superfície do <i>flyer</i> da EW 14-Al.Fe-3.3; (d) Superfície do <i>flyer</i> da EW 15- Al.Fe-5.3.....	38
Figura 4.4. Efeito do Rácio na superfície final da soldadura. (a) superfície exterior da EW 14-Al.Fe-3.3; (b) superfície exterior da UEW 22-Al.Fe-3.3.....	39
Figura 4.5. Superfície das faces que colidiram do ensaio UEW 22-Al.Fe-3.3.....	39
Figura 4.6. Efeito do Rácio na superfície final da soldadura: (a) superfície exterior da EW 15-Al.Fe-5.3; (b) superfície exterior da UEW 20-Al.Fe-5.3; (c) superfície exterior da UEW 21-Al.Fe-5.3.	40
Figura 4.7. Superfície que colidiram: (a) face da placa base que colidiu do ensaio UEW 20- Al.Fe-5.3; (b) faces das placas que colidiram do ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3.	40
Figura 4.8. Extração de provetes na soldadura EW 14-Al.Fe-3.3.	41
Figura 4.9. Soldadura EW 14-Al.Fe-3.3-L2.....	42
Figura 4.10. Soldadura EW 14-Al.Fe-3.3-T1.....	42
Figura 4.11. Soldadura EW 15-Al.Fe-5.3.....	43
Figura 4.12. Soldadura EW 15-Al.Fe-5.3: (a) Amostra L1; (b) Amostra L2; (c) Amostra L3.....	43
Figura 4.13. Soldadura UEW 21-Al.Fe-5.3: (a) Amostra L1-Fe; (b) Amostra L2-Fe; (c) Amostra L1-Al; (d) Amostra L2-Al.	44
Figura 4.14. Soldadura UEW 22-Al.Fe-3.3: (a) Amostra L1-Fe; (b) Amostra L2-Fe; (c) Amostra L1-Al; (d) Amostra L2-Al.	45
Figura 4.15. Soldadura EW 15-Al.A-5.3: Amostra L1.	46
Figura 4.16. Soldadura EW 15-Al.Al-5.3: Amostra T1.	46
Figura 4.17. Análise EDS das amostras L2 e L3: (a) Amostra L2, secção 2; (b) Amostra L3, secção 2; (c) Amostra L3, secção 3.	48
Figura 4.18. Espectro químico: (a) zona EW15L3-4 (FeAl3); (b) zona EW 15L3-5 (Fe2Al5).....	48
Figura 4.19. Análise EDS das amostras L2: (a) Amostra L2, placa base, secção 1; (b) Amostra L2, <i>flyer</i> , secção1.....	50
Figura 4.20. Análise EDS das amostras L2: (a) Amostra L2, secção 2; (b) Amostra L2, secção 3.	51
Figura 4.21. Análise EDS das amostras L2, secção 1.	52
Figura 4.22. Variação da dureza em EW14-Al.Fe-3.3: (a) amostra L2; (b) amostra T1.....	53
Figura 4.23. Variação da dureza em EW15-Al.Fe-5.3: (a) amostra L2; (b) amostra T1.....	54
Figura 4.24. Variação da dureza em EW15-Al.Al-5.3: (a) amostra L1; (b) amostra T1.....	54

Figura 4.25. Variação da dureza em EW 21-Al.Fe-5.3-L1. 55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais compostos intermetálicos do sistema Al-Fe (adaptada de Carvalho, 2015, e com base nos estudos de Kobayashi et al., 2002, e Kuz'min et al., 2015,)	16
Tabela 2.2. Durezas de compostos intermetálicos numa soldadura Al-Fe, tendo como base os resultados de Kobayashi et al., 2002, e Kuz'min et al., 2015)	17
Tabela 3.1. Composição química do Aço AISI 304, em percentagem em peso.	22
Tabela 3.2. Composição química do Alumínio 6082-T6, em percentagem em peso.	22
Tabela 3.3. Dimensões das placas utilizadas nos ensaios.	24
Tabela 3.4. Parâmetros utilizados em cada ensaio.	29
Tabela 4.1. Dados para medição de Velocidade de Detonação e o seu valor.	32
Tabela 4.2. Dados sobre os ensaios.	34
Tabela 4.3. Composição química da secção analisada L2-2.	49
Tabela 4.4. Composição química da secção analisada L3-2.	49
Tabela 4.5. Composição química da secção analisada L3-3.	49
Tabela 4.6. Composição química da secção analisada SS21-L2.	50
Tabela 4.7. Composição química da secção analisada AL21-L2.	51
Tabela 4.8. Composição química da secção analisada L2-2.	52
Tabela 4.9. Composição química da secção analisada L2-3.	52
Tabela 4.10. Efeito da Velocidade de Detonação na Dureza das chapas.	55

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Al-Al – Soldadura onde ambas as placas a soldar são de Alumínio

Al-Fe – Soldadura onde a placa voadora (*flyer*) é de Alumínio e a placa base é de Ferro (Aço)

β – Ângulo de Colisão

C – Massa de explosivo sobre a placa voadora

$C_b, C_{0,f}$ – Velocidade de propagação do som na placa voadora

C_1, C_2 – Constantes Empíricas

$c_{p,f}$ – Calor específico a pressão constante do material da placa voadora

$\sqrt{2E}$ – Energia de Gurney

ΔH – Calor produzido pela explosão

h_{exp} – Espessura de explosivo

h_f – Espessura da placa voadora

$H_{V,b}$ – Dureza Vickers do material da placa base

$H_{V,f}$ – Dureza Vickers do material da placa voadora

ΔKE – Perda de energia cinética

k_1 – Constante adimensional de limpeza de superfícies

k_f – Condutibilidade térmica do material da placa voadora

M – Massa da placa voadora sob o explosivo

N – Constante adimensional

p_{CJ} – Pressão de detonação Chapman-Jouguet

R – Rácio de explosivo

Re – Número de Reynolds

ρ – Massa volúmica do material mais macio

ρ_b – Densidade do material da placa base

ρ_{exp} – Densidade do explosivo

ρ_f – Densidade do material da placa voadora

τ – Constante de tempo

t – Instante de tempo

t_0 – Instante de tempo inicial

t_{cal} – Instante de tempo em que $V_{p,cal}$ é atingida

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

V_c – Velocidade no ponto de colisão ou velocidade de Colisão

$V_{c,tr}$ – Velocidade no ponto de colisão crítica de transição para ocorrer uma interface ondulada

$V_{c,min}$ – Velocidade no ponto de colisão mínima para ocorrer deformação plástica

V_d – Velocidade de detonação

V_p – Velocidade de projeção ou velocidade de impacto

$V_{p,Gurney}$ – Velocidade de projeção ou velocidade de impacto de Gurney

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

$V_{p,cal}$ – Velocidade de projeção ou velocidade de impacto igual a 80% de $V_{p,Gurney}$

$x(t)$ – Distância percorrida pela placa voadora em função do tempo

Siglas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ANFO – *Ammonium Nitrate Fuel Oil*

CFC – Sistema cristalino cúbico de faces centradas

DE – Micro-esferas ocas de polímero

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DMC – *DeLorean Motor Company*

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva (*Energy-dispersive X-ray Spectroscopy*)

Eex – Emulsão explosiva à base de nitrato de amónia

EW – Soldadura por Explosão (*Explosion Welding*)

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPN – Instituto Pedro Nunes

LEDAP – Laboratório de Energia e Detonação, Associação de Apoio

MDF - *Medium-Density Fiberboard*

SEM – Microscópio Eletrónico de varrimento (*scannig electron microscope*)

STD – Distância entre placa (*stand-off distante*)

SIM – Soldadura por Impulso Magnético

UEW – Soldadura por Explosão sem sucessp (*Unsucessfull Explosion Welding*)

VM – Velocity Measurement

1. INTRODUÇÃO

O homem, desde os seus primórdios, sentiu a necessidade de trabalhar e unir materiais. Melhorou também as tecnologias utilizadas, com o objetivo de obter resultados sempre mais satisfatórios às suas necessidades.

Vários são os processos que permitem a união de materiais, no entanto, a Soldadura por Explosão tem uma característica especial, permite a ligação de materiais com propriedades físicas muito distintas, nomeadamente com temperaturas de fusão muito diferentes. E, uma vez que, teoricamente, neste processo de soldadura não ocorre a fusão dos materiais para a sua ligação, esta tecnologia é definida como um processo de soldadura no estado sólido. Este processo, no entanto, ainda não está completamente bem definido, estando sob forte investigação.

O interesse em combinar materiais leves com materiais resistentes, por exemplo num chassi de um carro, melhorando a sua performance, ou combinar materiais resistentes à corrosão com materiais resistentes a altas temperaturas, por exemplo para um reservatório de uma indústria química, desperta o interesse na combinação do Alumínio-Ferro. O Alumínio tem elevada resistência à corrosão e baixa densidade, enquanto o Ferro, nomeadamente o Aço, tem elevada resistência mecânica e a temperaturas elevadas. Uma vez que as temperaturas de fusão destes dois materiais impossibilitam a sua soldadura por um processo de fusão, o estudo da sua soldadura por explosão apresenta-se muito interessante.

O objetivo deste trabalho é iniciar o estudo da soldadura destes materiais e assim compreender as dificuldades associadas à sua ligação. Nos ensaios realizados, onde se obteve ligação, a interface foi sempre linear, exceto para a ligação Alumínio-Alumínio que serviu para observar a diferença entre materiais similares e dissimilares. O material projetado foi sempre o Alumínio.

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 2 expõe-se o Estado da Arte, onde se faz uma apresentação do processo de soldadura por explosão, desde o seu surgimento até à atualidade. No capítulo 3 é descrito o procedimento experimental e no capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios experimentais

realizados. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões retiradas dos resultados obtidos.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Análise Histórica

O processo de Soldadura por explosão foi observado pela primeira vez durante a Primeira Guerra Mundial, por especialistas em munições.

Observaram que balas e estilhaços ficavam ligados a componentes metálicos, quando colidiam. Contudo, estes especialistas não reconheceram logo o fenómeno como um processo de soldadura (Carpenter, et al., 1975).

O Primeiro relato do fenómeno de soldadura por explosão ocorreu em 1944, por L.R. Carl. Depois de ter levado a cabo testes de avaliação de explosivos, Carl observou que dois discos finos de latão, utilizados para posicionar os explosivos, estavam unidos (Carpenter, et al., 1975).

A investigação deste fenómeno continuou e é de destacar os resultados obtidos pela equipa de investigadores de Kiev, liderados por M. A. Lavrent'ev, entre 1946 e 1948. Esta equipa obteve uma amostra de um cone composto por aço e cobre, onde era possível observar uma interface ondulada, característica deste processo (Deribas, et al., 1967).

Durante estas investigações, N. N. Sytyi, membro da mesma equipa de investigadores, obteve varetas de cobre monolítico, submetendo um conjunto de fios de cobre a uma compressão explosiva. Este método viria a ser patenteado dez anos mais tarde (Deribas, et al., 1967).

O termo "*Explosive Welding*" é da autoria do americano V. Philipchuck. Este termo surgiu em 1957, quando Philipchuck descreveu que durante a conformação por explosão de alumínio a um molde de aço, com secção transversal em U, cerca de uma polegada quadrada, 6,45 centímetros quadrados, ficou soldada ao molde (Deribas, et al, 1967).

Philipchuck desenvolveu um método que consistia em detonar um explosivo dentro de um reservatório com água. Este método tinha dificuldades em obter resultados com sucesso pois era difícil de converter a energia da onda de choque em calor, ou seja, havia dificuldade em gerar uma força de compressão, entre as superfícies a unir, durante um

intervalo de tempo suficientemente longo para desencadear o processo de difusão (Deribas, et al., 1967).

Philipchuck mostrou que o processo era melhorado se existissem irregularidades nas superfícies a unir, favorecendo a deformação plástica no fim do processo (Deribas, et al., 1967). Anos mais tarde, I. D. Zakharenko, refutaria esta melhoria, mostrando que quanto mais polidas forem as superfícies a unir, sobretudo a mais dura, maior seria a possibilidade de obter uma soldadura por explosão com sucesso (Zakharenko, et al., 1990).

As investigações prosseguiram e os parâmetros envolvidos foram aprofundados. Douglass, Holtzman e Cowan patentaram um método, em 1964, que tinha em conta a velocidade de detonação, a possibilidade de obtenção de juntas sobrepostas com uma só explosão, entre outros fatores. É também de destacar o método de Pearson e o método de Daveport e Duvall (Deribas, et al., 1967), que contribuíram na definição geral do processo de soldadura por explosão. Atualmente já existem métodos que utilizam placa intermédia, ou seja, uma placa entre a placa voadora e a placa base, método este apresentado por K. Hokamoto (Hokamoto, et al., 1993).

Vários são os investigadores deste processo de soldadura, ficando aqui o destaque a Crossland, Deribas, Zakharenko, Walsh, Holtzman, Acarer, Findik, Hokamoto, que muito contribuíram para o desenvolvimento deste processo.

Atualmente são poucas as empresas no mundo a utilizar industrialmente o processo de soldadura por explosão, sendo a DMC uma empresa de referência na aplicação deste processo.

A soldadura por explosão é ainda um processo em desenvolvimento uma vez que a preparação dos ensaios é morosa e o sucesso não é, ainda, garantido eficazmente para todas as combinações pretendidas. Ainda assim, a sua gama de aplicabilidade já conta com mais de 260 combinações de materiais possíveis (Findik, 2011).

2.2. Princípio do Processo

O processo de soldadura por explosão consiste na projeção de um material contra outro.

Utilizando uma determinada quantidade de explosivo, um material é acelerado contra outro, promovendo uma colisão a alta velocidade. A alta velocidade de colisão

provoca um escoamento plástico nas superfícies a unir, o que conduz a uma significativa deformação plástica nas superfícies, resultando na criação de uma ligação. Esta, pode ter uma morfologia linear ou ondulada, como se observa na Figura 2.1.

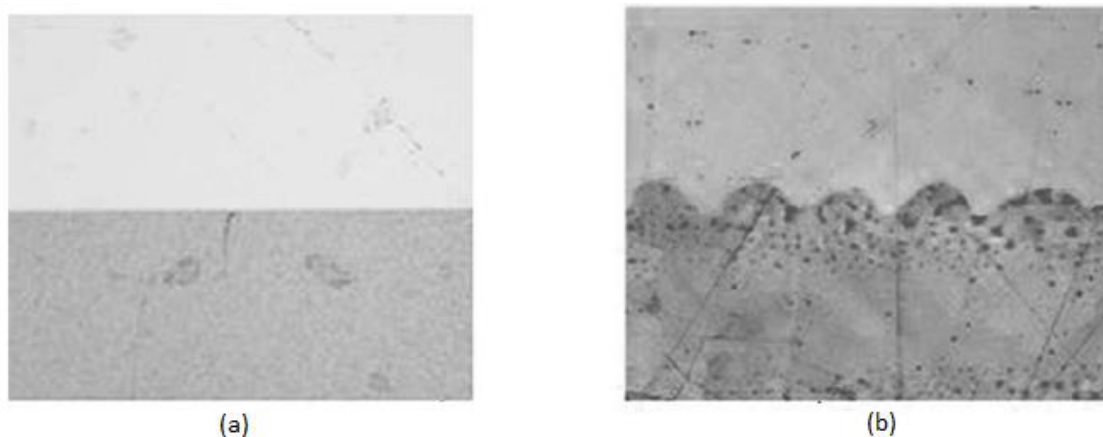


Figura 2.1. Tipos de interface: (a) interface Linear (Zlobin, et al., 2014); (b) interface Ondulada (Zlobin, et al., 2014).

Este processo é considerado um processo a frio, uma vez que não é adicionado calor exterior para promover a ligação. Contudo, devido à elevada pressão de compressão, originada pela colisão, existem pontos localizados onde são atingidas temperaturas elevadas.

O processo de soldadura por explosão é composto por uma placa base, ou estacionária, uma placa voadora, ou *flyer*, como será designado daqui em diante, e um explosivo. Sendo este conjunto colocado sobre um suporte.

A placa base é apoiada no suporte, chamado de bigorna, tendo este a função de absorver a energia gerada pelo impacto. O *flyer* encontra-se afastado da placa base a uma distância entre placas definida como STD (*stand-off distance*). O *flyer* pode estar inclinado ou paralelo, relativamente à placa base.

Por fim, o explosivo é colocado por cima do *flyer*. O explosivo, ao ser detonado, tem uma velocidade de detonação, V_d e confere ao *flyer* uma velocidade de colisão e projeção, V_c e V_p , respetivamente. V_p está dependente da STD e da quantidade de explosivo. O *flyer* colide com um ângulo de colisão β , pois a placa deforma-se à medida que a onda de detonação avança sobre ela. Os parâmetros referidos acima são fundamentais para o sucesso de uma soldadura por explosão, representados na Figura 2.2. Na secção 2.2.2 serão definidos estes parâmetros e a sua importância será explicada.

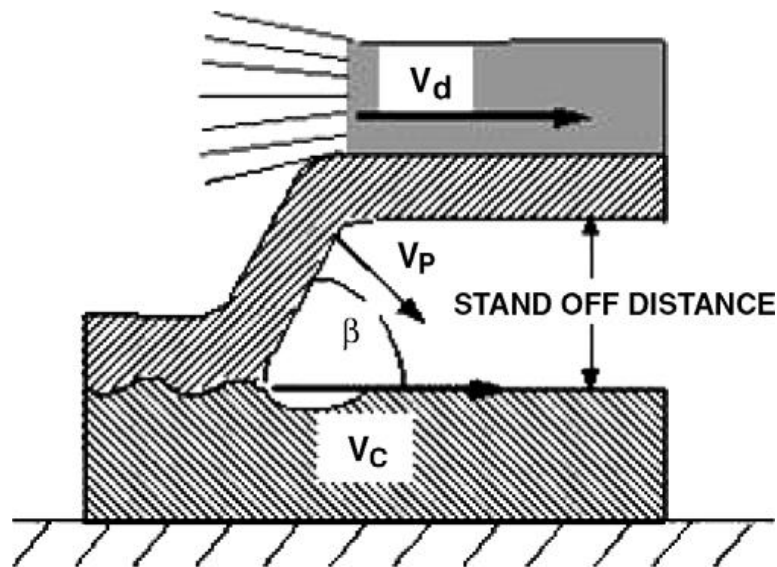


Figura 2.2. Ilustração dos parâmetros de soldadura (Mousavi, et al.,2008).

2.2.1. Mecanismo de Formação da Interface Ondulada

Uma soldadura por explosão com qualidade apresenta normalmente uma interface ondulada.

Dado o seu elevado interesse para o sucesso da soldadura por explosão, existem quatro teorias que tentam explicar este fenómeno que sucede na interface:

- Mecanismo de indentação do jato.
- Mecanismo de fluxo instável.
- Mecanismo do desprendimento do vórtice.
- Mecanismo de tensão de onda.

2.2.1.1. Mecanismo de Indentação do Jato

O *flyer*, ao colidir com a placa base, origina um jato composto por material da camada superficial do *flyer*. O jato, por sua vez, dá origem a uma cova à frente do ponto de colisão. De seguida, um jato reentrante, composto por material da placa base, ocupa o espaço da cova e permite a propagação do jato do *flyer*. Esta indentação periódica é defendida por autores como Abrahason (1961), Baharini et al. (1966) e Bergman et al. 1966, (Mousavi, et al., 2005). De acordo com Baharini, a interação entre a cova e o jato reentrante, que retém o material ejetado, é responsável pela formação dos vórtices observados na interface (Mendes, et al., 2013).

2.2.1.2. Mecanismo de Fluxo Instável

Esta teoria considera o mecanismo de formação da interface ondulada um fenômeno hidrodinâmico. Este é semelhante à interação de dois líquidos com velocidades horizontais diferentes, sendo este fenômeno conhecido por Instabilidade de Kelvin-Helmholz (Mendes, et al., 2013).

Segundo Hunt (1968), a descontinuidade de velocidades ocorre entre a placa base e o jato reentrante. Já Robinson (1975), afirma que a descontinuidade ocorre entre a placa base e o jato produzido pela colisão entre o *flyer* e a placa base (Mendes, et al., 2013).

As instabilidades que provocam a formação da onda podem ser consequência de interferências da onda (Ben-Artzy, et al., 2009), ou devido a oscilações da onda de explosão, sendo estas transmitidas pelo *flyer* à interface (Mendes, et al., 2013).

2.2.1.3. Mecanismo Turbulento

Este mecanismo descreve o fenômeno de formação de onda como sendo semelhante ao fenômeno de von Kármán Vortex Street, onde a ondulação resulta da separação de um escoamento depois da passagem por um obstáculo.

2.2.1.4. Mecanismo de Tensão de Onda

Este mecanismo considera que a interface ondulada se deve às sucessivas interferências provocadas por ondas de rarefação em ambas as placas, ou seja, ondas com direções opostas (Mendes, et al., 2013).

2.2.2. Parâmetros Fundamentais do Processo

Serão agora descritos os parâmetros fundamentais que promovem a ligação dos materiais a unir.

2.2.2.1. Tipo e Quantidade de Explosivo

O explosivo, depois de detonado, confere aceleração ao *flyer*. Posto isto, o tipo e a quantidade de explosivo são parâmetros fundamentais, pois influenciam outros parâmetros:

- Velocidade de Detonação, V_d ;
- Velocidade no ponto de Colisão, V_c ;
- Ângulo de Colisão, β ;

- Velocidade de Projeção, V_p .

O tipo e a quantidade de explosivo devem ser escolhidos tendo em conta os materiais a unir.

A quantidade de explosivo está relacionada com a massa do *flyer*. Depois de escolhido o explosivo, obtém-se o Rácio de explosivo, R , sendo este a razão entre a massa de explosivo, C , e a massa do *flyer*, M , expressa pela equação (2.1):

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

A morfologia da interface está intimamente ligada ao Rácio de explosivo. Com o aumento de R , aumenta o comprimento e a amplitude das ondas na interface, como se mostra na Figura 2.3 (Mousavi, et al., 2008).

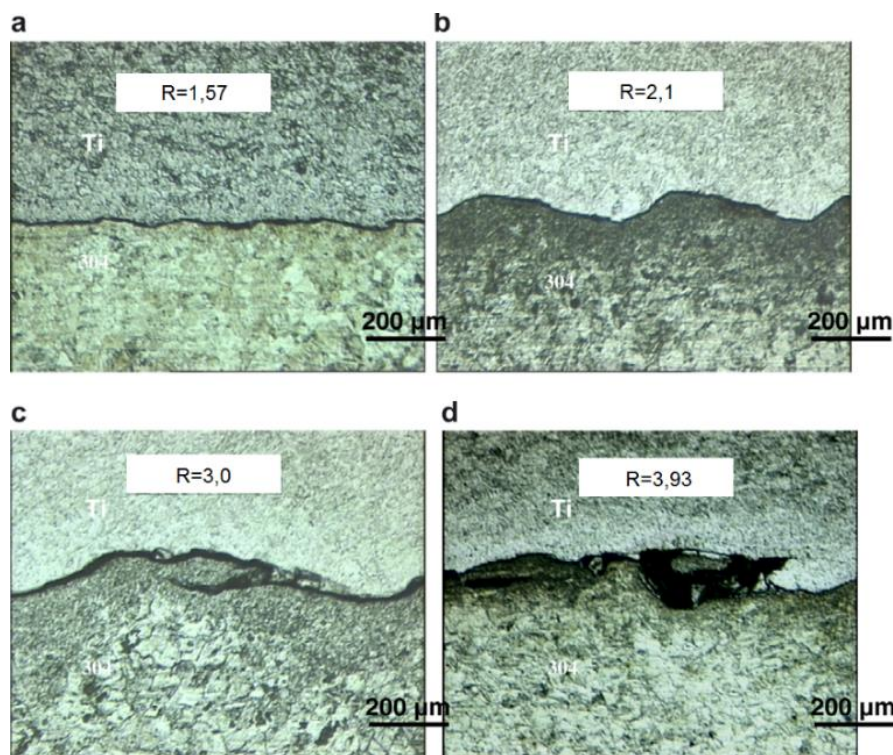


Figura 2.3. Influência do Rácio de explosivo na interface entre placas Ti/AISI 304 (Mousavi, et al., 2008).

O Rácio de explosivo deve ser escolhido de forma a obter-se uma soldadura com qualidade. Deve ter um valor mínimo que promova a formação da interface ondulada, necessária para uma boa ligação entre os materiais a unir. Não deve ter um valor excessivo, pois ao conferir demasiada energia ao *flyer*, nas ligações dissimilares conduzirá à formação

de compostos intermetálicos na interface da ligação; estes são indesejáveis pois enfraquecem a soldadura.

Como foi referido antes, o Rácio de explosivo está relacionado com a massa do *flyer*. O tipo de material e as dimensões do *flyer* são, normalmente, dados do projeto, concluindo-se, assim, que o Rácio de explosivo é controlado inteiramente pela massa do explosivo selecionado.

2.2.2.2. Distância entre Placas (STD)

A distância imposta entre as placas, STD, é selecionada considerando a espessura do *flyer*. Na literatura esta distância pode variar entre metade da espessura do *flyer*, até três vezes o seu valor (Durgutlu, et al., 2007).

Com o aumento da STD, aumenta o comprimento de onda, bem como a ondulação, ou seja, a STD influencia a dimensão e a forma da interface (Durgutlu, et al., 2007). A Figura 2.4 ilustra esta afirmação para o caso da ligação cobre-aço.

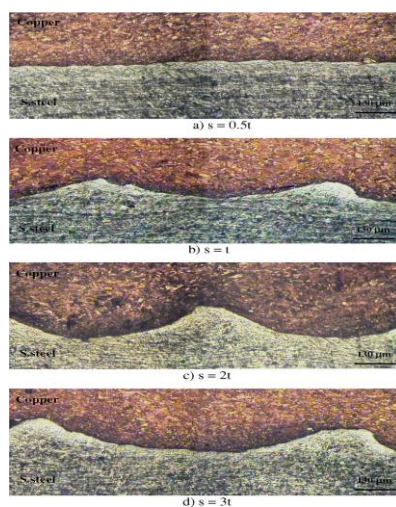


Figura 2.4. Influência da STD na interface entre placas Cu/St (Durgutlu, et al., 2008).

