



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Produção de Componentes Multifuncionais por Soldadura por Explosivo**

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

**Autora**

**Sandra Isabel da Silva Lourenço**

**Orientadores**

**Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Ricardo António Lopes Mendes**

**Júri**

**Presidente** Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins  
**Amaro**  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva  
**Ribeiro**  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal  
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

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

**Coimbra, Setembro, 2015**

Existe diferença entre conhecer o caminho e percorrer o caminho.

Morpheus, no filme *Matrix*, 1999.

## Agradecimentos

Todo o trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças ao apoio e contribuição de muitas pessoas, a todas as quais agradeço. É impossível enumerar todas sem exceção, que ao longo do meu percurso académico estiveram ao meu lado e incentivaram todo o meu desenvolvimento até este momento.

Assim sendo, gostaria no entanto de apresentar o meu reconhecimento às pessoas que mais se destacaram nestes últimos meses.

Ao Prof. Doutor Altino Loureiro, por todo o apoio, sentido crítico e permanente disponibilidade ao longo deste trabalho. Os seus esforços como orientador foram excelentes e os seus ensinamentos foram indispensáveis.

Ao Prof. Doutor Ricardo Mendes, por toda a ajuda na realização dos ensaios e esclarecimentos na parte dos cálculos. O seu sentido crítico e as suas sugestões foram louváveis, sem elas este trabalho não teria sido possível.

Ao Engenheiro Joel de Jesus, pelo apoio permanente, paciência e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

Ao Doutor Carlos Leitão e à Engenheira Maria Inês, pela ajuda, apoio e esclarecimentos prontos ao longo de todo o trabalho.

À minha família, principalmente às minhas avós, que apesar de já não estarem presentes fisicamente, continuarão sempre comigo em espírito. O seu apoio e conselhos ao longo da minha vida foram indispensáveis e preciosos.

Finalmente, à pessoa mais importante da minha vida, Ricardo Gaspar, que sempre acreditou em mim. Foi graças a ele que prossegui os estudos, e sem o seu apoio e incentivo nunca teria chegado tão longe. Obrigada por tudo.

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo principal a análise de juntas soldadas utilizando o método de soldadura por explosão (EXW) entre chapas de alumínio, cobre e alumínio-cobre, e a influência da variação de alguns parâmetros de soldadura na qualidade da interface de soldadura.

Foram efetuadas para o efeito 6 ensaios experimentais, sendo dois deles entre placas do mesmo tipo de material (Al-Al e Cu-Cu) e os restantes quatro entre alumínio e cobre, sendo projetado o alumínio, contrariamente aos ensaios realizados noutros anos, onde o material projetado foi o cobre. Utilizaram-se dois tipos de emulsões explosivas de nitrato de amónio, umas sensibilizada com microesferas ocas de vidro (Eex+MEOV) e outras sensibilizadas com esferas de esferovite (Eex+EPS), com variados valores de rácio de explosivo.

A emulsão Eex+EPS apresentou uma detonação mais heterogénea e uma velocidade de detonação  $V_d$  mais baixa, o que origina uma morfologia na interface também mais heterogénea e uma maior formação de compostos intermetálicos.

Para as duas emulsões verificou-se uma maior adesão do alumínio ao cobre utilizando o rácio mínimo de explosivo, no entanto mesmo assim não ocorreu a ligação.

Levanta-se a questão entre valores utilizados na construção da janela de soldabilidade no que consta ao cobre, pois apesar de a soldadura se localizar fora da janela de soldabilidade, apresentou bons resultados em termos de aspeto da interface, microdureza e ensaios de tração/corte.

A configuração alumínio-cobre apresentou uma janela de soldabilidade muito reduzida, devido maioritariamente à baixa temperatura de fusão do alumínio.

Nenhuma das soldaduras Al-Cu foi bem-sucedida, mesmo utilizando os rácios mínimos de explosivo. Conclui-se que as emulsões explosivas utilizadas não são adequadas para este tipo de ensaios, pois é necessário um rácio de explosivo mais reduzido para se conseguir respeitar os parâmetros definidos pela janela de soldabilidade.

Observou-se que em soldaduras similares, isto é entre o mesmo tipo de material as maiores durezas são observadas na placa voadora e não na interface.

Verificou-se que o aumento do rácio de explosivo  $R$  conjuntamente com variações na velocidade de detonação conduz ao aumento da velocidade de impacto  $V_p$ , que por sua vez leva ao aumento do ângulo de colisão  $\beta$ .

**Palavras-chave:** Soldadura por explosão, Emulsão explosiva, Cobre, Alumínio, Configuração plana, Compostos intermetálicos.

## Abstract

The main goal of this research was the analysis of the effect of welding parameters on the quality of similar welds aluminum-aluminum and copper-copper and dissimilar welds aluminum-copper, using the explosive welding method (EXW); the influence of some welding parameters in the morphology of the welded interface was analyzed.

Six experimental tests were made, four of them between aluminum-copper, being the aluminum projected against the copper plate. Two types of explosive were used, Eex+MEOV and Eex+EPS, with several explosive ratios.

The values used for the copper-copper weldability window definition were analyzed, because although the welding was located outside the window, this welding had very good results in terms of interface aspect, hardness and tensile/shear tests.

The aluminum-copper weldability window is very small, which is mainly a consequence of the aluminum low temperature melting point.

None of the four aluminum-copper weldings were successful, even using the minimum explosive ratio. It's concluded that the used explosive types are not the right ones for the aluminum flyer.

The similar welds, where the same material was used in the flyer and the parent plate, showed an increased hardness in the flyer plate side.

It was observed that an increase in the explosive ratio  $R$  leads to an increase in the impact velocity  $V_p$ , which leads to an increase in the collision angle  $\beta$ .

**Keywords** Explosive welding, Copper, Aluminum, Flat configuration, Intermetallic compounds.

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xii
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiv
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte .....	3
2.1. Análise Histórica.....	3
2.2. Princípio do Método .....	4
2.2.1. Mecanismos de Formação da Onda.....	5
2.2.2. Principais Parâmetros do Processo .....	7
2.3. Janela de Soldabilidade.....	9
2.3.1. Equações.....	10
2.3.2. Enquadramento no diagrama .....	13
2.4. Morfologia da Interface Alumínio-Cobre.....	15
2.4.1. Microestrutura .....	15
2.4.2. Fases na Interface .....	15
2.4.3. Microdureza Característica.....	16
2.5. Vantagens e Desvantagens do Processo .....	16
2.6. Combinações Possíveis.....	17
2.7. Principais Aplicações Atuais .....	18
2.8. Soldadura por Explosão VS Soldadura por Impulso Magnético .....	18
3. Procedimento Experimental .....	21
3.1. Composição e Dimensões dos Materiais Base .....	21
3.2. Montagem Experimental.....	22
3.3. Medição da Velocidade de Detonação.....	23
3.4. Nomenclatura das Amostras .....	25
3.5. Parâmetros de Soldadura .....	26
3.6. Metalografia.....	27
3.6.1. Preparação das Amostras.....	27
3.6.2. Ataque Químico.....	27
3.6.3. Análise Microestrutural .....	28
3.6.4. Análise Química .....	28
3.7. Análise Mecânica.....	28
3.7.1. Dureza.....	28
3.7.2. Resistência à Tração/Corte .....	28
4. Resultados.....	30
4.1. Janela de Soldabilidade.....	30
4.1.1. Velocidade de Detonação .....	30

4.1.2.	Velocidade de Impacto .....	31
4.1.3.	Ângulo de Impacto .....	32
4.1.4.	Enquadramento .....	32
4.2.	Análise Macroscópica .....	33
4.2.1.	Soldadura Cu-Cu .....	33
4.2.2.	Soldadura Al-Al.....	33
4.2.3.	Soldaduras Al-Cu .....	35
4.3.	Análise Microscópica .....	37
4.3.1.	Soldadura Cu-Cu .....	37
4.3.2.	Soldadura Al-Al.....	39
4.3.3.	Soldaduras Al-Cu .....	40
4.4.	Análise de Compostos Intermetálicos.....	43
4.4.1.	Ensaio UEW1 .....	43
4.4.2.	Ensaio UEW3 .....	44
4.4.3.	Ensaio UEW4 .....	45
4.5.	Dureza .....	45
4.5.1.	Soldadura Cu-Cu .....	46
4.5.2.	Soldadura Al-Al.....	46
4.5.3.	Soldaduras Al-Cu .....	47
4.6.	Resistência ao Corte.....	49
4.6.1.	Soldadura Cu-Cu .....	49
4.6.2.	Soldadura Al-Al.....	50
5.	Discussão de Resultados.....	53
5.1.	Montagens Experimentais.....	54
5.2.	Relações entre Variáveis.....	54
5.2.1.	$V_p$ e $\beta$ .....	55
5.2.2.	$R$ e $V_p$ .....	55
5.2.3.	$R$ e $\beta$ .....	56
5.3.	Janelas de Soldabilidade .....	57
5.4.	Relações entre Energia e Microestrutura .....	58
6.	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	59
6.1.	Conclusões .....	59
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	60
	Referências Bibliográficas.....	61
Apêndice A	Desenho das Peças para a Fixação das Sondas.....	64
Apêndice B	Dimensões Efetivas das Peças de Acrílico Utilizadas nas Sondas .....	65
Apêndice C	Desenho das Caixas de Cartão Utilizadas nos Ensaios EW8, EW9, UEW1 E UEW2 .....	66
Apêndice D	Desenho da Caixa de Acrílico Utilizada no Ensaio UEW3.....	67
Apêndice E	Desenho da Caixa de Acrílico Utilizada no Ensaio UEW4.....	68
Apêndice F	Desenho dos Espaçadores Utilizados nos Ensaios UEW2, UEW3, EW9 E UEW4 .....	69
Apêndice G	Processo de Calibração .....	70



Apêndice H	Janelas de Soldabilidade .....	72
Apêndice I	Desenho dos Provetes Maquinados para os Ensaios Mecânicos .....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Configurações possíveis para EXW: (a) Montagem inclinada; (b) Montagem paralela. Fonte da imagem: (Barreto, 2014).....	4
Figura 2.2. Mecanismo de indentação do jato (Mousavi, et al., 2004). .....	6
Figura 2.3. Influência do rácio de explosivo na interface em placas Al-Cu (Gulenc, 2008). 8	
Figura 2.4. Janela de soldabilidade típica (Mendes, et al., 2012).....	10
Figura 2.5. Relação entre $V_p$ , $V_d$ e $\beta$ (Mendes, et al., 2012).....	13
Figura 2.6. Morfologia da interface Cu-Al (Dias, 2012).....	15
Figura 2.7. Perfis de dureza de soldaduras Al-Cu (Gulenc, 2008).....	16
Figura 2.8. Combinações atualmente realizadas em EXW (Santos, 2013). .....	17
Figura 2.9. Esquema de uma montagem plana para o processo MPW (Watanabe, et al., 2009).....	18
Figura 3.1. Microestrutura do: (a) Alumínio 6082; (b) Cobre DHP.....	21
Figura 3.2. Esquema de montagem dos ensaios de soldadura. ....	22
Figura 3.3. Montagens experimentais das caixas de explosivo: (a) Caixa de cartão; (b) Caixa acrílica para UEW3; (c) Caixa acrílica para UEW4. ....	22
Figura 3.4. Esquema elétrico para a medição da velocidade de detonação (Santos, 2013). 23	
Figura 3.5. Montagem experimental para medição da velocidade de detonação: (a) Conjunto de sondas; (b) Detalhe de uma sonda. ....	24
Figura 3.6. Captação de sinais elétricos: (a) Osciloscópio digital; (b) Medições realizadas no ensaio UEW1.....	24
Figura 3.7. Esquema de amostras e nomenclatura utilizadas. ....	25
Figura 3.8. Aspeto final das amostras na resina e sua localização nas amostras.....	27
Figura 4.1. Processo de calibração para a soldadura EW8.....	31
Figura 4.2. Janelas de Soldabilidade para Cu-Cu: (a) $N=0,11$ ; (b) $N=0,062$ . ....	32
Figura 4.3. Soldadura EW8: (a) Vista geral; (b) Detalhe da zona soldada. ....	33
Figura 4.4. Soldadura EW9: (a) Vista geral; (b) Detalhe da zona soldada. ....	34
Figura 4.5. Fenda na zona soldada, amostra EW9_25_5.....	34
Figura 4.6. (a) Soldadura UEW1; (b) Detalhe da zona soldada. ....	35
Figura 4.7. (a) Soldadura UEW2; (b) Detalhe da zona soldada. ....	36
Figura 4.8. (a) Soldadura UEW3; (b) Detalhes da zona soldada.....	36

Figura 4.9. (a) Soldadura UEW4; (b) Detalhes da zona inicial da soldadura e do padrão observado.....	37
Figura 4.10. Aspeto geral da amostra EW8_25_7 L. ....	38
Figura 4.11. (a) Ondas presentes na amostra EW8_25_3 L; (b) Detalhe das bolsas dendríticas. ....	38
Figura 4.12. Aspeto geral da amostra EW9_25_3 L. ....	39
Figura 4.13. (a) Poros na amostra EW9_25_3; (b) Primeiro ataque químico. ....	39
Figura 4.14. Falta de adesão na interface da soldadura na amostra EW9_25_3 T.....	40
Figura 4.15. (a) Ondas rudimentares na amostra UEW3_15_2 L; (b) Ataque químico da mesma amostra. ....	41
Figura 4.16. Bolsa na amostra UEW3_15_2 T.....	42
Figura 4.17. (a) Ondas rudimentares na amostra UEW4_25_5 L; (b) Ataque químico da mesma amostra. ....	42
Figura 4.18. Análise EDS da amostra UEW1-25-5 L (a) Localização da zona analisada; (b) Espectro químico da zona do poro. ....	43
Figura 4.19. Análise EDS da amostra UEW3-15-5 L (a) Localização da zona analisada; (b) Espectro químico.....	44
Figura 4.20. Análise EDS da amostra UEW4-25-5 L (a) Localização das zonas analisadas; (b) Espectro químico. ....	45
Figura 4.21. Perfil de dureza da soldadura EW8_25_7 L e T. ....	46
Figura 4.22. Perfil de dureza da amostra EW9_25_5 L e T. ....	47
Figura 4.23. Perfis de dureza das amostras UEW3_15_2 e 5, L e T.....	48
Figura 4.24. Perfil de dureza da amostra UEW4_25_2 e 5, L e T. ....	48
Figura 4.25. Provetes tracionados.....	49
Figura 4.26. Representação gráfica da força em função do alongamento dos provetes EW8. ....	49
Figura 4.27. Análise pontual da deformação ocorrida na zona soldada do provete EW8_25_2.....	50
Figura 4.28. Representação gráfica da força em função do alongamento do provete EW8-25-6.....	51
Figura 4.29. Análise pontual da deformação ocorrida na zona soldada do provete EW9_25_6.....	51
Figura 5.1. Relação entre $V_p$ e $\beta$ . ....	55
Figura 5.2. Relação entre $V_p$ e $R$ . ....	55
Figura 5.3. Relação entre $\beta$ e $R$ . ....	56
Figura A.1. Desenho das peças para a fixação das sondas. ....	64
Figura A.2. Desenho 3D das peças para a fixação das sondas. ....	64

---

Figura B.1. Esquema das dimensões das peças de acrílico. ....	65
Figura C.1. Desenho das caixas de cartão utilizadas nos ensaios EW8, Ew9, UEW1 e UEW2. ....	66
Figura C.2. Desenho 3D das caixas de cartão utilizadas nos ensaios EW8, Ew9, UEW1 e UEW2. ....	66
Figura D.1. Desenho da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW3. ....	67
Figura D.2. Desenho 3D da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW3. ....	67
Figura E.1. Desenho da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW4. ....	68
Figura E.2. Desenho 3D da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW4. ....	68
Figura F.1. Desenho dos espaçadores de 4 mm utilizados. ....	69
Figura F.2. Desenho 3D dos espaçadores de 4 mm utilizados. ....	69
Figura G.1. Processo de calibração para o ensaio UEW1. ....	70
Figura G.2. Processo de calibração para o ensaio UEW2. ....	71
Figura G.3. Processo de calibração para o ensaio EW9. ....	71
Figura G.4. Processo de calibração para o ensaio UEW3. ....	71
Figura G.5. Processo de calibração para o ensaio UEW4. ....	71
Figura H.1. Janela de soldabilidade Al-Al com $N=0,11$ . ....	72
Figura H.2. Janela de soldabilidade Al-Al com $N=0,062$ . ....	73
Figura H.3. Janela de soldabilidade Al-Cu com $N=0,11$ . ....	73
Figura H.4. Janela de soldabilidade Al-Cu com $N=0,062$ . ....	73
Figura I.1. Desenho dos provetes maquinados para os ensaios de tração. ....	74
Figura I.2. Desenho 3D dos provetes maquinados para os ensaios de tração. ....	74

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composições químicas dos materiais usados. ....	21
Tabela 3.2. Parâmetros específicos de cada soldadura. ....	26
Tabela 4.1. Valores obtidos por cada sonda e cálculo das velocidades de detonação.....	30
Tabela 5.1. Parâmetros específicos de cada ensaio. ....	53
Tabela B.1. Dimensões efectivas para medição da velocidade de detonação. ....	65
Tabela G.1. Valores utilizados no processo de calibração. ....	70
Tabela H.1. Valores utilizados nas janelas de soldabilidade. ....	72

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

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

Al-Cu – Soldadura onde a placa voadora é de alumínio e a placa estacionária é de cobre

$\alpha$  – Ângulo de colisão na configuração inclinada

$\beta$  – Ângulo de colisão na configuração paralela

$C$  – Massa do explosivo sobre a placa voadora

$C_{0,f}$  – Velocidade de propagação do som no material da placa voadora

$C_1, C_2$  – Constantes empíricas

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

Cu-Cu – Soldadura onde ambas as placas a soldar são de cobre

Cu-Al – Soldadura onde a placa voadora é de cobre e a placa estacionária é de alumínio

$\sqrt{2E}$  – Energia de Gurney

$\Delta H$  – Calor produzido na explosão

$h_f$  – Espessura da placa voadora

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

$H_{V,e}$  – Dureza Vickers do material da placa estacionária

$k_f$  – Condutibilidade térmica do material da placa voadora

$K_1$  – Constante adimensional de limpeza de superfícies

$M$  – Massa da placa voadora (*flyer*) sob o explosivo

$N$  – Constante adimensional

$p_{CJ}$  – Pressão de detonação de Chapman-Jouguet

$R$  – Rácio de explosivo

$Re$  – Número de Reynolds

$\rho_e$  – Massa volúmica do material da placa estacionária

$\rho_f$  – Massa volúmica do material da placa voadora (*flyer*)

$\rho_{explosivo}$  – Massa volúmica do explosivo

$\tau$  – Constante de tempo

$t$  – Instante de tempo

$t_0$  – Instante de tempo inicial

$t_{vcal}$  – Instante de tempo em que  $V_{pcal}$  é atingida

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

$V_c$  – Velocidade do ponto de colisão ou velocidade de colisão

$V_d$  – Velocidade de detonação

$V_{explosivo}$  – Volume de explosivo

$V_p$  – Velocidade de projeção ou velocidade de impacto

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

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

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

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

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

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

## Siglas

ARAMIS – Software utilizado para análise de deformações dos provetes de tração

DHP - Desoxidado, alta percentagem de fósforo (*Deoxidized high phosphorus*)

DMC – *DeLorean Motor Company*

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva (*energy dispersive spectroscopy*)

Eex - Emulsão explosiva

EPS – Esferas de poliestireno expandido

EXW- Soldadura por explosão (*Explosive Welding*)

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPN – Instituto Pedro Nunes

LEDAP – Laboratório de Energia e Detonação, Associação de Apoio

MEOV – Microesferas ocas de vidro

MPW – Soldadura por impulso magnético (*Magnetic Pulse Welding*)

SEM – Microscópio eletrónico de varrimento (*scanning electron microscope*)

STD – Distância entre placas (*Stand-off distance*)



## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais a união de materiais dissimilares é necessária em diversas aplicações, e as tecnologias de soldadura tradicionais nem sempre têm resposta para este tipo de problema. As denominadas soldaduras no estado sólido são cada vez mais utilizadas, e a soldadura por explosão não é exceção. No entanto ainda há muita investigação que é necessário fazer, tanto no campo teórico como prático.

A importância da condutividade elétrica no desempenho de muitos equipamentos elétricos sempre foi um problema. Há alguns anos utilizavam-se conexões em ouro devido à alta condutividade elétrica deste, algo que deixou de ser feito devido ao elevado custo deste material. Neste campo a combinação alumínio-cobre torna-se então muito importante, pois o cobre cada vez apresenta maior custo e o alumínio é a alternativa mais interessante, no entanto possui uma condutividade elétrica mais reduzida que o cobre, e portanto a utilização do cobre ainda é necessária onde a área de contacto não pode ser aumentada (em conexões, por exemplo). No entanto, a diferença entre temperaturas de fusão não permite a união destes metais pelos métodos de soldadura tradicionais por fusão.

Em anos anteriores foram efetuadas com sucesso soldaduras por explosão entre estes dois materiais, projetando o cobre contra o alumínio. No entanto, nos ensaios efetuados não foi possível identificar as ondas específicas desta configuração. Neste trabalho tentou-se efetuar a ligação projetando o alumínio, de forma a perceber se o aspeto da interface se modifica, e efetuaram-se ligações entre cobre-cobre e alumínio-alumínio, de forma a observar a diferença entre a morfologia das interfaces das soldaduras similares e dissimilares.

Este trabalho encontra-se estruturado em 6 capítulos. No capítulo 2 expõe-se o estado da arte, onde se faz uma apresentação geral da técnica de soldadura por explosão e do seu desenvolvimento até à atualidade, no capítulo 3 descrevem-se os procedimentos experimentais utilizados, no capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos, no capítulo 5 discutem-se estes resultados e finalmente no capítulo 6 são retiradas conclusões acerca dos resultados obtidos.



## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Análise Histórica

“*A necessidade aguça o engenho.*” Não será por acaso que muitas das inovações tecnológicas aconteceram durante as duas grandes guerras, e o processo de soldadura por explosão não é exceção.

Este fenómeno foi observado durante a 1ª Guerra Mundial por soldados que constataram que, em determinadas circunstâncias, partes metálicas de projéteis e estilhaços eram soldadas a outras superfícies metálicas (Young, 2004). No entanto, apenas durante a 2ª Guerra Mundial e por mero acaso é que a soldadura por explosão foi alvo de estudo, decorria o ano de 1944. L. R. Carl efetuava testes de avaliação de explosivos, quando observou que dois discos finos de latão usados para posicionar o explosivo se tinham unido aquando da detonação (Carpenter, et al., 1975). Aquando da análise da interface, Carl reconheceu a inexistência de uma zona de fusão, e designou o processo como “processo de ligação no estado sólido” (Young, 2004).

A investigação de Carl foi continuada por diversos investigadores nos anos que se seguiram, sendo de maior destaque os resultados obtidos por uma equipa de investigadores liderados por M. A. Lavrent’ev em Kiev, entre os anos de 1946 e 1948. Esta equipa conseguiu obter um compósito bimetálico aço-cobre, onde era possível observar na interface as ondas tão características deste processo (Deribas, et al., 1967).

Apesar destes avanços, a soldadura por explosão propriamente dita (*Explosive Welding, EXW*) foi apenas reconhecida como tecnologia em 1957, pelas mãos do americano V. Philipchuck. Novamente por acaso, enquanto conformava um perfil em U de alumínio, Philipchuck reparou que cerca de uma polegada quadrada deste ficou soldado ao molde de aço (Carpenter, et al., 1975). Philipchuck prosseguiu a sua investigação, chegando mesmo a patentear um processo para obter este tipo de soldadura em 1962. No entanto, este processo nem sempre era bem-sucedido, dado que nem sempre era possível manter a força de compressão entre as placas pelo tempo suficiente para estabelecer a ligação entre elas

(Deribas, et al., 1967), e também por haver ainda um desconhecimento dos parâmetros que mais influenciam este processo.

Estes parâmetros foram aprofundados por Douglass, Holtzman e Cowan em 1960. Utilizando um método semelhante a Philipchuck mas com parâmetros melhorados, conseguiram obter bons resultados e patentearam este novo método, em 1964 (Deribas, et al., 1967).

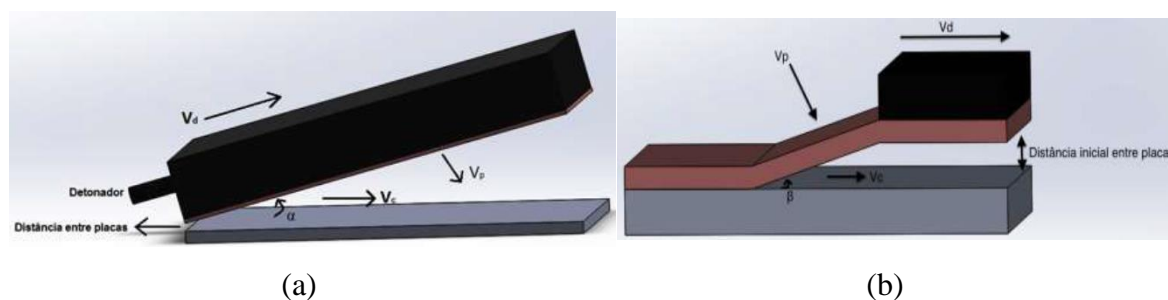
Várias investigações se seguiram, incluindo nomes como Daven e Duvall, Deribas, Boes, Sedykh, Zernov, Bahrami e Crossland, mas foi a empresa americana DuPont que através de nova patente tornou este processo usado industrialmente, criando a marca registada Detaclad® em 1964. Esta marca foi adquirida pela DMC em 1996.

Apesar do seu atribulado início, a soldadura por explosão encontra-se em franca expansão, devido à sua grande abrangência de utilização (atualmente já se efetuam mais de 260 combinações de materiais (Findik, 2011).

## 2.2. Princípio do Método

A soldadura por explosão destaca-se dos outros métodos de soldadura porque a união dos materiais se realiza sem ser necessária a fusão destes (daí este processo estar incluído no grupo de processos de soldadura no estado sólido). Este facto resulta em diversas vantagens, como ser possível a união de metais com temperaturas de fusão distintas e não existir uma zona de fusão generalizada (ou seja sem tensões superficiais significativas resultantes da soldadura). A união dá-se em primeira análise devido à deformação plástica causada pelo impacto entre os materiais, resultante por sua vez da força de compressão causada pela explosão.

Existem duas montagens utilizadas no processo, apresentadas na Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Configurações possíveis para EXW: (a) Montagem inclinada; (b) Montagem paralela. Fonte da imagem: (Barreto, 2014).

A placa estacionária encontra-se apoiada numa base, que tem como função absorver a força do impacto. A placa voadora (*flyer plate*) apresenta-se separada da placa estacionária por uma distância entre placas designada por STD (*stand-off distance*), e pode-se encontrar ligeiramente inclinada com um ângulo  $\alpha$  (Figura 2.1 a) ou paralela a esta (Figura 2.1 b). Imediatamente acima do *flyer* dispõe-se o explosivo. Este, ao ser detonado, comunica ao *flyer* uma grande aceleração e consequente velocidade de impacto  $V_p$  (variável consoante a distância STD e a quantidade e tipo de explosivo), e esta é projetada sobre a placa estacionária segundo um determinado ângulo (ângulo de colisão,  $\beta$ ). A colisão resultante provoca a deformação plástica dos materiais na interface entre eles, ocorrendo a ejeção da camada superficial dos materiais.

De notar que a colisão ocorre sempre com um determinado ângulo ( $\beta$ ), mesmo que as placas se encontrem paralelas inicialmente. Isto acontece porque a propagação da explosão é muito rápida e o *flyer* é deformado conforme esta propagação vai acontecendo.

Todos estes parâmetros acima mencionados estão intimamente relacionados com o resultado final obtido, e muitos deles encontram-se interligados (ver secção 2.2.2). Portanto, para estimar se a soldadura irá ser ou não bem-sucedida, estes valores devem ser pré-conhecidos teoricamente antes de se proceder à experiência propriamente dita.

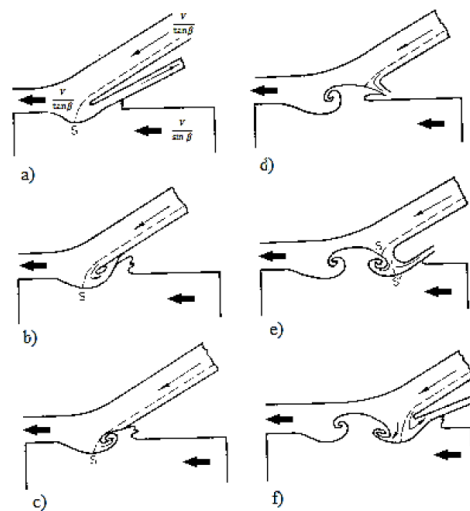
### **2.2.1. Mecanismos de Formação da Onda**

A soldadura por explosão apresenta geralmente uma interface característica com ondas de dimensão variável. Existem diversas teorias que tentam explicar os fenómenos responsáveis por tal facto, sendo elas, por ordem cronológica:

- Mecanismo de indentação do jato (Abrahamson, 1961);
- Mecanismo de fluxo instável (Hunt, 1968);
- Mecanismo turbulento (Reid, 1974);
- Mecanismo de tensão de ondas (El-Sobsky, et al., 1975).

#### **2.2.1.1. Mecanismo de Indentação do Jato**

Esta teoria apresenta-se como uma das teorias mais aceitáveis (Mousavi, et al., 2004). Este mecanismo é defendido por diversos autores (Abrahamson, 1961), (Bergman, et al., 1966), (Bahrani, et al., 1967), encontrando-se representado na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Mecanismo de indentação do jato (Mousavi, et al., 2004).

Este mecanismo atribui a formação de ondas na interface à ação de indentação do jato na placa estacionária. Este jato é composto por material proveniente do *flyer*, e quando se forma deixa uma saliência no material desta imediatamente após o ponto de colisão. Forma-se então um jato de reentrada composto por material da placa estacionária, que ocupa a saliência no *flyer* e permite a continuação do jato. (Bahrani, et al., 1967) defende que a formação de vórtices está relacionada com a interação entre o jato de reentrada e o material removido, proveniente do material da placa estacionária (Mendes, et al., 2012).

### 2.2.1.2. Mecanismo de Fluxo Instável

Esta teoria compara o processo de formação de ondas na interface com os fenômenos hidrodinâmicos presentes na interface entre dois líquidos com diferentes velocidades horizontais (fenômeno também chamado de instabilidade de Kelvin-Helmholz). (Hunt, 1968) refere que esta mesma diferença de velocidades ocorre entre a placa estacionária e o jato de reentrada. Já (Robinson, 1975) defende que a descontinuidade de velocidades ocorre entre a placa estacionária e a saliência produzida pelo jato.

Estas instabilidades responsáveis pela criação de ondas são resultado da detonação do explosivo, que é sempre heterogênea. As flutuações no campo de pressões e temperaturas do processo de detonação repercutem-se na placa voadora e por sua vez na placa estacionária. Quanto mais heterogênea for a detonação maior amplitude terão as ondas geradas (Plaksin, et al., 2003); (Mendes, et al., 2012).

### 2.2.1.3. Mecanismo Turbulento

Esta teoria atribui a formação de ondas a um mecanismo turbulento, devido à existência de vórtices que se formam graças a pontos de estagnação (velocidade nula).

### 2.2.1.4. Mecanismo de Tensão de Onda

Esta teoria atribui a formação de ondas a interferências provenientes das reflexões de onda, originárias nas duas placas (Mendes, et al., 2012).

## 2.2.2. Principais Parâmetros do Processo

Para ser possível ocorrer uma união de boa qualidade entre os materiais existem diversos parâmetros que devem ser tidos em consideração. São eles:

### 2.2.2.1. Tipo e Quantidade de Explosivo

O explosivo é responsável pela aceleração e conseqüente impacto do *flyer* sobre a placa estacionária. Logo, o seu tipo e quantidade (ou rácio  $R$ ) tornam-se fatores indispensáveis em todo o processo, e vão influenciar os seguintes parâmetros:

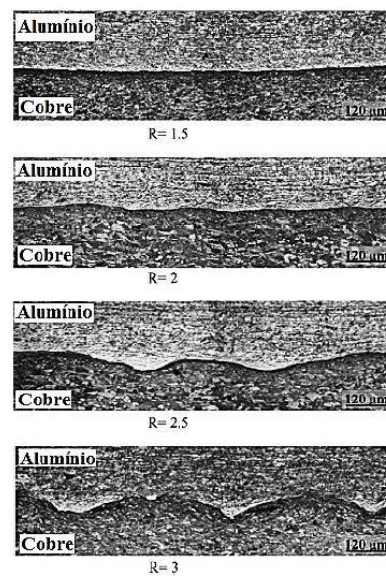
- A velocidade de detonação  $V_d$ ;
- A velocidade do ponto de colisão  $V_c$ ;
- O ângulo de colisão  $\beta$ ;
- A velocidade de impacto  $V_p$ .

O tipo e rácio de explosivo devem ser escolhidos tendo em conta a velocidade de detonação mais adequada, que por sua vez depende do tipo de materiais a soldar.

Depois de definido o tipo de explosivo a utilizar, a quantidade de explosivo é obtida pela relação estabelecida entre a massa do explosivo ( $C$ ) e a massa do *flyer* ( $M$ ), ou rácio de explosivo ( $R$ ), obtido pela equação (2.1):

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

O rácio de explosivo ( $R$ ) afeta diretamente a morfologia da interface. À medida que este parâmetro aumenta, o comprimento e a amplitude das ondas também aumenta, como se pode verificar na Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Influência do rácio de explosivo na interface em placas Al-Cu (Gulenc, 2008).

No entanto, quando este valor é excessivo conduz a um excesso de ondas e a uma maior fusão, conduzindo à formação de compostos intermetálicos na interface, o que enfraquece a soldadura (Gulenc, 2008). Quando o valor de  $R$  é demasiado baixo, a ondulação deixa de existir e não se verifica a soldadura (Gulenc, 2008).

Posto isto, torna-se evidente a existência de um valor ótimo para  $R$ , que permita um compromisso entre os dois lados da moeda e permita valores otimizados para os outros parâmetros que dele dependem. No entanto, cada combinação de materiais possui diferentes características e portanto o valor de  $R$  ideal é diferente para cada caso. Este valor também depende diretamente da massa do *flyer*, e este valor por sua vez depende da densidade e das dimensões desta. O tipo de material e as suas dimensões são normalmente dados do projeto e portanto são valores que não podem ser variados, logo o rácio do explosivo tem de ser controlado com o valor da massa do explosivo utilizado.

#### 2.2.2.2. Distância entre Placas (STD)

A distância entre placas depende essencialmente da espessura do *flyer*. Esta deve ser no mínimo igual a metade da espessura e suficiente para que o *flyer* atinja a velocidade de projeção mínima necessária, podendo ser aumentada até três vezes a espessura deste (Durgutlu, et al., 2008).

Esta distância tem influência na forma e na dimensão da zona ondulada da interface (Durgutlu, et al., 2008). Com o aumento da STD, aumenta a ondulação.



### 2.2.2.3. Material e Espessura do Material de Suporte da Placa Estacionária

O material onde a placa estacionária se encontra apoiada é responsável pela absorção do impacto, e tem uma grande influência no resultado final da soldadura, seja na morfologia da interface ou nas propriedades mecânicas da soldadura. Pode por vezes até ser responsável pela existência ou não de uma soldadura bem-sucedida.

Nos anos anteriores, nomeadamente na dissertação de mestrado de (Barreto, 2014) esta influência foi estudada, tendo sido obtidos os melhores resultados usando como base uma placa de aço sobre uma base de areia.

## 2.3. Janela de Soldabilidade

O processo de soldadura por explosão pode dividir-se em três momentos essenciais (Ghomi, 2009):

- 1) Detonação do explosivo;
- 2) Momento de aceleração e consequente deformação do *flyer*;
- 3) Instante da colisão entre placas.

A detonação do explosivo liberta gases que aceleram o *flyer* e o fazem colidir com a placa estacionária. O *flyer* deve atingir uma velocidade mínima (velocidade de impacto,  $V_p$ ), e estar sob pressão durante um tempo mínimo para que a soldadura ocorra (este tempo depende da velocidade de detonação  $V_d$ ). Para isto acontecer a velocidade de detonação deve ser adequada, e este fator depende do rácio de explosivo (ver secção 2.2.2.1). No entanto, se estes valores forem demasiado elevados, a soldadura pode revelar-se de má qualidade ou até mesmo não se realizar. Isto deve-se ao fornecimento de demasiada energia cinética, que se converte em energia térmica e forma uma zona fundida na interface, com formação de compostos intermetálicos (Crossland, 1982).

O momento de aceleração e deformação do *flyer* depende do primeiro momento e da distância entre placas (STD).

O instante de colisão entre placas é onde se dá a ligação propriamente dita. Aqui, a energia cinética do *flyer* converte-se não só em energia de compressão mas também uma parte desta é responsável pela criação do fluxo na interface. Esta energia é depois convertida em calor. Para poder relacionar todos os parâmetros envolvidos em todos os passos que ocorrem na soldadura foram desenvolvidos vários métodos ao longo dos anos.

A janela de soldabilidade trata-se de uma ferramenta bastante intuitiva para perceber se foram escolhidos os parâmetros adequados para que a soldadura aconteça e se mantenha. Basicamente, se a experiência reunir todos os parâmetros dentro da chamada janela de soldabilidade, a soldadura será bem-sucedida. Se não, não será. Apesar de parecer algo simples e intuitivo, está longe de ser cem por cento fiável e o seu desenvolvimento só foi possível após exaustiva investigação.

Tudo começa nos parâmetros a contabilizar. Segundo (Ribeiro, et al., 2014), a janela de soldabilidade apresentada por (Cowan, et al., 1963) e mencionada por (Mousavi, et al., 2004) apresenta fracos resultados, sendo a janela de soldabilidade mais usada nos dias de hoje baseada nos parâmetros velocidade do ponto de colisão  $V_c$  e ângulo de colisão  $\beta$  (desenvolvida por (Cowan, et al., 1971), (Deribas, et al., 1967), (Wittman, 1973) e (Szecket, 1979)).

Esta janela é delimitada por 4 linhas teóricas, conforme a Figura 2.4.

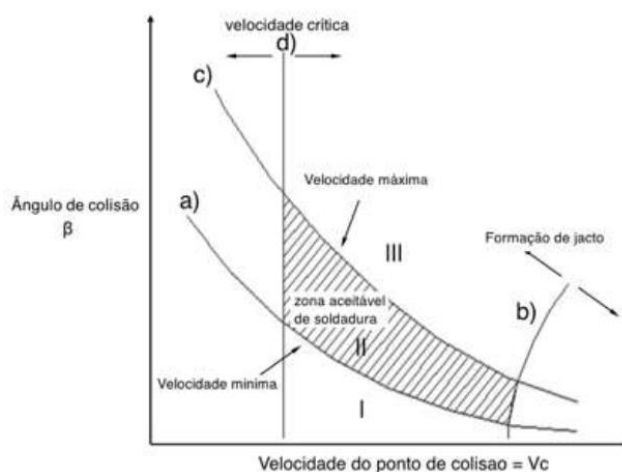


Figura 2.4. Janela de soldabilidade típica (Mendes, et al., 2012).

### 2.3.1. Equações

Estas 4 linhas delimitam uma zona (II), que é considerada a zona aceitável de soldadura. De facto, se a soldadura não se encontrar localizada nesta área o resultado pode ser uma soldadura de fraca qualidade ou até a não ocorrência de ligação.

A zona I caracteriza-se por velocidades de impacto demasiado baixas, o que resulta numa energia cinética insuficiente que não permite a deformação plástica necessária dos materiais para formar ligação entre eles.

Por seu lado, a zona III é caracterizada por uma velocidade de impacto exagerada, o que conduz a um excesso de fusão dos materiais e resultante formação de compostos intermetálicos na interface, no caso de uniões dissimilares (no caso de uniões similares há apenas excesso de fusão). Estes compostos tornam esta zona frágil e reduzem a resistência mecânica dos materiais (Gulenc, 2008).

As equações para obter as curvas que delimitam estas zonas estão relacionadas com os fatores anteriormente mencionados, sendo eles (Findik, 2011):

- Ângulo de colisão  $\beta$  crítico para a formação do jato;
- Velocidade do ponto de colisão crítica de transição  $V_{c,tr}$  para a formação do fluxo;
- Impacto mínimo necessário para a formação do jato, baseado na análise de tensões que provocam o fluxo;
- Impacto máximo para limitar os defeitos de soldadura, baseado na retenção do jato.

Os limites presentes na Figura 2.4 e que definem a janela de soldabilidade são obtidos recorrendo a equações com parâmetros conhecidos.

O limite a) corresponde à velocidade do ponto de colisão mínima com que o *flyer* colide com a placa estacionária ( $V_{c,min}$ ). Este parâmetro deve ser tal que a pressão de impacto no ponto de colisão resultante desta exceda a tensão limite de elasticidade de ambos os materiais (Mendes, et al., 2012). Para tal, calcula-se a velocidade mínima do ponto de colisão pela equação (2.2) desenvolvida por Deribas e Zacharenko (Zakharenko, et al., 1983),

$$V_{c,min} = \frac{K_1}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{H_{V,f}}{\rho_f}}, \quad (2.2)$$

onde  $K_1$  representa o coeficiente adimensional de limpeza de superfícies (0,6 no caso de metais),  $\beta$  é o já mencionado ângulo de colisão [rad],  $H_{V,f}$  a dureza Vickers do material do *flyer* e  $\rho_f$  a massa volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ] também do *flyer*.

O limite b) corresponde ao ângulo crítico de formação do jato. Este jato forma-se se ambas as velocidades de detonação e do ponto de colisão forem inferiores à velocidade de propagação do som no material do *flyer*. A velocidade do ponto de colisão  $V_c$  relaciona-se com o ângulo de colisão  $\beta$  pela equação (2.3) desenvolvida por (Abrahamson, 1961),

$$\beta = 10 \cdot (V_c - 5,5). \quad (2.3)$$

O limite c) limita a velocidade de impacto do *flyer*  $V_p$  de maneira a que este não produza uma energia cinética excessiva, para que por sua vez o calor libertado aquando da colisão não seja o suficiente para fundir os materiais. A velocidade máxima de impacto é relacionada com a velocidade de detonação  $V_d$  recorrendo à equação (2.4) desenvolvida por (Wittman, 1973),

$$V_p = \frac{1}{N} \cdot \frac{(T_{m,f} \cdot C_{0,f})^{\frac{1}{2}}}{V_d} \cdot \left( \frac{K_f \cdot C_{p,f} \cdot C_{0,f}}{\rho_f \cdot h_f} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.4)$$

onde  $N$  representa um valor adimensional (0,11 atribuído aos metais),  $T_{m,f}$  a temperatura de fusão do material do *flyer* [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $C_{0,f}$  a velocidade de propagação do som no material do *flyer* [cm/s],  $K_f$  a condutibilidade térmica também do *flyer* [erg/s.cm. $^{\circ}\text{C}$ ],  $C_{p,f}$  o calor específico a pressão constante do *flyer* [erg/g. $^{\circ}\text{C}$ ],  $h_f$  a espessura do *flyer* [cm] e  $\rho_f$  a massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>] também do *flyer*. No entanto, este valor de  $N$  pode não ser uniforme para todos os metais. (Ribeiro, et al., 2014) não só afirma que este valor é apenas referido mas não verificado experimentalmente por (de Rosset, 2006), como também defende que mudando o valor de  $N$  para 0,062 são obtidos resultados mais compatíveis com os resultados empíricos.

(Gurney, 1943) apresenta outro modo de cálculo da velocidade de impacto. Este modelo considera que a aceleração do *flyer* é perpendicular à direção de propagação da detonação, e relaciona as duas através de uma energia específica para cada tipo de explosivo (energia de Gurney-  $\sqrt{2E}$ ). Este modelo foi reformulado por (Kennedy, et al., 1972) para a configuração paralela do EXW, através da equação (2.5),

$$V_{pGurney} = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{3}{1 + 5 \cdot \left(\frac{M}{C}\right) + 4 \cdot \left(\frac{M^2}{C^2}\right)}}, \quad (2.5)$$

Onde a energia de Gurney  $\sqrt{2E}$  é aproximadamente 60% do calor produzido na explosão  $\Delta H$  (Kennedy, et al., 1998),  $M$  a massa do *flyer* [kg] e  $C$  a massa do explosivo [kg].

Tendo  $V_p$  e a velocidade de detonação  $V_d$ , o ângulo de colisão  $\beta$  é calculado por (2.6) (Findik, 2011):

$$V_p = 2 \cdot V_d \cdot \text{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (2.6)$$

Finalmente, o limite d) representa o valor mínimo da velocidade do ponto de colisão. Este limite é obtido através da hipótese hidrodinâmica (2.7),

$$Re = \frac{V_d^2}{2} \cdot \frac{(\rho_f + \rho_e)}{(H_{V,f} + H_{V,e})} \leftrightarrow V_{c,tr} = \sqrt{\frac{2 \cdot Re \cdot (H_{V,f} + H_{V,e})}{\rho_f + \rho_e}}, \quad (2.7)$$

onde  $Re$  representa o número de Reynolds,  $\rho_f$  e  $\rho_e$  as massas volúmicas dos materiais e  $H_{V,f}$  e  $H_{V,e}$  as durezas Vickers dos dois materiais a unir.

### 2.3.2. Enquadramento no diagrama

Tendo a janela de soldabilidade construída, as soldaduras são incluídas no gráfico através de três parâmetros:

- Velocidade de impacto  $V_p$ ;
- Velocidade de detonação  $V_d$ ;
- Ângulo de colisão  $\beta$ .

A relação entre estes três parâmetros apresenta-se na Figura 2.5.

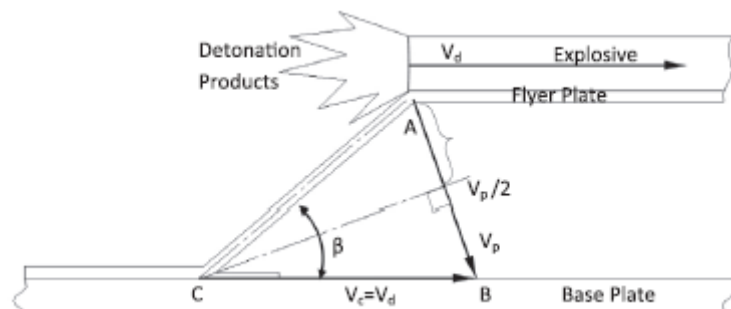


Figura 2.5. Relação entre  $V_p$ ,  $V_d$  e  $\beta$  (Mendes, et al., 2012).