2.2.2.3. Material de Suporte à placa base (Anvil)

O material de suporte à placa base é responsável pela absorção do impacto devido à colisão das placas. Este suporte tem grande influência na morfologia da interface (Barreto, 2014), bem como nas propriedades mecânicas da soldadura, nomeadamente na dureza final dos materiais utilizados na soldadura. Barreto (2014), observou uma dureza mais elevada para um suporte formado apenas por uma placa de aço, comparativamente à observada para um suporte constituído por uma placa de aço sobre areia. Este resultado é corroborado por Durgutlu (Durgutlu, et al., 2008).

2.3. Janela de Soldabilidade

A Janela de Soldabilidade é uma área onde teoricamente ocorrerá uma soldadura por explosão com qualidade.

Atualmente a Janela de Soldabilidade mais utilizada baseia-se na velocidade do ponto de colisão, V_c , e no ângulo de colisão, β , tendo a primeira explicação teórica deste critério sido sugerida por J. M. Walsh (Walsh, et al., 1953), (Mendes, et al., 2013). Este critério simplifica a compreensão das condições necessárias a reunir, fornecendo uma área onde, teoricamente, ocorrerá ligação com qualidade entre as placas a soldar. Esta área é obtida através de quatro linhas, representando cada linha um limite. Na Figura 2.5 (a) está representada uma Janela de Soldabilidade que segue este critério. Contudo, existem critérios que se baseiam em diferentes parâmetros, quando há interesse em estudar outro aspeto da soldadura. Hokamoto utilizou a velocidade de colisão e a perda de energia cinética, ΔKE , para construir a Janela de Soldabilidade quando estudou o efeito de uma placa intermédia numa soldadura por explosão (Hokamoto, et al., 1993), como se apresenta na Figura 2.5 (b).

Como veremos na secção 2.3.1, vários investigadores contribuíram para a conceção do critério mais utilizado, o critério baseado na V_c e no β .

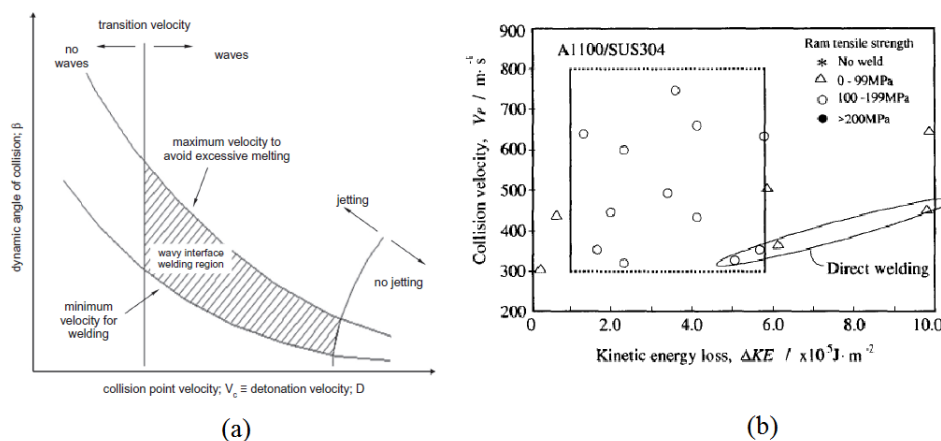


Figura 2.5. (a) Janela de Soldabilidade baseada em V_c e β (Mendes, et al., 2013); (b) Janela de Soldabilidade baseada em V_c e ΔKE (Hokamoto, et al., 1993).

2.3.1. Limites da Janela de Soldabilidade - Equações

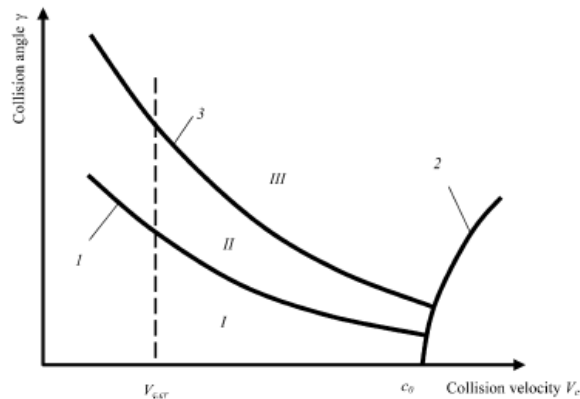


Figura 2.6. Janela de Soldabilidade (Lysak, et. al, 2011)

Apresenta-se a seguir o significado de cada limite e a interpretação da Janela de Soldabilidade, tomando como orientação a Figura 2.6.

Linha Tracejada: o limite esquerdo da Janela de Soldabilidade está relacionado com a formação da interface ondulada, característica necessária a uma soldadura por explosão com qualidade. Lysak e Kuzmin afirmam que existe uma velocidade de colisão de transição, acima da qual se obtém uma interface ondulada (Ribeiro, et al., 2014). Cowan sugeriu em (Cowan, et al., 1971), uma equação para esta velocidade de transição:

$$V_{c,tr} = \left(\frac{2Re_{cr}(H_{V,p} + H_{V,f})}{\rho_p + \rho_f} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

Na equação 2.2, Re_{cr} representa o número de Reynolds crítico. Este valor varia entre 8.0 e 13.0 para soldaduras dissimilares. $H_{V,p}$ e $H_{V,f}$ representam a dureza Vickers da placa base e do *flyer*, respetivamente, expressa em [MPa]. Por fim, ρ_p e ρ_f representam a densidade da placa base e do *flyer*, expressa [g/cm^3]. Concluindo, deve garantir-se que a V_c seja superior a esta velocidade.

Linha 1: o limite inferior da Janela de Soldabilidade tem como objetivo estabelecer uma velocidade de colisão mínima que garanta uma pressão gerada pelo impacto superior à resistência mecânica dos materiais a unir, de forma a promover a deformação plástica necessária para se estabelecer a ligação entre as placas. Deribas e Zakharenko (Deribas, et al., 1974), desenvolveram uma equação para este limite e, num estudo posterior, Zakharenko e Zlobin, clarificaram-na. A equação é a seguinte:

$$V_{c,min} = \frac{k_1}{\beta} \left(\frac{H_V}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

Na equação 2.3, k_1 é uma constante que toma valores entre 0,6, para superfícies limpas, e 1,2 para superfícies que não estão perfeitamente limpas (Ribeiro, et al., 2014). Esta limpeza ocorre em soldadura de materiais com diferentes durezas devido à formação de um escoamento por parte do material mais macio (Zakharenko, et al., 1983). β representa o ângulo de colisão, em $[rad]$, H_V representa a dureza do material mais macio, em $[MPa]$, e ρ representa a densidade do material mais macio, em $[g/cm^3]$. Concluindo, abaixo desta linha, na região I, não ocorrerá ligação entre as placas.

Linha 2: o limite direito da Janela de Soldabilidade está relacionado com a formação de um jato no ponto de colisão. Este limite fornece informação quanto ao valor do ângulo de colisão crítico acima do qual não ocorre a formação de jato, para uma dada velocidade de colisão. Existem três equações, equações 2.4 a 2.6, para expressar este limite:

$$V_c < C_b \quad (2.4)$$

$$V_c < 1,25 C_b \quad (2.5)$$

$$V_c < \frac{\beta}{10} + 5,5 \quad (2.6)$$

A equação 2.4 foi proposta por Walsh (Walsh, et al., 1953) afirmando que V_c tem de ser inferior à velocidade do som no *flyer*, C_b . Wiley, por sua vez, afirma que deve ser inferior 1,25 vezes a C_b , equação 2.5, (Ribeiro, et al., 2014). Já Abrahamson afirma que V_c está relacionada com o ângulo no ponto de colisão, β , como se apresenta na equação 2.6. (Ribeiro, et al., 2014). V_c é expressa em $[mm/\mu s]$ e β em $[rad]$.

Linha 3: o limite superior da Janela de Soldabilidade é imposto para garantir que a velocidade de projeção do *flyer* não exceda um valor acima do qual, devido à dissipação da energia cinética da placa, produza uma camada contínua de material fundido (Ribeiro, et al., 2014), ou seja, de forma a evitar que a soldadura ocorra na zona III. Em soldaduras dissimilares, quando há fusão dos materiais surgem compostos intermetálicos geralmente frágeis, este é um aspeto indesejável na soldadura por explosão, como será explicado na secção 2.4.2.

Existem duas equações que permitem expressar este limite. Uma foi desenvolvida por Wittman, que relaciona V_p com V_d , segundo a equação 2.7:

$$V_p = \frac{1}{N} \times \frac{(T_{m,f} \times C_{b,f})^{1/2}}{V_d} \times \left(\frac{k_f \times C_{p,f} \times C_{b,f}}{\rho_f \times h_f} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

Na equação 2.7, N representa um valor adimensional, com um valor de 0,11 para os metais. Contudo em (Ribeiro, et al., 2014) refuta-se este valor, afirmando não ter sido verificado experimentalmente por de Rosset (de Rosset, 2006) e defende que alterando o valor de N para 0,062 são obtidos resultados mais compatíveis com os empíricos. $T_{m,f}$ representa a temperatura de fusão do material do *flyer* em [$^{\circ}C$]; $C_{b,f}$ a velocidade de propagação do som no material do *flyer* [cm/s]; k_f a condutibilidade térmica do material do *flyer*, [$erg/s.cm.^{\circ}C$]; $C_{p,f}$ representa o calor específico, a pressão constante, do material do *flyer*, em [$erg/g.^{\circ}C$]; ρ_f a densidade do *flyer*, em [g/cm^3]; h_f a espessura do *flyer*, em [cm].

A outra equação foi apresentada por Gurney. Esta equação considera que a aceleração do *flyer* é perpendicular à direção de propagação da detonação, relacionando-as através de uma energia específica para cada tipo de explosivo, a chamada energia ou velocidade de Gurney, $\sqrt{2E}$. (Kennedy, et al. 1972) estabeleceram um modelo para um ensaio com configuração plana, apresentando a equação 2.8:

$$V_{p,Gurney} = \sqrt{2E} \times \sqrt{\frac{3}{1 + 5 \times \left(\frac{M}{C}\right) + 4 \times \left(\frac{M^2}{C^2}\right)}} \quad (2.8)$$

Na equação 2.8, $\sqrt{2E}$ tem um valor de aproximadamente 60% do calor produzido na explosão (Kennedy, et al., 1998). M representa a massa do *flyer*, em [kg] e C a massa de explosivo em [kg].

Em ambas as equações pode relacionar-se V_p e V_d através de β pela equação 2.9:

$$V_p = 2 \times V_d \times \text{sen} \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (2.9)$$

Obtendo o valor de V_p e V_d é possível o cálculo de β .

Concluindo, é necessário conhecer bem os parâmetros de cada limite para que a Janela de Soldabilidade obtida seja o mais rigorosa possível. A zona II é a área delimitada onde é provável que ocorra uma soldadura por explosão com qualidade.

2.3.2. Estimativa de V_p e enquadramento dos ensaios

Uma vez construída a Janela de Soldabilidade, é possível fazer o planeamento de futuros ensaios simulando a sua localização na Janela de Soldabilidade. Para isso é necessário estimar a V_p , saber o valor de V_d e assim obter o valor de β .

Após os ensaios, com os valores de V_p , V_d e β , é possível enquadrá-los na Janela de Soldabilidade.

2.3.2.1. Estimativa da Velocidade de Projeção V_p

A velocidade de projeção pode ser estimada recorrendo à equação 2.10, sugerida por Chou e Fils (Chou, et al., 1986):

$$V_p(t) = V_{p,Gurney} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right] \quad (2.10)$$

$V_{p,Gurney}$ calcula-se utilizando a equação 2.8. t_0 é o instante inicial, normalmente igual a zero, e τ é uma constante de tempo (Chou, et al., 1986), calculada pela equação 2.11:

$$\tau = C_1 \times \frac{M \times V_{p,Gurney}}{P_{CJ}} + C_2 \quad (2.11)$$

C_1 e C_2 são constantes empíricas de calibração. Os seus valores são ajustados para cada ensaio, com o objetivo de garantir que o *flyer* acelera até atingir 80% de $V_{p,Gurney}$, sendo esta a velocidade de projeção calibrada, $V_{p,cal}$. Considera-se que o *flyer* acelera até que a onda de detonação sofra oito reflexões no seu interior (Mendes, et al., 2013). O tempo necessário para que o *flyer* atinja $V_{p,cal}$, t_{cal} , é determinado considerando que a onda de choque se propaga dentro do *flyer* à velocidade do som do seu material, por uma distância equivalente a oito vezes a sua espessura.

M representa a massa do *flyer* em [kg] e P_{CJ} representa a pressão de Chapman-Jouguet produzida pela detonação (Mendes, et al., 2013).

Estimada a velocidade de projeção, por simples integração da equação 2.10, obtém-se a equação da distância percorrida pelo *flyer* em função do tempo, representada na equação 2.12:

$$x_p(t) = V_{p,Gurney} \times \left[t - t_0 + \tau \left(\exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) - 1 \right) \right] \quad (2.12)$$

Uma vez que a STD é um dado conhecido, é assim fácil saber a velocidade do *flyer* no momento do impacto.

Sabendo que V_p e V_d se relacionam pela equação 2.9 percebe-se agora a utilidade deste método. Sabendo o explosivo a utilizar, pode ter-se uma referência da velocidade de detonação, mais ou menos precisa, e estimar o valor de β , podendo assim ser feito um planeamento de um ensaio de soldadura por explosão. Quando a V_d é medida, processo descrito na secção 3.3, utiliza-se este método, também para calcular β e assim saber onde se localizou o ensaio dentro da Janela de Soldabilidade.

2.4. Características da Interface Alumínio-Ferro

2.4.1. Morfologia da Interface

Como já foi visto na secção 2.2.2, existem vários fatores que influenciam a morfologia da interface. A interface de uma soldadura por explosão que liga o Alumínio ao Aço apresenta fraca ondulação e esta é heterogénea, como se observa na Figura 2.7. Este facto explica-se pela diferença de resistência mecânica e de temperatura de fusão.

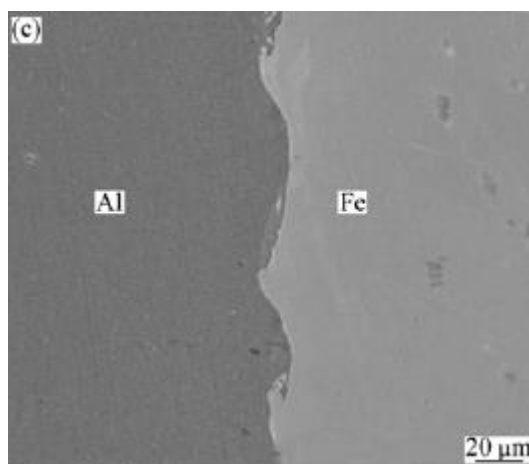


Figura 2.7. Morfologia da interface de soldadura Al-Fe. (Xian-jun, et al., 2011)

2.4.2. Fases Intermetálicas na Interface

Bouché mostrou em estudos que compostos ricos em Alumínio se formam a temperaturas entre os 700 e 900 °C (Bouché, et al., 1998), enquanto Kobayashi mostrou que

compostos com baixo teor em Alumínio se formam acima de 1000 °C (Kobayashi et al., 2002). Na Figura 2.8 é apresentado o diagrama de equilíbrio Al-Fe.

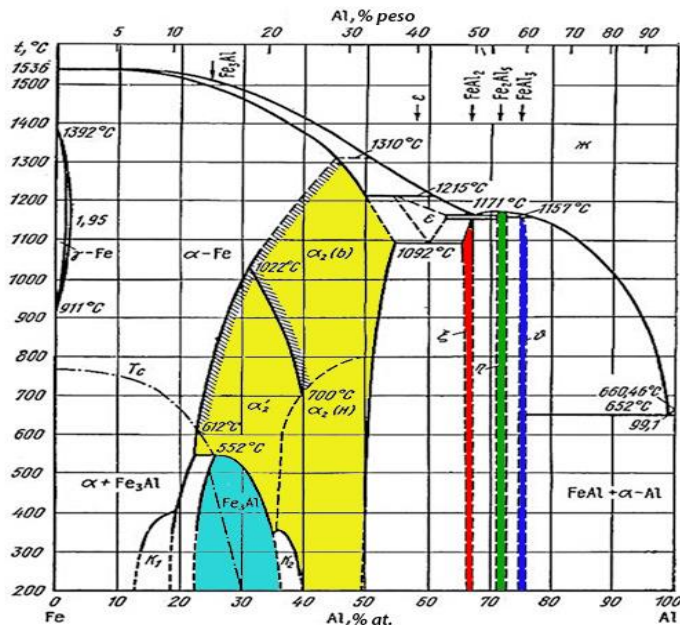


Figura 2.8. Diagrama de equilíbrio Al-Fe. (Carvalho, 2015)

Na Tabela 2.1 apresentam-se os vários compostos intermetálicos e as suas percentagens, em peso e atômicas aproximadas. Com esses valores é possível identificar os compostos intermetálicos na interface de uma soldadura por explosão Alumínio-Ferro. Este processo, como já foi dito, considera-se um processo a frio, ou seja, não ocorre a fusão dos materiais. Ainda assim ocorrem picos de temperaturas elevadas em zonas pontuais, produzindo a fusão localizada dos materiais e havendo difusão entre eles. Os compostos intermetálicos mais prováveis de ocorrerem na interface são os mais ricos em Alumínio.

Tabela 2.1. Principais compostos intermetálicos do sistema Al-Fe (adaptada de Carvalho, 2015, e com base nos estudos de Kobayashi et al., 2002, e Kuz'min et al., 2015,)

Fase	%[peso] de Fe	%[peso] de Al	%[atômica] de Fe	%[atômica] de Al	Sistema Cristalino
Fe₃Al	86,06	~13 a ~20	-	-	CFC
FeAl	67,31	12,8 a ~37	-	-	Cúbica
FeAl₂	50,72	48 a 49,4	-	-	Triclínico
Fe₂Al₅	45,16	53 a 57	29,2 27,9	70,8 72,2	Monoclínico
FeAl₃	40,70	58,5 a 61,3	25,9	74,1	Monoclínico (BC)

2.4.3. Perfil de Dureza Característico

A Figura 2.9 apresenta um perfil de dureza característico de uma soldadura por explosão Alumínio-Ferro. Como se observa na Figura 2.9, a dureza, em ambos os materiais, aumenta na direção da interface. Uma maior ou menor variação de dureza está relacionada com os parâmetros de soldadura. É na interface que se registam os valores mais elevados de dureza e este facto explica-se por ser esta a zona de maior deformação plástica e pela presença dos compostos intermetálicos. Estes compostos têm durezas muito elevadas, comparativamente às dos materiais base. Os compostos intermetálicos ricos em Ferro apresentam boa resistência mecânica e à oxidação. Já os compostos intermetálicos ricos em Alumínio são muito duros e, portanto, frágeis, sendo os mais indesejáveis. Na Tabela 2.2 apresentam-se os valores de dureza de alguns destes compostos intermetálicos.

Tabela 2.2. Durezas de compostos intermetálicos numa soldadura Al-Fe, tendo como base os resultados de Kobayashi et al., 2002, e Kuz'min et al., 2015)

Composto Intermetálicos	Micro-dureza [Hv]
Fe_3Al	320
$FeAl$	660
Fe_2Al_5	1000
$FeAl_3$	866,7 a 938,1

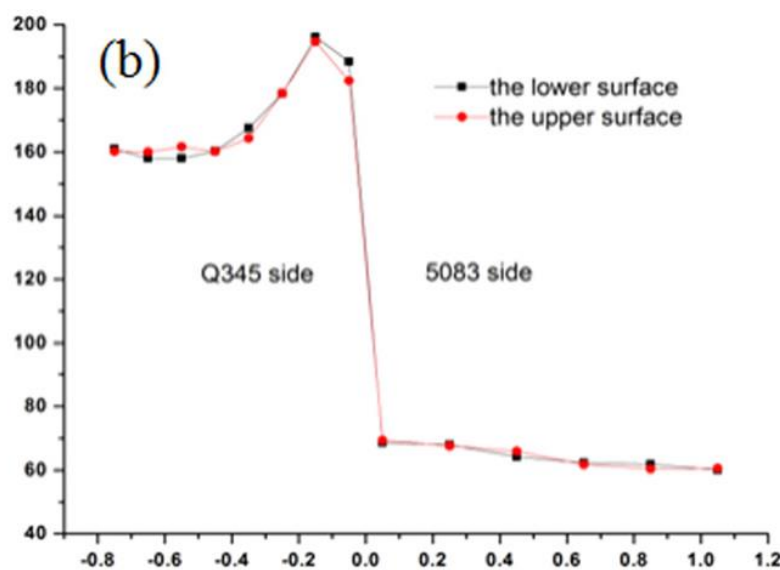


Figura 2.9. Perfil de dureza de uma soldadura Al-Fe. (Li, et al., 2015)

2.5. Vantagens do Processo

Findik em (Findik, 2011) enunciou as seguintes vantagens do processo de soldadura por explosão:

- É possível obter soldaduras de materiais dissimilares;
- Obtêm-se ligações muito resistentes;
- A qualidade dos materiais base é conservada;
- É possível soldar grandes áreas;
- O investimento feito no processo é de baixo custo;
- É acionado por controlo remoto;
- Possibilita soldar em ambientes hostis;
- Permite a soldadura de placas com diferentes espessuras;
- É um processo a “frio”;
- Requer pouca quantidade de explosivo;
- É um método simples de aplicar.

2.6. Desvantagens do Processo

Também Findik em (Findik, 2011) enunciou as seguintes desvantagens do processo de soldadura por explosão:

- Os materiais a unir têm de possuir elevada resistência ao impacto e ductilidade;
- Devido ao ruído gerado pela explosão, bem como à sua onda de choque, obrigam a que o operador esteja bem protegido, levando à realização de ensaios em câmaras de vácuo, enterrados ou debaixo de água;
- Os explosivos não estão autorizados em zonas industriais devido ao ruído e vibrações que provocam;
- As geometrias das soldaduras têm de ser simples – geometrias planas, cilíndricas ou cónicas.

2.7. Combinações de Materiais Possíveis

O processo de soldadura por explosão é bastante investigado e encontra-se em forte crescimento. Através dele é possível obter ligação homogénea para a maioria dos metais e também para a ligação de metais dissimilares. Na Figura 2.10 apresenta-se um conjunto de combinações possíveis aplicando este processo de soldadura.

	Zircónia	Magnésio	Platina	Ouro	Prata	Nióbio	Tântalo	Hastelloy	Titânio	Liga de Níquel	Liga de Cobre	Alumínio	Aço inoxidável	Liga de Aço	Liga de Carbono
Liga de Carbono	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Liga de Aço	●	●					●	●	●	●	●	●	●	●	●
Aço inoxidável				●	●	●	●		●	●	●	●	●		
Alumínio		●			●	●	●		●	●	●	●			
Liga de Cobre					●	●	●		●	●	●				
Liga de Níquel		●	●	●			●	●	●	●					
Titânio	●	●			●	●	●		●						
Hastelloy								●							
Tântalo				●		●	●								
Nióbio			●			●									
Prata					●										
Ouro															
Platina			●												
Magnésio		●													
Zircónia	●														

Figura 2.10. Combinações possíveis utilizando soldadura por explosão (Fonte: AWS handbook – Chapter 6).

2.8. Aplicações do Processo

O processo de soldadura por explosão é aplicado numa grande variedade de indústrias, das quais se destacam as seguintes áreas, conforme refere Findik (Findik, 2011):

- Construção naval;
- Fabrico de reatores nucleares;
- Indústria automóvel;
- Revestimento de reservatórios para a indústria química e criogénica;
- Permutadores de calor;
- União de tubos;
- Ligação de alhetas de refrigeração.

2.9. Técnicas de Soldadura por Explosão

Nesta secção apresentam-se algumas variantes técnicas, com o objetivo de melhorar a ligação entre os materiais.

A primeira técnica consiste na utilização de uma placa intermédia. Esta reduz a energia cinética do flyer, o que leva à redução da camada de compostos intermetálicos formada, indesejável numa soldadura com qualidade, Figura 2.11.

A segunda técnica é realizada de baixo de água, onde a ligação é obtida através da onda de choque propagada na água após a explosão, evitando assim a formação de poeiras devido à libertação dos gases de explosão, representada na Figura 2.12.

A terceira técnica consiste na maquinação de entalhes na placa base para assim promover uma maior deformação plástica do flyer ao colidir com a placa base e assim facilitar a ligação, Figura 2.13.

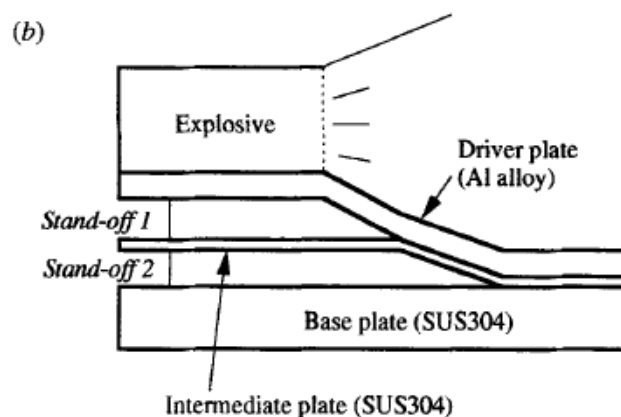


Figura 2.11. Técnica de soldadura por explosão utilizando uma placa intermédia (Hokamoto, et al., 1993).