#### 2.3.2.1. Velocidade de Impacto $V_p$

Para determinar a velocidade de impacto calcula-se primeiro  $V_{pGurney}$  através de (2.5), e a velocidade de impacto em função do tempo  $V_p(t)$  é dada pela equação (2.8) (Chou, et al., 1986),

$$V_p(t) = V_{pGurney} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right], \quad (2.8)$$

onde  $t_0$  é o instante inicial [s] (normalmente igual a zero) e  $\tau$  uma constante de tempo calculada por (2.9) (Chou, et al., 1983),

$$\tau = C_1 \cdot \frac{M \cdot V_{pGurney}}{p_{cj}} + C_2, \quad (2.9)$$

onde  $M$  é a massa do *flyer* [kg],  $p_{cj}$  a pressão de Chapman-Jouguet produzida na detonação e  $C_1$  e  $C_2$  constantes empíricas, calibradas para cada processo de maneira que o *flyer* seja acelerado até atingir uma velocidade igual a 80% de  $V_{pGurney}$  ( $V_{pcai} = 0,8V_{pGurney}$ ). Considera-se que o processo de aceleração do *flyer* ocorre até que a onda de choque gerada pela detonação sofra oito reflexões no interior deste (Mendes, et al., 2012).

O tempo necessário para que o *flyer* atinja  $V_{pcai}$  ( $t_{vcai}$ ) é determinado considerando que esta onda de choque se move à velocidade do som do material no interior do *flyer* (Findik, 2011). Integrando a função obtida pela relação (2.8) obtém-se a equação da distância percorrida pelo *flyer* em relação ao tempo, apresentada em (2.10),

$$X_p(t) = V_{pGurney} \cdot \left[ t - t_0 + \tau \left( \exp \left( -\frac{t - t_0}{\tau} \right) - 1 \right) \right], \quad (2.10)$$

onde  $X_p(t)$  é então a distância percorrida em relação ao tempo. Como a distância inicial entre placas é conhecida (STD), é possível calcular a velocidade da placa voadora no momento do impacto, ou velocidade de projeção ( $V_p$ ).

### 2.3.2.2. Velocidade de Detonação $V_d$

Este parâmetro é calculado através de medições efetuadas em cada soldadura. Cada montagem possui várias sondas montadas a distâncias conhecidas que emitem sinais elétricos quando a detonação “passa” por elas. Estes sinais elétricos são captados por um osciloscópio que os regista numa base de tempo e os representa num campo dividido em quadrículas, cada uma correspondente a um intervalo de tempo de  $5\mu s$ . Tendo os intervalos de tempo entre sinais e as correspondentes distâncias, obtém-se a velocidade de detonação  $V_d$ . O circuito elétrico responsável por estes sinais e a sua montagem, bem como os equipamentos utilizados estão descritos na secção 3.3.

### 2.3.2.3. Ângulo de Colisão $\beta$

Tendo obtido os dois parâmetros anteriores  $V_p$  e  $V_d$ , o ângulo de colisão  $\beta$  é facilmente obtido pela equação (2.6).

## 2.4. Morfologia da Interface Alumínio-Cobre

### 2.4.1. Microestrutura

Se a soldadura for bem-sucedida deve-se posteriormente fazer uma análise da microestrutura na interface entre os dois metais, do modo a poder analisar fatores como o comprimento e a amplitude da onda.

A interface apresenta uma morfologia ondulada característica, que apresenta parâmetros distintos consoante as condições da soldadura e do tipo dos dois materiais a unir. As soldaduras que combinam alumínio e cobre são caracterizadas por uma fraca ondulação (aquando comparadas às soldaduras entre aços, por exemplo) (Dias, 2012), e por uma ondulação heterogénea, como se pode observar na Figura 2.6.



Figura 2.6. Morfologia da interface Cu-Al (Dias, 2012).

### 2.4.2. Fases na Interface

Na interface da soldadura Al-Cu e Cu-Al pode ocorrer a formação de vários compostos intermetálicos, que se encontram mencionados no diagrama de fases destes dois elementos. (Kim, et al., 2003) menciona que entre 150°C e 300°C se podem formar os seguintes compostos intermetálicos, cada um deles com as respetivas percentagens atómicas aproximadas de cobre:

- CuAl, 50% Cu;
- CuAl<sub>2</sub>, 33,3% Cu;
- Cu<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>, 60,0% Cu;
- Cu<sub>4</sub>Al<sub>3</sub>, 57,1% Cu;
- Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>, 69,2% Cu.

Estes valores permitem identificar os intermetálicos presentes na interface.

### 2.4.3. Microdureza Característica

As soldaduras por explosão entre alumínio e cobre apresentam um perfil de dureza característico apresentado na Figura 2.7.

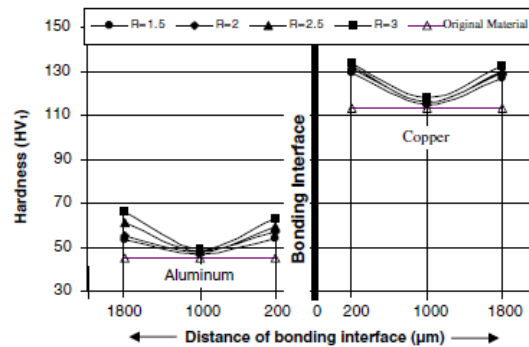


Figura 2.7. Perfis de dureza de soldaduras Al-Cu (Gulenc, 2008).

Como se pode verificar, este perfil varia com o rácio de explosivo  $R$  utilizado. Os valores máximos de dureza verificam-se na interface de soldadura e nos pontos mais afastados desta. Os valores da interface são justificados com a presença de compostos intermetálicos frágeis, que apresentam várias durezas características (Ouyang, et al., 2006):

- $\text{CuAl}$ , 663-760 Hv;
- $\text{CuAl}_2$ , 486-557 Hv ou  $\text{CuAl}_2$  eutético, 257-385 Hv;
- $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ , 136-178 Hv.

(Ouyang, et al., 2006) justifica estes intervalos de valores de microdureza com as variações observadas na microestrutura da interface.

## 2.5. Vantagens e Desvantagens do Processo

Segundo (Findik, 2011), as principais vantagens deste processo são:

- Soldadura de materiais dissimilares;
- A qualidade dos materiais base é mantida;
- Soldadura de áreas consideráveis (área ilimitada);
- Processo económico;
- Possibilidade de ser realizado em diversas condições ambientais.
- Possibilidade de acionamento por controlo remoto.

Para além destas vantagens, é possível apontar outras:

- Simplicidade do método;



- Possibilidade de soldar chapas de diferentes espessuras;
- Pequena quantidade de explosivo utilizada;

Como desvantagens, (Findik, 2011) aponta:

- Os materiais devem possuir uma resistência ao impacto e ductilidade mínima de maneira a que consigam suportar a rápida deformação plástica sem ocorrer fratura;
- O ruído e a onda de choque resultantes do processo obrigam a alguns cuidados por parte do operador, como o uso de equipamento de proteção, câmaras de vácuo, ou a realização do processo debaixo de terra ou água;
- A interdição do uso de explosivos em zonas industriais devido ao ruído e vibrações resultantes do processo;
- A necessidade de uma geometria simples (plana, cilíndrica ou cônica são as mais utilizadas).

## 2.6. Combinações Possíveis

A soldadura por explosão tem um enorme potencial para crescer, e cada vez mais se efetuam combinações entre os materiais mais improváveis. Como tal, a Figura 2.8 serve apenas em termos indicativos, podendo não se encontrar completa, já que todos os dias inúmeras experiências são realizadas de modo a comprovar o uso desta tecnologia em diversos materiais.

	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 2.8. Combinações atualmente realizadas em EXW (Santos, 2013).

## 2.7. Principais Aplicações Atuais

De acordo com (Findik, 2011), este método de soldadura é usado em:

- Fabrico de reatores nucleares;
- Construção naval;
- Fuselagem de aviões;
- Fabrico de permutadores de calor;
- Fabrico de transformadores elétricos;
- União de juntas sobrepostas.

Outras aplicações possíveis deste método são:

- União de tubos;
- Revestimentos;
- Fabrico de alhetas de refrigeração.

## 2.8. Soldadura por Explosão VS Soldadura por Impulso Magnético

A soldadura por impulso magnético (MPW) é em tudo semelhante à soldadura por explosão, com exceção na origem da força de projeção, que neste caso é magnética em vez de explosiva. Neste método utiliza-se uma montagem semelhante à EXW, com utilização do circuito elétrico que vai ser responsável por criar e manter o campo magnético responsável pela projeção do *flyer* contra a placa base. A Figura 2.9 representa esquematicamente o processo.

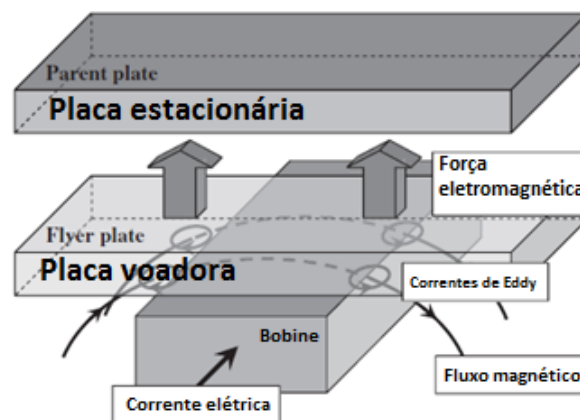


Figura 2.9. Esquema de uma montagem plana para o processo MPW (Watanabe, et al., 2009).

Este método apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação à soldadura por explosão. Como vantagens é um método mais ecológico, não necessita de mão-de-obra qualificada e é facilmente mecanizável. No entanto, os materiais a unir devem possuir propriedades magnéticas, os equipamentos são dispendiosos, existe uma certa dificuldade na definição da distância de projeção ótima e existem limites nas espessuras e nas áreas dos materiais a unir. Apresenta também velocidades de projeção menores do que a soldadura por explosão (pois a aceleração magnética apresenta valores inferiores à aceleração incutida pela expansão dos gases na explosão), o que pode ser problemático em algumas situações. A soldadura por impulso magnético é normalmente mais usada em configurações cilíndricas, devido ao formato característico das bobines causadoras do campo magnético.

No entanto, como já foi mencionado, em termos de forças presentes os dois processos são semelhantes, o que permite comparar resultados e morfologia das interfaces obtidas pelos dois processos. No caso em análise este aspeto irá ser extremamente útil, pois na bibliografia disponível existem muito mais resultados obtidos por MPW do que por EXW nos materiais em estudo (Alumínio e Cobre).



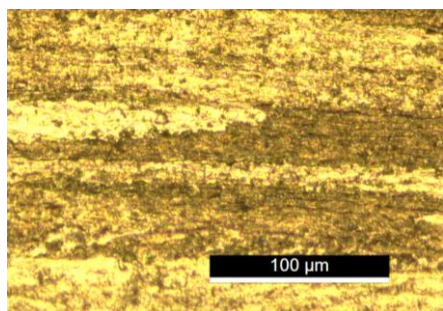
### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Composição e Dimensões dos Materiais Base

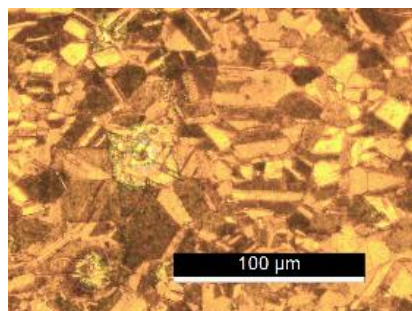
Para a realização das soldaduras foram usadas placas de alumínio 6082 e cobre DHP, com as composições químicas apresentadas na Tabela 3.1 e aspeto da microestrutura ilustrado na Figura 3.1.

Tabela 3.1. Composições químicas dos materiais usados.

	Al (%)	Cu (%)	Fe (%)	Si (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	P (%)	Mn (%)	Outros (%)
<b>Cobre DHP</b>	-	99,9	-	-	-	-	-	-	0,04	-	0,06
<b>Alumínio 6082</b>	Restante	0,0-0,1	0,0-0,5	0,7-1,3	0,6-1,2	0,0-0,25	0,0-0,2	0,0-0,1	-	0,4-1,0	0,05-0,15



(a)



(b)

Figura 3.1. Microestrutura do: (a) Alumínio 6082; (b) Cobre DHP.

O alumínio tem o grão alongado segundo a direção de laminagem, cuja dimensão é difícil discernir; o cobre apresenta um grão irregular com maclas.

Foram utilizadas placas com dimensões 120x95 mm e com espessura de 3 mm, com exceção do primeiro ensaio (EW8), onde o *flyer* tinha apenas 1 mm de espessura. Na Tabela 3.2 está identificada a espessura do *flyer* utilizado em cada ensaio.

### 3.2. Montagem Experimental

A preparação, montagem e execução dos ensaios experimentais foram realizadas no LEDAP em Condeixa, Coimbra.

Todas as placas foram cortadas, desempenadas para eliminar movimentos indesejados durante o processo de soldadura e posteriormente polidas com lixas P320 na zona a soldar, de maneira a eliminar sujidade ou possíveis contaminantes. O esquema de montagem apresenta-se na Figura 3.2.



Figura 3.2. Esquema de montagem dos ensaios de soldadura.

Para conter o explosivo foram efetuadas montagens de cartão nos ensaios, EW8, UEW1, UEW2 e EW9, e montagens em acrílico nos ensaios UEW3 e UEW4. As dimensões e os desenhos das caixas de cartão estão no Apêndice C, as dimensões das montagens em acrílico estão patentes nos Apêndice D e Apêndice E. Na Figura 3.3 apresentam-se as caixas já montadas e coladas ao *flyer*, de forma a evitar oscilações aquando da detonação e explosão que se segue.

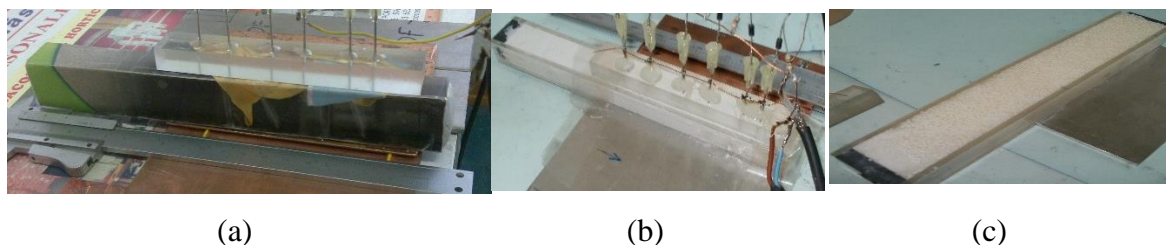


Figura 3.3. Montagens experimentais das caixas de explosivo: (a) Caixa de cartão; (b) Caixa acrílica para UEW3; (c) Caixa acrílica para UEW4.

O explosivo utilizado em todos os ensaios foi uma emulsão explosiva (*Eex*), utilizando como matriz nitrato de amónio composto por água, óleos e emulsionantes, e como sensibilizante foram utilizadas nos ensaios EW8, EW9, UEW1, UEW2 e UEW3

microesferas ocas de vidro (MEOV), com 40  $\mu\text{m}$  de diâmetro e no ensaio UEW4 foram utilizadas esferas de poliestireno expandido (EPS), que apresentam um diâmetro médio de 1,25 mm. Na Tabela 3.2 presente na secção 3.5 apresentam-se o tipo de sensibilizante usado bem como as proporções usadas em cada ensaio.

Para o cálculo da densidade da mistura explosiva utilizou-se um tubo oco com volume conhecido, retirou-se a massa e obteve-se então a densidade. Posteriormente as caixas foram cheias com a emulsão explosiva preparada.

Por cima destas caixas foram colocadas as placas de acrílico portadoras das sondas. Depois do seu fabrico foram verificadas as distâncias efetivas entre furos com um paquímetro, de maneira a tornar as medições da velocidade de detonação o mais precisas possível. O desenho destas peças é apresentado no Apêndice A, sendo as medições apresentadas no Apêndice B, Tabela B.1. Estas peças podem ser observadas na Figura 3.5.

Nos furos de 0,8 mm foram colocadas agulhas com diâmetro de 0,8 mm, onde passaram os fios (cada agulha corresponde a uma sonda), de maneira a que estas se posicionem da maneira mais precisa possível e evitem-se erros de mau posicionamento. As placas a soldar foram separadas utilizando espaçadores de 1,35 mm e 4 mm, conforme o ensaio. Para os de dimensão 1,35 mm utilizaram-se fios de cobre e para os de 4 mm fabricaram-se espaçadores de acrílico conforme o apresentado no Apêndice F, de maneira a que aquando da explosão o espaçador ceda facilmente. Estes espaçadores foram também colados na placa base. O esquema de montagem destas sondas apresenta-se na Figura 3.5.

### 3.3. Medição da Velocidade de Detonação

Para calcular a velocidade de detonação utilizou-se o circuito elétrico presente na Figura 3.4, o mesmo utilizado nos ensaios realizados por (Santos, 2013) e (Barreto, 2014).

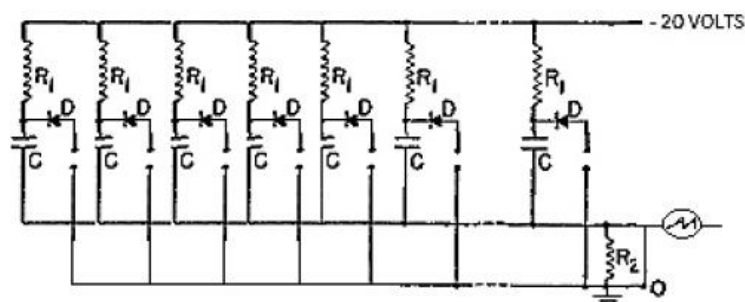
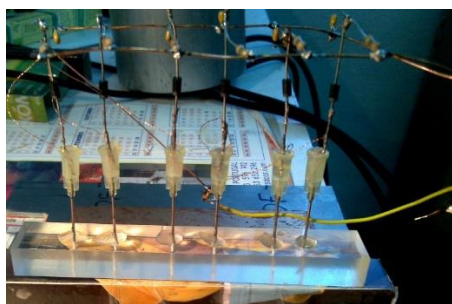
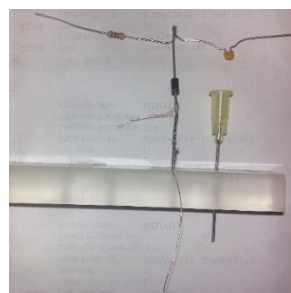


Figura 3.4. Esquema elétrico para a medição da velocidade de detonação (Santos, 2013).

Foram utilizadas 6 sondas por cada ensaio, cada uma destas composta por um condensador e uma resistência unidos em paralelo com o ânodo do díodo, enquanto o cátodo deste foi soldado a dois fios de cobre entrelaçados. Estes fios estão dentro de um tubo de aço de diâmetro 0,8 mm, e as suas extremidades foram posteriormente soldadas a um fio condutor ligado às sondas restantes, como se mostra na Figura 3.5.



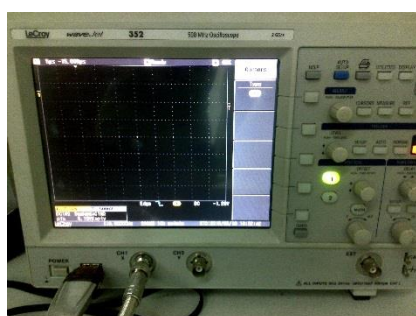
(a)



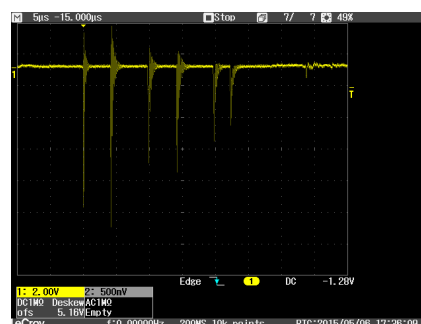
(b)

**Figura 3.5.** Montagem experimental para medição da velocidade de detonação: (a) Conjunto de sondas; (b) Detalhe de uma sonda.

Os fios dentro do tubo de aço estão em contacto com o explosivo nas posições descritas na Tabela 4.1 e no Apêndice B, Tabela B.1. Este circuito elétrico é alimentado por uma tensão de 20 V pelas resistências, e as sondas, quando atingidas pela explosão, emitem um sinal elétrico correspondente à descarga do condensador a si associado. Estes sinais elétricos são registados recorrendo a um osciloscópio digital, cujo cabo de sinal está ligado aos condensadores e que regista os sinais elétricos emitidos, como se apresenta na Figura 3.6.



(a)



(b)

**Figura 3.6.** Captação de sinais elétricos: (a) Osciloscópio digital; (b) Medições realizadas no ensaio UEW1.



A velocidade de detonação foi medida nos ensaios EW8, UEW1, UEW2, UEW3 e UEW4.

No ensaio EW9, a velocidade de detonação considerou-se igual ao ensaio UEW2 realizado imediatamente antes, já que foi utilizada a mesma emulsão explosiva e o mesmo volume desta. A diferença entre os valores das velocidades de detonação obtidos, apesar da densidade do explosivo se manter mais ou menos constante nestes ensaios, pode ser explicada por diversos motivos, como erros de posicionamento das sondas, detonação do explosivo não homogénea (velocidade de detonação variável), oscilações da montagem aquando da explosão, etc. No entanto, consideram-se que os valores obtidos estão dentro do esperado.

### 3.4. Nomenclatura das Amostras

Para posterior análise, as placas soldadas foram cortadas na serra em várias amostras, com espessura alternada de 10 mm e 20 mm, seguindo duas nomenclaturas; os ensaios que produziram uma união entre as duas placas seguem uma nomenclatura do tipo EWa\_b\_c, onde EW é a abreviatura de *Explosive Welding*, “a” representa o número do ensaio, “b” corresponde à espessura em mm do explosivo usado, e finalmente “c” representa o número da amostra, tendo ordem crescente na direção da detonação. De notar que o primeiro ensaio é EW8; isto porque os ensaios efetuados o ano anterior por Gonçalo Barreto foram até ao EW7 (segundo a mesma nomenclatura). Na Figura 3.7 mostra-se a posição de cada amostra na soldadura EW8.

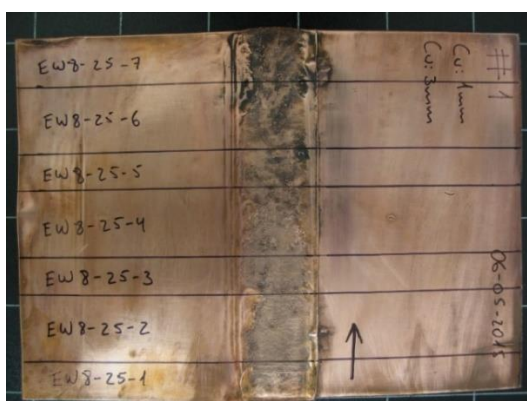


Figura 3.7. Esquema de amostras e nomenclatura utilizadas.

No caso dos ensaios em que não se obteve uma soldadura bem-sucedida foi atribuída uma nomenclatura diferente, do tipo UEWa\_b\_c, onde UEW é a abreviatura de

*Unsuccessful Explosive Welding*, “a” representa o número do ensaio, “b” corresponde à espessura em mm do explosivo usado, e finalmente “c” representa o número da amostra, tendo ordem crescente na direção da detonação. Acrescentam-se as letras “L” e “T” às nomenclaturas, de modo a estabelecer a diferença entre as análises longitudinal (L) e transversal (T) relativamente à direção da velocidade de detonação.

### 3.5. Parâmetros de Soldadura

Os parâmetros de soldadura gerais e específicos de cada ensaio estão apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2.** Parâmetros específicos de cada soldadura.

	EW8	UEW1	UEW2	EW9	UEW3	UEW4
<b>Tipo de Explosivo</b>	Eex+15% MEOV					Eex+1,2% EPS
<b>Material de suporte</b>	Aço/Areia					
<b><math>V_{explosivo}</math> [mm<sup>3</sup>]</b>	20x25x120=60000				20x15x 120=36000	30x25x120 =90000
<b><math>\rho_{explosivo}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	769,77	769,77	768,19	768,19	743,81	879,88
<b><math>C</math> [g]</b>	46,19	46,19	46,09	46,09	27,77	69,28
<b>Material do Flyer</b>	Cu-DHP	Al-6082	Al-6082	Al-6082	Al-6082	Al-6082
<b>Material da Base</b>	Cu-DHP	Cu-DHP	Cu-DHP	Al-6082	Cu-DHP	Cu-DHP
<b><math>h_{flyer}</math> [mm]</b>	1	3	3	3	3	3
<b><math>M_{flyer}</math> [g]</b>	21,42	19,44	19,44	19,44	19,44	19,44
<b><math>R</math></b>	2,16	2,38	2,38	2,38	1,43	3,56
<b>STD [mm]</b>	1,35	1,35	4	4	4	4

## 3.6. Metalografia

### 3.6.1. Preparação das Amostras

Após os ensaios experimentais e cortadas as amostras representadas na Figura 3.7, as reservadas para análise metalográfica foram inseridas em moldes de resina epoxy, e posteriormente polidas com lixas P320, P600, P1000 e P2500 grãos por polegada linear. Seguidamente, para o polimento recorreu-se a uma solução de pó de diamante com 3  $\mu\text{m}$  de diâmetro adicionado de lubrificante (para reduzir o aquecimento e o atrito), de maneira a obter um acabamento final espelhado. Foram analisadas amostras no sentido transversal e longitudinal à velocidade de detonação, como se apresenta na Figura 3.8.



Figura 3.8. Aspeto final das amostras na resina e sua localização nas amostras.

### 3.6.2. Ataque Químico

Para destacar a microestrutura dos metais utilizaram-se dois ataques químicos, sendo utilizado para a amostra EW8 (Cu-Cu) uma solução de 10 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  (água), 10 ml de  $\text{HNO}_3$  (ácido nítrico) e 0,2 ml de HF (ácido fluorídrico); para a amostra EW9 (Al-Al) utilizou-se o reagente de “Poulton” envelhecido, cuja solução contém 9 ml de  $\text{HNO}_3$  (ácido nítrico), 6,5 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  (água), 6 ml de HCl (ácido clorídrico), 1 ml de  $\text{CrO}_3$  (trióxido de crómio) e 0,5 ml de HF (ácido fluorídrico). Para as amostras restantes (Al-Cu) foram experimentados dois reagentes, a mesma solução utilizada para a amostra EW8, e uma solução com 25 ml de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (hidróxido de amónio) a 25% e 5 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (peróxido de hidrogénio, vulgo água oxigenada) a 30%, a mesma solução utilizada por (Barreto, 2014).

O ataque químico foi feito por imersão, sendo no caso do alumínio emergido duas vezes por 30 segundos e no caso do cobre emergido por 5 segundos. Depois de imersas as amostras foram lavadas em água, álcool e finalmente secas com um secador.

### **3.6.3. Análise Microestrutural**

Para analisar a microestrutura das amostras utilizou-se um microscópio ótico. Foi efetuada a análise das amostras, incluindo tamanho e a forma do grão, a morfologia na interface da soldadura e a amplitude e comprimento das ondas na interface.

### **3.6.4. Análise Química**

Para esta análise recorreu-se ao equipamento disponível no IPN, um microscópio eletrónico de varrimento Zeiss-Gemini 2 (SEM), acoplado a um sistema de microanálise de energia dispersiva EDS que permitiu analisar os compostos intermetálicos. Foram analisadas as amostras de soldadura alumínio-cobre, de maneira a conseguir identificar os compostos intermetálicos presentes na interface.

## **3.7. Análise Mecânica**

### **3.7.1. Dureza**

Para analisar as microdurezas das soldaduras obtidas foram realizadas medições com o equipamento *Struers- Duramin*. Em todas as amostras foram efetuadas indentações com forças de 25g por 15 segundos, incluindo as amostras não soldadas, utilizando uma distância entre indentações de 250  $\mu\text{m}$ . Foram analisadas as microdurezas longitudinal e transversalmente à soldadura, tanto no material base como ao longo da própria banda de soldadura, de modo a analisar não só a interface como também a dureza dos materiais base, tanto nas zonas deformadas pela soldadura como nas zonas não afetadas.

### **3.7.2. Resistência à Tração/Corte**

Para a realização dos ensaios de tração maquinaram-se provetes provenientes das únicas soldaduras bem-sucedidas, EW8 e EW9, seguindo o desenho presente no Apêndice I. Os três provetes provenientes da soldadura EW8 foram sujeitos a uma maquinação prévia, de forma a reduzir a espessura da placa estacionária para 1 mm (espessura do *flyer*). Da soldadura EW9 apenas foi possível a análise de um provete, pois aquando da maquinação os restantes fraturaram. Estes provetes foram sujeitos a uma carga de tração aplicada pelo equipamento *Instrom 4206*.

Através destes ensaios foi possível verificar a resistência da ligação. O extensómetro ótico 3D *ARAMIS* com correlação de imagem digital permitiu observar os campos de deformação durante os ensaios. As zonas observadas foram previamente polidas com lixas P320, P600 e P1000, sendo em seguida pintadas de branco e finalmente recorrendo a um aerógrafo salpicou-se o provete com tinta preta, obtendo no final um padrão visual que permite ao programa *ARAMIS* identificar as zonas de maior e menor deformação.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Janela de Soldabilidade

#### 4.1.1. Velocidade de Detonação

A Tabela 4.1 representa os valores de espaço e tempo registados nos ensaios. Os valores utilizados para definir as posições das sondas estão na Tabela B.1, Apêndice B. De notar que apesar dos ensaios Al-Cu não terem sido bem-sucedidos, o registo dos valores das sondas foi efetuado em todas com exceção de uma, o que permitiu o cálculo das velocidades de detonação  $V_d$ .

**Tabela 4.1.** Valores obtidos por cada sonda e cálculo das velocidades de detonação.

	EW8		UEW1		UEW2		UEW3		UEW4	
	Pos. Sonda (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Pos. Sonda (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Pos. Sonda (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Pos. Sonda (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Pos. Sonda (mm)	Tempo ( $\mu$ s)
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15,1	4,44	15,1	4,12	14,9	4,92	15,0	--	14,9	4,58
	35,3	10,2	35,2	9,76	35,0	8,72	35,0	9,6	35,2	11,9
	50,3	14,4	50,2	14,10	50,2	14,36	50,3	13,8	50,3	16,8
	70,8	19,72	70,4	19,66	70,1	18,72	70,2	19,16	70,3	23,68
	80,8	22,64	80,0	22,22	79,9	24,48	80,0	21,76	80,3	26,8
$V_d$ [m/s]	3551,1		3588,8		3476,9		3664,5		2986,9	

#### 4.1.2. Velocidade de Impacto

A velocidade de impacto é calculada através da velocidade de detonação, utilizando a metodologia descrita e proposta por (Mendes, et al., 2012), presente na secção 2.3.2.1.

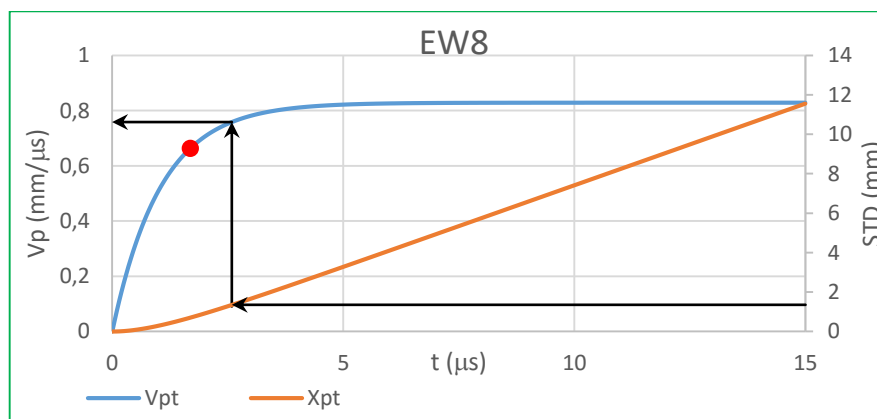
Os valores que são efetivamente utilizados para calibração são  $V_{pcal}$  e  $t_{vcal}$ . Estes valores são calculados considerando que a velocidade de impacto do *flyer* atinge 80% do valor da velocidade de Gurney ( $V_{pcal}$ , equação (4.1) ) no intervalo de tempo em que demora a haver 8 reflexões da onda de choque no *flyer*, considerando que esta se desloca à velocidade do som do material (equação (4.2), onde  $C_0$  representa a velocidade do som no material de que é composto o *flyer*),

$$V_{pcal} = 0.8 V_{pGurney}, \quad (4.1)$$

$$t_{vcal} = 8 \times \frac{\text{Espessura Flyer}}{C_0}. \quad (4.2)$$

As constantes  $C_1$  e  $C_2$  utilizadas em (2.9) foram estimadas de maneira a que a curva (2.8) passe pelo ponto estabelecido pelos valores de  $V_{pcal}$  e  $t_{vcal}$  (ponto de calibração na Figura 4.1).

Como exemplo apresentam-se os cálculos efetuados para a soldadura EW8. Utilizando os valores acima referidos e utilizando as equações (2.8) e (2.10) foi possível a construção do gráfico apresentado na Figura 4.1, onde é possível estimar a velocidade de impacto  $V_p$ , que no caso da soldadura EW8 foi de 758,25 m/s.



**Figura 4.1.** Processo de calibração para a soldadura EW8.

Todos os valores utilizados nestes cálculos, bem como os gráficos de calibração efetuados para os outros ensaios estão apresentados no Apêndice G, Tabela G.1. De notar que para o cálculo da velocidade de impacto  $V_p$  considera-se apenas o volume do *flyer*

afetado diretamente pela explosão, isto é, o volume do *flyer* por baixo da caixa que contém o explosivo, já que a velocidade não é constante em todo o *flyer*. Como a área da caixa é igual à área do *flyer* afetada, este cálculo resume-se à diferença entre a espessura do *flyer* e a altura de explosivo.

#### 4.1.3. Ângulo de Impacto

Tendo o valor da velocidade de impacto sido obtido na secção 4.1.1, o valor do ângulo de colisão  $\beta$  é calculado pela equação (2.6), sendo neste caso  $12,26^\circ$ . Tendo estes dois valores é possível enquadrar a soldadura obtida no diagrama. Os valores de  $\beta$  para as restantes soldaduras encontram-se no Apêndice H, Tabela H.1.

#### 4.1.4. Enquadramento

Usando as equações (2.2), (2.3), (2.4), (2.6) e (2.7) e utilizando os valores disponíveis no Apêndice H foi possível construir as janelas de soldabilidade. Optou-se por construir duas janelas para cada combinação de materiais (total de 6 janelas), uma utilizando o valor teórico de  $N=0,11$  que tem sido utilizado em outros trabalhos anteriores (casos (a)), e outra considerando  $N=0,062$  (casos (b)). Para o caso da combinação Cu-Cu (soldadura EW8) construíram-se as janelas presentes na Figura 4.2, onde em ambos os casos a curva a corresponde à equação (2.2), a curva b corresponde à equação (2.3), a curva c corresponde à equação (2.4) e a curva d corresponde à equação (2.5).

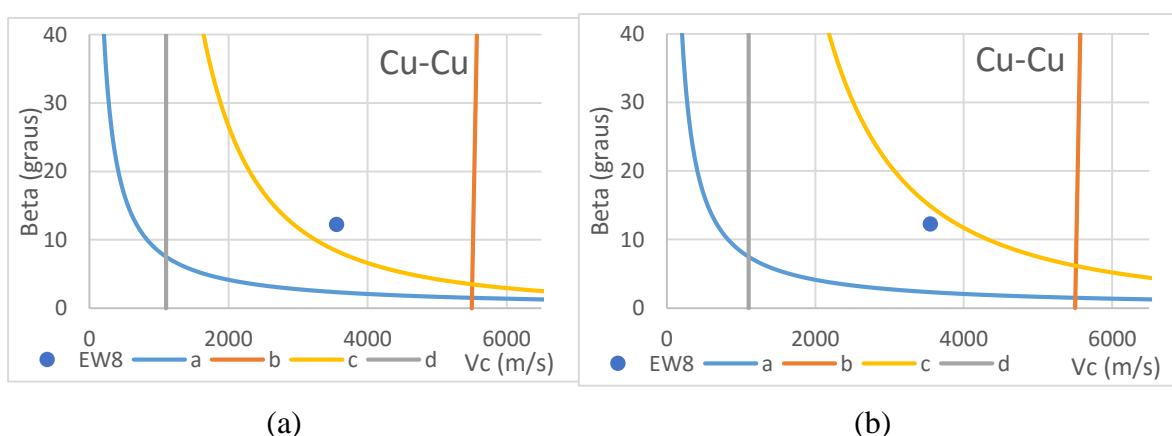


Figura 4.2. Janelas de Soldabilidade para Cu-Cu: (a)  $N=0,11$ ; (b)  $N=0,062$ .

É possível verificar a diferença que o valor de  $N$  provoca no resultado final. Apesar da soldadura EW8 se encontrar fora da janela de soldabilidade da Figura 4.2 (a), a



ligação foi conseguida. Na Figura 4.2 (b) a soldadura encontra-se dentro dos limites impostos. Em todas as outras janelas apresentadas no Apêndice H verificou-se esta diferença de resultados. Na secção 5.3 discute-se qual o valor de  $N$  mais apropriado para cada caso.

## 4.2. Análise Macroscópica

### 4.2.1. Soldadura Cu-Cu

A soldadura EW8 apresentou um bom resultado, com uma deformação algo excessiva do *flyer* devido à sua reduzida espessura mas com uma ligação coesa entre as placas de cobre, como se pode observar na Figura 4.3. Os círculos brancos assinalam a zona mais deformada.

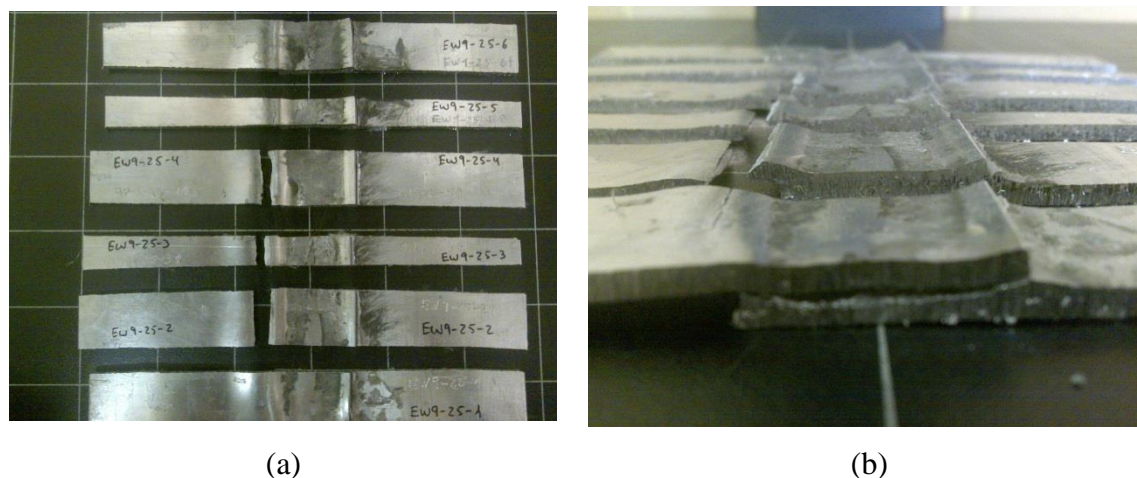


Figura 4.3. Soldadura EW8: (a) Vista geral; (b) Detalhe da zona soldada.

Este empenamento esteve presente em todas as placas voadoras, com soldaduras bem ou mal sucedidas. Atribui-se este facto à inércia da zona do *flyer* não soldada. Quando a banda do *flyer* a soldar é projetada pela explosão, o resto deste não é acelerado tão rapidamente, o que provoca um “atraso” da restante superfície do *flyer* em relação à banda a soldar e que se traduz numa deformação plástica final superior nesta zona, onde o gradiente de velocidade é mais elevado.

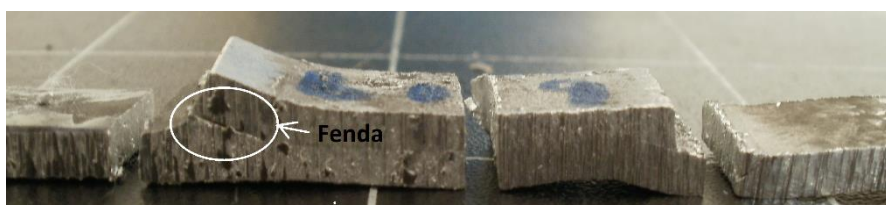
### 4.2.2. Soldadura Al-Al

A soldadura EW9 apresentou uma ligação com excesso de deformação plástica, causada provavelmente por excesso de energia, originando uma fenda visível na Figura 4.4, que aquando da maquinação das amostras resultou numa fratura dos provetes 2, 3 e 4.



**Figura 4.4.** Soldadura EW9: (a) Vista geral; (b) Detalhe da zona soldada.

Mais uma vez é possível distinguir a deformação do *flyer* na mesma zona, onde acabou por ocorrer a fratura aquando da maquinação. Este facto é mais uma prova de que esta zona sofre realmente uma grande deformação plástica, tornando-se numa zona sensível. Além desta fratura é possível verificar que a zona soldada apresenta também uma fenda constante ao longo de toda a soldadura (Figura 4.5), e portanto é uma ligação de fraca qualidade. Esta fenda encontra-se analisada com mais pormenor na secção 4.3.2.



**Figura 4.5.** Fenda na zona soldada, amostra EW9\_25\_5.

De notar que este ensaio utilizou o mesmo explosivo com as mesmas proporções e na mesma quantidade que o ensaio EW8, o que resultou numa velocidade de detonação semelhante. No entanto a distância entre placas STD foi superior, o que resultou num ligeiro aumento da velocidade de impacto, o que pode explicar a deformação final. Outro fator a considerar é a temperatura de fusão do alumínio, que é aproximadamente metade da temperatura de fusão do cobre. O rácio de explosivo foi também ligeiramente superior, o que também contribuiu para este resultado.

### 4.2.3. Soldaduras Al-Cu

Estes ensaios não foram bem-sucedidos. O ensaio UEW1 não apresentava uma distância entre placas STD suficiente (o mínimo seria 1,5 mm e foi usada uma distância de 1,35 mm). Esta distância deve ser suficiente para que o *flyer* seja acelerado e possua uma velocidade mínima aquando da colisão com a placa estacionária. Houve no entanto uma adesão parcial do alumínio ao cobre, o que sugere que a ligação ocorreu, mas depois houve separação das placas, possivelmente aquando da reflexão da onda de choque. O início da banda soldada é caracterizado por uma zona negra, assinalada por círculos brancos, veja-se a Figura 4.6. Esta zona está presente também nos outros ensaios.

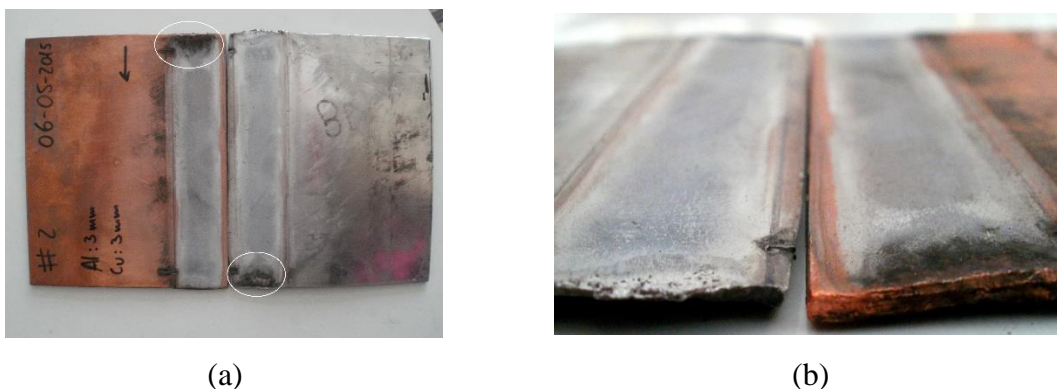


Figura 4.6. (a) Soldadura UEW1; (b) Detalhe da zona soldada.

O ensaio UEW2, apesar de apresentar uma distância entre placas suficiente e uma velocidade de detonação ligeiramente menor do que o ensaio UEW1, apresentou uma velocidade de impacto demasiado elevada (teve mais tempo para acelerar devido à maior distância percorrida antes da colisão), de acordo com a janela de soldabilidade Al-Cu (a), presente no Apêndice H, Figura H.3. O resultado macroscópico foi semelhante, no entanto existiu uma maior quantidade de alumínio que aderiu ao cobre e uma maior deformação geral das placas, devido ao maior ângulo  $\beta$ , como é visível na Figura 4.7. Mais uma vez verificou-se a banda negra no início da soldadura. Neste caso é admitida a hipótese de ter havido uma ligação entre o alumínio e o cobre, mas esta deve ter sido quebrada aquando da reflexão da onda de choque da explosão.

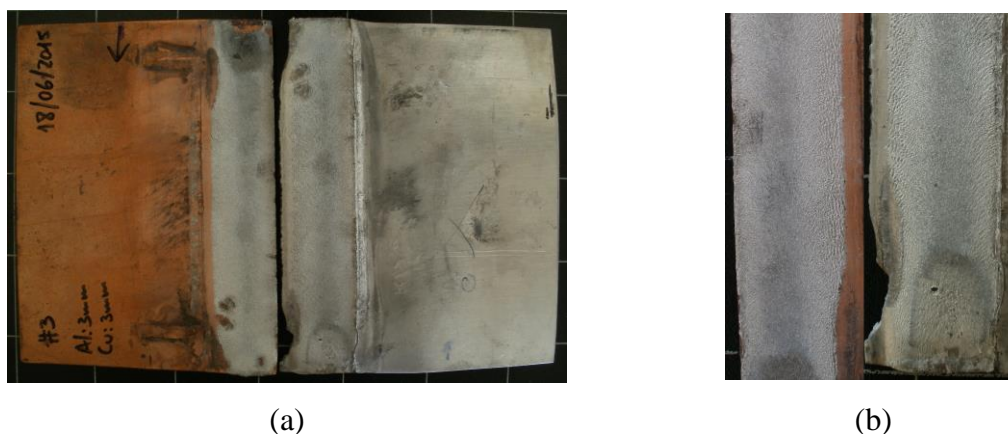


Figura 4.7. (a) Soldadura UEW2; (b) Detalhe da zona soldada.

No ensaio UEW3 diminuiu-se o rácio de explosivo para o valor mínimo e conseguiu-se diminuir ainda mais o ângulo de colisão da placa, mas mais uma vez a velocidade de detonação  $V_d$  foi (segundo a janela de soldabilidade Al-Cu (a) presente no Apêndice H, Figura H.3) demasiado elevada. Observa-se uma ainda maior quantidade de alumínio ligado ao cobre e uma maior deformação das placas (Figura 4.8), o que leva a crer que a ligação mais uma vez ocorreu mas foi novamente quebrada, possivelmente por um excesso de fusão na zona do alumínio imediatamente acima da interface, o que levou a que a ligação fosse quebrada aquando da reflexão da onda de choque.