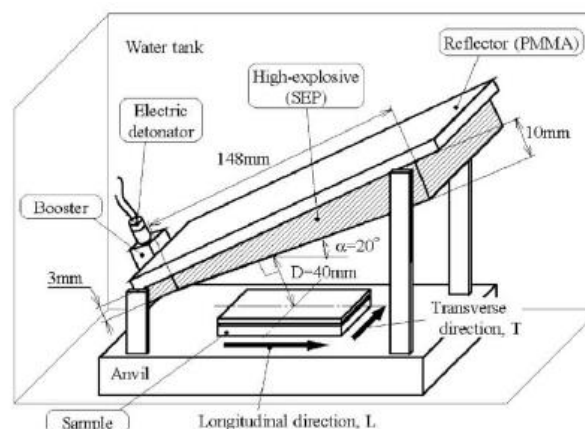


Figura 2.12. Técnica de soldadura por explosão debaixo de água (Hokamoto, et al., 2008).

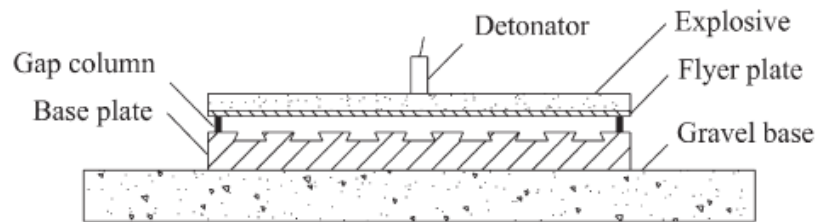


Figura 2.13. Soldadura por explosão utilizando entalhes na placa base (Li, et al., 2015).

2.10. Soldadura por Impulso Magnético

O processo de Soldadura por Impulso Magnético, SIM, é semelhante ao processo de Soldadura por Explosão, sendo diferente a origem da força de projeção que promove a ligação entre os materiais a unir; neste caso a força é magnética.

Como se observa na Figura 2.14, este processo utiliza uma montagem semelhante à de soldadura por explosão, utilizando um circuito elétrico que será responsável por criar o campo magnético que irá projetar um material contra o outro.

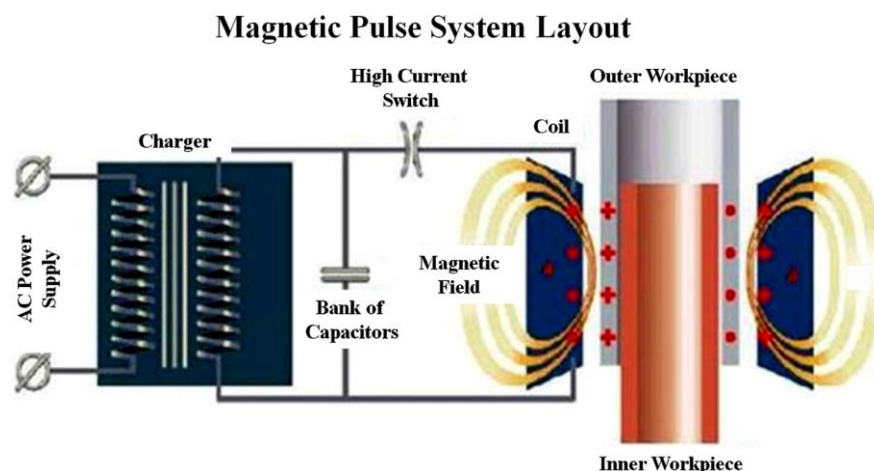


Figura 2.14. Esquema de montagem de tubular utilizando SIM (Ben-Artzy, et al., 2014).

Comparativamente ao processo de soldadura por explosão, este tem como vantagens: ser mais ecológico, não tendo a libertação de gases, ser facilmente mecanizável e não necessita de mão-de-obra especializada para operar com os equipamentos. Tem como desvantagem: o requisito de os materiais a unir terem obrigatoriamente de possuir propriedades magnéticas, os equipamentos serem dispendiosos, a definição da STD ótima ainda não é definida com clareza e existem limites para as espessuras e áreas que é possível unir.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterização Química e Microestrutural dos Materiais

Os materiais das placas utilizadas nas soldaduras foram o aço inoxidável austenítico AISI 304, para a placa de base, e o alumínio 6082-T6, onde o Magnésio e o Silício são os elementos de liga principais, para o *flyer*. Este alumínio é tratado termicamente, tendo sofrido uma solubilização, têmpera e envelhecimento artificial. As suas composições químicas são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 e a respetiva microestrutura nas Figura 3.1. e 3.2.

Tabela 3.1. Composição química do Aço AISI 304, em percentagem em peso.

	Mn Wt.%	N Wt.%	Si Wt.%	Cr Wt.%	P Wt.%	S Wt.%	Ni Wt.%	C Wt.%	Fe Wt.%
AISI	2	0,10	0,75	18-20	0,045	0,03	8-12	0,08	Restante
304	max	max	max		max	max	max	max	

Tabela 3.2. Composição química do Alumínio 6082-T6, em percentagem em peso.

	Mn Wt.%	Mg Wt.%	Si Wt.%	Cu Wt.%	Zn Wt.%	Ti Wt.%	Cr Wt.%	Outros Wt.%	Fe Wt.%	Al Wt.%
Al	0,4 -	0,60	0,70	0,0 -	0,0 -	0,0 -	0,0 -	0,0 -	0,0-	Restante
6082-T6	1	- 1,2	- 1,3	0,10	0,02	0,10	0,25	0,05	0,5	

A Figura 3.1 mostra que o grão do aço AISI 304 apresenta dimensões irregulares, com maclas, sendo visíveis precipitados na fronteira de grão.

A Figura 3.2 mostra que o alumínio apresenta o grão com dimensões irregulares e também alguns precipitados.

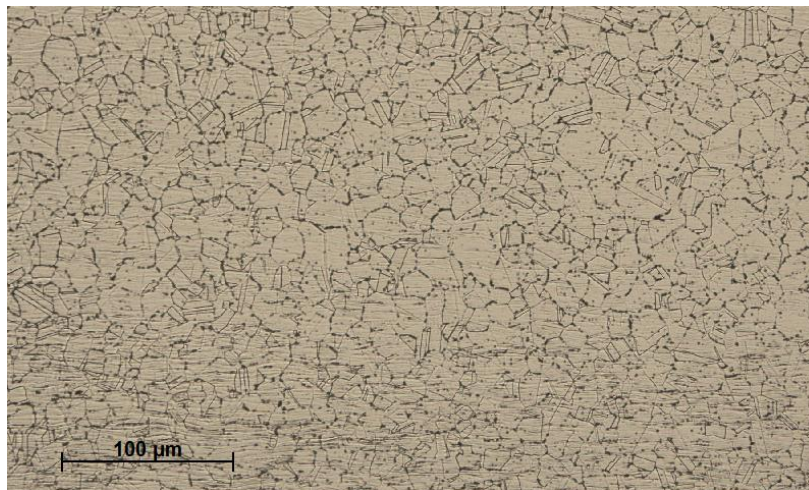


Figura 3.1. Microestrutura do Aço AISI 304.

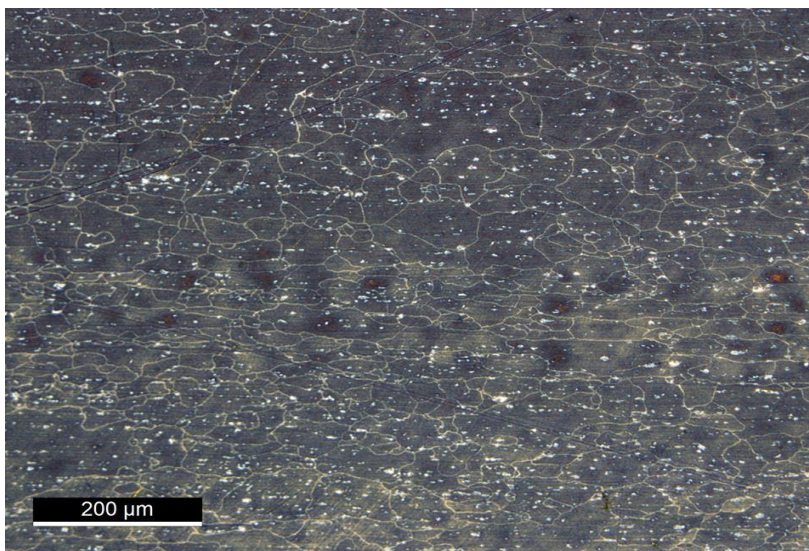


Figura 3.2. Microestrutura do Alumínio 6082-T6.

3.1.1. Dimensões das Placas

Na Tabela 3.3 são apresentadas as dimensões das placas utilizadas nos ensaios realizados. As dimensões e espessura das placas variaram de uns ensaios para os outros de modo a melhorar a probabilidade de êxito durante a soldadura. Na tabela já é ilustrada a nomenclatura utilizada para as soldaduras a qual está definida no ponto seguinte.

Na tabela são apresentados dois ensaios EW 15, onde o *flyer* era de alumínio. Neste ensaio a placa base era composta por uma placa de alumínio e uma de aço tendo-se obtido uma ligação similar e dissimilar. Dado que estas ligações foram obtidas no mesmo ensaio, têm o mesmo número de ensaio, sendo diferenciadas pela nomenclatura atribuída.

Tabela 3.3. Dimensões das placas utilizadas nos ensaios.

	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
EW 14-Al.Fe-3.3			
Flyer	200	65	3
Placa Base	125	65	3
EW 15-Al.Fe-5.3			
Flyer	200	65	5
Placa Base	125	65	3
EW 15-Al.Al-5.3			
Flyer	200	65	5
Placa Base	75	65	3
UEW 20-Al.Fe-5.3			
Flyer	250	125	5
Placa Base	250	127	3
EW 21-Al.Fe-5.3			
Flyer	250	82	5
Placa Base	250	75	3
EW 22-Al.Fe-3.3			
Flyer	250	76	3
Placa Base	250	75	3

3.1.2. Nomenclatura das Amostras

A nomenclatura utilizada seguiu a aplicada em dissertações anteriores, nomeadamente na dissertação de Gonçalo Barreto (Barreto, 2014) e Sandra Lourenço (Lourenço, 2015), adicionando mais informação a essa nomenclatura. Foi adicionada a informação sobre que materiais se utilizaram no ensaio e as espessuras das placas constituintes. A nomenclatura tem então a seguinte forma: (U)EW “a” - “ M_f ” . “ M_b ” - “ h_f ” . “ h_b ”. A letra “a” representa o número do ensaio, M_f e M_b representam o material do flyer e o material da placa base, respetivamente; h_f e h_b representam a espessura do flyer e da placa base, respetivamente. Serve como exemplo o seguinte ensaio: EW 14-Al.Fe-3.3, representado na Figura 3.3. Este foi o décimo quarto ensaio, onde o flyer era de alumínio, tendo a placa uma espessura de 3 mm, e a placa base era de aço, tendo uma espessura de 3 mm.

Utilizou-se UEW quando não foi obtida ligação entre as placas, sendo a abreviatura para “*Unsucessfull Explosive Welding*”. Quando o ensaio produziu ligação entre as placas, utilizou-se EW sendo a abreviatura para “*Explosive Welding*”.

A nomenclatura atribuída às amostras cortadas seguiu o seguinte tipo: (U)EW “a” - “ M_f ” . ” M_b ” - ” h_f ” . ” h_b ”- (“L” ou “T”) “b”.

A letra “b” representa o número da amostra, tomando como direção crescente a direção de detonação. Por fim, “L” significa que a amostra foi cortada para uma análise longitudinal, relativamente à direção de detonação e “T” para uma análise transversal, relativamente à mesma direção.

O primeiro ensaio realizado foi o EW 14-Al.Fe-3.3 pois o anterior a esse foi o EW 13, efetuado por Daniel Vitorino (Vitorino, 2016).

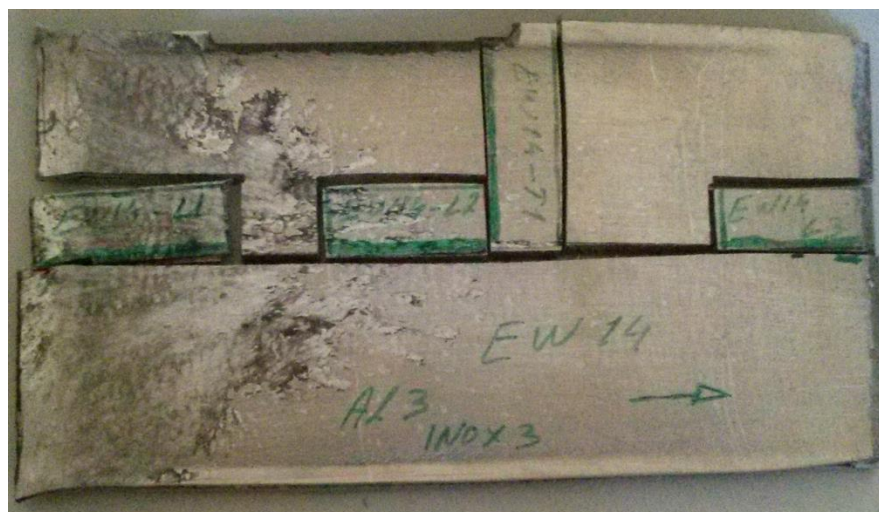


Figura 3.3. Amostras já cortadas do ensaio EW 14-Al.Fe-3.3

Nos ensaios de medição da velocidade de detonação, para composições de explosivo teste, utilizou-se a seguinte nomenclatura: VM-“c”. As letras VM são a abreviatura para “*Velocity Measurement*” e “c” é o número do ensaio.

3.2. Montagem Experimental

A preparação e montagem dos ensaios foram realizadas no DEM (Departamento de Engenharia Mecânica) e a execução decorreu no LEDAP (Laboratório de Energia e Detonação, Associação de Apoio), em Condeixa, Coimbra. Apenas a montagem final das sondas, para a medição da velocidade de detonação, foi feita no LEDAP, devido à

necessidade de verificação do seu correto funcionamento e posterior montagem no interior da câmara de explosão.

As placas de Alumínio foram cortadas no DEC (Departamento de Engenharia Civil), numa guilhotina, e as chapas de Aço Inoxidável foram cortadas na Vaco – Metalúrgica e Equipamentos de Inox, Eiras, Coimbra. As placas foram polidas, com lixa P320 (grãos por polegada linear), com o objetivo de eliminar sujidade e óxidos na superfície a soldar, fatores que podem comprometer o sucesso da soldadura.

As caixas para conter o explosivo, os separadores e o suporte para conter as sondas, para os ensaios EW 14-Al.Fe-3.3, EW 15-Al.Fe-5.3, EW 15-Al.Al-5.3 e EW 20-Al.Fe-5.3 eram formados designa-se MDF (*Medium-Density Fiberboard*). Para os ensaios EW 21-Al.Fe-5.3 e EW 22-Al.Fe-3.3 utilizaram-se caixas de PMMA (acrílico). As dimensões das caixas e dos suportes das sondas são apresentadas nos apêndices A, B e C.

Foram utilizadas três composições de explosivo, todas contendo uma percentagem de ANFO (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*). No ensaio EW 14-Al.Fe-3.3 utilizou-se 100% de ANFO. No ensaio EW 15-Al.Fe-5.3, EW 15-Al.Al-5.3, EW 20-Al.Fe-5.3 e EW 22-Al.Fe-3.3 utilizou-se 70% de ANFO e 30 % de emulsão explosiva à base de nitrato de amónia. No ensaio EW 21-Al.Fe-5.3 utilizou-se 50% de ANFO e 50% de emulsão explosiva com microesferas ocas de polímero (DE).

O cálculo da densidade de explosivo foi obtido de dois modos. Um modo utilizou um tubo oco, com volume conhecido e massa conhecida. Depois de cheio de explosivo, subtraiu-se a massa do tubo e, por fim, dividindo pelo volume interior do tubo, obteve-se a densidade. O segundo modo consistiu na pesagem da montagem experimental apenas com o iniciador de explosão, seguida da pesagem da montagem experimental já contendo explosivo. Subtraíram-se estes dois valores e dividindo pelo volume da caixa de explosivo, com iniciador, obteve-se a densidade do explosivo.

A montagem experimental consiste numa placa base, sobre a qual são colados os separadores, que impõem a STD. Sobre os separadores é colado o *flyer* e sobre este é colada a caixa de explosivo. Na Figura 3.4 são apresentadas a montagem das sondas para medição da V_d , a caixa de explosivo e a montagem final de um ensaio.

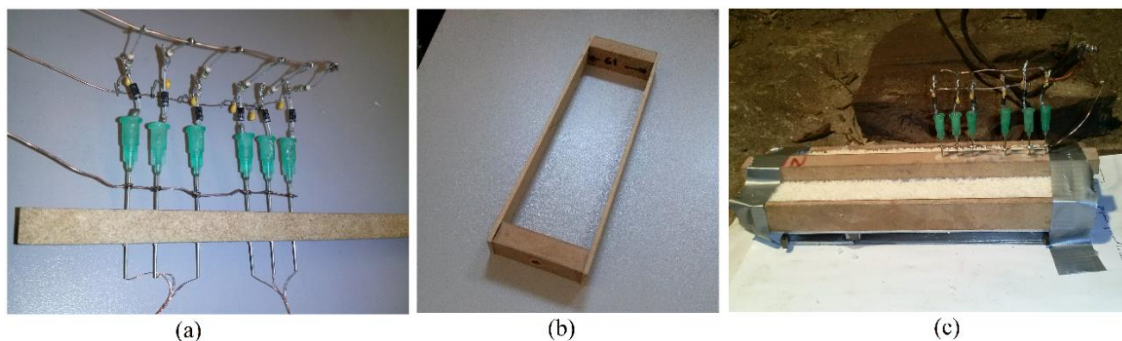


Figura 3.4. Componentes do ensaio experimental: (a) Montagem das sondas; (b) Caixa de Explosivo; (c) Montagem Final.

3.3. Medição da Velocidade de Detonação

Para a medição da velocidade de detonação recorreu-se ao método cronográfico, utilizado anteriormente por (Santos, 2013), (Barreto, 2014) e (Lourenço, 2015), em que as sondas de ionização são colocadas em pontos fixos dentro do explosivo.

O circuito elétrico utilizado, representado na Figura 3.5 (a), é constituído por seis sondas em paralelo. Uma sonda é composta por um condensador de 1 nF, uma resistência de 1 M Ω e um díodo. Ao díodo são estanhados dois fios de cobre entrelaçados e inseridos dentro de uma seringa com 0,8 mm de diâmetro, Figura 3.5 (b).

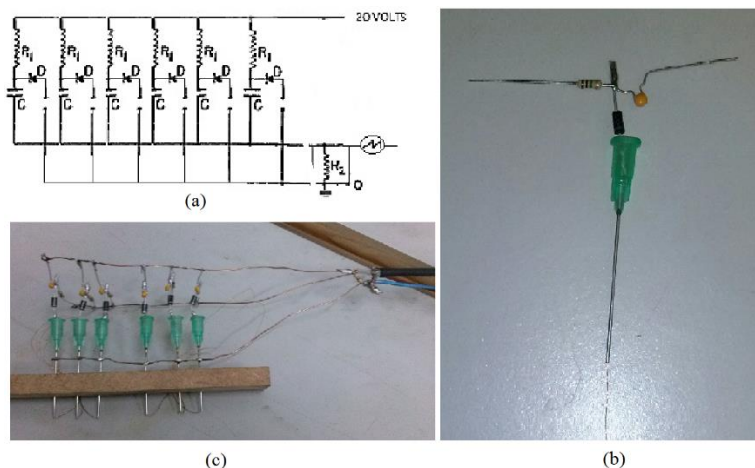


Figura 3.5. (a) Esquema elétrico para medição da velocidade de detonação; (b) Detalhe de uma sonda; (c) Montagem experimental do conjunto de sondas.

As seis sondas são ligadas em paralelo e alimentadas por uma fonte de tensão de 20 V, pelas resistências.

Os condensadores são carregados através das resistências. Quando a onda de detonação atinge a sonda, ocorre uma ionização, provocada pelo curto-circuito entre o tubo

de Aço e o fio condutor, fazendo com que o circuito externo, associado às sondas, gere um sinal de medida, causado pela descarga do condensador (Santos, 2013). Cada sinal é enviado para um osciloscópio digital, fornecendo os tempos entre cada sinal. Conhecido o tempo entre cada sinal e conhecidas as distâncias entre as sondas, estimou-se a velocidade de detonação. Esta estimativa através do tratamento de dados feito através do *software Excell*.

A velocidade de detonação foi medida nos ensaios EW15-Al.Fe-5.3, uma vez que para o ensaio EW14-Al.Fe-3.3 se utilizou o mesmo explosivo e em condições idênticas às utilizadas por Daniel Vitorino (Vitorino, 2016) no ensaio EW 13, onde foi medida a velocidade de detonação, admitindo-se então uma velocidade de detonação igual à de EW13. Para EW 20-Al.Fe-5.3 não se mediu a velocidade de detonação pois as condições eram idênticas às do ensaio EW 15-Al.Fe.5.3, admitindo-se, de novo, a mesma velocidade de detonação. Na Figura 3.6 apresenta-se os instantes de tempo obtido na medição da V_d no ensaio EW 15-Al.Fe-5.3. O ensaio VM-2 utilizou também este tipo de sondas.

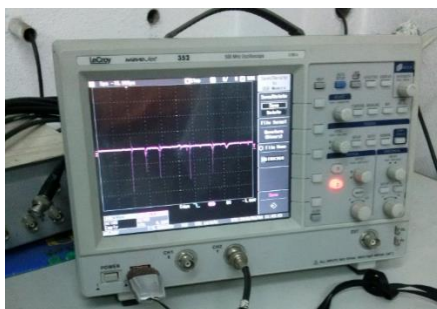


Figura 3.6. Medições realizadas no ensaio EW 15-Al.Fe-5.3 registadas no osciloscópio digital LeCroy Wavejet 352.

Para a medição da V_d do explosivo utilizado no ensaio VM-1 utilizou-se um sistema de medição mais simples, onde apenas se inseriu um fio de cobre em quatro tubos de aço, com um determinado diâmetro, e se estancou outro fio de cobre ao tubo de cada seringa. Ao detonar, o explosivo provoca o curto-circuito entre o fio interior e o tubo da seringa, provocando a descarga de um condensador no registador de sinal. O instante dessa descarga fica registado, dando o intervalo de tempo entre sondas e, sabendo a distância entre elas, obteve-se a V_d . Na Figura 3.7 apresenta-se a montagem das sondas referidas.

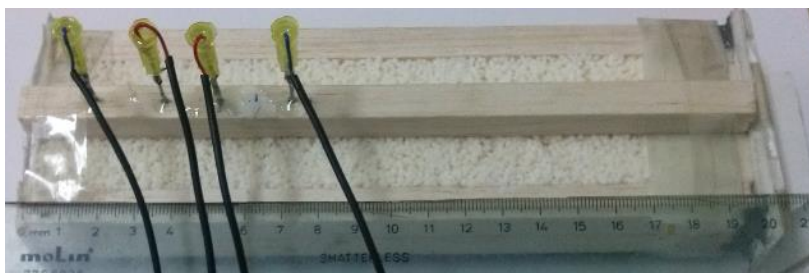


Figura 3.7. Montagem experimental dos sistema de medição da V_d utilizando 4 sondas.

3.4. Parâmetros de Soldadura

Apresentam-se na Tabela 3.4 os parâmetros gerais utilizados em cada ensaio.

Na vertical indicam-se os parâmetros e na horizontal os ensaios a que se referem.

Tabela 3.4. Parâmetros utilizados em cada ensaio.

Ensaio	EW14 Al.Fe- 3.3	EW15 Al.Fe- 5.3	EW15 Al.Al- 5.3	EW20 Al.Fe- 5.3	EW21 Al.Fe- 5.3	EW22 Al.Fe- 3.3
Material do Flyer	Al 6082-T6					
Material da placa base	AISI 304		Al 6082-T6	AISI 304		
Material de Suporte	Bloco de Aço sobre areia					
Explosivo	ANFO	70% ANFO+30% Eex			50% ANFO + %50 (Eex+DE)	70% ANFO + 30% Eex
$V_{explosivo}$ [cm^3]	224,5 32	228,56		604,53	436,6	436,6
$\rho_{explosivo}$ [kg/m^3]	0,925 6	1,078	1,078	1,093	1,261	1,029
$h_{explosivo}$ [mm]	20					
h_{Flyer} [mm]	3	5				3
R	2,3	1,6			1,9	2,5
STD [mm]	3,4	6,3				3,4

3.5. Metalografia

3.5.1. Preparação das Amostras

Uma vez cortadas as amostras, como representado na Figura 3.3, foram inseridas em moldes com resina epoxy e, depois desta solidificar, foram polidas com lixas P180, P320,

P600, P1000 e P2500 (grãos por polegadas linear). Após estes polimentos, utilizou-se um pano de polimento para amostras Alumínio-Ferro e Alumínio-Alumínio, e este foi molhado com uma solução de pó de diamante, com $3 \mu\text{m}$ de diâmetro, e utilizado lubrificante para reduzir o atrito e o aquecimento entre a amostra e o pano. Este último polimento foi feito no sentido de obter um acabamento superficial espelhado, necessário para uma boa análise microestrutural.

3.5.2. Ataque Químico

Na análise da microestrutura da ligação dissimilar foram utilizados dois ataques químicos. Para obter a microestrutura do Aço AISI 304 utilizou-se um ataque químico eletrolítico. Este ataque utilizou uma solução contendo 10 % de ácido oxálico, $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, e 90% de água, ligado a uma fonte de tensão com 6 V e 1 A. Este ataque foi feito por imersão, revelando o grão após 45 segundos de imersão. Este ataque foi consultado no “*ASM Metals handbook Volume 9 - Metallography and Microstructures*”. O ataque químico utilizado para revelar a microestrutura do alumínio foi uma solução contendo 1 ml de ácido fluorídrico e 100 ml de água, contudo este ataque não revelou o grão do alumínio. Isto deve-se à presença do Aço AISI 304. Em ligações dissimilares este é um problema encontrado quando se pretende revelar a microestrutura do Alumínio na presença de outro metal.