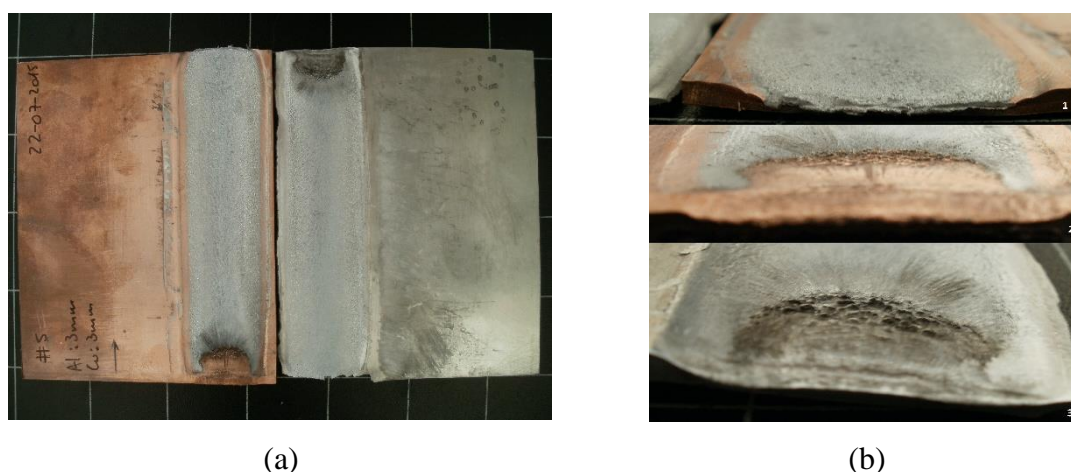


Figura 4.8. (a) Soldadura UEW3; (b) Detalhes da zona soldada.

No ensaio UEW4 alterou-se o tipo de explosivo e conseguiu-se diminuir a velocidade de detonação  $V_d$ . No entanto, mesmo utilizando o rácio de explosivo mínimo possível para este explosivo, este foi superior aos rácios anteriores, o que resultou num ângulo de colisão superior. Houve um excesso de deformação plástica que levou à fratura

do *flyer*, na zona já anteriormente considerada a mais frágil, e apesar de haver ainda uma maior adesão superficial do alumínio ao cobre (a mais elevada de todos os ensaios), mais uma vez a ligação das placas não aconteceu. Mais uma vez surgiu uma coloração negra no início da soldadura. De notar o padrão presente no alumínio neste ensaio, na Figura 4.9 (b). Este padrão também surgiu, ainda que em menor quantidade, no ensaio UEW3, o que sugere que isto acontece quando o explosivo está em contacto direto com o material do *flyer*. Este padrão parece demonstrar como o jato se forma na interface.

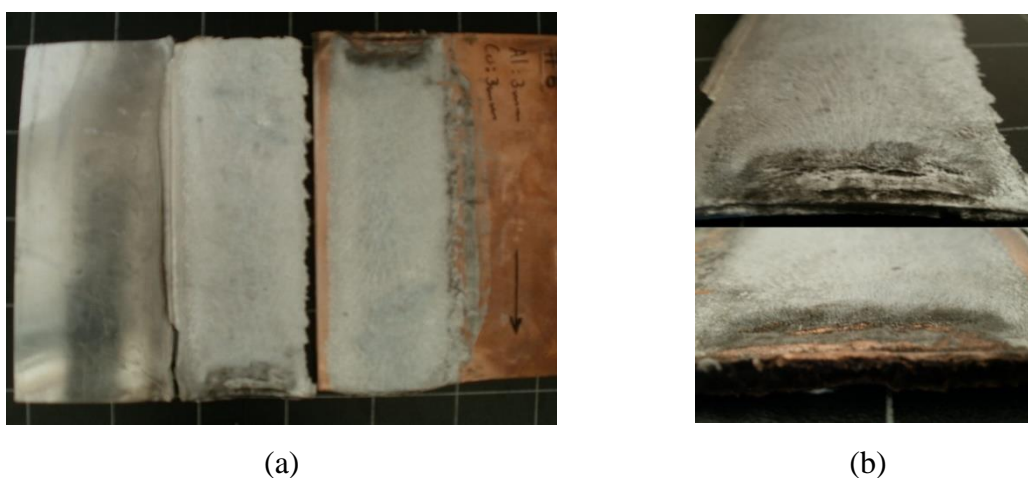


Figura 4.9. (a) Soldadura UEW4; (b) Detalhes da zona inicial da soldadura e do padrão observado.

### 4.3. Análise Microscópica

#### 4.3.1. Soldadura Cu-Cu

Foram analisadas as amostras EW8\_25\_3, onde o processo se considerou estabilizado e EW8\_25\_7, de maneira a observar o que acontece no final da soldadura. Nas duas amostras é bem visível a ondulação característica deste processo.

Na amostra EW8\_25\_7 L nota-se um crescimento acentuado da amplitude e do período das ondas, à medida que se aproxima o fim das placas. Este crescimento é bem visível na Figura 4.10. Temos no início da amostra uma amplitude de onda de 66  $\mu\text{m}$  e comprimento de 120  $\mu\text{m}$ . Estes valores aumentam gradualmente, apresentando o final da amostra uma amplitude de 150  $\mu\text{m}$  e um comprimento de 860  $\mu\text{m}$ . Este fenómeno deve-se à diminuição gradual da inércia do *flyer*, à medida que se aproxima o fim da soldadura. A diminuição da inércia provoca um aumento da velocidade de impacto  $V_p$ , que por sua vez é

responsável por ondas maiores. Esta diferença de ondas também pode ser explicada pelo fim da detonação, que coincide com o final das placas.



Figura 4.10. Aspeto geral da amostra EW8\_25\_7 L.

A análise às amostras EW8\_25\_3 T e EW8\_25\_7 T demonstram uma boa ligação. As bolsas dendríticas são também visíveis neste plano, e a diferença de tamanho de grão entre o *flyer* e a placa base assemelham-se mais, o que leva à conclusão de que neste caso as placas possuem um sentido de laminagem igual, e que a diferença de tamanho de grão nas amostras longitudinais deve-se apenas à deformação sofrida durante o processo de soldadura.

As ondas são regulares e bem definidas, apresentando bolsas dendríticas na base e na crista de algumas ondas (ver Figura 4.11). Estas dendrites são prova de que existiu fusão do material nestas zonas (zonas de maior deformação plástica). No geral a interface apresenta uma boa ligação, sem fendas e quantidade muito reduzida de poros, o que leva a crer que esta soldadura se encontra dentro da janela de soldabilidade, ou seja, neste caso o valor de  $N$  mais adequado será de 0,062 e a janela de soldabilidade mais adequada será portanto a janela (b), apresentada na Figura 4.2, secção 4.1.4.

Na amostra EW8\_25\_3 L as ondas apresentam uma amplitude e período constante, com uma amplitude média de 96,5  $\mu\text{m}$  e um comprimento médio de 207,5  $\mu\text{m}$ . Na Figura 4.11 apresenta-se o aspeto geral das ondas, semelhante nas duas amostras, bem como o detalhe de duas bolsas dendríticas, uma apresentando um poro no seu interior. A seta representa o sentido da velocidade de detonação, igual nas figuras 4.11 (a) e (b).

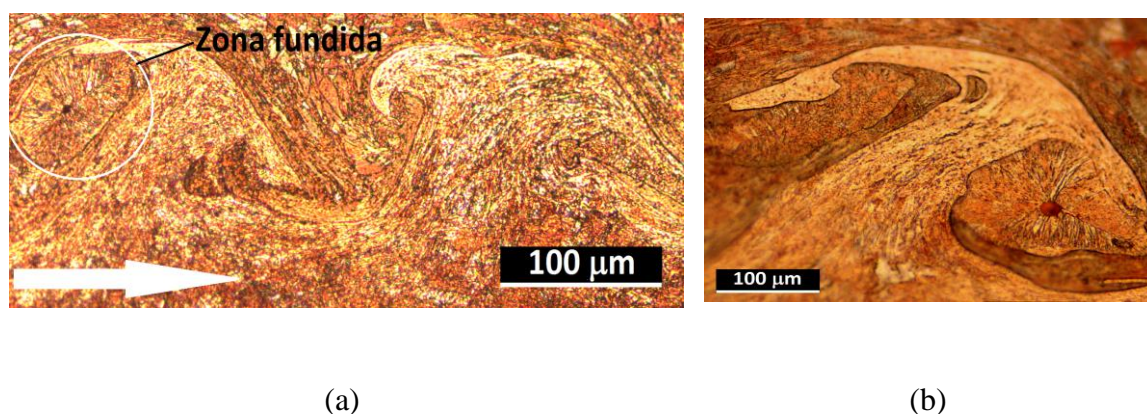


Figura 4.11. (a) Ondas presentes na amostra EW8\_25\_3 L; (b) Detalhe das bolsas dendríticas.

### 4.3.2. Soldadura Al-Al

Neste caso foram analisadas as amostras onde o processo se considerou estabilizado, EW9\_25\_3 e EW9\_25\_5. Mais uma vez são bem visíveis as ondas características, mas com uma maior amplitude e comprimento do que na soldadura EW8, visíveis na Figura 4.12.



Figura 4.12. Aspeto geral da amostra EW9\_25\_3 L.

Observam-se bolsas dendríticas na crista e na base das ondas (Figura 4.13), apresentando estas últimas diversos poros e até fendas na parte traseira da crista das ondas, o que comprova o excesso de fusão ocorrido. O primeiro ataque químico realizado a esta amostra apresentou uma coloração diferente na zona da interface, o que parece sugerir a formação de uma fase diferente do alumínio nesta zona, principalmente na parte traseira da crista da onda, pois foi onde se encontraram mais poros e fendas. Os ataques químicos foram feitos com o mesmo reagente, mas nem sempre foram obtidos os mesmos resultados; atribui-se a diferença de resultados obtida à diferença na temperatura ambiente ou ao envelhecimento do reagente. No caso apresentado na Figura 4.13 (b) o reagente esteve sujeito à temperatura e ao ar ambiente, e possivelmente já não se encontrava em boas condições. Tornou no entanto possível a identificação de fases diferentes na interface.

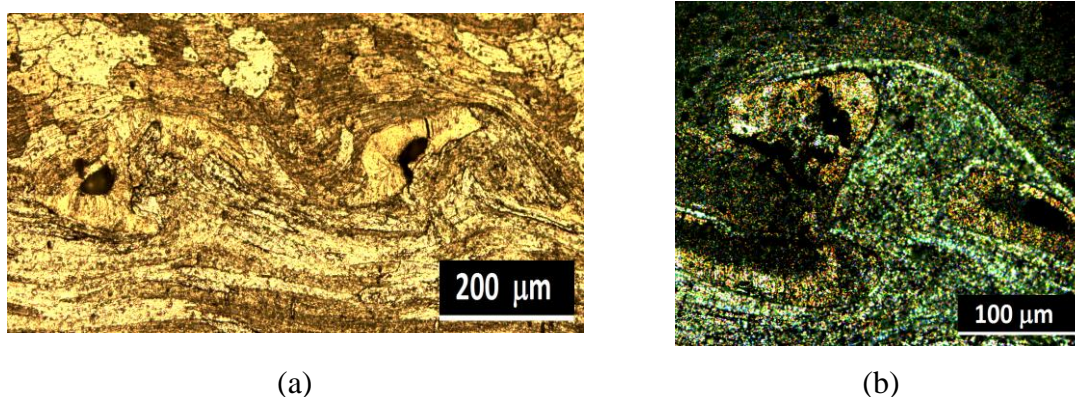


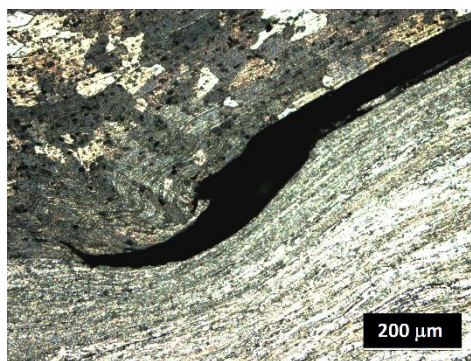
Figura 4.13. (a) Poros na amostra EW9\_25\_3; (b) Primeiro ataque químico.

A amplitude e o comprimento das ondas manteve-se constante nas duas amostras, sendo o comprimento médio de 445  $\mu\text{m}$  e a amplitude média de 167  $\mu\text{m}$ . De notar

também a diferença de grãos entre a placa estacionária (em baixo) e o *flyer* (em cima). A placa estacionária apresenta grãos alongados, enquanto o *flyer* apresenta grãos mais regulares. Isto pode dever-se à direção de laminagem das placas, algo que não foi considerado aquando da preparação destas. Na verdade, quando observadas transversalmente, o *flyer* apresenta grãos mais alongados e a placa estacionária apresenta menos alongados.

A soldadura apresenta também uma fenda macroscópica, o que leva a crer que a soldadura não deve estar localizada dentro dos limites da janela de soldabilidade, e portanto neste caso o valor de  $N$  mais adequado não será de 0,062.

A análise das amostras EW9\_25\_3 T e EW9\_25\_7 T permitiu a análise microscópica da fenda na interface da soldadura apresentada na Figura 4.5, cuja imagem ampliada está patente na Figura 4.14. A figura sugere que se trata na realidade de falta de adesão e não propriamente fenda, pois observa-se o alongamento dos grãos na interface.



**Figura 4.14.** Falta de adesão na interface da soldadura na amostra EW9\_25\_3 T.

### 4.3.3. Soldaduras Al-Cu

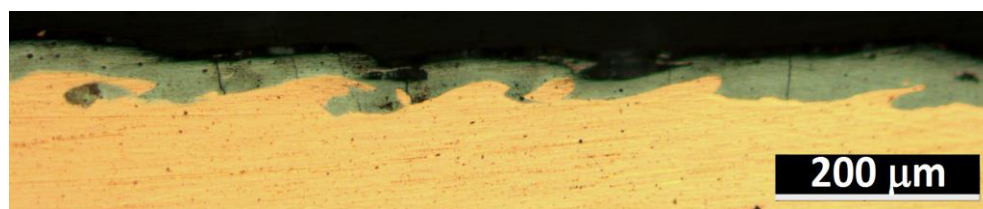
Como as soldaduras não foram bem-sucedidas, optou-se por tentar observar a zona onde houve a adesão do alumínio ao cobre, numa tentativa de tentar perceber o que correu mal.

Na análise microscópica foi possível verificar uma interface semelhante nestas zonas, mas com uma espessura de alumínio aderente crescente com o número do ensaio. Nos ensaios UEW1, UEW2 e UEW3 esta espessura crescente é explicada com a diminuição do rácio de explosivo; por sua vez no ensaio UEW4 utilizou-se um explosivo diferente, o que causou uma velocidade de detonação inferior para um rácio mais elevado. Os últimos dois ensaios foram então os que permitiram uma melhor análise da interface e os que se apresentam.

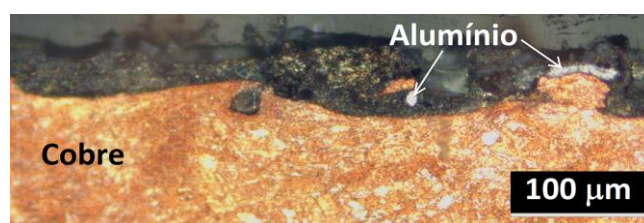


Do ensaio UEW3 foram analisadas as amostras UEW3\_15\_2 e UEW3\_15\_5 no sentido longitudinal e transversal, sem ataque químico e com os ataques químicos mencionados na secção 3.6.2., obtendo-se melhores resultados com o mesmo ataque químico utilizado para o cobre. Nas amostras longitudinais não atacadas foi possível identificar algumas zonas que apresentam uma formação rudimentar de ondas, como se apresenta na Figura 4.15 (a). Estas ondas, apesar de não serem constantes e não se encontrarem sempre, apresentam comprimento e amplitude constantes ao longo das duas amostras, tendo um comprimento médio de 181  $\mu\text{m}$  e uma amplitude média de 49,5  $\mu\text{m}$ . Verifica-se a existência muito acentuada de poros e fendas na superfície do alumínio (zona cinzenta).

Aplicando o ataque químico obteve-se o resultado apresentado na Figura 4.15 (b), onde é possível verificar que existe uma camada contínua de uma fase na interface (zona de vários tons de cinzento). Esta camada frágil pode ter sido a principal causa da não ocorrência da ligação, e mais uma vez confirma o excesso de fusão ocorrido nestes ensaios. Nas secções 4.4.3 e 4.5.3 apresentam-se respetivamente a análise SEM/EDS e da microdureza desta interface, com o objetivo de identificar estes compostos intermetálicos.



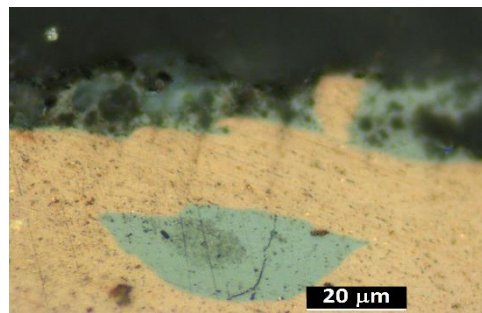
(a)



(b)

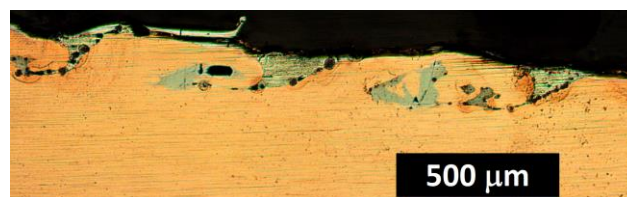
**Figura 4.15.** (a) Ondas rudimentares na amostra UEW3\_15\_2 L; (b) Ataque químico da mesma amostra.

As amostras transversais permitiram observar várias zonas onde o alumínio penetrou no cobre, formando bolsas isoladas. Uma destas bolsas é apresentada na Figura 4.16. Presume-se que estas bolsas sejam formadas por compostos intermetálicos frágeis, já que se observam fendas e poros.

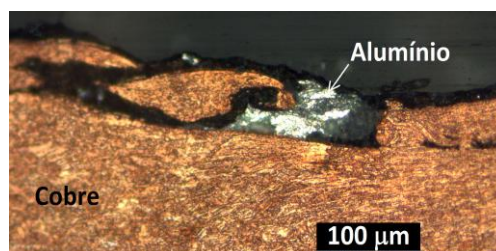


**Figura 4.16.** Bolsa na amostra UEW3\_15\_2 T.

Do ensaio UEW4 foram analisadas as amostras UEW4\_25\_2 e UEW4\_25\_5, no sentido longitudinal e transversal. Existe uma formação de ondas na maior parte da zona observada (ver Figura 4.17), no entanto a amplitude destas variou ao longo da amostra. Na amostra UEW4\_25\_2 L a amplitude média foi de 100  $\mu\text{m}$  e o comprimento médio foi de 560  $\mu\text{m}$ , enquanto que na amostra UEW4\_25\_5 L observou-se um comprimento médio de 900  $\mu\text{m}$  e amplitude média de 265  $\mu\text{m}$ . Refira-se que foram apenas observadas duas amostras, representando apenas uma parte da soldadura, pelo que estas medições têm valor limitado.



(a)



(b)

**Figura 4.17.** (a) Ondas rudimentares na amostra UEW4\_25\_5 L; (b) Ataque químico da mesma amostra.

Existe uma maior espessura de alumínio, e como se pode observar existe também uma maior zona que se presume ser de compostos intermetálicos ao longo da interface.

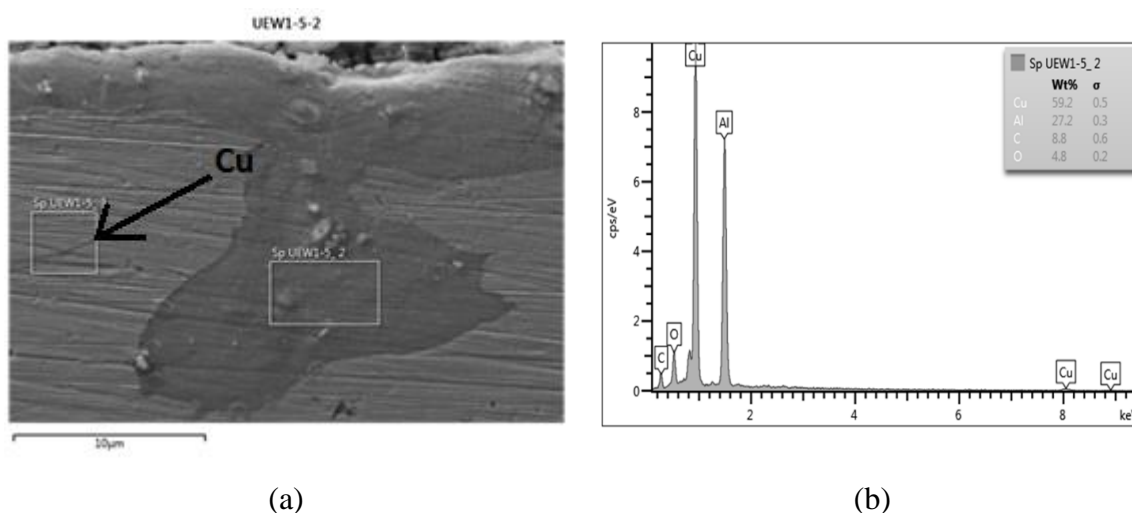
## 4.4. Análise de Compostos Intermetálicos

Nesta análise foram observadas amostras dos ensaios UEW1, UEW3 e EW4.

Os resultados obtidos nos espectros apresentam-se em percentagem mássica, sendo depois convertidos automaticamente pelo programa em percentagem atômica. Para esta conversão ignora-se os elementos residuais presentes na amostra. Os resultados foram depois comparados com os apresentados na secção 2.4.2.

### 4.4.1. Ensaio UEW1

Este ensaio foi o que apresentou uma projeção de alumínio no cobre mais baixa, devido à insuficiente distância entre placas que resultou numa velocidade do ponto de colisão demasiado baixa. Foram analisadas três áreas da amostra UEW1-25-5 L que se consideraram representativas, sendo uma delas na camada inferior, outra na camada superior e a última numa zona onde a camada superior penetrou no cobre. Os resultados obtidos nas últimas duas zonas foram semelhantes, apresentando-se apenas um deles na Figura 4.18.



**Figura 4.18.** Análise EDS da amostra UEW1-25-5 L (a) Localização da zona analisada; (b) Espectro químico da zona do poro.

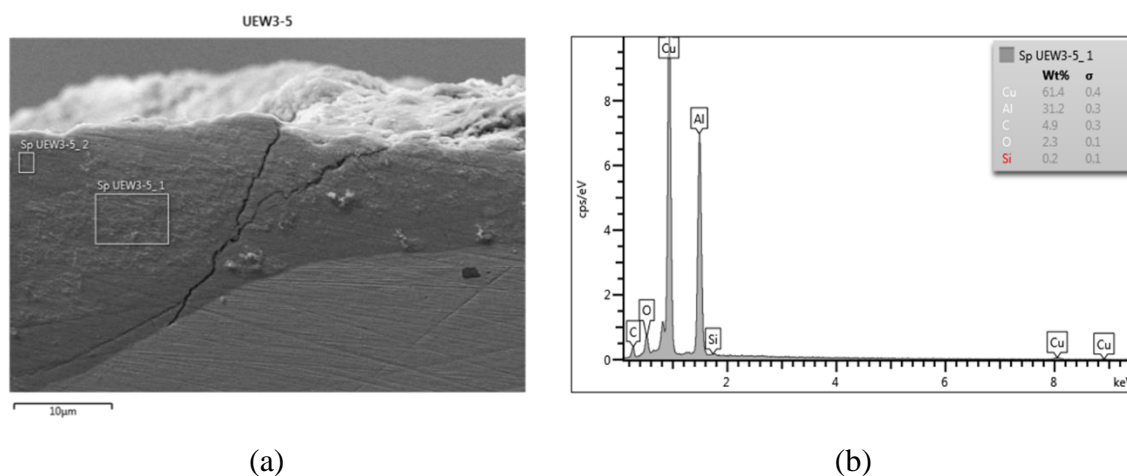
O espectro apresentou além do alumínio e do cobre quantidades residuais de elementos como o oxigénio e carbono. Estes apresentam-se naturalmente no ar ambiente, e como as placas não se uniram houve contaminação da interface, o que justifica a presença destes elementos.