Para ligação similar Alumínio-Alumínio utilizou-se o reagente de Pulton modificado cuja solução contém 9 ml de ácido nítrico, HNO_3 , 6,5 ml de água, 6 ml de ácido clorídrico, HCl , 1 ml de trióxido de crômio, CrO_3 , e 0,5 ml de ácido fluorídrico, HF . Este ataque revelou a microestrutura quando a amostra foi imersa 40 segundos.

3.5.3. Análise Microestrutural

Na análise microestrutural das amostras utilizou-se um microscópio ótico *Leica DM 4000 MLED*, recorrendo ao *software Leica application suite* para fotografar as amostras. A análise morfológica da interface e as dimensões dos compostos intermetálicos foi realizada recorrendo ao *software Axio Vision SE 64 Rel. 4.9.1*.

3.5.4. Análise Química

A análise química foi feita no equipamento disponível no IPN (Instituto Pedro Nunes), um microscópio eletrónico de varrimento *Zeiss-Gemini 2* (SEM- Scannig Electron

Microscope), com um espectrômetro de dispersão de energia (EDS- Energy-dispersive X-ray Spectroscopy) acoplado. Desta forma foi possível analisar os compostos intermetálicos na interface, bem como a sua morfologia.

3.6. Análise Mecânica

3.6.1. Micro-dureza

As durezas das amostras obtidas foram medidas num equipamento *Struers-Duramin*, disponível no DEM.

Em todas as amostras as indentações foram feitas perpendicularmente à linha da interface. A indentação aplicou uma força de 200 gramas durante 15 segundos. O espaçamento entre as indentações foi de 250 μm , havendo sido feitas indentações com distâncias menores junto da interface para melhor se perceber a variação da dureza nessa zona. Nas amostras longitudinais efetuou-se apenas uma linha de medição, enquanto nas amostras transversais foram medidas três linhas, no início, meio e fim da amostra, considerando o início da amostra a zona correspondente ao centro das placas.

Foram também efetuadas medições pontuais nas regiões onde se encontravam os compostos intermetálicos. Estas indentações aplicaram uma força de 10 gramas, durante 15 segundos.

4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Enquadramento dos Ensaios na Janela de Soldabilidade

4.1.1. Velocidade de Detonação

A velocidade de detonação, V_d , foi medida sempre que a composição de explosivo se alterou.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as posições das sondas, os tempos registados e a velocidade de detonação obtida, para cada ensaio.

Tabela 4.1. Dados para medição de Velocidade de Detonação e o seu valor.

Nº	EW 15 Al.Fe-5.3		VM-1		VM-2		EW 14 Al.Fe-3.3
	Sonda [mm]	Tempo [µs]	Sonda [mm]	Tempo [µs]	Sonda [mm]	Tempo [µs]	-
0	0	0	0	FALHA	0	0	-
1	9,08	4,48	19,52	FALHA	9,28	3,48	-
2	8,28	8,84	35,53	26,527	8,88	7,16	-
3	20,30	18,64	55,08	35,245	18,68	14,7	-
4	14,22	26,14	-	-	14,8	22,42	-
5	8,72	30,84	-	-	9,7	29,4	-
V_d [m/s]	2127		2242		2389		2077

A medição da V_d para o ensaio EW 14-Al.Fe-3.3 não foi efetuada pois a composição do explosivo e espessura era idêntica à do ensaio EW 13, realizado por Daniel Vitorino, onde mediu a velocidade, assumindo-se, assim, o mesmo valor.

Na medição da V_d em VM-1, ocorreu uma falha nas duas primeiras sondas que recebem a onda de choque. Posto isto, a velocidade foi calculada com base nos dois últimos

instantes de tempo e no último intervalo entre sondas. A composição utilizada neste ensaio não foi utilizada em nenhum ensaio com placas, pois a velocidade obtida era inferior à teoricamente necessária para uma soldadura por explosão Al-Fe e Al-Al.

A composição utilizada no ensaio VM-2 foi aplicada no ensaio EW21-Al.Fe-5.3. Apesar de a V_d ser superior à teoricamente necessária, esta composição também não produziu ligação entre as placas.

4.1.2. Velocidade de Projeção

A velocidade de projeção, V_p , foi calculada utilizando a metodologia descrita na secção 2.3.2.1., através do conhecimento do valor de V_d , conforme metodologia proposta em (Ribeiro, et al., 2014).

Os valores das constantes C_1 e C_2 , utilizadas na equação 2.11, são calibrados, iterativamente, por forma a que a curva da equação de V_p , equação 2.10, passe pelos pontos de calibração com coordenadas $(t_{cal}, V_{p,cal})$.

No cálculo de V_p é considerado o inverso do Rácio de explosivo, R , ou seja, a razão entre a massa do *flyer* e a massa de explosivo. Uma vez que a área do *flyer* afetada pela explosão é igual à área da caixa de explosivo, o valor do inverso do Rácio é calculado através da razão entre a espessura do *flyer* e a espessura do explosivo, multiplicadas pelas suas densidades, respetivamente.

Como exemplo, apresenta-se, na Figura 4.1, o gráfico da calibração do ensaio EW 21-Al.Fe-5.3, gráfico obtido através da aplicação das equações 2.10 e 2.12, com os dados de ensaio. Neste ensaio a STD era de 6,3 mm e a velocidade de projeção estimada foi de 818,2 m/s. Na Tabela 4.2, são apresentadas as velocidades de projeção dos ensaios realizados.

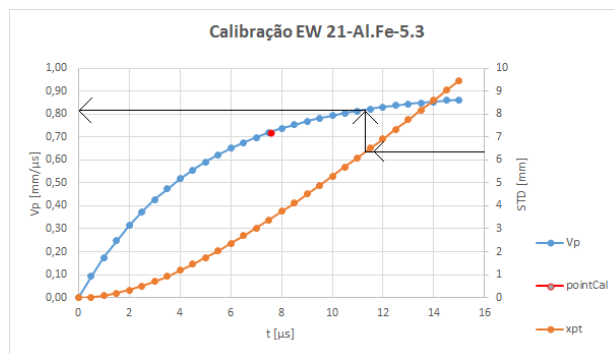


Figura 4.1. Gráfico de calibração para o ensaio EW 21-Al.Fe-5.3.

Todos os dados necessários para cálculo da V_p , bem como os gráficos de calibração para cada ensaio, são apresentados no apêndice D.

4.1.3. Ângulo de Colisão

Uma vez obtido o valor de V_c e V_p , aplicando a equação 2.9 obtém-se o valor do ângulo de colisão β . Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de β estimados para cada ensaio.

Conhecido o valor de V_c e β , é então possível, enquadrar as soldaduras na Janela de Soldabilidade.

4.1.4. Relação entre Variáveis

Na Tabela 4.2 estão expostos na vertical os valores da densidade de explosivo, ρ_{exp} , do Rácio de explosivo, R , de V_p , de V_d , de β e da STD, de cada ensaio. Na horizontal, apresentam-se os ensaios realizados. A ordem dos ensaios foi escolhida com o objetivo de colocar lado a lado os ensaios com a mesma STD e espessuras de *flyer*, e, assim, simplificar a análise dos dados da tabela.

Será seguidamente apresentada uma análise entre as variáveis expostas.

Tabela 4.2. Dados sobre os ensaios.

	EW14- Al.FE-3.3	UEW 22- Al.Fe-3.3	EW 15- (Al.Fe/Al.Al)- 5.3	UEW 20- Al.Fe-5.3	UEW 21- Al.Fe-5.3
Tipo de Explosivo	ANFO	70% ANFO + 30% Matriz	70% ANFO + 30% Eex		50% ANFO + 50% (Eex+DE)
ρ_{exp} [kg/m^3]	0,9256	1,029	1,078	1,093	1,261
R	2,3	2,5	1,6	1,6	1,9
V_p [m/s]	867,7	905,9	762,9	766,1	818,2
β [°]	24,76	25,24	21,22	21,30	20,25
V_d [m/s]	2077	2127	2127	2127	2389
STD [mm]	3,4		6,3		

4.1.4.1. Relação entre V_p e R

Para ensaios com a mesma STD, verificou-se que o aumento do Rácio de explosivo conduz, também, ao aumento da velocidade de projeção da placa. Este resultado já era esperado uma vez que as velocidades de detonação dos explosivos com maior Rácio, são superiores às dos explosivos com menor Rácio, concluindo-se assim que uma maior energia foi fornecida ao *flyer* levando a que a sua velocidade de projeção fosse maior.

4.1.4.2. Relação entre β e R

Para os ensaios EW 14-Al.Fe-3.3 e UEW 22-Al.Fe-3.3, com uma STD de 3,4 mm, observa-se o aumento do ângulo de colisão com o aumento do Rácio. Isto deve-se ao facto de um maior Rácio implicar uma maior V_d e uma maior V_p .

Comparando agora EW 15-(Al.Fe/Al.Al)-5.3 e UEW 20-Al.Fe-5.3 com UEW 21-Al.Fe-5.3, ensaios com uma STD de 6,3 mm, observa-se que β diminui. Esta diminuição deve-se ao facto de, apesar de a composição de explosivo com 50%ANFO+50% (Eex+DE) fornecer uma maior V_p , a sua V_d não é substancialmente maior à V_d da composição com 70%ANFO+30%Eex, o que resulta numa razão entre V_p e V_d menor para o ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3, logo o seu valor de β é menor.

4.1.4.3. Relação entre V_p e β

Em todos os ensaios o aumento de V_p conduziu ao aumento de β , exceto no ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3 pelo motivo acabado de referir, na secção anterior.

4.1.5. Enquadramento dos Ensaios

A partir das equações 2.2, 2.3, 2.4 e 2.7, e utilizando os valores tabelados no apêndice E, foi construída a Janela de Soldabilidade para cada ensaio.

Na Figura 4.2 são apresentadas as Janelas de Soldabilidade para o ensaio EW 14-Al.Fe-3.3, utilizando diferentes valores para o parâmetro N . Apesar de não ter sido possível obter resultados concretos quanto ao efeito do parâmetro N , para esta combinação de materiais, pode-se ver que utilizando o parâmetro $N=0,11$, a área onde é possível obter uma soldadura por explosão com qualidade é muito menor comparativamente com a área utilizando $N=0,062$. As Janelas de Soldabilidade, para cada ensaio e para valor de N , são apresentadas no apêndice E.

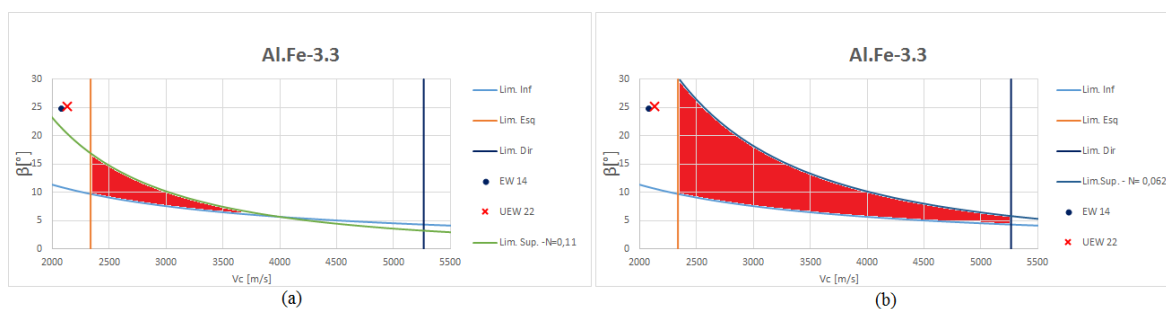


Figura 4.2. Efeito do parâmetro N na Janela de Soldabilidade: (a) $N=0,11$; (b) $N=0,062$.

Após realizados os ensaios, estes foram enquadrados na sua Janela de Soldabilidade. Todos ficaram fora e à esquerda da Janela de Soldabilidade, à exceção do ensaio UEW 21-Al-Fe-5.3, que ficou dentro da Janela de Soldabilidade quando N é igual a 0,062.

No ensaio EW 14-Al-Fe-3.3, apesar de ficar fora da Janela de Soldabilidade, foi obtida ligação entre as placas. Contudo esta ligação revelou-se fraca, ocorrendo separação das amostras EW 14-Al-Fe-3.3-L1 e EW 14-Al-Fe-3.3-L3, quando estas estavam a ser serradas. Já era esperado que tal acontecesse uma vez que a detonação se extinguiu a meio do *flyer*, como será exposto na secção 4.2.2.1.

Nos ensaios EW 15-Al-Fe-5.3 e EW 15-Al-Al-5.3, embora também estejam fora da Janela da Soldabilidade, foi obtida novamente ligação. Nestes ensaios o explosivo detonou por completo e já foram visíveis compostos intermetálicos, na interface Al-Fe, ainda que pontuais. Embora as placas não se tenham separado durante o serramento das amostras, esta ligação apresenta porosidade, o que sugere uma baixa resistência mecânica desta ligação.

Aquando a realização do ensaio UEW 20-Al-Fe-5.3, ensaio realizado nas mesmas condições dos dois ensaios anteriores, este não ligou. O motivo atribuído a este resultado não é o facto de se situar fora da Janela de Soldabilidade mas sim o explosivo utilizado. Na composição do explosivo foi utilizado ANFO seco e ANFO com cerca 2% de humidade. A altura de explosivo era de 20 mm, sendo preenchidos 18 mm com explosivo contendo ANFO seco e 2 mm com ANFO húmido. Atribui-se a não ligação entre placas à provável falta de detonação do ANFO húmido, não tendo assim sido reunidas as condições dos ensaios prévios.

O ensaio UEW 21-Al-Fe-5.3 localizou-se dentro da Janela de Soldabilidade para um valor de $N=0,062$, contudo não foi obtida ligação. Atribui-se este insucesso à conjugação

de dois acontecimentos: a fusão de material na interface e a reflexão da onda de impacto na placa de suporte. Esta análise é suportada pela existência de compostos intermetálicos na interface de ambas as placas. As placas colidem, fundindo material entre elas. Quando a onda de choque é refletida na placa de suporte e volta às placas dos materiais a unir, o material fundido ainda não solidificou, ocorrendo a separação entre as placas.

O ensaio UEW 22-Al.Fe-3.3 foi realizado nas mesmas condições dos ensaios EW 15-Al.Fe-5.3 e EW 15-Al.Al-5.3. Após o ensaio, as placas encontravam-se ligadas até metade do seu comprimento e ocorreu a separação total das mesmas quando se serraram. O insucesso neste ensaio é atribuído ao motivo apresentado para o insucesso no ensaio anterior.

4.2. Análise Macroscópica

4.2.1. Montagem Experimental

Como já foi referido, todos os ensaios seguiram a configuração plana, contudo houve alterações feitas com o objetivo de promover a ligação entre as placas.

4.2.1.1. Placa de Apoio

Nos ensaios EW 14-Al.Fe-3.3 e EW 15-Al.Fe-5.3, o *flyer* tinha um comprimento superior à placa base. O motivo desta diferença era permitir que a onda de choque já esteja estabilizada quando promove o choque entre as placas. Por isso, foi necessário aplicar uma placa de apoio para se conseguir uma montagem estável.

No ensaio EW 14-Al.Fe-3.3 utilizou-se uma placa de *K-line*, contudo, devido à reduzida resistência deste material, ocorreu deformação plástica no início da ligação, devido ao choque do *flyer* com a placa suporte. Esta deformação ajudou à separação da amostra EW 14-Al.Fe-3.3-L1. Pode observar-se a deformação referida na Figura 4.3 (a).

Para o ensaio EW 15-Al.Fe-5.3 procurou-se resolver este problema substituindo a placa de *K-line* por uma de Alumínio 6082-T6. Esta alteração produziu bons resultados, não só foi eliminada a deformação inicial, entre o *flyer* e a placa base, como foi obtida ligação em todo o comprimento das placas, quer de Al-Al, quer de Al-Fe. Apresenta-se este resultado na Figura 4.3 (b). O resultado da alteração da placa de apoio também é visível na superfície do *flyer*, como podemos ver nas Figuras 4.3 (c), para o ensaio EW 14-Al.Fe-3.3 e Figura 4.3 (d), para o ensaio EW 15-Al.Fe-5.3.

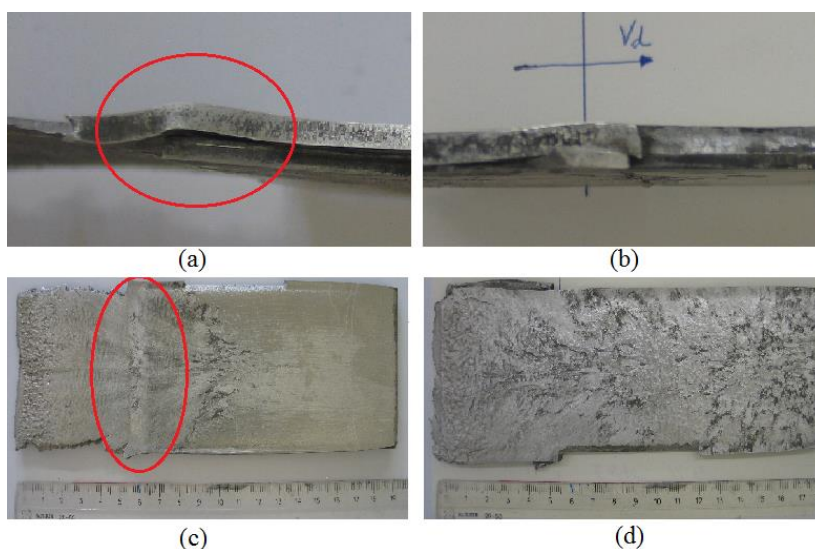


Figura 4.3. Efeito da placa de apoio no resultado final da soldadura: (a) EW 14-Al.Fe-3.3 - Detalhe no início da ligação; (b) EW 15-Al.Fe-5.3 – Detalhe no início da ligação; (c) Superfície do *flyer* da EW 14-Al.Fe-3.3; (d) Superfície do *flyer* da EW 15-Al.Fe-5.3.

Para os restantes ensaios, o pretendido era obter provetes para ensaios mecânicos, consistindo a montagem experimental em placas de igual comprimento e uma caixa de explosivo com um comprimento superior. Neste caso, o problema da deformação inicial já não ocorria e para selar a caixa de explosivo foi simplesmente colado um pedaço de cartão.

4.2.2. Efeito do Rácio de explosivo nas Superfícies das Placas

Nesta secção será analisado o efeito do Rácio de explosivo na superfície das placas. Esta análise foi seccionada em duas partes: na primeira, onde se analisa os ensaios com placas de iguais espessuras e na segunda, com placas de espessuras diferentes.

4.2.2.1. Ensaios EW 14-Al.Fe-3.3 e UEW 22-Al.Fe-3.3

Os ensaios analisados nesta secção são caracterizados por terem espessuras de *flyer* e placa base idênticas, igual a 3 mm.

No ensaio EW 14-Al.Fe-3.3 o Rácio de explosivo foi de 2,3. Ao observar a Figura 4.4 (a), verifica-se que a superfície exterior do *flyer* apenas apresenta marcas da explosão até cerca de um terço do comprimento da ligação, estando o resto da superfície sem grande alteração, o que sugere que a explosão se extinguiu. Atribui-se a separação da amostra EW 14-Al.Fe-3.3-L3 à extinção da explosão. Ainda assim é possível ver na zona afetada pela explosão que a superfície ficou levemente enrugada.

No ensaio UEW 22-Al.Fe-3.3 o Rácio de explosivo foi de 2,5. Neste ensaio, o explosivo detonou por completo e apresentou maior velocidade de detonação conferindo maior velocidade de projeção ao *flyer*, o que resultou uma superfície bastante enrugada, reduzindo esta deformação no sentido da detonação, como podemos observar na Figura 4.4 (b). Neste ensaio não foi obtida ligação entre as placas, sendo analisada as faces que colidiram, como se observa na Figura 4.5. Tem-se então uma zona escura, referente ao início da colisão onde ocorreu a ligação parcial, que se desfez aquando do corte; e uma zona cinzenta às manchas. Embora não seja perceptível a olho nu, ocorreu projeção de Alumínio no Aço, afirmação sustentada pela observação de compostos intermetálicos nas superfícies que colidiram, como se poderá ver na secção 4.3.1.3.



Figura 4.4. Efeito do Rácio na superfície final da soldadura. (a) superfície exterior da EW 14-Al.Fe-3.3; (b) superfície exterior da UEW 22-Al.Fe-3.3.

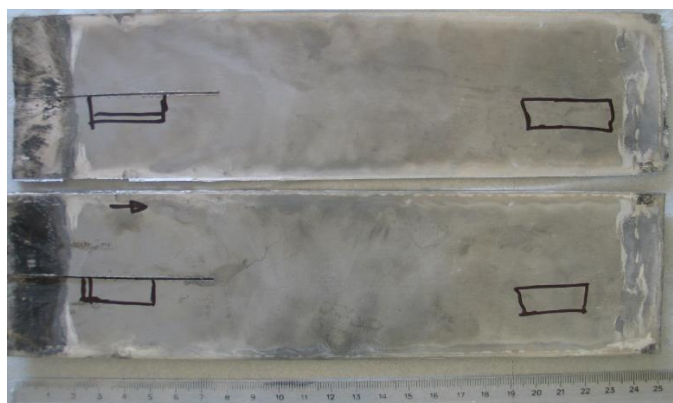


Figura 4.5. Superfície das faces que colidiram do ensaio UEW 22-Al.Fe-3.3.

4.2.2.2. Ensaios EW 15-Al.Fe-3.3, UEW 20-Al.Fe-5.3 e UEW 21-Al.Fe-5.3

Os ensaios analisados nesta secção são caracterizados por terem uma espessura de *flyer* de 5 mm e uma espessura de placa base de 3 mm. O aumento da espessura do *flyer* teve como objetivo a redução do ângulo de colisão.

Na Figura 4.6 são apresentadas as superfícies superiores dos *flyers* dos ensaios EW 15-Al.Fe-5.3, UEW 20-Al.Fe-5.3 e UEW 21-Al.Fe-5.3, tendo sido de 1,6 o Rácio de explosivo de EW 15-Al.Fe-5.3 e UEW 20-Al.Fe-5.3 e de 1,9 em UEW 21-Al.Fe-5.3.

Observa-se na Figura 4.6 (a) e (b) uma superfície enrugada e manchada pelo explosivo, e observa-se também uma fratura, assinalada, na Figura 4.6 (b).

Na Figura 4.6 (c) observa-se uma superfície mais limpa e mais lisa. Este último aspeto, aliado à aparência das bordas laterais, evidencia o efeito de uma maior velocidade de detonação e de projeção da placa. Uma maior $V_d = V_c$ e maior V_p , conduz a maior energia cinética do *flyer*, o que leva a maior dano na superfície desta placa.

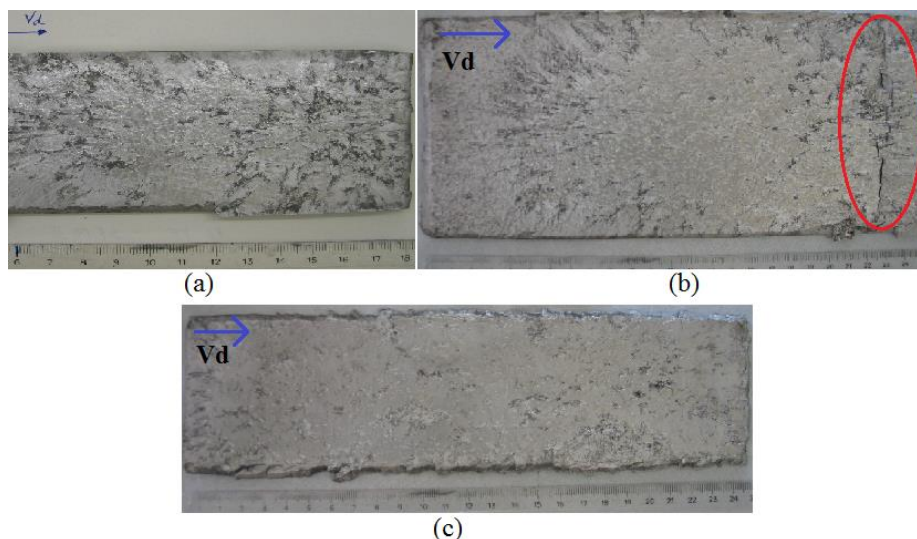


Figura 4.6. Efeito do Rácio na superfície final da soldadura: (a) superfície exterior da EW 15-Al.Fe-5.3; (b) superfície exterior da UEW 20-Al.Fe-5.3; (c) superfície exterior da UEW 21-Al.Fe-5.3.

Não foi obtida ligação nos ensaios UEW 20-Al.Fe-5.3 e UEW 21-Al.Fe-5.3, tendo sido analisadas as faces que colidiram, conforme Figura 4.7.

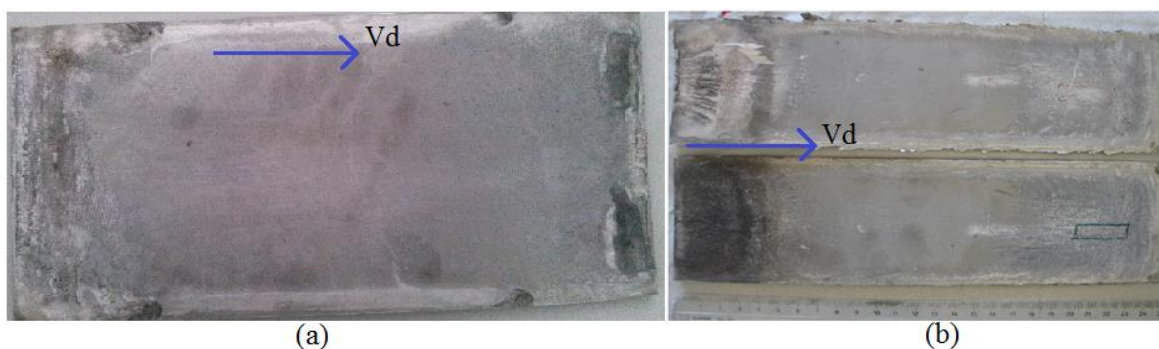


Figura 4.7. Superfície que colidiram: (a) face da placa base que colidiu do ensaio UEW 20-Al.Fe-5.3; (b) faces das placas que colidiram do ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3.

Na Figura 4.7 é possível distinguir três zonas distintas em todas as placas. Uma zona inicial escura, no início da colisão das placas, uma zona intermédia, mais ou menos homogénea, e uma zona heterogénea, no final da colisão.

Na zona final da placa representada na Figura 4.7 (a), correspondente à placa base, de Aço, do ensaio UEW 20-Al.Fe-5.3, observaram-se pequenos pedaços de alumínio soldado. Já as placas representadas na Figura 4.7 (b), analisadas quimicamente, apresentaram compostos intermetálicos. Concluiu-se, embora também não seja perceptível a olho nu, que ocorreu projecção de alumínio no aço; esta afirmação é sustentada pela observação de compostos intermetálicos nas superfícies que colidiram, como se poderá ver na secção 4.3.1.3.

4.3. Análise Microscópica

4.3.1. Soldadura Al-Fe

Dos ensaios realizados, apenas os ensaios EW 14-Al.Fe-3.3 e EW 15-Al.Fe-5.3 produziram amostras para análise da interface Al-Fe. Em todas as amostras não foi possível revelar o grão do Alumínio por estar na presença do Aço, que inibe o ataque químico utilizado para o Alumínio.

4.3.1.1. EW 14-Al.Fe-3.3

Como já foi exposto na secção 4.1.5., e se pode observar no apêndice E, este ensaio situou-se à esquerda do limite esquerdo da Janela de Soldabilidade, ou seja, na zona onde não é provável a ocorrência de uma interface ondulada, independentemente do valor do parâmetro N . Deste ensaio também só foram analisadas as amostras EW 14-Al.Fe-3.3-L2 e EW 14-Al.Fe-3.3-T1, expostas na Figura 4.8.

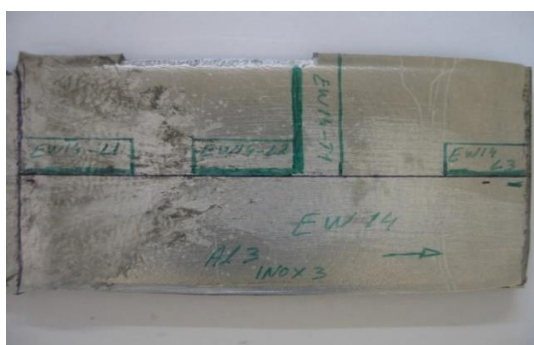


Figura 4.8. Extração de provetes na soldadura EW 14-Al.Fe-3.3.

Na Figura 4.9 (a) é apresentada a amostra L2. Como se pode ver, não há qualquer ondulação na interface e, quando feita uma ampliação na zona da interface, Figura 4.9 (b), a espessura da linha da interface sugere que a ligação entre as placas não é contínua mas sim pontual, porosa, devendo ser por isso uma ligação fraca.

Ao analisar a amostra T1, Figura 4.10, são tiradas conclusões idênticas.

O tamanho de grão no material base não se alterou, mantendo as marcas características da direção de laminagem.

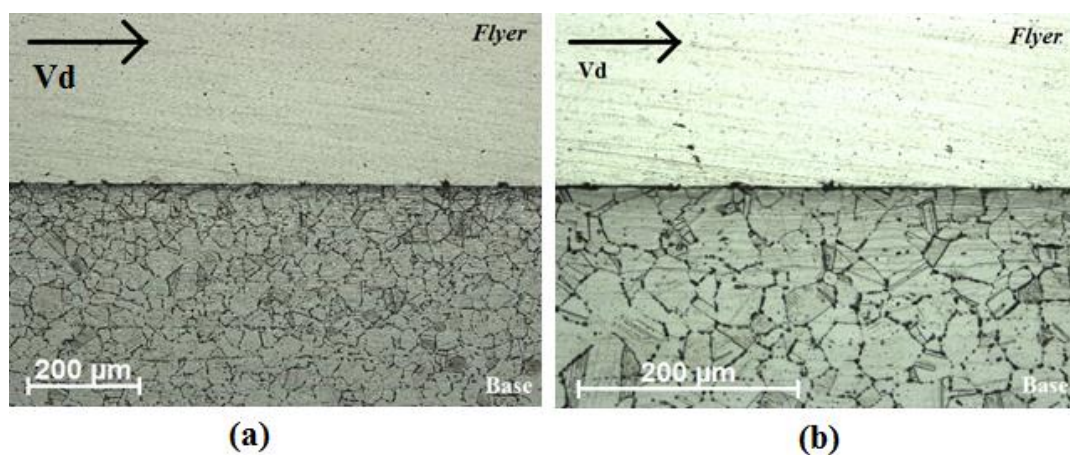


Figura 4.9. Soldadura EW 14-Al.Fe-3.3-L2.

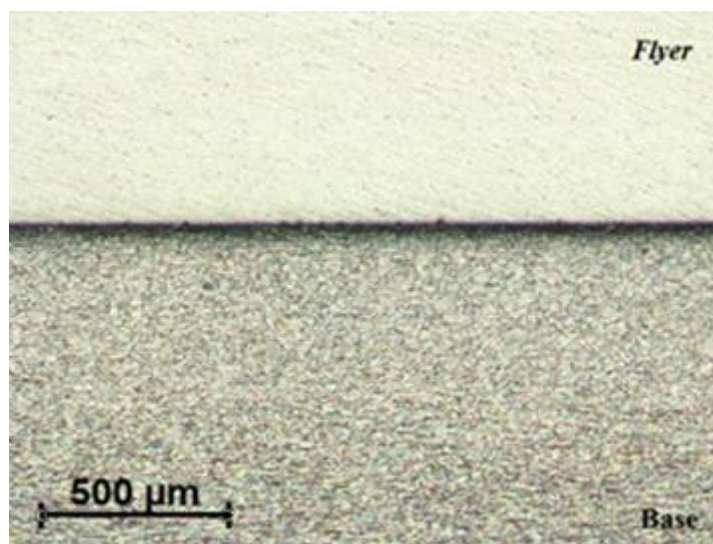


Figura 4.10. Soldadura EW 14-Al.Fe-3.3-T1.

Analisada esta soldadura conclui-se que o limite da formação da interface ondulada se verificou, uma vez que a soldadura se localizou à esquerda deste limite e não ocorreu uma interface ondulada. Também não foram observados compostos intermetálicos em qualquer das amostras, o que sugere que o valor para o parâmetro N mais indicado para

este caso seria 0,062. Foi obtida uma soldadura por explosão, contudo esta não estava contida na área da Janela de Soldabilidade onde estas apresentam boa qualidade, o que se verificou devido a apenas se obter duas amostras deste ensaio.

4.3.1.2. EW 15-Al.Fe-5.3



Figura 4.11. Soldadura EW 15-Al.Fe-5.3.

Também este ensaio, representado na Figura 4.11, se situou à esquerda do limite esquerdo da Janela de Soldabilidade, verificando-se uma interface linear, característica desta zona.

Este ensaio também apresentou uma linha da interface que sugere fraca adesão entre as placas, Figura 4.12, contudo, devido à maior velocidade de detonação do explosivo utilizado, já é possível ver a formação de compostos intermetálicos na interface.

Na Figura 4.12 (a) vemos uma fenda mas esta deve-se à falta de adesão entre as placas, pois observou-se o alongamento do grão na interface. Esta fenda pertence à amostra L1, ou seja, representa a zona do início da colisão entre as placas. Apesar desta fenda, a amostra manteve-se unida, o que mostra que a alteração da placa de apoio para um material mais resistente, favorece a soldadura das placas.

O comprimento e altura dos compostos intermetálicos diminuiu no sentido da detonação, o que faz sentido, uma vez que a explosão perde energia no seu avanço.

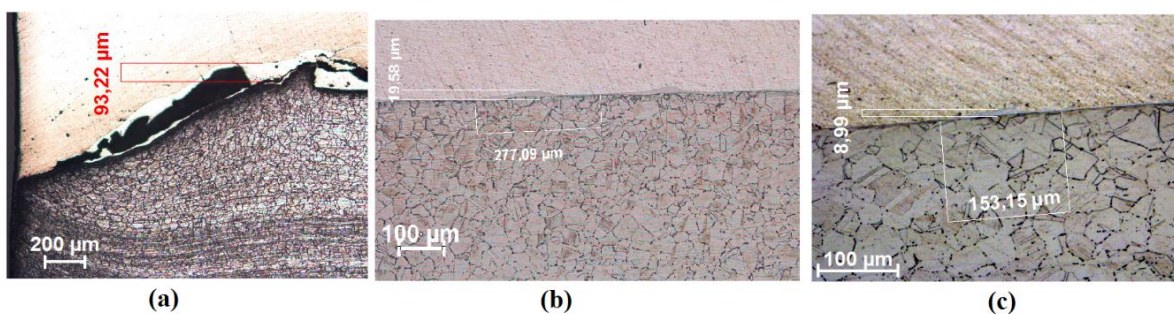


Figura 4.12. Soldadura EW 15-Al.Fe-5.3: (a) Amostra L1; (b) Amostra L2; (c) Amostra L3.

A análise à amostra transversal desta soldadura não mostra diferenças das amostras anteriores. Observa-se que o tamanho dos compostos intermetálicos diminui do meio da soldadura para as suas bordas laterais.

Uma vez que foram observados compostos intermetálicos isto sugere que o valor para o parâmetro N mais indicado seria 0,11.

4.3.1.3. UEW 20-Al.Fe-5.3, UEW 21-Al.Fe-5.3 e UEW 22-Al.Fe-3.3

Nos ensaios UEW 20-Al.Fe-5.3, UEW 21-Al.Fe-5.3 e UEW 22-Al.Fe-3.3 não foi obtida ligação entre as placas; ainda assim, foram retiradas amostras longitudinais dos ensaios UEW 21-Al.Fe-5.3 e UEW 22-Al.Fe-3.3 para tentar perceber o que correu mal.

No ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3, foi possível observar em todas as amostras compostos intermetálicos, conforme Figura 4.13.

Estes compostos intermetálicos apresentam uma morfologia porosa, o que sugere que a sua solidificação ocorreu ao ar, ou seja, após a placas se separarem, devido à reflexão da onda de choque na placa de suporte, como já foi referido. A esta camada de compostos intermetálicos, precedida da fusão da camada superficial, atribui-se a causa mais provável do insucesso deste ensaio.

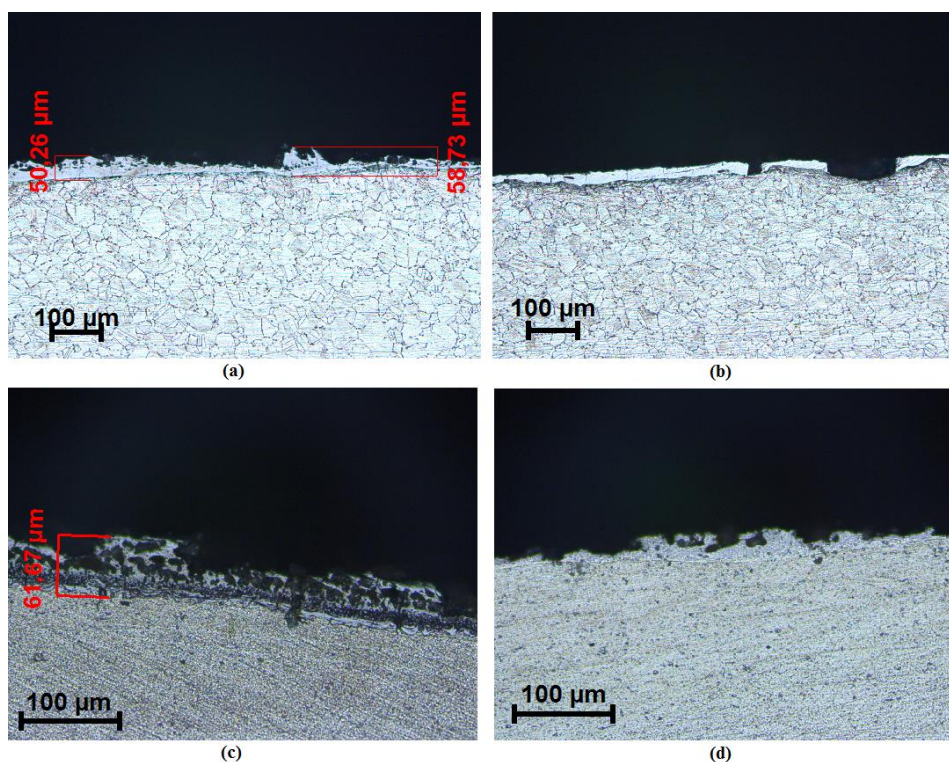


Figura 4.13. Soldadura UEW 21-Al.Fe-5.3: (a) Amostra L1-Fe; (b) Amostra L2-Fe; (c) Amostra L1-Al; (d) Amostra L2-Al.

Observando os compostos intermetálicos é possível detetar também fissuras, o que sugere que estes compostos intermetálicos são frágeis. Atribui-se a elevada quantidade de compostos intermetálicos ao aumento da velocidade de detonação de explosivo. Esta aumenta a energia cinética da placa e a sua dissipação na interface, por conseguinte, aumenta a formação de compostos intermetálicos na interface.

No ensaio UEW 22-Al.Fe-3.3 apenas foram visíveis compostos intermetálicos no *flyer*, como se observa na Figura 4.14.

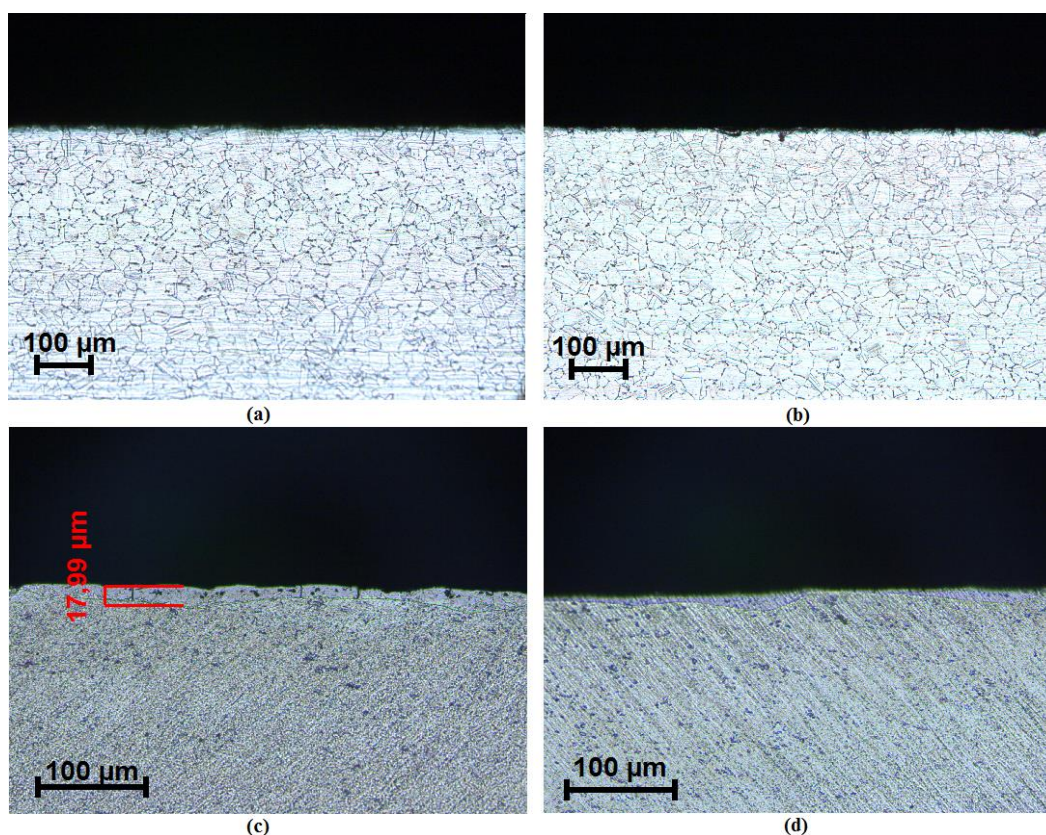


Figura 4.14. Soldadura UEW 22-Al.Fe-3.3: (a) Amostra L1-Fe; (b) Amostra L2-Fe; (c) Amostra L1-Al; (d) Amostra L2-Al.

Como é possível comparar, na Figura 4.13 observam-se compostos intermetálicos com uma espessura de 50,26 a 58,73 μm no Aço, e de 60,67 μm no Alumínio. Já na Figura 4.14, é na amostra L1-Al que se observa uma zona de composto intermetálico com maior espessura, igual a 17,99 μm , muito inferior às observadas na Figura 4.13. O ensaio UEW 22-Al.Fe-3.3 apresentou maior velocidade de projeção, igual a 905,9 m/s, e um Rácio de explosivo maior, comparativamente ao ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3, que teve um velocidade de projeção igual a 818,2 m/s. Atribui-se, então, a maior formação de compostos intermetálicos no ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3 à maior velocidade de detonação do explosivo

e, por conseguinte, à maior velocidade de colisão das placas, bem como à maior massa do *flyer*.

4.3.2. Soldadura Al-Al

4.3.2.1. EW 15-Al.AI-5.3

Este ensaio, em que colidiram duas placas de Alumínio 6082-T6, também se situou à esquerda do limite esquerdo da Janela de Soldabilidade, para qualquer valor de N . Contudo, observando a Figura 4.15, vê-se claramente uma interface ondulada, aumentando a amplitude e comprimento de onda na direção da velocidade de detonação.



Figura 4.15. Soldadura EW 15-Al.AI-5.3: Amostra L1.

Atribui-se esta formação de interface ondulada a dois aspetos: ao facto de o iniciador, explosivo que faz detonar a composição de explosivo utilizada no ensaio, estar também posicionado em cima do *flyer*. A velocidade de detonação deste iniciador, mais a velocidade do explosivo utilizado, deve gerar, por breves instantes, uma velocidade que permite a formação desta interface; e ao facto se utilizarem materiais iguais, com propriedades iguais. Ainda assim, esta ligação assume-se como fraca pois, como se pode ver na Figura 4.16, a amostra transversal apenas mostrou ligação até cerca de metade do seu comprimento.



Figura 4.16. Soldadura EW 15-Al.AI-5.3: Amostra T1.

Para avaliar a influência do parâmetro N na Janela de Soldabilidade, observando a Figura 4.15, são visíveis zonas de material fundido, concluindo-se assim que, neste caso, o valor de 0,11 para o parâmetro N seria o mais indicado.

4.3.3. Análise dos Compostos Intermetálicos

Para determinar a morfologia e composição dos compostos intermetálicos foram analisadas amostras dos ensaios EW 14-Al.Fe-3.3, EW 15-Al.Fe-5.3, UEW 21-Al.Fe-5.3 e UEW 22-Al.Fe-3.3 através de SEM/EDS.

No ensaio EW 14-Al.Fe-3.3 não foram observados compostos intermetálicos, como já referido na secção 4.3.1.1. Do ensaio EW 15-Al.Fe-5.3 foram analisadas as amostras L2 e L3. Do ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3 foram analisadas as amostras L1 da placa base e L2, de ambas as placas, *flyer* e base. Do ensaio UEW 22-Al.Fe-3.3 foi analisada a amostra L2 do *flyer*.

Os resultados obtidos nos espetros apresentam-se em percentagem mássica, tendo sido depois convertida automaticamente para percentagem atómica, ignorando os elementos residuais presentes nas amostras. Por fim, estes resultados foram comparados com os dados apresentados na Tabela 2.1.

Em todas as amostras analisadas os elementos Crómio e Níquel estiveram presentes, o que sugeriu uma composição de compostos intermetálicos $(Fe, Cr, Ni)_xAl_y$. Contudo, tal como afirmado por F. Barbier em (F. Barbier, et. al, 1996), esta composição pode tomar-se como uma composição binária Fe_xAl_y . Ainda assim, devido à presença de Crómio e Níquel, estes elementos dificultam a definição do composto intermetálico presente. Comparando com os dados existentes na literatura, permitiram identificar compostos intermetálicos presentes.

4.3.3.1. EW 15-Al.Fe-5.3

Neste ensaio observaram-se compostos intermetálicos na interface e, após observação através do microscópio eletrónico de varrimento, destacaram-se as áreas, apresentadas na Figura 4.17, estando o Alumínio 6082-T6 no lado esquerdo e o Aço AISI 304 do lado direito. Na Figura 4.18, apresentam-se os espetros das zonas 4 e 5 da Figura 4.17 (b), que sugerem a fase intermetálica $FeAl_3$ e Fe_2Al_5 , respetivamente. Estas áreas são representativas das zonas analisadas neste ensaio.

Como é possível ver, o composto intermetálico cresce a partir do Aço para Alumínio. Não tem uma composição homogénea, apresentando manchas que correspondem a diferentes compostos intermetálicos. A sua diferente coloração também indica que têm diferentes densidades, sendo os compostos mais escuros os de menor densidade.

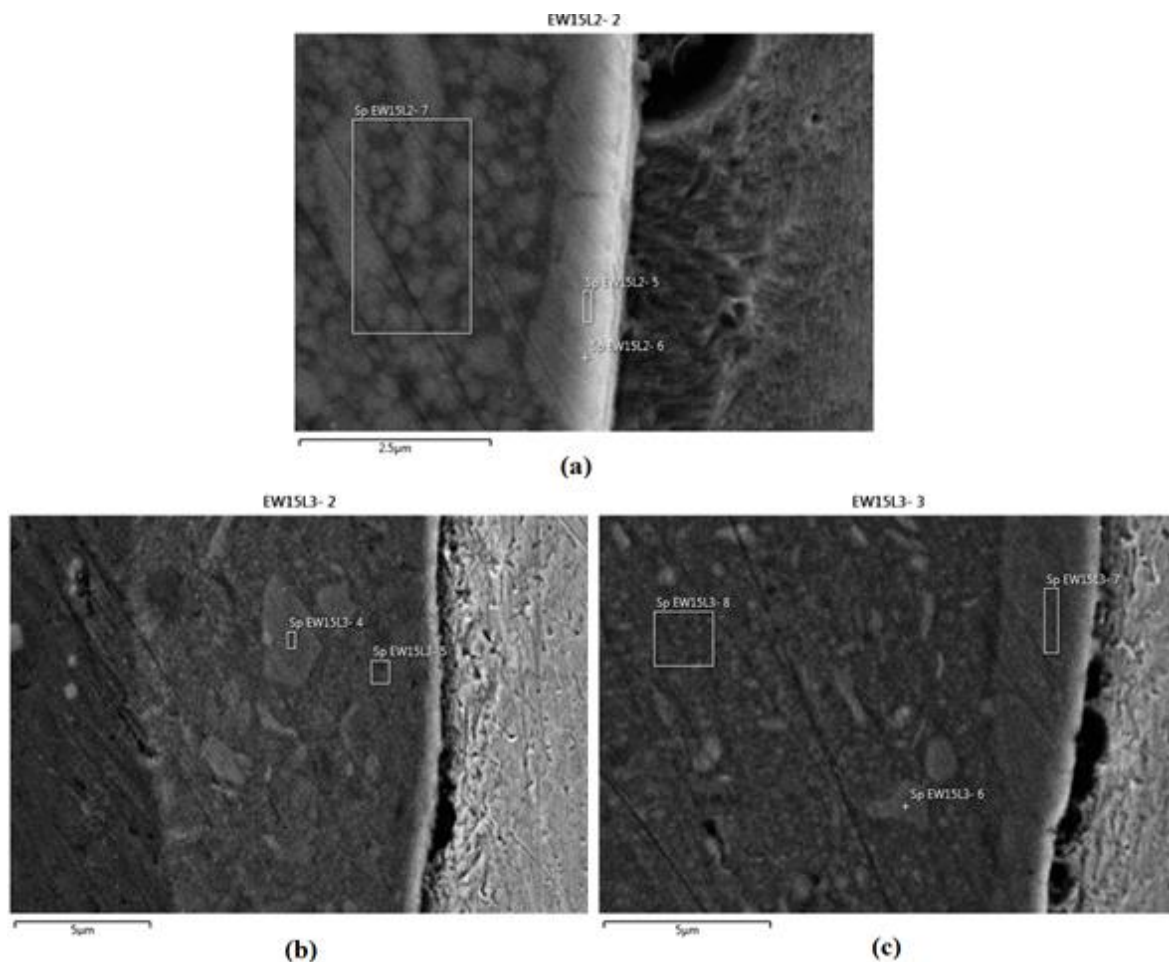


Figura 4.17. Análise EDS das amostras L2 e L3: (a) Amostra L2, secção 2; (b) Amostra L3, secção 2; (c) Amostra L3, secção 3.