Analisou-se também a zona localizada à esquerda deste poro, onde se obteve uma percentagem de 5,9% de alumínio e 94,1% de cobre, ou seja, houve uma penetração

ligeira do alumínio na placa estacionária. A zona do poro apresentou 53,8% de alumínio e 46,2% de cobre, estando portanto próxima da fase do composto intermetálico CuAl. Existiu também uma zona que apresentou 56,89% de alumínio e 43,11% de cobre, o que sugere uma mistura entre CuAl e Cu<sub>4</sub>Al<sub>3</sub>. Não foi observada nenhuma fase de alumínio, o que parece confirmar que a separação das placas ocorreu por causa da formação generalizada deste intermetálico.

#### 4.4.2. Ensaio UEW3

Este ensaio foi o último efetuado utilizando a emulsão explosiva Eex+MEOV, utilizando o rácio mínimo para esta emulsão. Dentro dos ensaios utilizando este explosivo foi o que apresentou a projeção de alumínio no cobre mais elevada, devido ao rácio de explosivo *R* mais baixo. Foram analisadas três áreas da amostra UEW3-15-5 L, todas elas localizadas na camada superior. Obtiveram-se numa zona os mesmos resultados do que o ensaio anterior, mas também os apresentados na Figura 4.19.



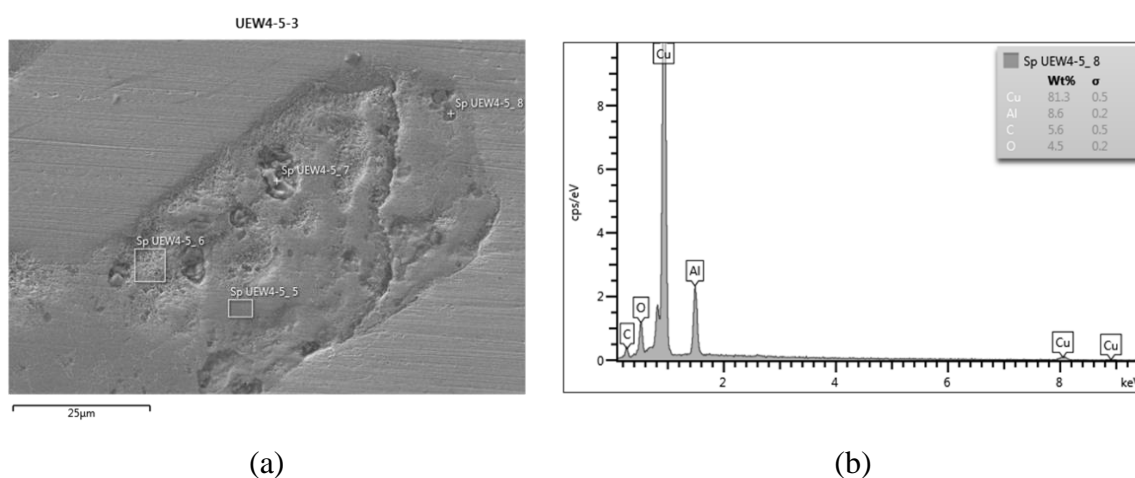
**Figura 4.19.** Análise EDS da amostra UEW3-15-5 L (a) Localização da zona analisada; (b) Espectro químico.

O espectro apresentou mais uma vez quantidades residuais de oxigénio e carbono, e também silício. A presença de silício pode ser justificada pela sua existência no alumínio 6082.

O espectro químico da Figura 4.19 apresentou 55,03% de alumínio e 44,97% de cobre, o que parece sugerir uma mistura entre os compostos intermetálicos CuAl e Cu<sub>4</sub>Al<sub>3</sub>.

### 4.4.3. Ensaio UEW4

Este ensaio foi o único efetuado utilizando a emulsão explosiva Eex+EPS, utilizando o rácio mínimo possível para esta emulsão. Este foi de todos os ensaios o que apresentou a projeção de alumínio no cobre mais elevada. Foram analisadas nove áreas da amostra UEW4-25-5 L, devido ao aspeto heterogéneo da amostra. Observaram-se vários compostos intermetálicos, incluindo alguns que não se encontraram nas amostras anteriores. Na Figura 4.20 apresentam-se várias zonas observadas, bem como um dos espectros obtidos.



**Figura 4.20.** Análise EDS da amostra UEW4-25-5 L (a) Localização das zonas analisadas; (b) Espectro químico.

Este espectro apresentou mais uma vez quantidades residuais de oxigénio e carbono, juntamente com 78,89% de cobre e 21,11% de alumínio. Este resultado encontra-se próximo da fase do composto intermetálico  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ . Observou-se também resultados de 35,77% de cobre e 64,23% de alumínio, o que se aproxima da fase  $\text{CuAl}_2$ , e de 50,18% de cobre e 49,82% de alumínio, o que sugere mais uma vez a presença de  $\text{CuAl}$ .

## 4.5. Dureza

Foram realizados diversos ensaios de maneira a verificar não só a dureza na interface mas como também a dureza do material base. Como já foi mencionado, a direção de laminagem das chapas não foi tida em consideração nos ensaios, e portanto cada chapa foi analisada longitudinal e transversalmente, de forma a analisar se existem diferenças de dureza significativas.

#### 4.5.1. Soldadura Cu-Cu

Neste caso foi analisada a amostra EW8-25-7 L e T. O material base apresentou no sentido longitudinal e transversal uma dureza média semelhante de 101 Hv, ou seja, apesar da diferença de forma do grão não existe uma diferença significativa em termos de dureza nas chapas usadas. Na Figura 4.21 apresentam-se os perfis de dureza da soldadura EW8.

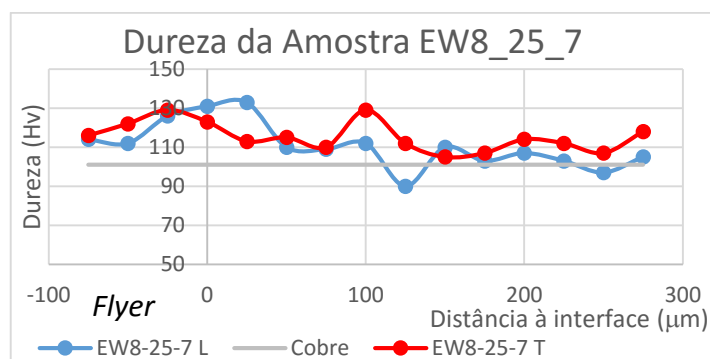


Figura 4.21. Perfil de dureza da soldadura EW8\_25\_7 L e T.

O *flyer* apresentou uma dureza superior, o que era esperado devido à deformação plástica sofrida. A zona da interface também apresenta uma dureza elevada, tendo a placa estacionária um valor mais baixo. Existe um aumento de dureza geral nas zonas afetadas pela soldadura em relação ao material de base não afetado. No geral não se apresenta um aumento excessivo de dureza na zona da interface, o que se pode justificar pela não existência de compostos intermetálicos (visto que o *flyer* e a placa estacionária são formados pelo mesmo material). Não existe uma diferença significativa entre a dureza medida longitudinal e transversalmente, exceto na interface, onde a dureza longitudinal apresenta um valor superior. Isto pode ser justificado pelas bolsas dendríticas que se observam em maior quantidade na amostra longitudinal, e que apresentam uma dureza média de 128,5 Hv. No entanto, as durezas mais elevadas observam-se nas cristas das ondas, que apresentam uma dureza média de 144 Hv, sendo a dureza máxima da amostra observada nesta zona, com um valor de 167 Hv.

#### 4.5.2. Soldadura Al-Al

Foram analisadas as amostras EW9\_25\_3 L e T, e EW9\_25\_5 L e T. Mais uma vez a dureza média do material de base foi semelhante nos dois sentidos, sendo o seu valor

médio de 42 Hv. Isto parece sugerir que a placa não está no estado T6. Este alumínio no estado recozido tem em média 40 Hv.

O *flyer* apresenta uma dureza muito superior na amostra transversal, o que comprova o excesso de deformação plástica ocorrido. Mais uma vez o *flyer* apresenta valores de dureza superiores aos obtidos na interface, pois também não existem compostos intermetálicos neste caso. Os resultados obtidos são semelhantes nos dois casos, observando-se o perfil de dureza da amostra EW9\_25\_5 representado na Figura 4.22.

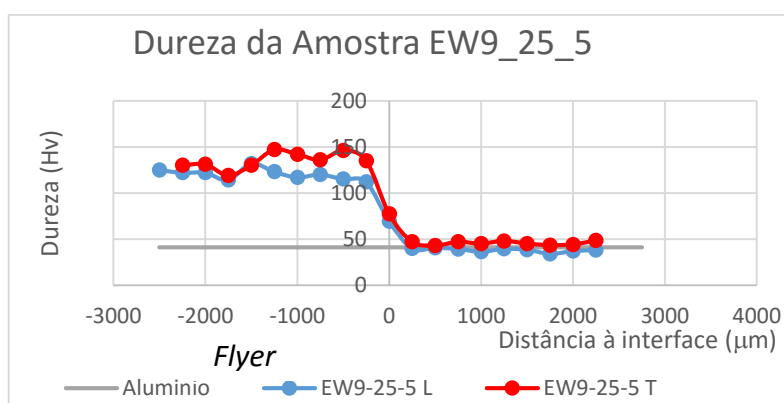


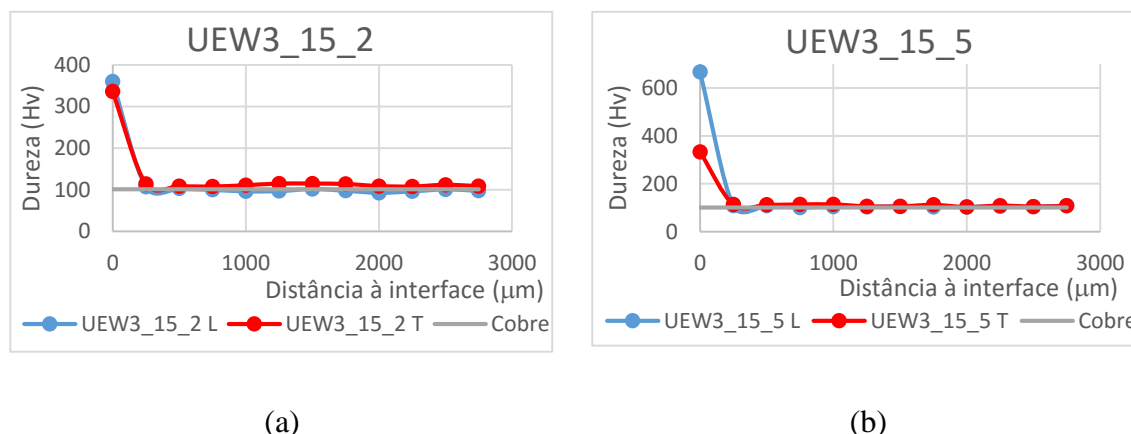
Figura 4.22. Perfil de dureza da amostra EW9\_25\_5 L e T.

### 4.5.3. Soldaduras Al-Cu

Apesar de não ter havido ligação, existiu formação de compostos intermetálicos na interface, como se comprova pelas durezas analisadas na interface. Mais uma vez analisaram-se as amostras nos sentidos transversal e longitudinal, mas mais uma vez não se obtiveram diferenças entre estas. Os valores elevados obtidos na interface comprovam mais uma vez a existência de compostos intermetálicos em todas as amostras. O cobre não afetado pela soldadura apresenta valores semelhantes ao já observado (101 Hv), e todas as placas estacionárias apresentam valores semelhantes a este, seja no sentido transversal ou longitudinal.

#### 4.5.3.1. Ensaio UEW3

A placa de cobre UEW3 apresentou um perfil de soldadura normal, como se pode ver na Figura 4.23. O cobre de base apresenta um perfil de dureza constante e praticamente inalterado. Na interface foi possível identificar vários compostos intermetálicos pelas suas microdurezas características.

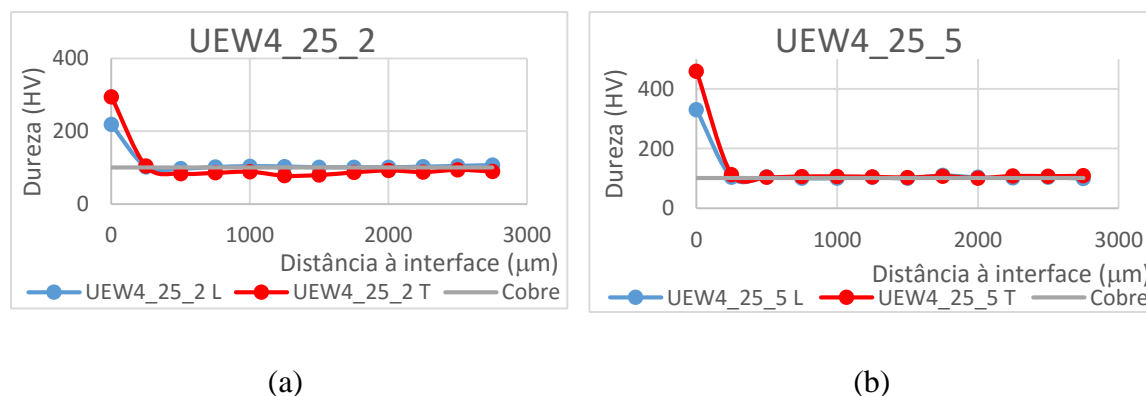


**Figura 4.23.** Perfis de dureza das amostras UEW3\_15\_2 e 5, L e T.

Na interface observaram-se valores entre 146 e 179 Hv, correspondentes ao intermetálico  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ . Observaram-se também valores entre 251 e 396 Hv e entre 485 e 569Hv, correspondentes a  $\text{CuAl}_2$ . Foi registado também um valor de 609 Hv, o que segundo (Barreto, 2014) corresponde ao intermetálico  $\text{Cu}_4\text{Al}_3$ . O valor médio de dureza na interface é de 357 Hv, o que significa que o composto intermetálico mais abundante é o  $\text{CuAl}_2$ . Este facto é comprovado com os resultados obtidos na secção 4.4.2.

#### 4.5.3.2. Ensaio UEW4

O ensaio UEW4 apresentou as maiores durezas, o que é coerente. Os valores no cobre mais uma vez permanecem praticamente inalterados, à exceção do cobre na análise da amostra UEW4-25-2 T, que apresentou uma diminuição de dureza, o que sugere que houve um aquecimento suficiente para haver crescimento do grão. Estes resultados apresentam-se na Figura 4.24.



**Figura 4.24.** Perfil de dureza da amostra UEW4\_25\_2 e 5, L e T.



Na interface observaram-se valores entre 141 e 179 Hv, correspondentes ao intermetálico  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ . Observaram-se também valores entre 245 e 387 Hv e entre 491 e 570 Hv, correspondentes a  $\text{CuAl}_2$ . Foram registados também valores de 610 Hv, o que segundo (Barreto, 2014) corresponde ao intermetálico  $\text{Cu}_4\text{Al}_3$ .

O valor médio de dureza na interface é de 375 Hv, o que significa que mais uma vez o composto intermetálico mais abundante é o  $\text{CuAl}_2$ , facto também comprovado pelos resultados obtidos na secção 4.4.3.

## 4.6. Resistência ao Corte

Foram feitos quatro ensaios de tração, três da soldadura Cu-Cu e um da soldadura Al-Al. Os provetes tracionados apresentam-se na Figura 4.25.



Figura 4.25. Provetes tracionados.

### 4.6.1. Soldadura Cu-Cu

Foram maquinados 3 provetes e realizados 3 testes de tração. A rotura verificou-se sempre no *flyer*, na zona já considerada frágil, o que comprova a fragilidade desta zona. As soldaduras apresentaram portanto boa qualidade, sem defeitos que causassem a fratura, o que mais uma vez comprova o facto da soldadura se localizar dentro dos parâmetros da janela de soldabilidade. As curvas de força VS deformação estão apresentadas na Figura 4.26.

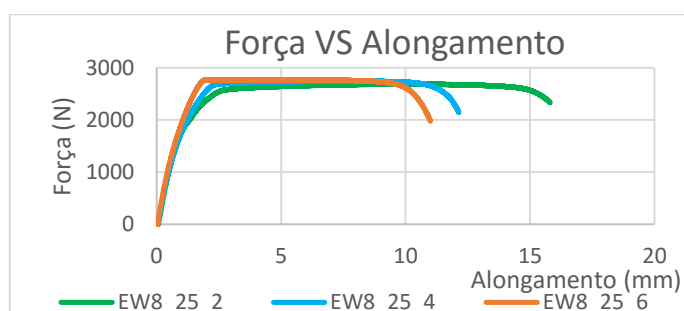
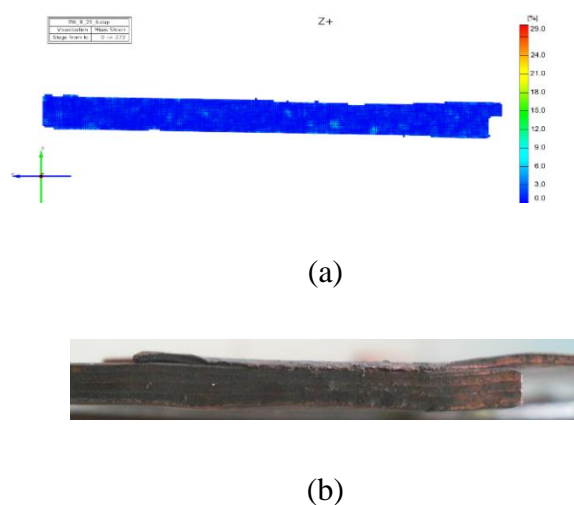


Figura 4.26. Representação gráfica da força em função do alongamento dos provetes EW8.

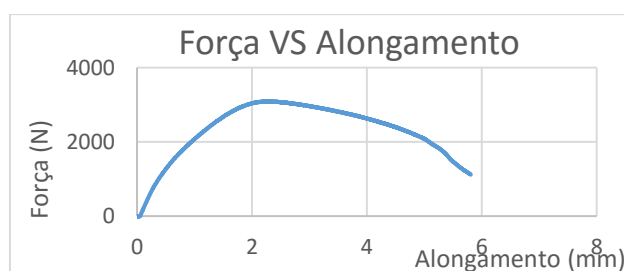
O provete EW8\_25\_2 apresentou um comportamento mais dúctil, tendo o provete EW8\_25\_6 apresentado o comportamento menos dúctil. Estes resultados são coincidentes com a análise metalográfica, visto que se verificou uma maior quantidade de zonas fundidas nas partes finais da amostra. Visto que todos os provetes romperam longe da soldadura, não foi possível analisar a deformação ocorrida na zona de rotura no *ARAMIS*. Em termos de deformação, nos três casos a zona soldada não apresentou praticamente deformação durante todo o ensaio de tração, como é possível verificar na Figura 4.27.



**Figura 4.27.** Análise pontual da deformação ocorrida na zona soldada do provete EW8\_25\_2.

#### 4.6.2. Soldadura Al-Al

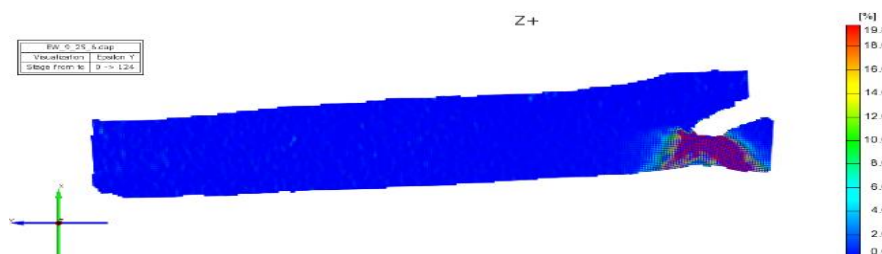
Aquando da maquinação, ocorreu a fratura das amostras EW9\_25\_2, EW9\_25\_3 e EW9\_25\_4, sobrando apenas as amostras para provetes à tração EW9\_25\_1 e EW9\_25\_6. No entanto, o provete EW9\_25\_1 apresentava uma fenda de grandes dimensões, e portanto também não foi tracionado. Restou portanto o provete EW9\_25\_6. Este apresentou um comportamento dúctil e rompeu pela soldadura, pela falta de adesão identificada na Figura 4.5. Na Figura 4.28 representa-se o gráfico da força em função da deformação para este provete.



**Figura 4.28.** Representação gráfica da força em função do alongamento do provete EW8-25-6.

Este provete apresentou um comportamento bastante diferente dos provetes EW8. Antes da cedência observa-se um comportamento bastante dúctil. A cedência aconteceu para uma força superior, devido à maior espessura do provete (3 mm, tendo a zona soldada uma espessura de 5 mm). No entanto, contrariamente aos provetes EW8, houve uma imediata redução da força aplicada, isto porque ocorreu uma estrição na área onde eventualmente ocorreu a rotura. No entanto, o alongamento foi bastante inferior.

A rotura aconteceu na zona soldada, e portanto foi possível analisar a deformação ocorrida com recurso ao *ARAMIS*. A análise pontual deste provete apresenta-se na Figura 4.29 (a); por sua vez a zona onde ocorreu a estrição e posterior rotura apresenta-se na Figura 4.29 (b).



(a)



(b)

**Figura 4.29.** Análise pontual da deformação ocorrida na zona soldada do provete EW9\_25\_6.

É visível a vermelho a zona onde ocorreu a estrição do provete (logo de maior deformação), imediatamente abaixo da zona onde ocorreu a falta de adesão.



## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste trabalho foram analisadas soldaduras efetuadas com o mesmo material (similares) e com material dissimilar. Contrariamente aos anos anteriores, projetou-se o alumínio contra o cobre. Esta combinação apresenta uma janela de soldabilidade muito mais fechada do que a combinação cobre-alumínio que tem sido analisada. Como consequência disso não foi possível obter uma ligação utilizando as mesmas emulsões explosivas, mesmo utilizado o rácio mínimo. Conclui-se portanto que estes explosivos não são os mais adequados para a realização destas ligações. Na Tabela 5.1 apresentam-se todos os parâmetros relevantes de todos os ensaios.

**Tabela 5.1.** Parâmetros específicos de cada ensaio.

	EW8	UEW1	UEW2	EW9	UEW3	UEW4
<b>Tipo de Explosivo</b>	Eex+15% MEOV					Eex+1,2% EPS
<b>Material de suporte</b>	Aço/Areia					
<b>Material do Flyer</b>	Cu-DHP	Al-6082	Al-6082	Al-6082	Al-6082	Al-6082
<b>Material da Base</b>	Cu-DHP	Cu-DHP	Cu-DHP	Al-6082	Cu-DHP	Cu-DHP
<b>R</b>	2,16	2,38	2,38	2,38	1,43	3,56
<b>STD [mm]</b>	1,35		4			
<b><math>V_p</math> [m/s]</b>	758	662	824		717	837
<b><math>V_c = V_d</math> [m/s]</b>	3551,1	3588,8	3476,9		3664,5	2986,9
<b><math>\beta</math> [graus]</b>	12,26	10,59	13,62		11,23	16,12

## 5.1. Montagens Experimentais

Foram utilizados dois tipos de materiais para conter as emulsões explosivas: acrílico e cartão.