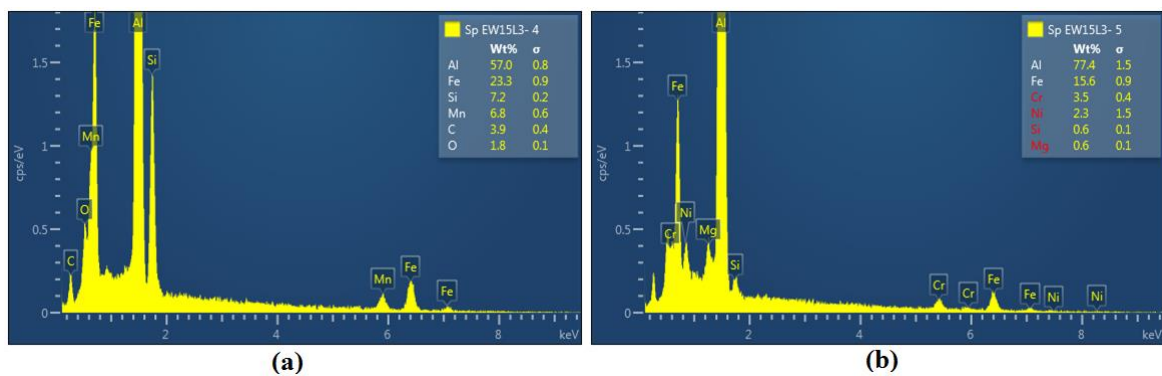


Figura 4.18. Espectro químico: (a) zona EW15L3-4 ($FeAl_3$); (b) zona EW 15L3-5 (Fe_2Al_5).

Após analisados os vários espectros foram contruídas as tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, onde se apresenta a percentagem mássica e atómica dos elementos relevantes e indica-se o composto intermetálico a que, provavelmente, corresponde essa composição, quando comparados com os dados da literatura.

Tabela 4.3. Composição química da secção analisada L2-2.

Elemento:	L2-2					
	Zona 5		Zona 6		Zona 7	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
Al	50	68,67	47,4	66,5	67,9	88,66
Fe	31,8	21,11	33,8	22,67	18,3	10,8
Cr	8,3	5,93	8,6	6,25	4,8	3,08
Ni	4,8	3,05	5,6	3,6	3,7	2,08
Composto Intermetálico	$FeAl_3$		$FeAl_3$		Fe_2Al_5	

Tabela 4.4. Composição química da secção analisada L3-2.

Elemento:	L3-2			
	Zona 4		Zona 5	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
Al	57,0	72,53	77,4	86,8
Fe	23,3	14,36	15,6	8,45
Cr	7,2	8,84	3,5	2,02
Ni	6,8	4,27	2,3	1,19
Composto Intermetálico	$FeAl_3$		Fe_2Al_5	

Tabela 4.5. Composição química da secção analisada L3-3.

Elemento:	L3-3					
	Zona 6		Zona 7		Zona 8	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
Al	56,3	72,57	67,1	81,94	76,5	88,63
Fe	23,1	14,47	20,3	12,05	13,1	7,4
Cr	0,9	0,58	4,8	3,06	3,3	1,99
Ni	-	-	3,0	1,7	1,0	0,55
Composto Intermetálico	$FeAl_3$		Fe_2Al_5		Fe_2Al_5	

Após esta análise foram também efetuadas medições de dureza nas zonas onde estavam presentes os compostos intermetálicos. Foram medidas durezas entre $523Hv_{0,010}$ e $674Hv_{0,010}$, não estando nenhum dos valores contidos na gama dos compostos intermetálicos referidos, mas sim na gama do composto intermetálico $FeAl$, podendo este estar presente também, tendo como base os valores obtidos por Kobayashi (Kobayashi, et.al,

2002). Não é então possível tirar uma conclusão tendo como base as medições de dureza. Para uma melhor definição dos compostos intermetálicos presentes deve recorrer-se à técnica de Difração de Raios X, que fornecerá dados exatos quanto à composição química presente.

4.3.3.2. UEW 21-Al.Fe-5.3

Deste ensaio foram analisadas as amostras L1 e L2, de ambas as placas, *flyer* e base. Apresentam-se, seguidamente, os resultados obtidos para as amostras L2, que se consideram representativos das zonas analisadas neste ensaio.

Na Figura 4.19 apresentam-se as zonas analisadas e nas Tabelas 4.6 e 4.7, a percentagem mássica e atómica dos elementos relevantes e indica-se, novamente, o composto intermetálico a que, provavelmente, corresponde essa composição, quando comparados com os dados da literatura.

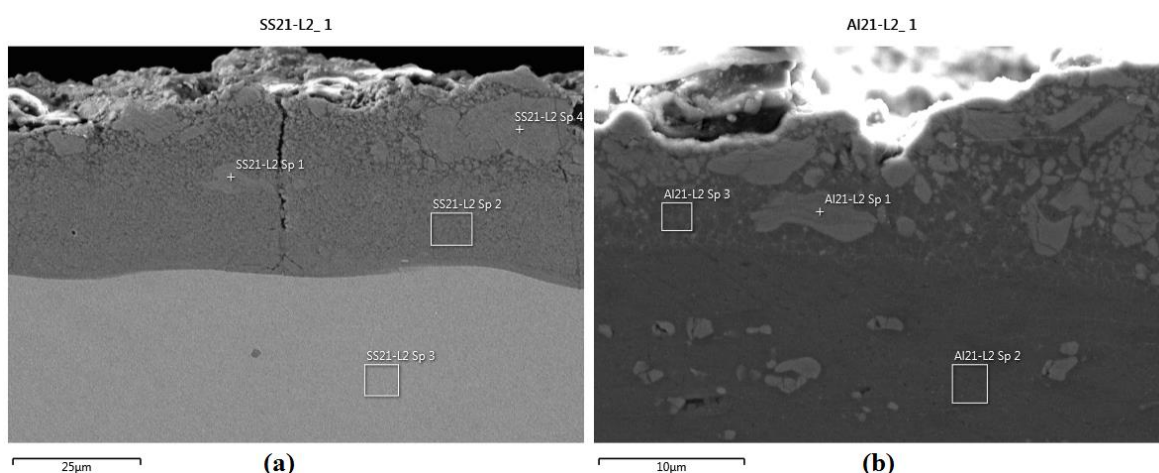


Figura 4.19. Análise EDS das amostras L2: (a) Amostra L2, placa base, secção 1; (b) Amostra L2, *flyer*, secção1.

Tabela 4.6. Composição química da secção analisada SS21-L2.

Elemento	L2-1							
	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
Al	55,2	71,36	67,3	80,48	-	-	61,8	76,18
Fe	31,5	19,67	24,0	13,85	71,8	70,99	27,5	16,38
Cr	8,2	5,48	6,4	3,99	18,8	19,96	6,7	4,29
Ni	4,4	2,6	1,5	0,84	9,1	8,57	2,7	1,56
Composto Intermetálico	$FeAl_3$		Fe_2Al_5		AISI 304		Fe_2Al_5	

Tabela 4.7. Composição química da secção analisada AL21-L2.

Elemento:	L2-1					
	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
Al	63,6	77,91	98,0	97,31	87,1	93,28
Fe	27,0	15,96	-	-	8,7	4,51
Cr	5,5	3,52	-	-	2,5	1,38
Ni	3,1	1,77	-	-	1,7	0,83
Composto Intermetálico	Fe_2Al_5		Al 6082 - T6		Maioritariamente Al 6082-T6	

Nestes ensaios não foram conseguidos valores de dureza úteis para análise pois a indentação não apresentava uma marca válida para análise. Contudo, observa-se uma fissura na região do composto intermetálico, Figura 4.19 (a), o que sugere ser um composto intermetálico frágil. Os compostos intermetálicos, constituídos por Alumínio e Ferro, mais ricos em Alumínio, são mais frágeis, tal como mencionado por Kobayashi (Kobayashi, et. al, 2002). Os resultados obtidos estão de acordo com o mencionado por este autor, os compostos intermetálicos que surgem na interface são ricos em Alumínio.

4.3.3.3. UEW 22-Al.Fe-3.3

Neste ensaio foi analisada a amostra L2 do *flyer*. Na tentativa de uma melhor definição do composto intermetálico, foi feita uma maior ampliação na região do composto intermetálico, destacando-se as secções 2 e 3, apresentadas na Figura 4.20. Nas Tabelas 4.8 e 4.9, apresenta-se a percentagem mássica e atómica dos elementos relevantes, nos pontos analisados. A zona 4 e 7 foram destacadas a escuro nas tabelas para uma mais rápida percepção.

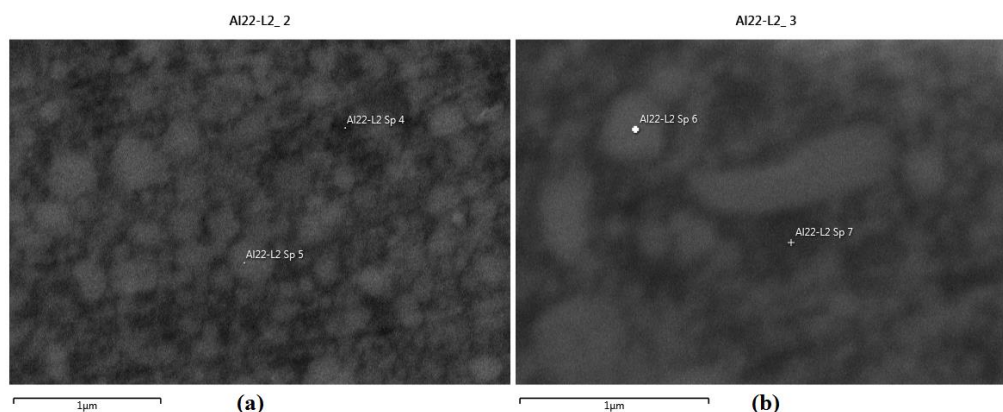
**Figura 4.20.** Análise EDS das amostras L2: (a) Amostra L2, secção 2; (b) Amostra L2, secção 3.

Tabela 4.8. Composição química da secção analisada L2-2.

Elemento:	L2-2			
	Zona 4		Zona 5	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
Al	82,1	88,71	75,4	84,45
Fe	11,5	5,98	17,0	9,19
Cr	3,4	1,88	4,7	2,72
Ni	0,8	0,42	0,7	0,35

Tabela 4.9. Composição química da secção analisada L2-3.

Elemento:	L2-3			
	Zona 6		Zona 7	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
Al	74,4	85,56	85,8	92,5
Fe	21,1	11,74	10,9	5,7
Cr	4,5	2,7	3,2	1,81
Ni	-	-	-	-

Analisando as percentagens obtidas não é possível tirar nenhuma conclusão quanto ao composto intermetálico presente na amostra. Trata-se de um composto intermetálico rico em Alumínio, mas as percentagens não se aproximam a nenhuma das gamas conhecidas dos compostos intermetálicos. Contudo, é possível concluir que as zonas mais escuras, destacadas nas tabelas, apresentam maior quantidade de Alumínio e são também as de menor densidade.

Também não foram conseguidos valores de dureza úteis para análise, pois a indentação não apresentava uma marca válida para análise. Contudo, observa-se uma fissura na região do composto intermetálico, Figura 4.21, o que sugere ser um composto intermetálico frágil, tirando-se a mesma conclusão referida no final da secção anterior.

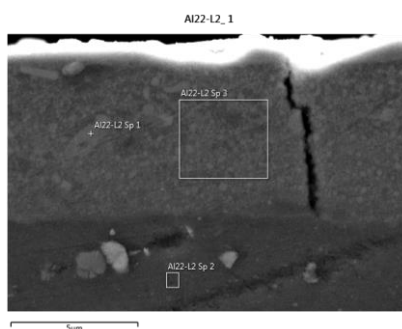


Figura 4.21. Análise EDS das amostras L2, secção 1.

4.4. Análise de Dureza

Para estudar o efeito da explosão na alteração da dureza dos materiais base, foram efetuadas medições de dureza nas amostras obtidas dos ensaios. As indentações foram sempre realizadas perpendicularmente à linha da interface. Nas amostras longitudinais foi efetuada uma linha de medições e nas amostras transversais foram efetuadas três linhas de medições. A direção de laminagem das placas utilizadas não foi tida em consideração.

Nas medições de dureza realizadas nos materiais base obteve-se uma dureza média medida de 170 Hv_{0,2}, para o Aço AISI 304, e de 114 Hv_{0,2} para o Alumínio 6082-T6.

4.4.1. Soldadura EW 14-Al.Fe-3.3

Como já foi referido, este ensaio apenas forneceu duas amostras, a amostra longitudinal L2 e a amostra transversal T1. Na Figura 4.22 são apresentados os gráficos que ilustram a variação da dureza, das amostras referidas, ao longo da sua espessura.

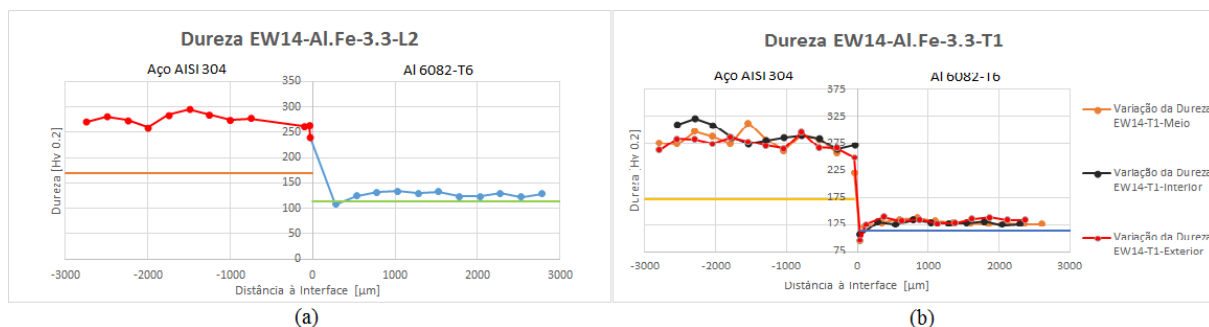


Figura 4.22. Variação da dureza em EW14-Al.Fe-3.3: (a) amostra L2; (b) amostra T1.

Como já era esperado, a dureza aumentou em ambas as placas devido à deformação plástica. Não se regista um aumento de dureza significativo na interface, devido à deformação plástica, além de não se formarem compostos intermetálicos. Observa-se para a amostra T1 uma redução de dureza junto da interface. Esta redução de soldadura deve-se à dissolução dos precipitados no Alumínio nesta zona, tornando-o mais macio.

A dureza média na placa base foi de 271 Hv_{0,2}, e no *flyer* foi de 126 Hv_{0,2}.

4.4.2. Soldadura EW 15-Al.Fe-5.3

Deste ensaio foram obtidas amostras da ligação Al-Fe e da ligação Al-Al. Serão primeiro expostos os resultados obtidos das medições nas amostras da ligação Al-Fe.

4.4.2.1. Ligação Al-Fe

Foram obtidas quatro amostras deste ensaio, três longitudinais e uma transversal. Será apenas exposto o gráfico da amostra longitudinal L2, representativa do que sucedeu em todo o comprimento do ensaio, e o gráfico da amostra transversal T1, Figura 4.23.

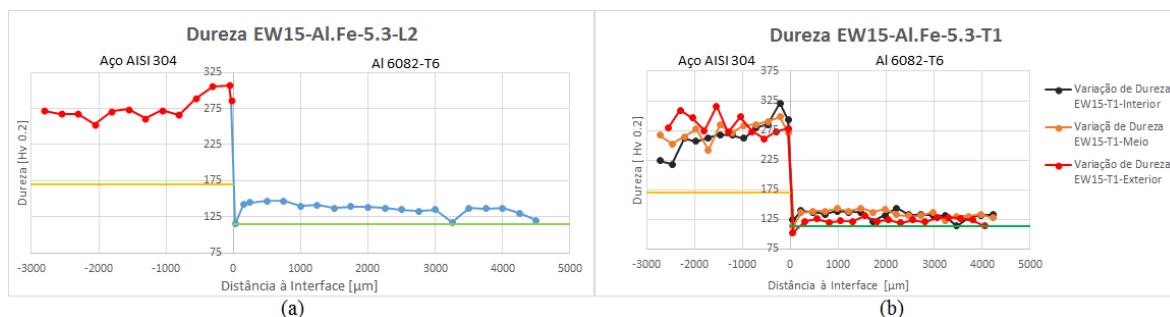


Figura 4.23. Variação da dureza em EW15-Al-Fe-5.3: (a) amostra L2; (b) amostra T1.

Neste ensaio, apesar da formação de compostos intermetálicos, a sua dimensão não foi suficiente para provocar aumentos de dureza significativos na zona da interface, tendo sido registado um resultado semelhante ao do ensaio anterior. Contudo, devido à maior velocidade de detonação do explosivo, a deformação plástica aumentou no *flyer*, e, como tal, neste ensaio foi registado uma dureza média no *flyer* de 132 Hv_{0,2}, superior à registada para o ensaio anterior. Na placa base a dureza média tem um valor de 274 Hv_{0,2}.

4.4.2.2. Ligação Al-Al

Da ligação Al-Al foram obtidas duas amostras, uma longitudinal e uma transversal. Na Figura 4.24 são apresentados os gráficos que descrevem a variação da dureza nestas amostras. Neste caso, apenas foi realizada uma linha de medições na amostra T1, pois esta amostra apresentou separação entre as placas até cerca de metade do seu comprimento.

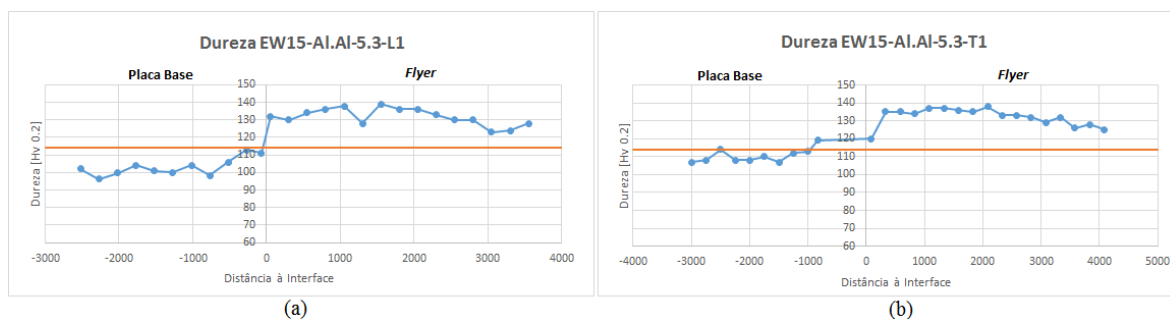


Figura 4.24. Variação da dureza em EW15-Al-Al-5.3: (a) amostra L1; (b) amostra T1.

Também nestes gráficos se observa o mesmo aumento de dureza no *flyer*. Já a placa base apresenta uma ligeira redução de dureza. Uma vez que houve material fundido

podemos atribuir este ligeiro decréscimo de dureza à dissolução dos precipitados presentes neste Alumínio, tornando-o ligeiramente mais macio.

4.4.3. Ensaio UEW 21-Al.Fe-5.3

Apesar de este ensaio não ter apresentado ligação, onde se utilizou uma nova composição de explosivo, foram efetuadas medições de dureza nas amostras longitudinais L1 da placa base e do *flyer*, para saber que alteração produziu na dureza destas placas.

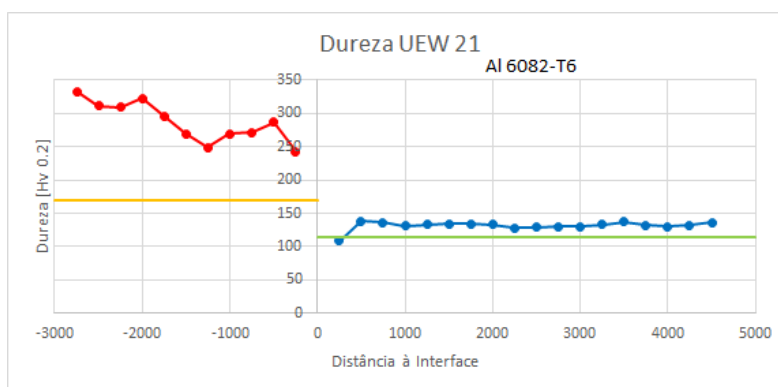


Figura 4.25. Variação da dureza em EW 21-Al.Fe-5.3-L1.

No *flyer* a dureza média registada foi de 132 $Hv_{0,2}$, e na placa base foi de 287 $Hv_{0,2}$.

Apresenta-se na Tabela 4.10 a influência da velocidade de detonação, ou seja, a velocidade de colisão das placas no aumento de dureza nas placas que colidem, para a ligação Al-Fe.

Tabela 4.10. Efeito da Velocidade de Detonação na Dureza das chapas.

	R	$V_c [m/s]$	Aumento de Dureza no <i>Flyer</i> [%]	Aumento de Dureza na placa base [%]
EW 14-Al.Fe-3.3	2,3	2077	10,5	59,4
EW 15-Al.Fe-5.3	1,6	2127	15,8	61,2
UEW 21-Al.Fe-5.3	1,9	2389	15,8	68,9
EW 15-Al.Al-5.3	1,6	2127	23,9	-9,5

Fica então visível o efeito da velocidade de detonação do explosivo. Apesar do menor valor de Rácio de explosivo, para os ensaios em que o *flyer* tinha 5 mm de espessura, o aumento da velocidade de detonação levou a um maior aumento da dureza final nas placas.

5. CONCLUSÕES

O trabalho realizado permite tirar as seguintes conclusões:

- Para ensaios iniciais, a colocação de uma placa de apoio de um material mais resistente, neste caso de uma placa de *K-Line* para uma placa de alumínio, melhora a qualidade da soldadura;
- A velocidade de projeção, V_p , aumenta com o aumento do Rácio de explosivo, R , para a mesma distância entre placas, STD;
- O ângulo de colisão, β , aumenta com o aumento de R ;
- O ângulo de colisão, β , aumenta com o aumento de V_p ;
- O aumento de R , conduz a uma superfície exterior do *flyer* com pior acabamento superficial;
- Não foi possível concluir com clareza qual o valor do parâmetro N mais indicado a ter em conta na construção da Janela de Soldabilidade, para a combinação Alumínio-Ferro;
- O aumento de R conduz a uma maior formação de compostos intermetálicos;
- Os compostos intermetálicos apresentam uma composição que sugere tratar-se dos compostos $FeAl_3$ e Fe_2Al_5 . Contudo, as durezas medidas nas zonas com compostos intermetálicos sugerem que o composto $FeAl$ também pode estar presente;
- As zonas de compostos intermetálicos apresentam uma morfologia heterogénea, existindo mais que um composto intermetálico dentro da mesma zona;
- A dureza aumenta com o aumento de R e também com o aumento da velocidade de colisão, V_c . Foi registado o maior aumento percentual de dureza na placa base;
- As composições explosivas utilizadas, apesar de terem detonado, não forneceram uma V_c suficiente para aproximar os ensaios da Zona de Soldabilidade com qualidade.

Trabalhos Futuros:

Este trabalho foi uma primeira abordagem à soldadura por explosão de Alumínio-Ferro, pelo que já era esperada dificuldade em obter ligação através da configuração plana convencional. Sugere-se:

- Que uma nova configuração seja estudada: a configuração plana utilizando uma placa intermédia.
- Novos explosivos devem ser testados, no sentido de se obter uma velocidade de colisão que permita realizar ensaios que se localizem dentro da Janela de Soldabilidade, onde é possível a obtenção de uma soldadura por explosão com qualidade.