O cartão tem sido utilizado em trabalhos anteriores. Tem como principais vantagens o baixo custo e a facilidade de montagem, no entanto apresenta como principal desvantagem a dificuldade de obter medidas precisas nas montagens, devido à excessiva maleabilidade do cartão. Isto tem como consequência uma incerteza no volume de explosivo utilizado, o que se torna problemático tendo em conta que qualquer flutuação pode fazer com que o ensaio saia dos limites definidos pela janela de soldabilidade.

Para contornar este problema decidiu-se recorrer a um material menos maleável. O acrílico revelou ser uma opção mais eficaz e precisa em termos de medidas, tendo também como vantagem a possibilidade de ter o contacto direto da emulsão explosiva com o *flyer*. Outra vantagem é possibilitar o posicionamento correto do detonador, o que permite uma detonação mais uniforme. No entanto, este material exige maquinação prévia, o que origina um custo final mais elevado. O material base também possui um custo mais elevado, portanto esta opção pode não ser também a mais adequada, pois cada caixa é destruída a cada ensaio.

Conclui-se portanto que deve haver outro material com um custo base e de maquinação mais baixo que forneça o mesmo resultado que o acrílico.

## 5.2. Relações entre Variáveis

Foram analisadas várias variáveis do processo, de forma a tentar estabelecer relações entre elas.

Todos os ensaios foram incluídos nesta análise, mesmo os que não apresentaram resultados. Os ensaios UEW2 e EW9 apresentaram o mesmo rácio de explosivo  $R$  e consequente velocidade de detonação  $V_d$  semelhante, distância entre placas igual, ângulo de colisão  $\beta$  igual e portanto também apresentam uma velocidade de impacto  $V_p$  igual. Isto origina que em muitos dos gráficos que a seguir se apresentam os pontos correspondentes a estes dois ensaios se encontrem sobrepostos.

### 5.2.1. $V_p$ e $\beta$

O valor do ângulo de colisão  $\beta$  depende diretamente da velocidade de impacto  $V_p$  e da velocidade de detonação  $V_d$ . Observando a Figura 5.1 é possível distinguir uma clara ligação entre estes dois fatores.

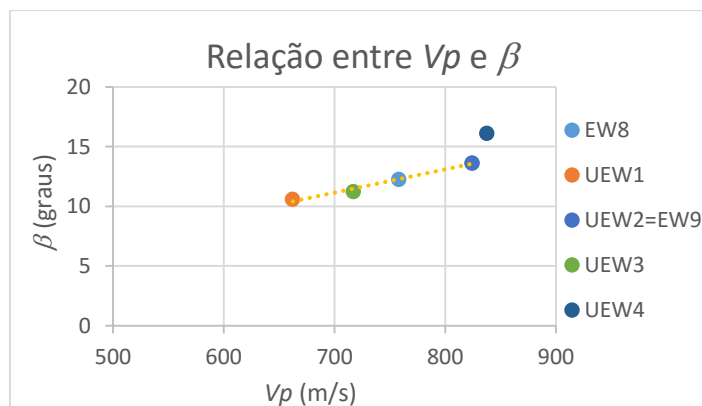


Figura 5.1. Relação entre  $V_p$  e  $\beta$ .

Utilizando o mesmo tipo de explosivo Eex+MEOV (ensaios EW8, UEW1, UEW2, EW9 e UEW3) é possível observar uma relação linear bastante forte entre o ângulo de colisão  $\beta$  e a velocidade de impacto  $V_p$ . O ensaio UEW4 utilizou uma emulsão explosiva diferente (Eex+EPS), e portanto apresenta um ponto mais anormal. No entanto também existiram variações na velocidade de detonação  $V_d$ , o que também é responsável por esta variação.

### 5.2.2. $R$ e $V_p$

A velocidade de impacto  $V_p$  apresenta uma ligação com o rácio de explosivo  $R$  utilizado, como se pode observar na Figura 5.2.

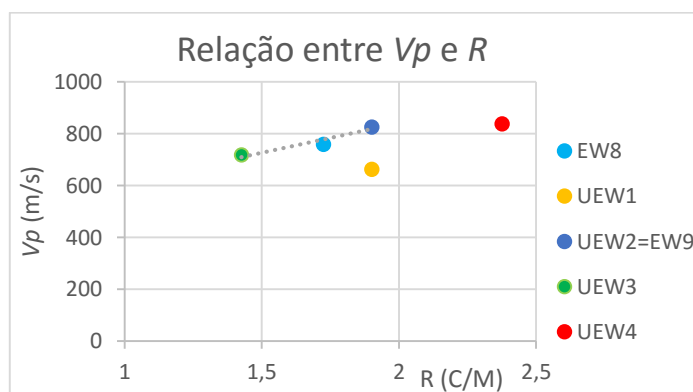


Figura 5.2. Relação entre  $V_p$  e  $R$ .

O ensaio UEW1 apresenta um resultado mais anormal, mas atribui-se este resultado ao facto de a distância entre placas STD não ter sido a correta (daí a velocidade de impacto  $V_p$  demasiado baixa para o mesmo rácio de explosivo  $R$ ). A soldadura UEW4 foi efetuada com emulsão explosiva diferente que apresenta uma velocidade de detonação mais baixa para um rácio mais elevado, e portanto a velocidade de impacto é mais baixa do que o que seria para o mesmo rácio da emulsão explosiva Eex+MEOV. O ensaio EW8 apresentou uma distância entre placas também mais reduzida, mas esta é compensada com a espessura reduzida do *flyer* e portanto o ponto apresenta-se mais coerente, no entanto esta diferença é suficiente para baixar a correlação entre estas variáveis.

### 5.2.3. $R$ e $\beta$

O ângulo de colisão  $\beta$  é calculado com recurso aos valores da velocidade de detonação  $V_d$  e velocidade de impacto  $V_p$ . Por sua vez, já foi demonstrado que estes dois valores dependem do rácio de explosivo  $R$ . Torna-se coerente portanto que haja uma relação entre estes dois valores,  $\beta$  e  $R$ . Esta é ilustrada na Figura 5.3.

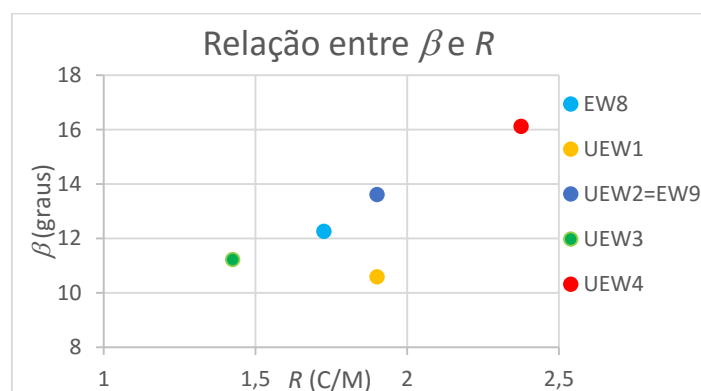


Figura 5.3. Relação entre  $\beta$  e  $R$ .

Existe uma relação óbvia entre estes valores, sendo que o ângulo de colisão  $\beta$  aumenta com o aumento do rácio  $R$ . No entanto, o ponto UEW1 não apresenta resultados coerentes com os outros ensaios, o que leva à conclusão que a relação entre a STD e a espessura da placa voadora  $h_f$  tem influência nesta relação.



### 5.3. Janelas de Soldabilidade

Após a construção das janelas de soldabilidade utilizando diferentes valores para  $N$  é evidente a importância do valor utilizado nesta constante para o resultado final. No caso da soldadura EW8, o resultado final é de uma ligação de boa qualidade, sem concentração de tensões na zona soldada, zonas fundidas e poros pouco frequentes. Este resultado é coerente com uma soldadura localizada dentro dos limites impostos pela janela de soldabilidade respectiva, e portanto neste caso conclui-se que o valor  $N = 0,062$  será o mais adequado.

No caso da soldadura EW9, obteve-se uma ligação defeituosa, com fendas, poros e excesso de fusão. No teste de tração obteve-se a confirmação deste resultado, com o provete a fraturar na zona soldada. Apesar de ter ocorrido ligação, esta não apresenta uma boa qualidade, e portanto este ensaio não se deve enquadrar dentro dos limites da janela de soldabilidade. Portanto, no caso do *flyer* ser de alumínio o valor de  $N$  mais adequado será de 0,11, o que justifica também os resultados obtidos nas ligações dissimilares, já que utilizando este valor todas as soldaduras UEW se encontram fora da janela de soldabilidade. Este valor origina uma janela de soldabilidade mais fechada, e no caso do alumínio isto pode justificar-se pela sua baixa temperatura de fusão.

A não ligação dos ensaios alumínio-cobre é justificada pelo excesso de fusão ocorrido na interface, que dá origem a compostos intermetálicos extremamente frágeis e que são responsáveis pela separação das placas aquando da reflexão da onda. Por outras palavras, a ligação ocorre, formam-se ondas, mas o excesso de energia provoca um aumento de temperatura na interface, que devido ao baixo ponto de fusão do alumínio causa uma fusão parcial deste, existindo formação de diversos compostos intermetálicos. Quando a onda de choque causada pela explosão retorna, o alumínio fundido separa-se dos compostos intermetálicos e ocorre a separação das placas. Nos anos anteriores a ligação foi bem conseguida, porque sempre se projetou o cobre, sendo a temperatura de fusão do *flyer* o que mais influencia.

## 5.4. Relações entre Energia e Microestrutura

Através da análise da microdureza e da análise SEM/EDS foi possível identificar os compostos intermetálicos que se formaram na interface entre o alumínio e o cobre. Em nenhuma das amostras se verificou a existência de alumínio puro, o que parece confirmar que a formação generalizada de compostos intermetálicos causou a rotura da ligação.

Esta formação verificou-se em todos os ensaios, no entanto a quantidade dos compostos intermetálicos identificados variou em cada ensaio.

Para a emulsão explosiva Eex+MEOV, a morfologia geral da interface foi semelhante, variando a espessura da camada intermetálica. A variação da espessura da camada de intermetálicos obtida pareceu variar com o rácio de explosivo  $R$  e com a distância entre placas STD. O tipo de composto intermetálico mais abundante também dependeu destes dois parâmetros.

O ensaio UEW1, apesar de apresentar um rácio mais elevado de explosivo, apresentou uma distância STD mais baixa, o que resultou numa velocidade de impacto  $V_p$  e consequente ângulo de colisão  $\beta$  mais baixos, e portanto menos energia fornecida. Existiu uma formação generalizada do composto intermetálico CuAl, observando-se também o composto  $Cu_4Al_3$  em menos abundância.

O ensaio UEW3, apesar do seu rácio de explosivo menor, possuiu uma maior STD e portanto maior energia fornecida. Existiu uma maior formação de  $CuAl_2$ .

Finalmente, o ensaio UEW4 foi efetuado com a emulsão explosiva Eex+EPS. Esta emulsão é caracterizada por uma detonação mais heterogénea, que resultou numa interface também mais heterogénea. A maior energia fornecida resultou numa maior espessura de compostos intermetálicos, mas mais uma vez o  $CuAl_2$  é dominante.

Em termos de valores médios de microdureza, o ensaio UEW4 apresentou valores mais elevados, ou seja, quanto maior a energia fornecida maior a microdureza da interface.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. Conclusões

A realização deste trabalho permitiu retirar várias conclusões, sendo elas:

- Para o mesmo tipo de explosivo, o ângulo de colisão  $\beta$  aumenta com a velocidade de impacto  $V_p$ ;
- Para o mesmo tipo de explosivo e para a mesma distância STD, a velocidade de impacto  $V_p$  aumenta com o aumento do rácio  $R$ ;
- O ângulo de colisão  $\beta$  aumenta com o aumento do rácio  $R$ , desde que exista uma proporção coerente entre a espessura da placa voadora  $h_f$  e a distância STD;
- O valor de  $N$  tem uma elevada influência no enquadramento de ensaios na janela de soldadura, e o seu valor parece depender do tipo de material do *flyer*. Os valores que mais se adequam a cada material ainda se encontram por apurar;
- Nas soldaduras EXW a zona de soldadura correspondente ao *flyer* apresenta maiores valores de dureza, devido à existência de elevada deformação plástica. Nas soldaduras dissimilares, além disto verifica-se também formação de compostos intermetálicos na interface de soldadura, o que resulta num aumento de dureza nesta zona;
- Quanto maior o rácio de explosivo  $R$  e distância entre placas STD, maior será a formação de compostos intermetálicos na interface de soldadura;
- A configuração de soldadura utilizada faz com que a zona imediatamente após a soldadura no *flyer* seja uma zona frágil devido aos gradientes de velocidade que esta é sujeita aquando da detonação do explosivo. Reduzindo a dimensão do *flyer* este efeito pode ser reduzido;

- As emulsões explosivas utilizadas revelaram um comportamento não adequado aos ensaios onde o alumínio é projetado. Novos tipos de explosivo devem portanto ser explorados no futuro;
- Quando se pretende efetuar uma soldadura assimilar deve-se quando possível escolher a configuração de materiais que permitir uma janela de soldabilidade maior.

## **6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como propostas para continuação do trabalho desenvolvido sugere-se:

- A exploração de novos tipos de explosivo com velocidades de detonação inferiores;
- A exploração de novas configurações de soldadura;
- A verificação de valores da constante  $N$  para vários materiais.

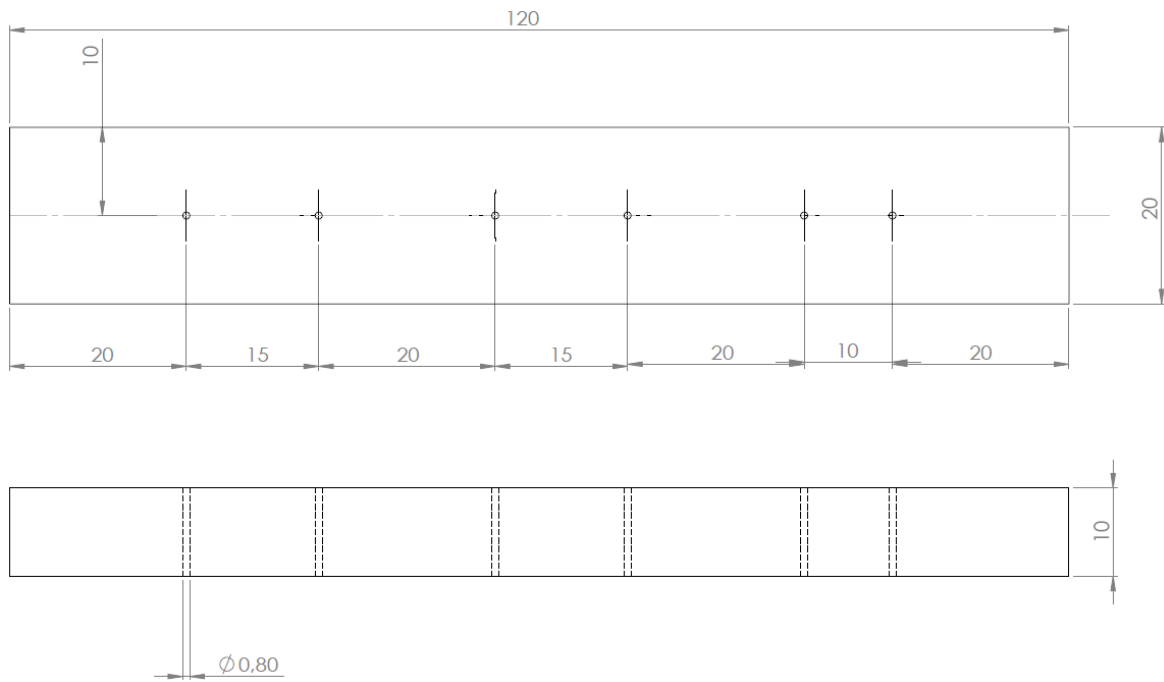
## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahamson, G. R. J.** 1961. *Appl. Mech.* 1961.
- Bahrani, A. S., Black, T. J. e Crossland, B.** 1967. *The Mechanics of Wave Formation in Explosive Welding.* s.l. : Proc. Roy Soc. A, 1967. pp. 123-136.
- Barreto, Gonçalo.** 2014. *Soldadura por explosão de Alumínio-Cobre.* Coimbra : Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2014.
- Bergman, O., Cowan, G. e Holtzman, A.** 1966. *Experimental Evidence of Jet Formation During Explosion Cladding.* s.l. : Trans. Metal Soc. AIME, 1966. pp. 646-653.
- Carpenter, S. H. e Wittman, R. H.** 1975. *Explosion Welding.* Denver, Colorado : Denver Research Institute, University of Denver, 1975.
- Chou, P. C. e Flis, W. J.** 1986. *Recent Developments in Shaped Charge Technology.* s.l. : Propellants, Explosives, Pyrotechnics 11, 1986. pp. 99-114.
- Chou, P. C., et al.** 1983. *Improved formulas for velocity, acceleration, and projection angle of explosively driven liners.* s.l. : Propellants, Explosives, Pyrotechnics 8, 1983. pp. 175-183.
- Cowan, G. R. e Holtzman, A. H.** 1963. *Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding.* s.l. : Journal of Applied Physics 34, 1963. pp. 928-939.
- Cowan, G. R., Bergman, O. R. e Holtzman, A. H.** 1971. *Mechanics of bond wave formation in explosive cladding of metals.* s.l. : Metallurgical Transactions 2:3145, 1971.
- Crossland, B.** 1982. *Explosive welding of metals and its application.* [ed.] Oxford Series on Advanced Manufacturing. s.l. : Clarendon Press, 1982.
- de Rosset, W. S.** 2006. *Analysis of Explosive Bonding Parameters.* s.l. : Manuf. Process. 21, 2006. pp. 634-638.
- Deribas, A. A., et al.** 1967. *Explosive Welding.* s.l. : Siberian branch of academy of sciences in explosive welding, 1967. pp. 111-118. Vol. 3. 1.
- Dias, T.** 2012. *Soldadura Al-Cu por explosivo em configuração plana.* Coimbra : Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2012.
- Durgutlu, A., Okuyucu, H. e Gulenc, B.** 2008. *Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel.* Denver, Colorado : Proceedings of the Fifth international Conference on High Energy Rate Fabrication, 2008. pp. 1-21.
- El-Sobsky, H. e Blazynski, T. Z.** 1975. *Experimental Investigation of the Mechanisms of Explosive Welding by Means of a Liquid Analogue.* Denver : Proceedings of the Fifth International Conference on High Energy Rate Fabrication, 1975. pp. 1-21.
- Findik, F.** 2011. *Recent Developments in Explosive Welding.* 54187 Adapazari, Turkey : Sakarya University, Faculty of Technology, Esentepe Campus, 2011. pp. 1081-1093.
- Ghomi, M.** 2009. *Impact Wave Process Modeling and Optimization in High Energy Rate Explosive Welding.* s.l. : Mälardalen University Press Licentiate Thesis, No. 106, 2009.

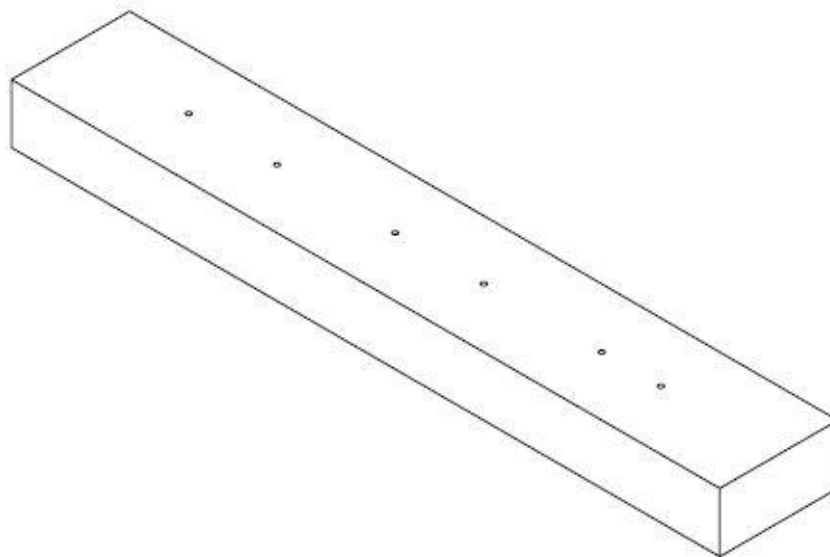
- Gulenc, B. 2008.** *Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper.* s.l. : Materials and Design 29, 2008. pp. 275-278.
- Gurney, R. W. 1943.** *The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells, and Grenades, BRL-405.* Aberdeen, Maryland : Ballistic Research Laboratory, 1943.
- Hunt, J. N. 1968.** *Phil. Mag.* 1968. Vol. 17.
- Kennedy, J. E., Davidson, L. e Coffey, F. 1972.** *Explosive output for driving metal.* New Mexico : Proc behavior and utilization of explosives in engineering design conf. ASME, 1972.
- Kennedy, J. E., et al. 1998.** *The Gurney Model of Explosive Output for Driving Metal.* [ed.] L. Davison e Y. Hori. New York : Explosive Effects and Applications, 1998. pp. 221-257.
- Kim, H. J., et al. 2003.** *Effects of Cu/Al Intermetallic Compound (IMC) on Copper Wire and Aluminum Pad Bondability.* s.l. : IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 26, nº 2, 2003.
- Mendes, R., Ribeiro, J. B. e 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.
- Mousavi, A. A. e Al-Hassani, S. T. S. 2004.** *Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding.* s.l. : Department of Metallurgy and Material Science Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, 2004.
- Ouyang, J., Yarrapareddy, E. e Kovacevic, R. 2006.** *Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper.* s.l. : Journal of Materials Processing Technology 172, 2006.
- Plaksin, I., et al. 2003.** *Novelties in Physics of Explosive Welding and Powder Compaction.* s.l. : J. Phys. IV France 110, 2003. pp. 797-802.
- Reid, S. R. 1974.** *A Discussion of the Mechanism of Interface Wave Generation in Explosive Welding.* s.l. : International. J. Mech. Sci., 1974. pp. 399-413. Vol. 16.
- Ribeiro, J. B., Mendes, R. e Loureiro, A. 2014.** *Review of the weldability window concept and equations for explosive welding.* Coimbra : Journal of Physics: Conference Series 500, 2014.
- Robinson, J. L. 1975.** *Phil. Mag.* 1975. pp. 587-597. Vol. 31.
- Santos, Nelson. 2013.** *Soldadura por explosivo em configuração plana de Alumínio-Cobre.* Coimbra : Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projecto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2013.
- Szecket, A. 1979.** *An experimental study of the explosive welding window.* s.l. : PhD, thesis, Queen's University of Belfast, 1979.
- Watanabe, M. e Kumai, S. 2009.** *Interfacial Morphology of Magnetic Pulse Welded Aluminum/Aluminum.* Yokohama, Japan : Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2009.
- Wittman, R. H. 1973.** *The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welded aluminum alloy.* Mariánské Lázně, Czechoslovakia : Proceedings of the Second International Symposium on the Use of Explosive Energy in Manufacturing, 1973. pp. 153-168.
- Young, G. 2004.** *Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History.* s.l. : Stainless Steel World 2004 © KCI Publishing BV, 2004.

**Zakharenko, I. e Zlobin, B. 1983.** *Effect of the hardness of welded materials on the position of the lower limit of explosive welding.* s.l. : Combust Explo Shock Waves, 1983. pp. 685-695. 19 (5).