Para uma melhor definição dos compostos intermetálicos presentes sugere-se a análise destes compostos através da técnica de Difração de Raios X.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

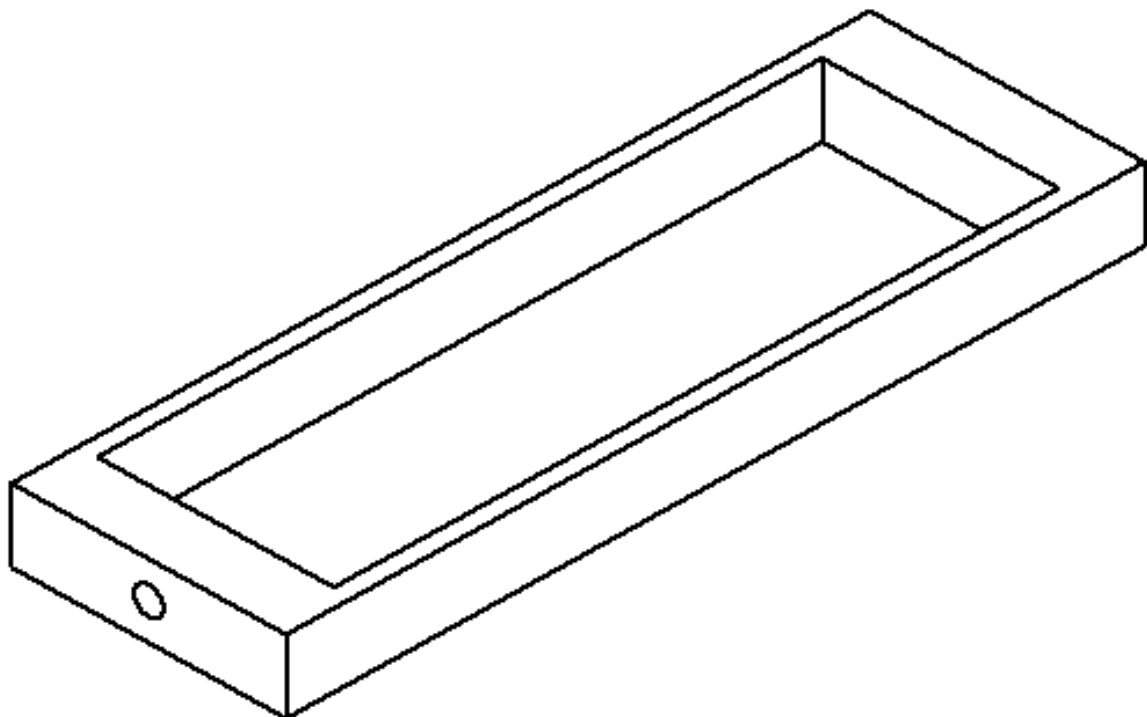
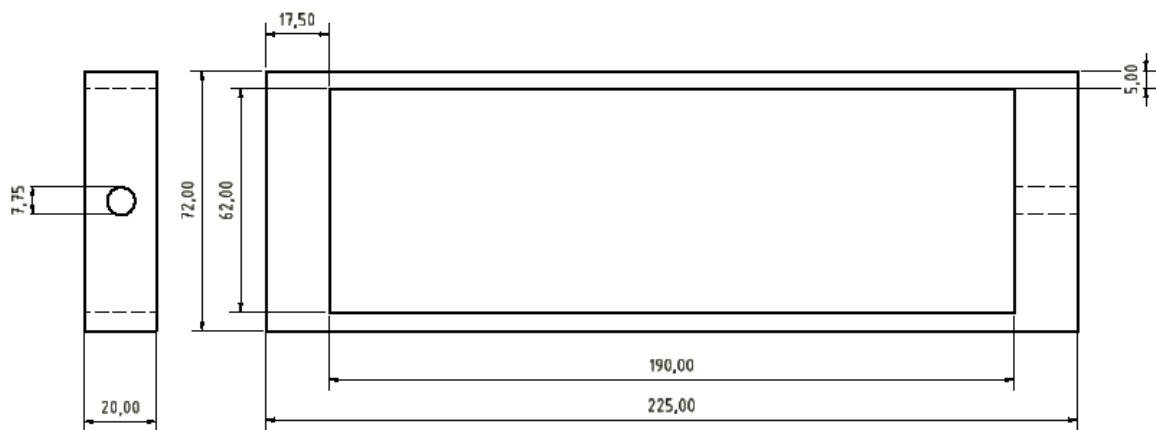
ASM – Metal handbook Volume 9 – Metallography and Microstructures
AWS handbook – Chapter 6 “Clad and dissimilar metals”
Barbier, F., Manuelli, D., Bouché K. 1997. Characterization of Aluminide Coatings Formed on 1.4914 and 316L Steels by Hot-Dipping in Molten Aluminium. s.l.: Scripta Materialia, Vol. 36, No. 4, pp. 425-431, 1997
Barreto, G. 2014. Soldadura por Explosão de Alumínio-Cobre. Coimbra: Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2014.
Ben-Artzy, A., Stern, A., Frage, N., Shribman, V., Sadot, O. 2009. Wave formation mechanism in magnetic pulse welding. Int J Impact Eng 2010;37(4):397–404.
Ben-Artzy, A., Stern, A., Shribman, V., Aizenshtein, M. 2014. Interface Phenomena and Bonding Mechanism in Magnetic Pulse Welding. JMEPEG (2014) 23:3449–3458
Bouché, K., Barbier, F., Coulet, A. 1998. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. Materials Science and Engineering A249 (1998) 167–175.
Carpenter, S. H., Wittman, R. H. 1975. Explosion Welding. Denver, Colorado: Denver Research Institute, University of Denver, 1975.
Carvalho, G. 2015. Formação de intermetálicos em uniões por EXW e FSW entre ligas de alumínio e aço; e entre ligas de alumínio e ligas de cobre. Investigação apresentada como parte dos requisitos necessários para a conclusão da disciplina Técnicas Avançadas de Soldadura, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2015.
Chou, P. C., Fils, W. J. 1986. Recent Developments in Shaped Charge Tecnology. s.l.: Propellants, Explosives, Pyrotechnics 11, 1986. pp. 99-114.
Cowan, G. R., Bergman, O. R., Holtzman, A. H. 1971. Mechanics of bond wave formation in explosive cladding of metals. s.l. : Clarendon Press, 1982
Deribas, A. A., Kudinov, V. M., Matveenkov, F. I. 1967. Explosive Welding. s.l. : Siberian branch of academy of sciences in explosive welding, 1967. pp. 111-118. Vol. 3.1.
Deribas, A. A., Zakharenko, I. 1974. Determination of the Limiting Collision Conditions ensuring the Welding of metals by Explosion
Durgutlu, A., Okuyucu, H., Gulenc, B. 2008. Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded cooper and stainless steel. Denver, Colorado: Proceedings of the Fifth international Conference on High Energy Rate Fabrication, 2008. pp. 1-21.

<p>Findik, F. 2011. Recent Developments in Explosive Welding. 54187Adapazari, Turkey: Sakarya University, Faculty of Tecnology, Esentepe Campus, 2011. pp. 1081-1093.</p>
<p>Hokamoto, K., Izuma, T., Fujita, M. 1993. New Explosive Welding Technique to Weld Aluminum Alloy and Stainless Steel Plates Using a Stainless Steel Intermediate Plate. Metallurgical Transactions A. VOLUME 24A, OCTOBER 1993-2289</p>
<p>Hokamoto, K., Mori, A., Fujita, M. 2008. Possibility of underwater Explosive Welding for making large-sized thin metal plate clad by overlapping plates. s.l.: International Journal of Modern Physics B. Vol. 22, Nos. 9, 10 & 11 (2008) 1647-1652</p>
<p>Kennedy, J. M., Davidson, L., Coffey, F. 1972. Explosive output for drinving metal. New Mexico: Proc behavior and utilization of explosives in engineering design conf. ASME, 1972.</p>
<p>Kennedy, J. M., et al. 1998. The Gurney Modelo f Explosive Output for Driving Metal. [ed.] L. Davidson, Y. Hori New York: Explosive Effects and Aplications, 1998. pp. 221-257</p>
<p>Kobayashi, S., Yakou, T. 2002. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment. Materials Science and Engineering A338 (2002) 44_ 53.</p>
<p>Kuz'min, V. I. , Lysak, V. I., Kuz'min, S. V., Kharlamov, V. O. 2015. Effect of Heat Treatment on the Structure and Propertiesof Steel–Aluminum Composite with a Diffusion Barrier. ISSN 0031_918X, The Physics of Metals and Metallography, 2015, Vol. 116, No. 11, pp. 1096–1102.</p>
<p>Lasl Shock Hugoniot Data- Co</p>
<p>Li, X., Ma, H., Shen, Z. 2015. Research on explosive welding of aluminum alloy to steel with dovetail grooves. s.l.: Materials and Design 87 (2015) 815–824.</p>
<p>Lourenço, S. 2015. Produção de Componentes Multifuncionais por Soldadura por Explosivo. Coimbra: Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2015.</p>
<p>Lysak, V.I., Kuzmin S.V. 2012. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas. s.l.: Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 150-156</p>
<p>Mendes, R., Ribeiro, J. B., Loureiro, A. 2012. Effect of the Explosive Characteristics on Explosive Welding of Stainless Steel to Carbon Steel in Cylindrical Configuration. s.l.: Journal of Materials and Design, 2012.</p>
<p>Mousavi, A., Al-Hassani, S. T. S. 2005. Numerical and experimental studies of themechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding. s.l.: Journal of the Mechanics and Physics of Solids 53 (2005) 2501–2528</p>
<p>Mousavi, A., Al-Hassani, S. T. S., Atkins, A.G. 2008. Bond strength of explosively welded specimens. s.l.: Materials and Design 29 (2008) 1334–1352</p>
<p>Plaksin, I., Campos, J., Ribeiro J., Mendes R., Direito J., Braga D., Pruemmer R. 2008. Novelties in Physics of Explosive Welding and Powder Compaction. s.l.: Materials Science Forum Vol 566 (2008) pp 135-140</p>
<p>Ribeiro, J. B., Mendes, R., Loureiro, A. 2014. Review of the weldability window concept and equations for explosive welding. Coimbra: Journal of Physics: Conference Series 500, 2014.</p>
<p>de Rosset, W. S. 2006. Analysis of Explosive Bonding Parameters Mater. Manuf. Process. 21 634-8</p>

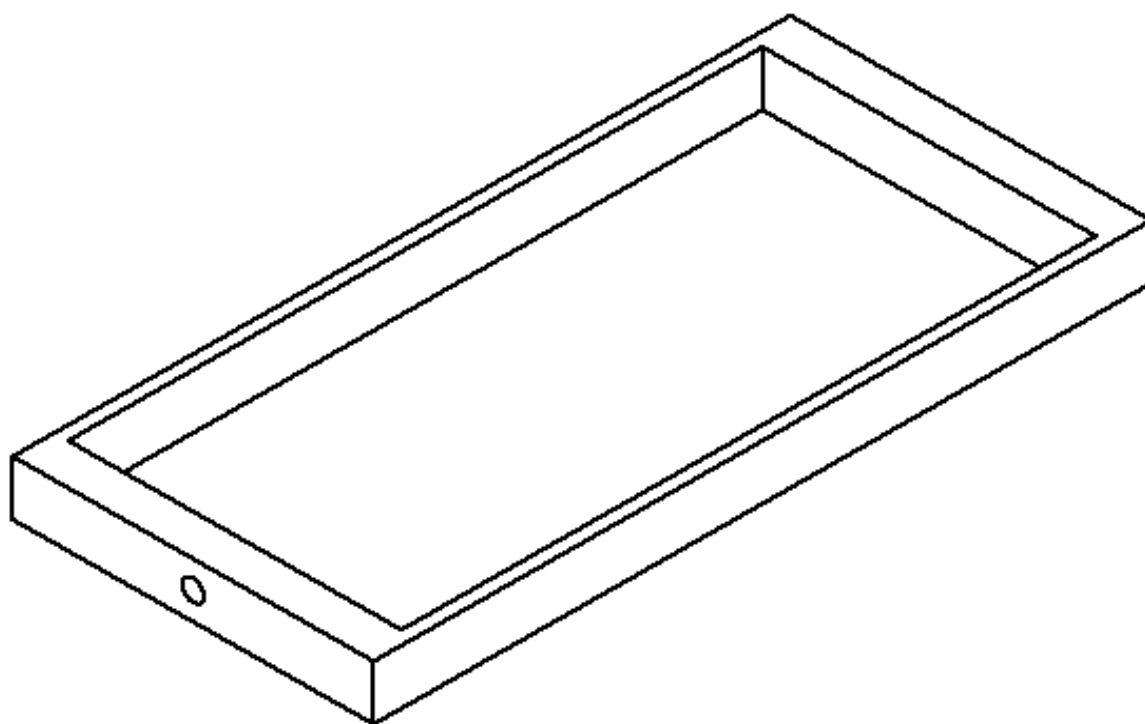
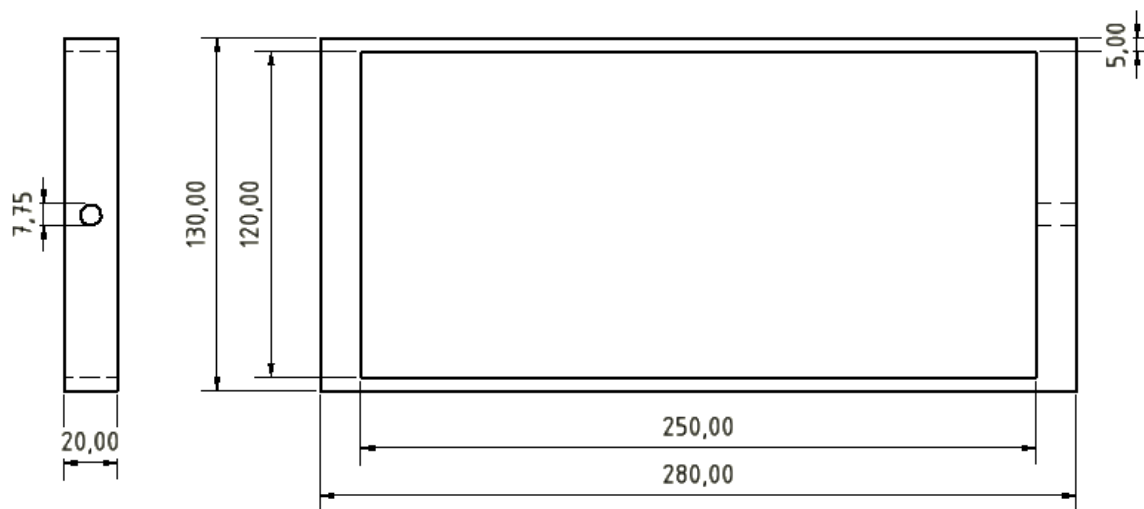
<p>Sanchidrián, J., López, L., 2006. Calculation of the Energy of Explosives with a Partial Reaction Model. Comparison with Cylinder Test Data. <i>Propellants, Explosives, Pyrotechnics</i> 31, No. 1 (2006)</p>
<p>Santos, N. 2013. Soldadura por explosivo em configuração plana de Alumínio-Cobre. Coimbra: Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2013.</p>
<p>Vitorino, D. 2016. Efeito do Rácio de Explosivo em Soldaduras Similares AA 6082-T6 e Dissimilares AA 6082-T6 a Cu-DHP. Coimbra: Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2016.</p>
<p>Walsh, J. M., Shreffler, R. G., Willig, F. J. 1953. Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions. s.l.: <i>Journal of Applied Physics</i> Vol 24., Num 3 March, 1953.</p>
<p>Xian-jun, S., Jie, T., Xun-zhong, G. 2011. Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding. s.l.: <i>Trans. Nonferrous Met. Soc. China</i> 21(2011) 2175-2180</p>
<p>Zakharenko, I. D., Zlobin, B. S. 1983. Effect of the Hardness of Welded Materials on the Position of the Lower Limit of Explosive Welding. Novosibirsk. Translated from <i>Fizika Goreniya i Vzryva</i>, Vol. 19, No. 5, pp. 170-174, September-October-1983.</p>
<p>Zakharenko, I. D., et al. 1990. <i>Svarka metallov zryvom</i>, Minsk: Nauka i technikk, 1990, in Russia.</p>
<p>Zlobin, B., Sil'Vestrov, V., Shtertser, A., Plastinin, A., Kiselev, V. 2014. Enhancement of Explosive Welding Possibilities by use of Emulsion Explosive. s.l.: <i>Archives of Metallurgy and Materials</i>, Vol. 59, 2014, Issue 4</p>

APÊNDICE A – CAIXAS DE EXPLOSIVO DE MDF

Dimensões da Caixa de Explosivo utilizadas nos ensaios EW 14-Al.Fe-3.3,
EW 15-(Al.Fe/Al.Al)-5.3:

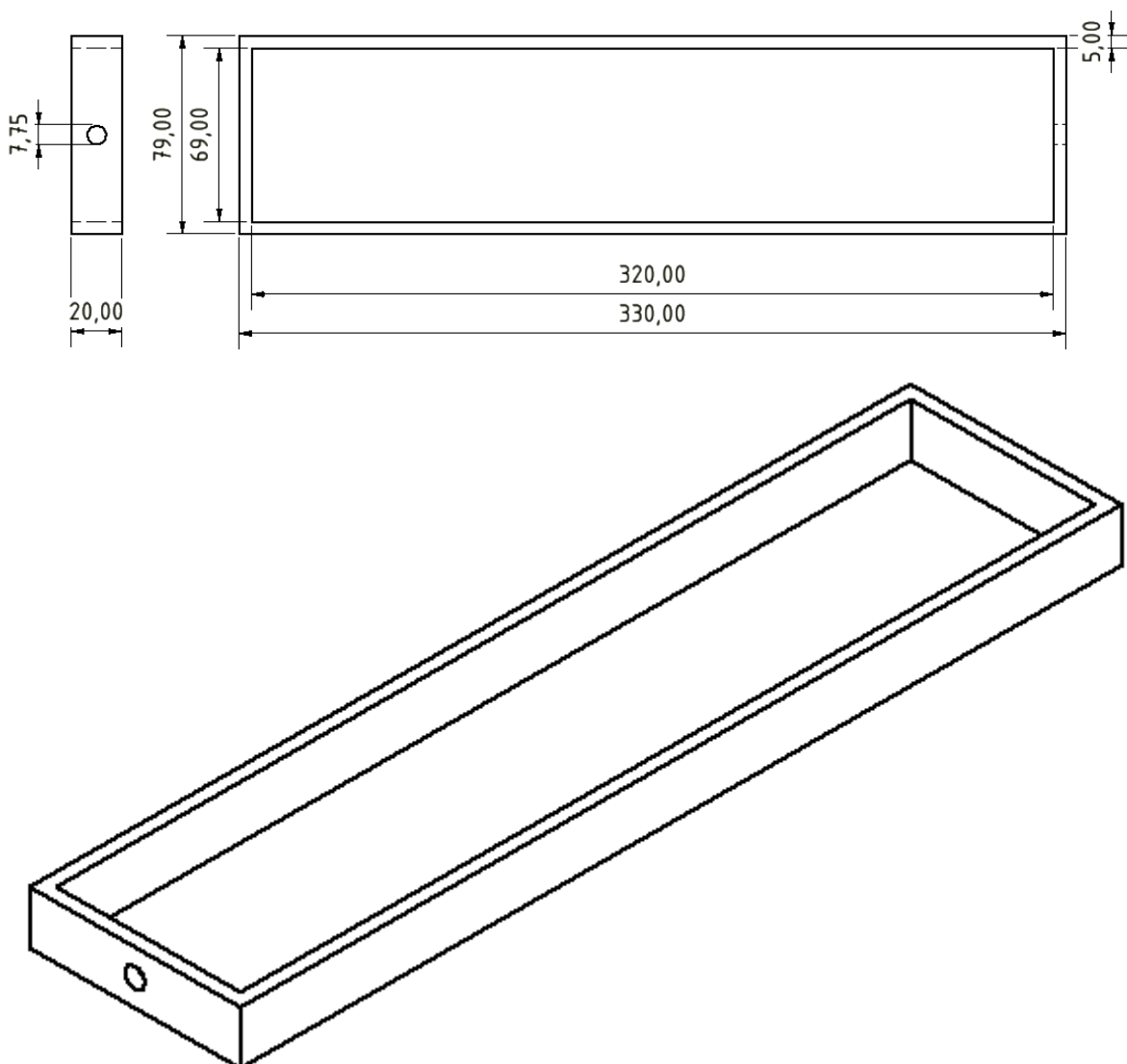


Dimensões da Caixa de Explosivo utilizadas no ensaio EW 20-Al.Fe-5.3:



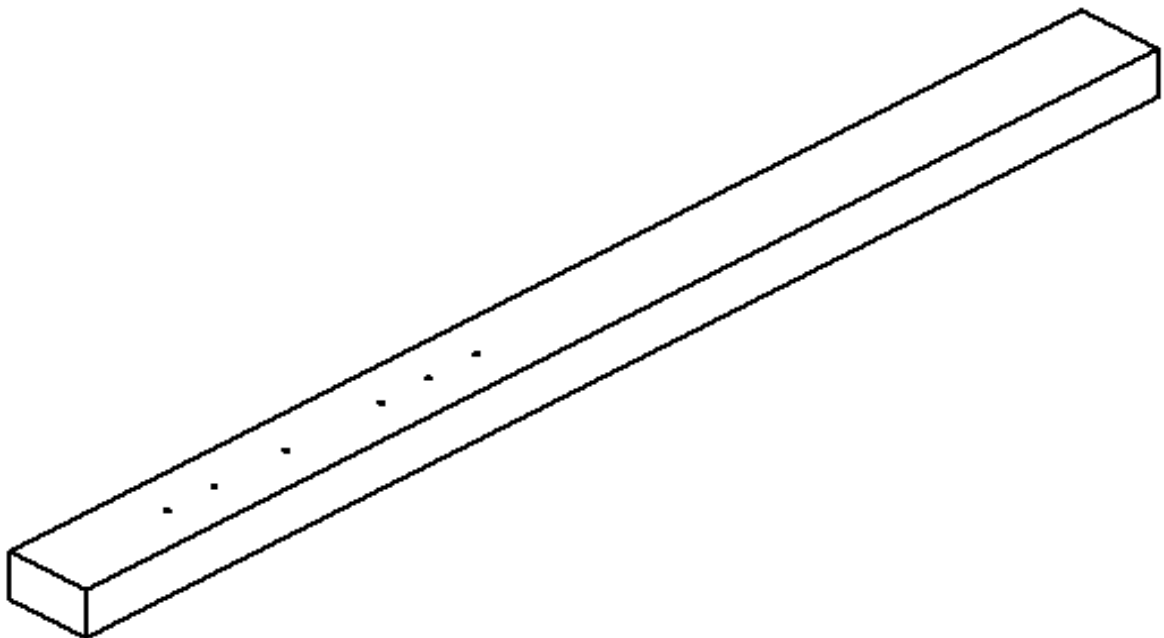
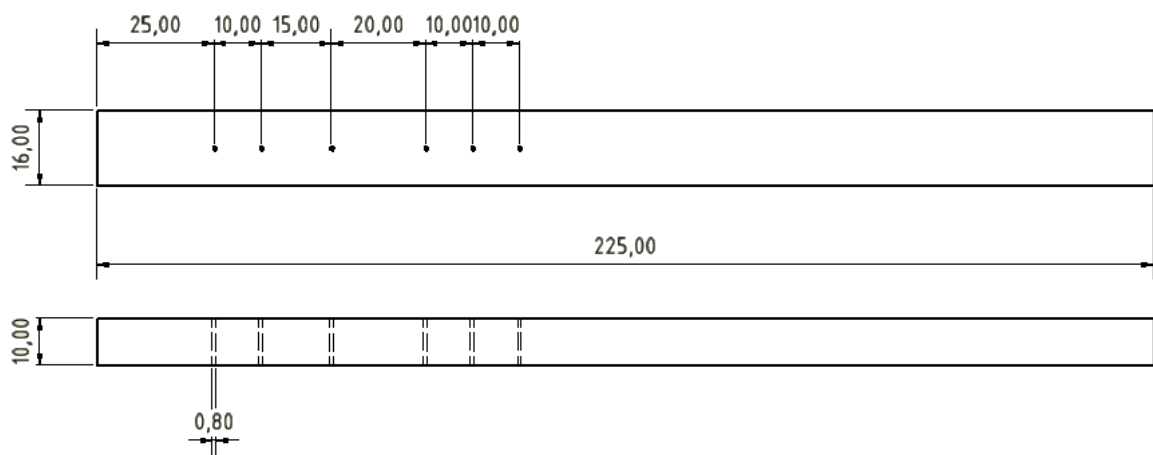
APÊNDICE B – CAIXAS DE EXPLOSIVO DE PMMA

Dimensões da Caixa de Explosivo utilizadas no ensaio EW 20-Al.Fe-5.3:

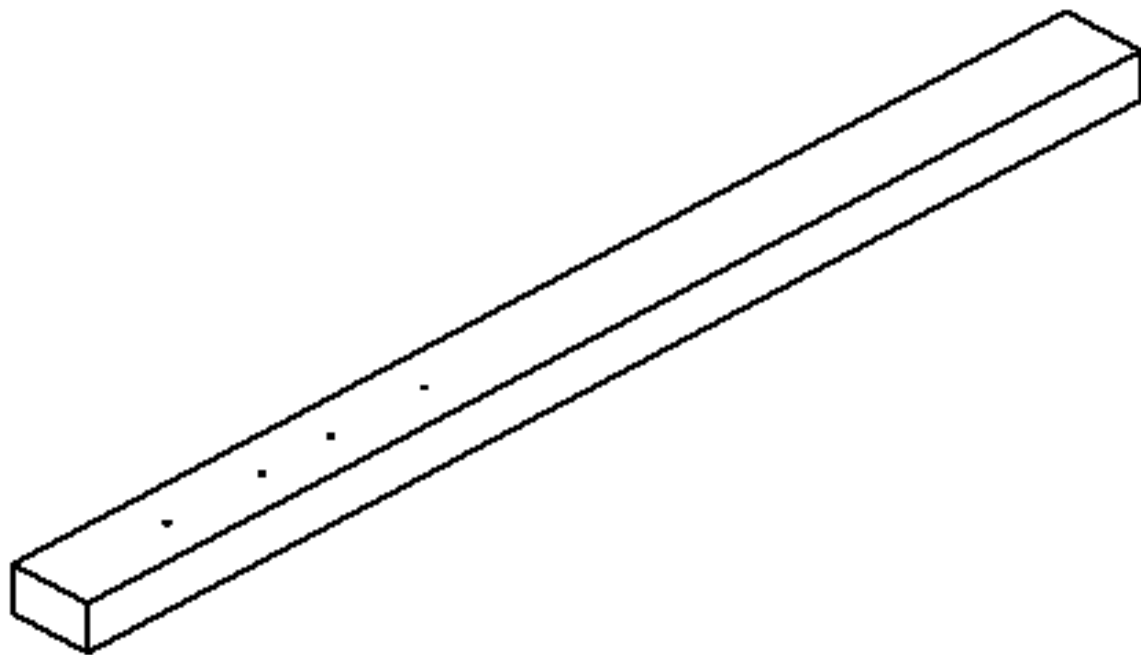
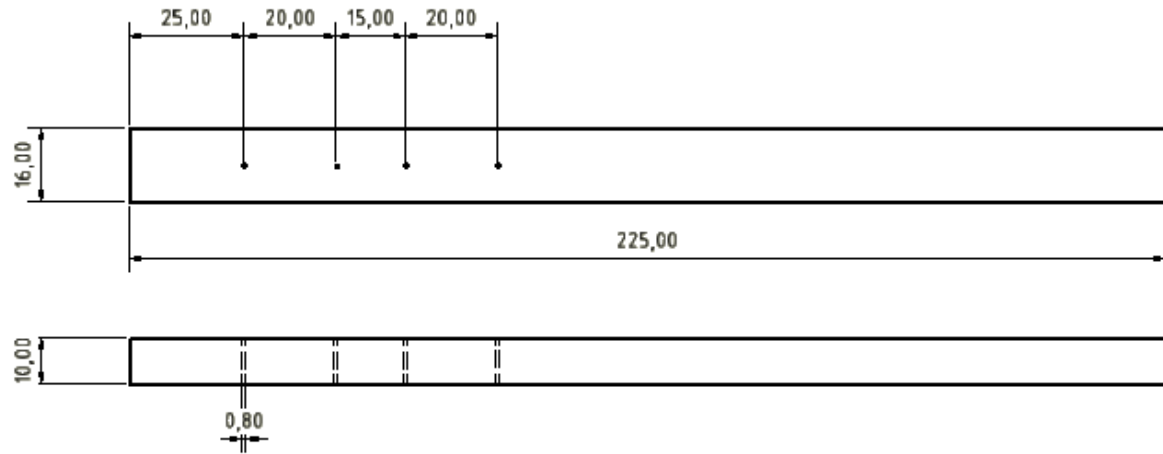


APÊNDICE C – DESENHO DO SUPORTE PARA SONDAS

Suporte de sondas utilizado nos ensaios EW 15-Al.Fe-5.3 e VM-2:



Suporte de sondas utilizado no ensaio VM-1:

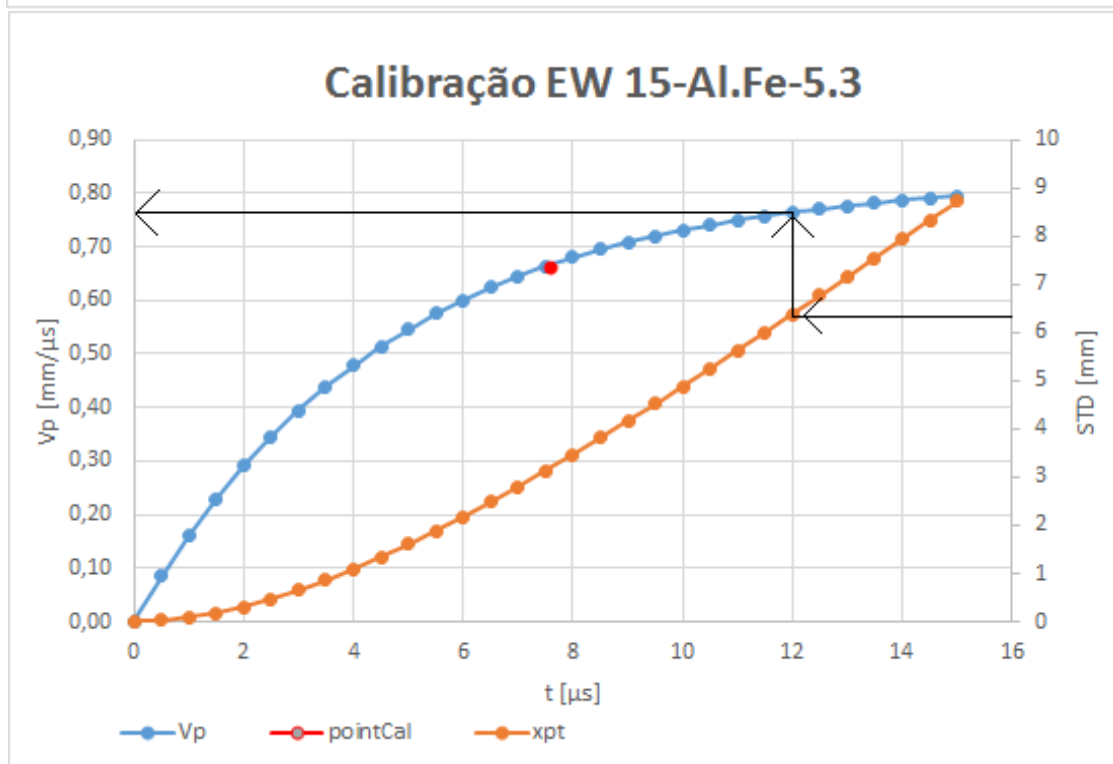
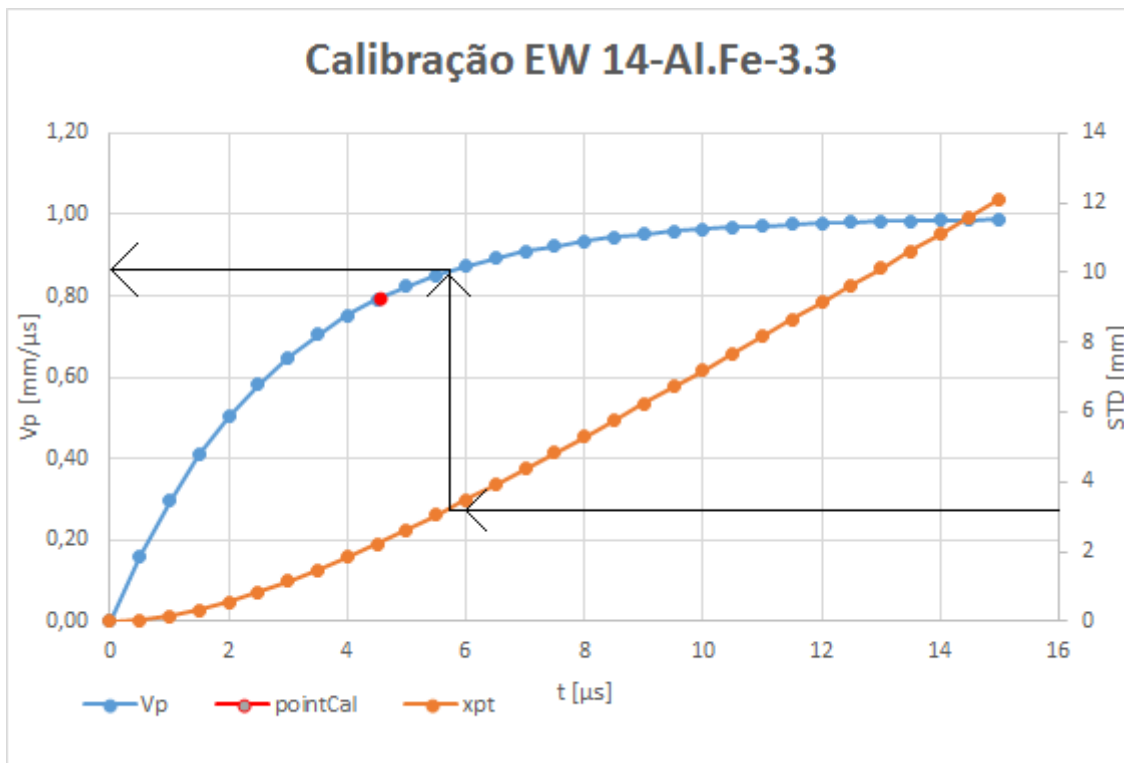


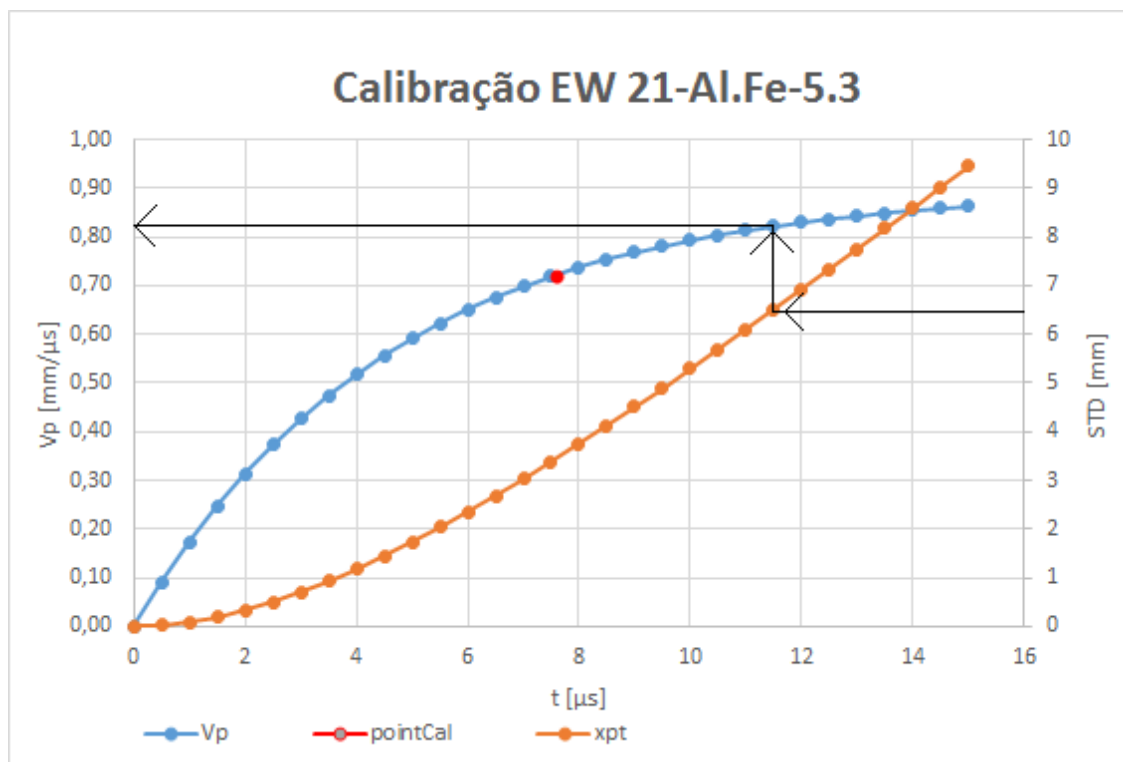
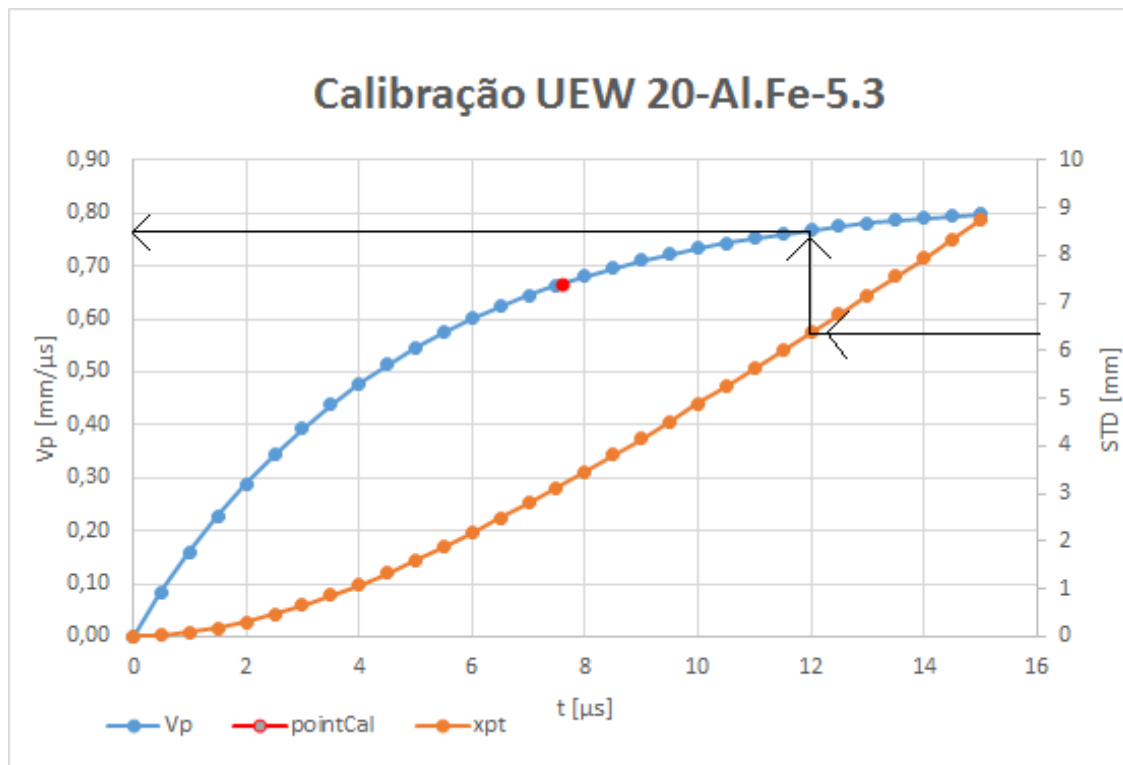
APÊNDICE D – DADOS PARA CALIBRAÇÃO

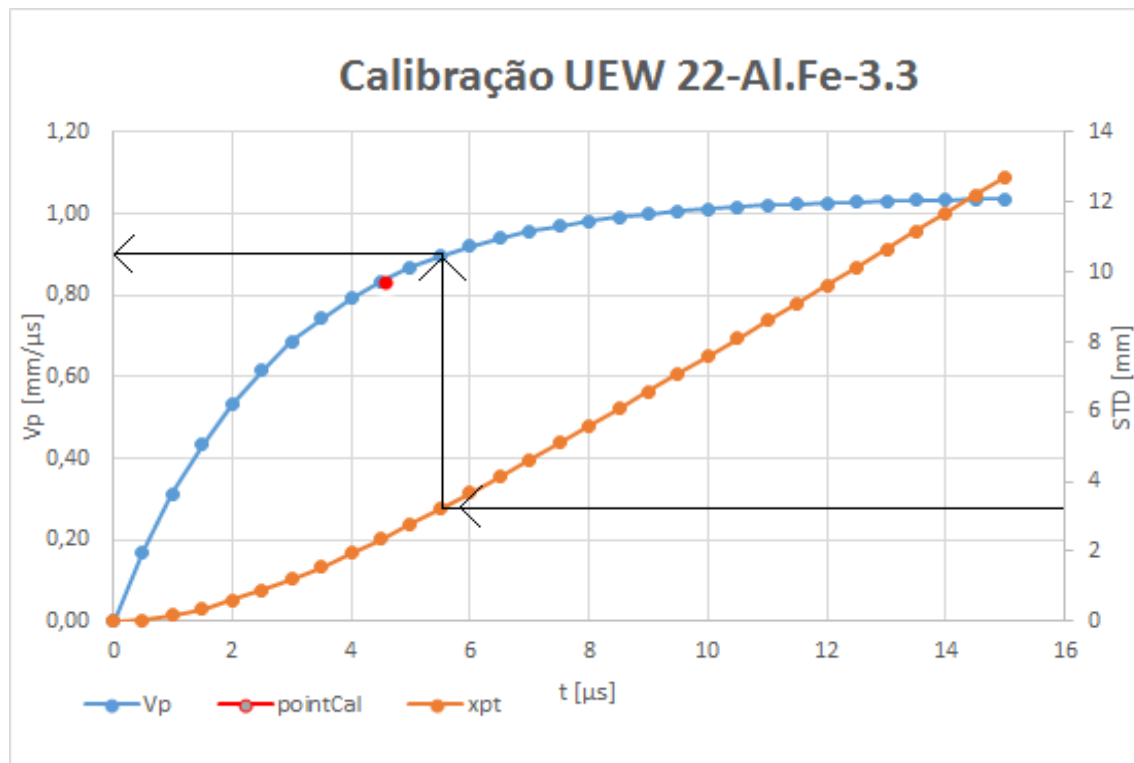
	EW 14	EW 15	UEW 20	UEW21	UEW22
Tipo de Explosivo	ANFO	70% ANFO + 30% Eex		50% ANFO + 50% (Eex+DE)	70% ANFO + 30% Eex
ΔH [MJ/kg] *	3,881				
$\sqrt{2E}$ [m/s]	1,139				
$V_{p,Gurney}$ [mm/ μ s]	0,993	0,827	0,833	0,899	1,042
ρ_{exp} [kg/m ³]	0,9256	1,078	1,093	1,261	1,029
h_{exp} [mm]	20				
ρ_f [kg/m ³]	2700				
h_f [mm]	3	5	5	5	3
R	2,3	1,6	1,6	1,6	2,5
$C_{0,f}$ [m / s] **	5266				
$V_{p,cal}$ [mm/ μ s]	0,794	0,661	0,666	0,719	0,833
$t_{p,cal}$ [μ s]	4,56	7,60	7,60	7,60	4,56
P_{cj} [GPa]	5				
τ	2,8307	4,6236	4,6976	4,6597	2,7941
STD	3,4	6,3			2,4
V_p [m / s]	867,7	762,9	766,1	818,2	905,3

* Valor consultado no artigo de A. Sanchidrián em (Sanchidrián, et. al, 2006).

** Valor calculado a partir dos valores fornecidos, para o Alumínio, em Lasl Shock Hugoniot Data.





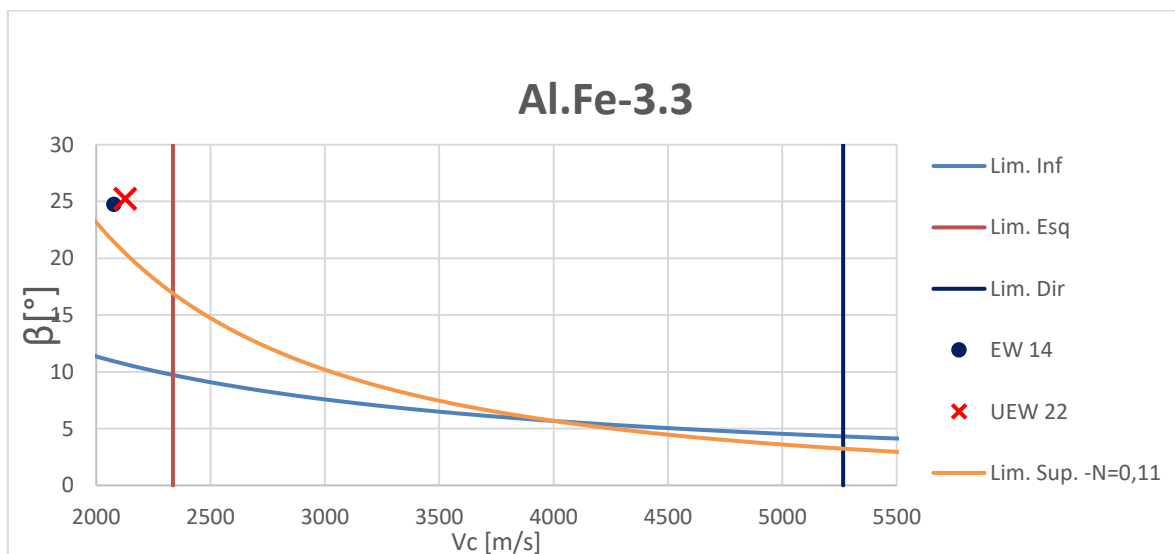


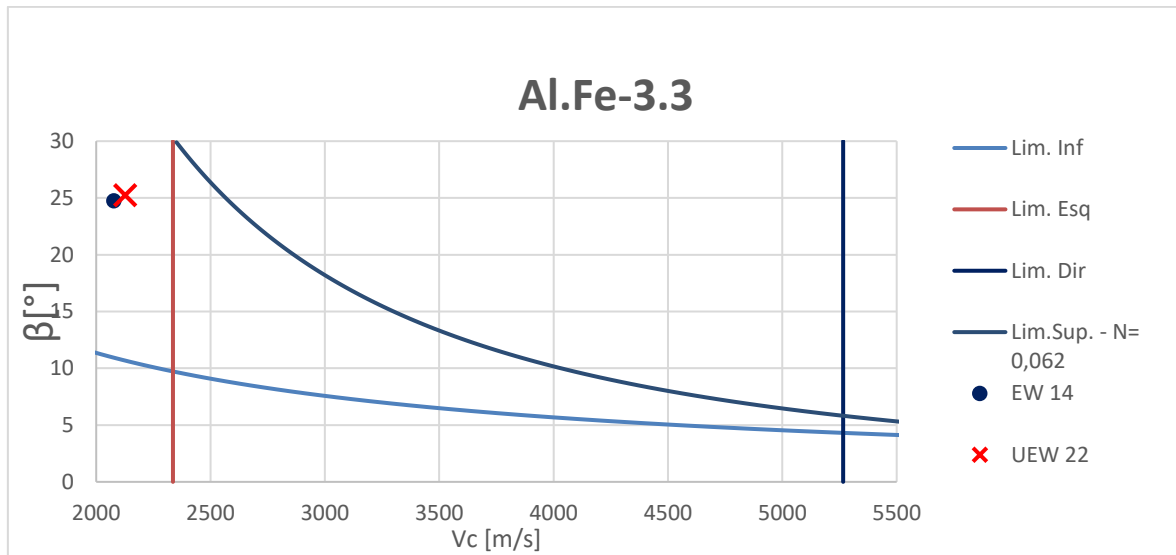
APÊNDICE E – JANELAS DE SOLDABILIDADE

Al-Fe

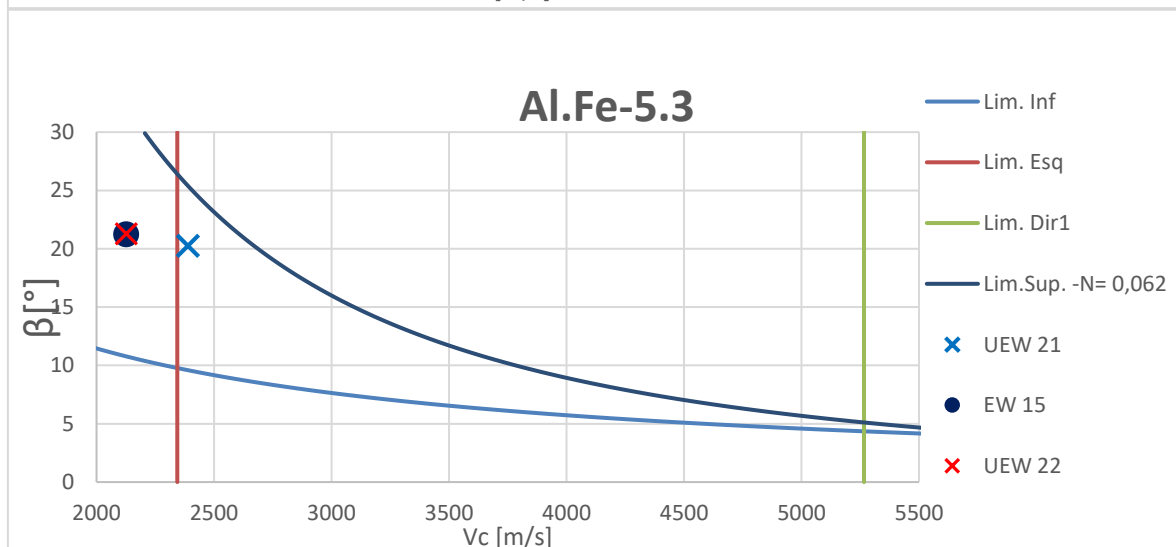
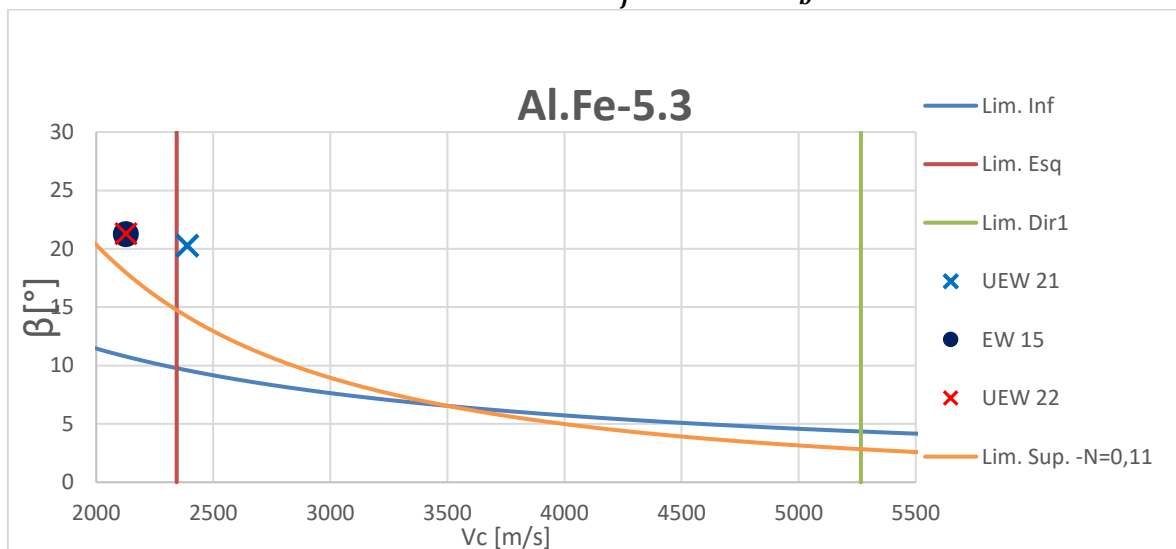
	EW 14	EW 15	UEW 20	UEW21	UEW22
$V_c = V_d$ [m/s]	2077	2127		2389	2127
β [°]	24,76	21,22	21,30	20,25	25,24
K_1	0,6				
$H_{V,f}$ [MPa]	1118				
$H_{V,b}$ [MPa]	1669,2				
ρ_f [kg/m ³]	2700				
ρ_b [kg/m ³]	8030				
h_f [mm]	0,003	0,005	0,005	0,005	0,003
$T_{m,f}$ [°]	2700				
k_{flyer} [W/(m.K)]	180				
$c_{p,flyer}$ [J/(kg.K)]	894				
$N_{(a)}$	0,11				
$N_{(b)}$	0,062				
Re	10,5				
$C_{0,flyer}$ [km/s]	5,27				

Janela de Soldabilidade- $h_f = 3$ mm e $h_b = 3$ mm





Janela de Soldabilidade- $h_f = 5\text{ mm}$ e $h_b = 3\text{ mm}$



Al-Al

	EW 15
$V_c = V_d$ [m/s]	2127
β [°]	21,22
K_1	0,6
$H_{V,f}$ [MPa]	1118
$H_{V,b}$ [MPa]	1118
ρ_{flyer} [kg/m ³]	2700
ρ_{base} [kg/m ³]	2700
h_{flyer} [mm]	0,005
$T_{m,flyer}$ [°]	2700
k_{flyer} [W/(m.K)]	180
$c_{p,flyer}$ [J/(kg.K)]	894
$N_{(a)}$	0,11
$N_{(b)}$	0,062
Re	10,5
$C_{0,flyer}$ [km/s]	5,27