## APÊNDICE A      DESENHO DAS PEÇAS PARA A FIXAÇÃO DAS SONDAS



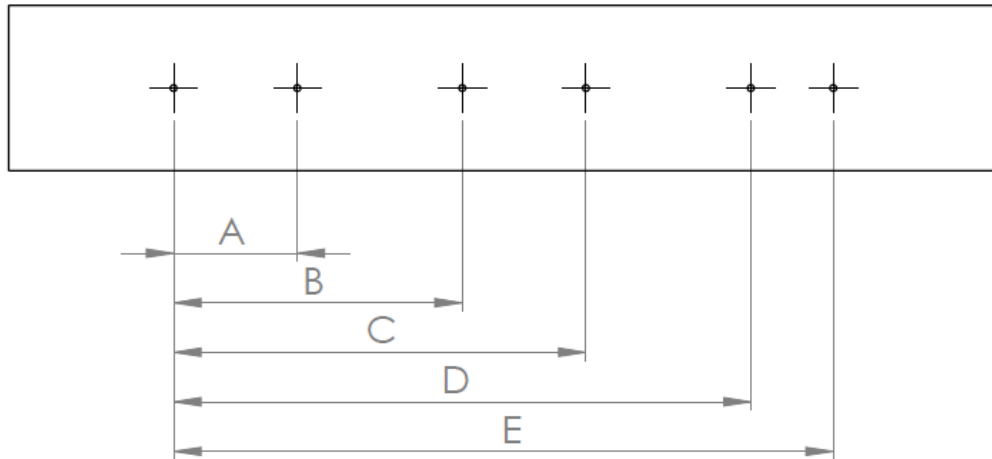
**Figura A.1.** Desenho das peças para a fixação das sondas.



**Figura A.2.** Desenho 3D das peças para a fixação das sondas.



## APÊNDICE B DIMENSÕES EFETIVAS DAS PEÇAS DE ACRÍLICO UTILIZADAS NAS SONDAS

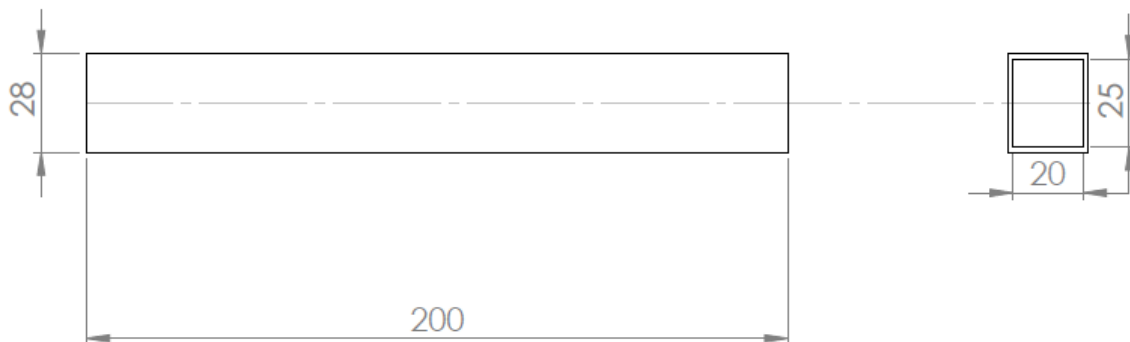


**Figura B.1.** Esquema das dimensões das peças de acrílico.

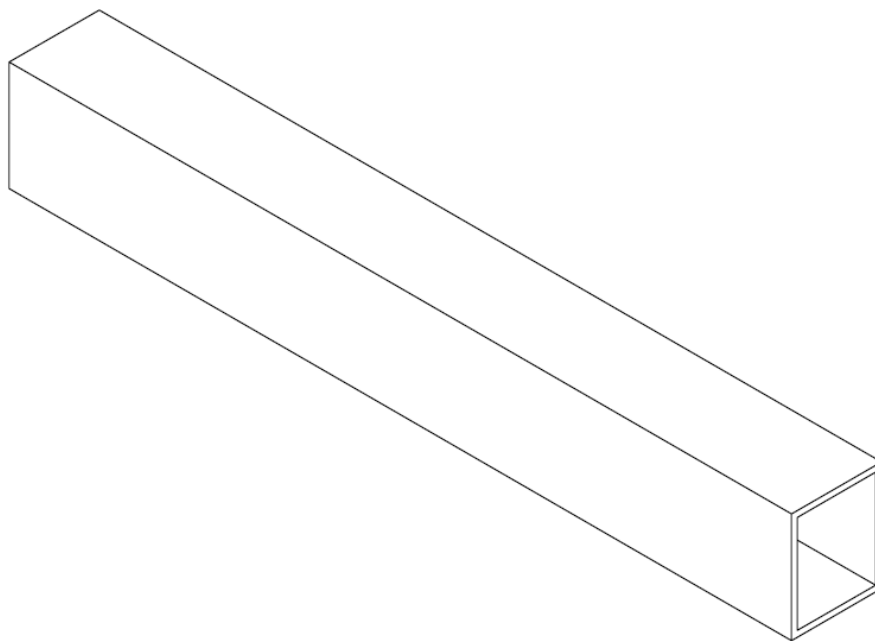
**Tabela B.1.** Dimensões efectivas para medição da velocidade de detonação.

	EW8	UEW1	UEW2	UEW3	UEW4
A (mm)	15,1	15,1	14,9	15,0	14,9
B (mm)	35,3	35,2	35,0	35,0	35,2
C (mm)	50,3	50,2	50,2	50,3	50,3
D (mm)	70,8	70,4	70,4	70,2	70,3
E (mm)	80,8	80,0	80,0	80,0	80,3

## APÊNDICE C DESENHO DAS CAIXAS DE CARTÃO UTILIZADAS NOS ENSAIOS EW8, EW9, UEW1 E UEW2



**Figura C.1.** Desenho das caixas de cartão utilizadas nos ensaios EW8, Ew9, UEW1 e UEW2.



**Figura C.2.** Desenho 3D das caixas de cartão utilizadas nos ensaios EW8, Ew9, UEW1 e UEW2.

## APÊNDICE D DESENHO DA CAIXA DE ACRÍLICO UTILIZADA NO ENSAIO UEW3



Figura D.1. Desenho da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW3.

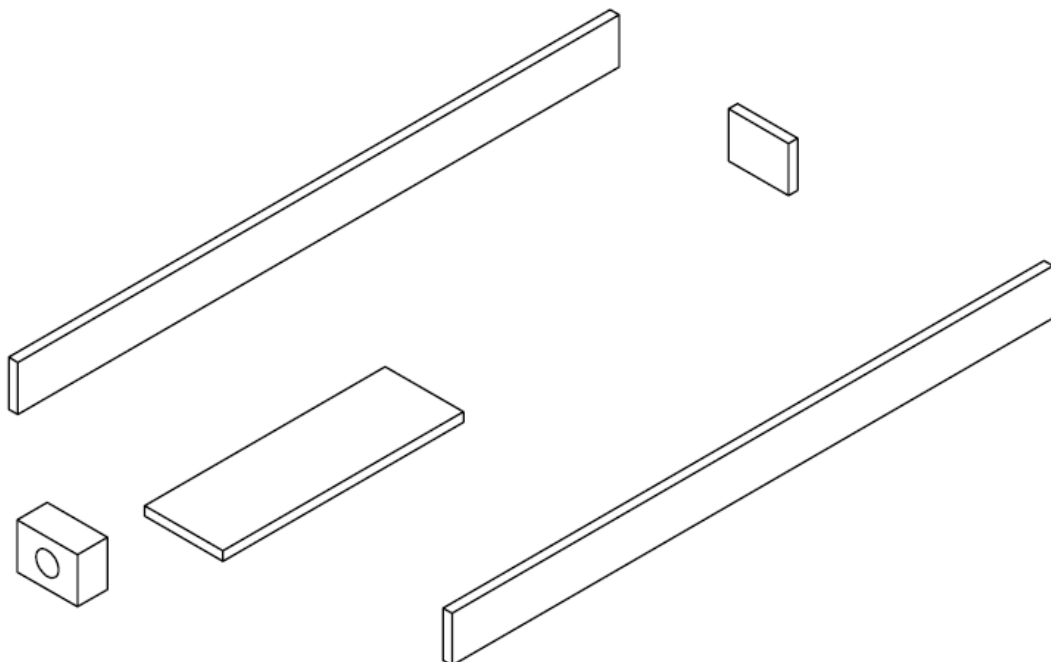


Figura D.2. Desenho 3D da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW3.

## APÊNDICE E DESENHO DA CAIXA DE ACRÍLICO UTILIZADA NO ENSAIO UEW4

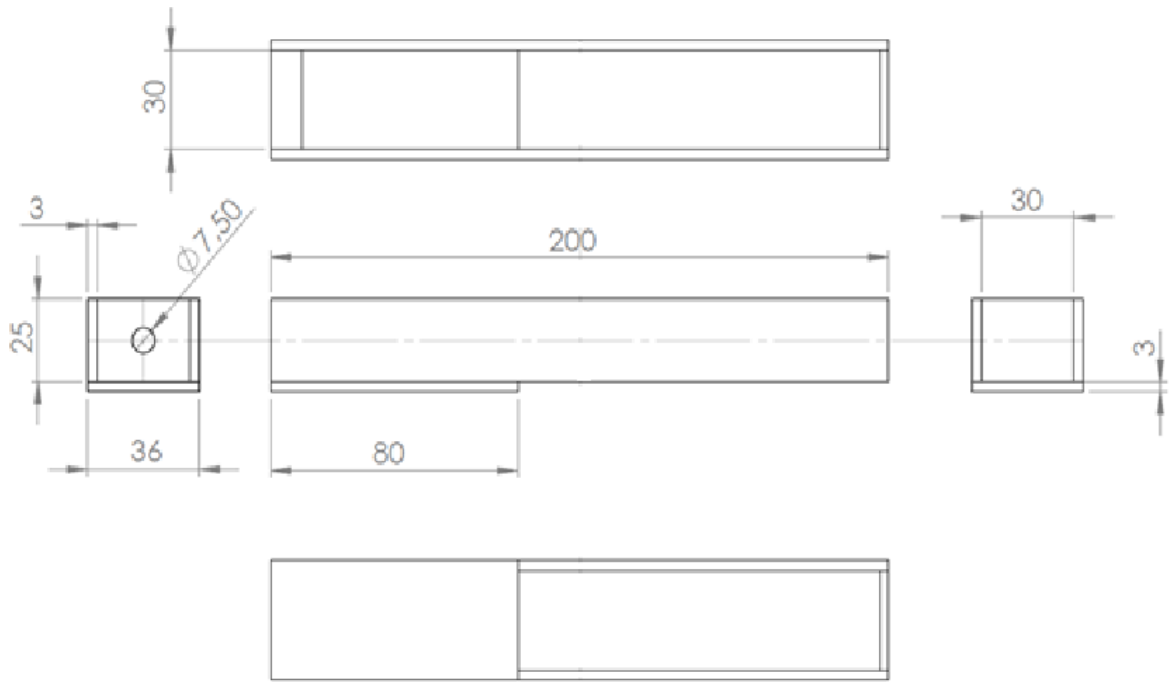


Figura E.1. Desenho da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW4.

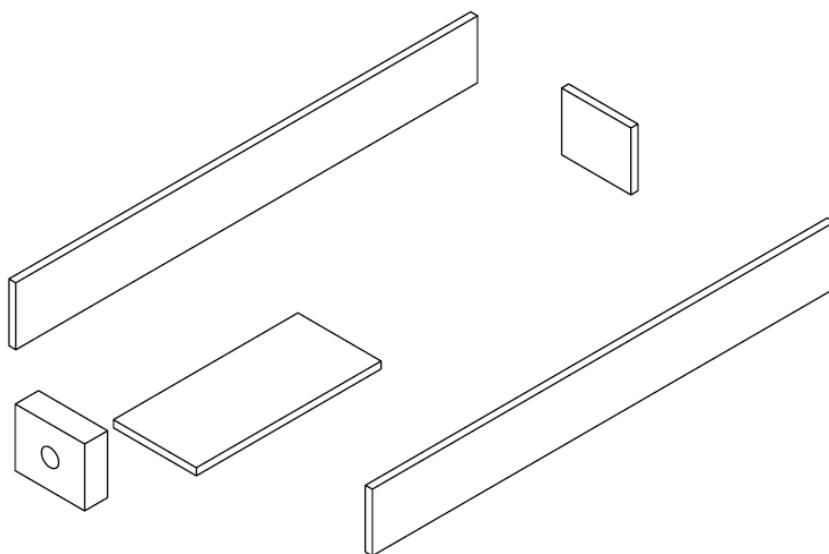
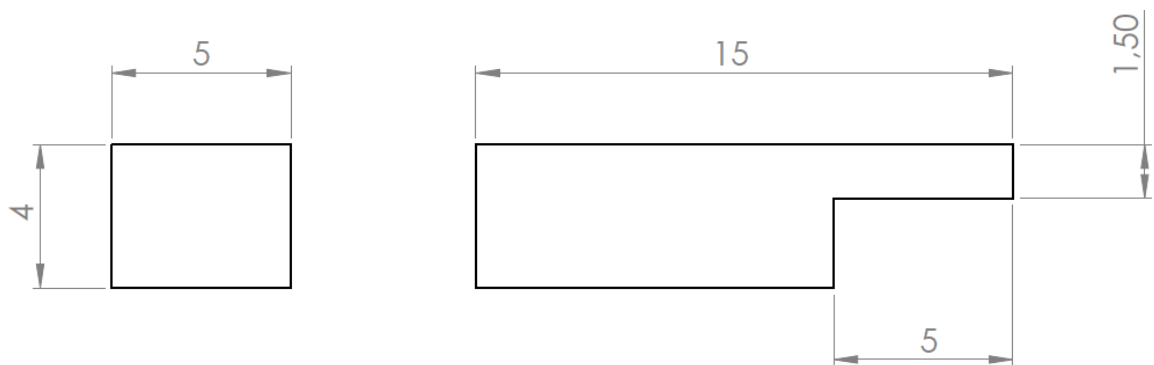
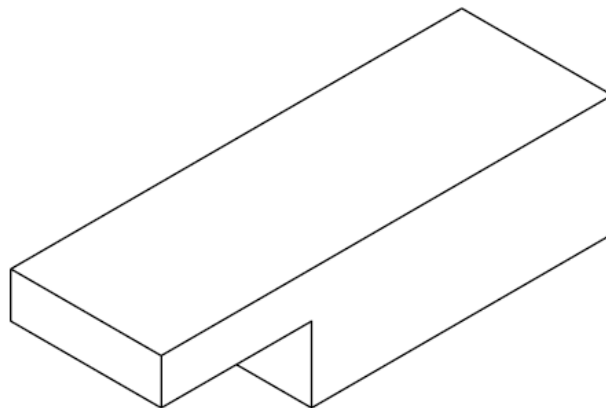


Figura E.2. Desenho 3D da caixa de acrílico utilizada no ensaio UEW4.

## APÊNDICE F DESENHO DOS ESPAÇADORES UTILIZADOS NOS ENSAIOS UEW2, UEW3, EW9 E UEW4



**Figura F.1.** Desenho dos espaçadores de 4 mm utilizados.

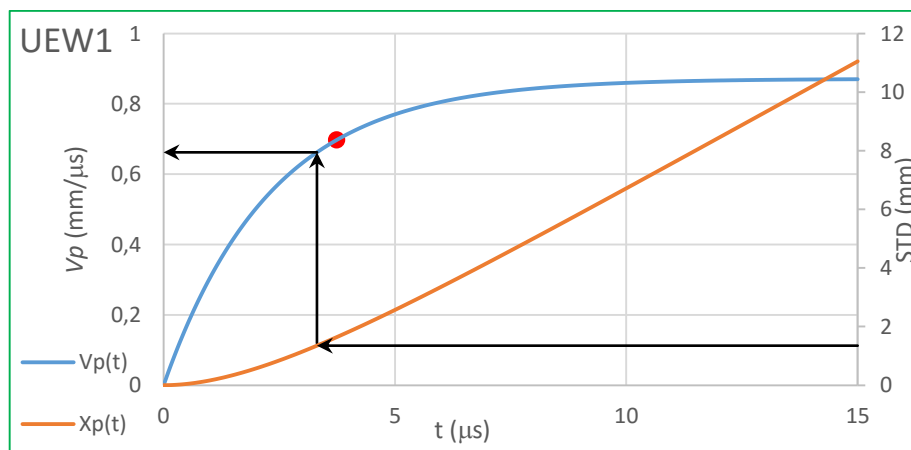


**Figura F.2.** Desenho 3D dos espaçadores de 4 mm utilizados.

## APÊNDICE G PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

**Tabela G.1.** Valores utilizados no processo de calibração.

	EW8	UEW1	UEW2	EW9	UEW3	UEW4
$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	8924	2700				
Volume projetado flyer (mm <sup>3</sup> )	3000	9000			7200	10800
$h_f$ (mm)	1	3				
$M$ (kg)	0,0268	0,0243			0,0194	0,0292
$V_{explosivo}$ (mm <sup>3</sup> )	6000				3600	9000
$C$ (kg)	0,0462				0,0277	0,0693
$R$ (C/M)	1,73	1,90			1,43	2,38
Tipo de Explosivo	Eex+15%MEOV					Eex+1,2%EPS
$\sqrt{2E}$ (m/s)	1095				1000	
$p_{cj}$ (GPa)	3,1				2,8	
$\tau$	1,0487	2,3227				
STD (mm)	1,35			4		
$C_{0,f}$ (mm/ $\mu$ s)	4,74	6,42				
$V_{p\ Gurney}$ (mm/ $\mu$ s)	0,8284	0,8713			0,7453	0,8870
$V_{p\ cal}$ (mm/ $\mu$ s)	0,6627	0,6971			0,5962	0,7096
$t_{v\ cal}$ ( $\mu$ s)	1,69	3,74				
$V_p$ (mm/ $\mu$ s)	0,758	0,662	0,824	0,824	0,717	0,837



**Figura G.1.** Processo de calibração para o ensaio UEW1.

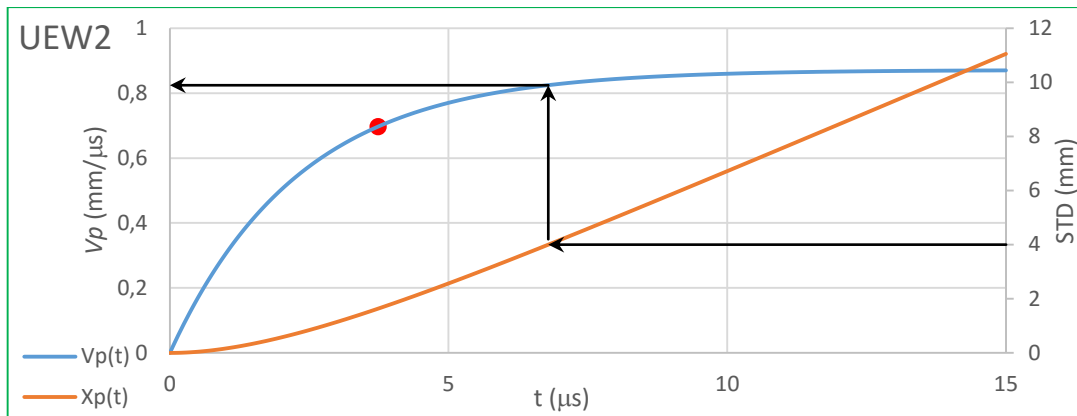


Figura G.2. Processo de calibração para o ensaio UEW2.

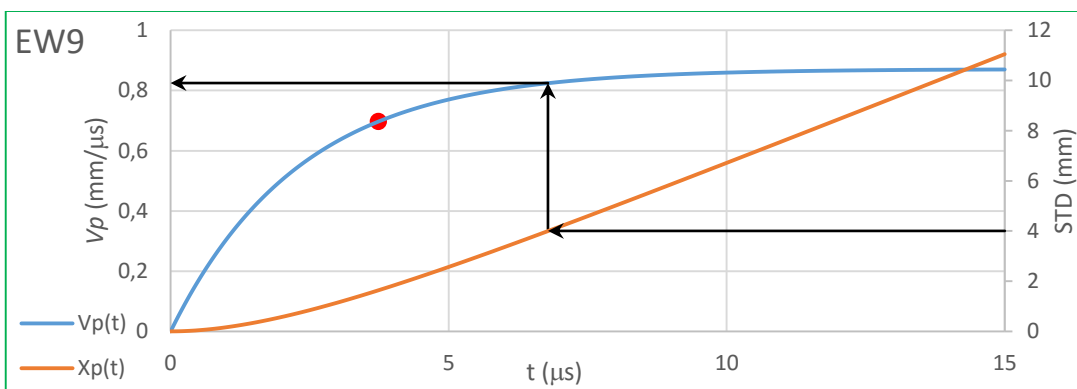


Figura G.3. Processo de calibração para o ensaio EW9.

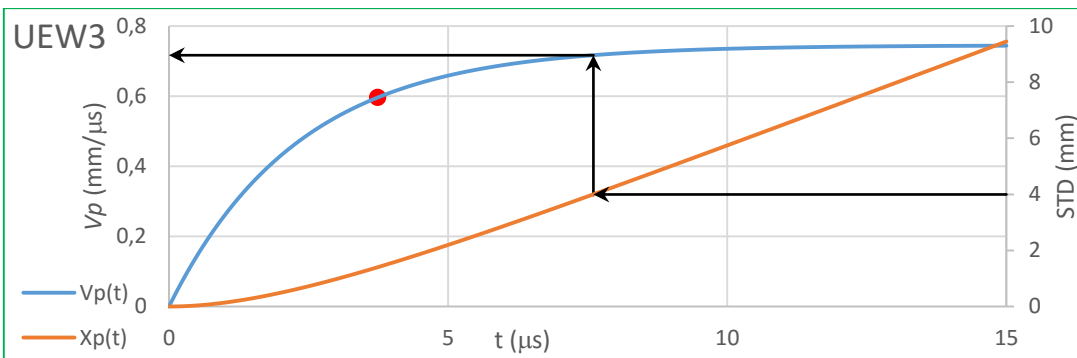


Figura G.4. Processo de calibração para o ensaio UEW3.

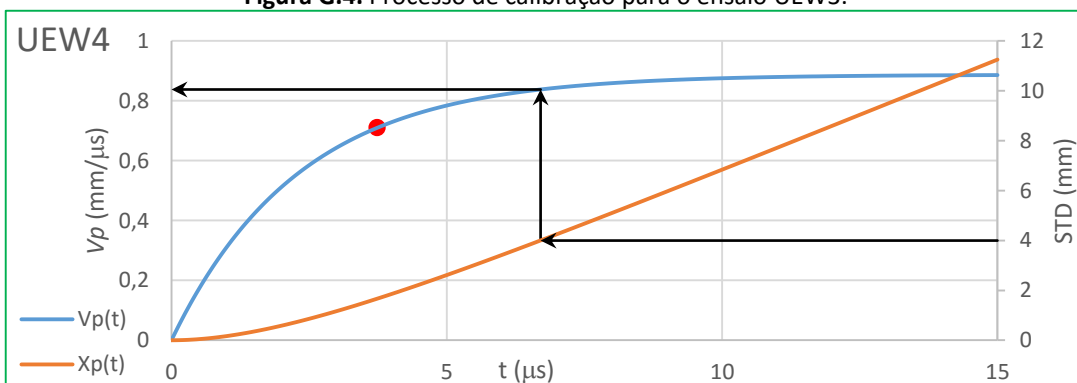
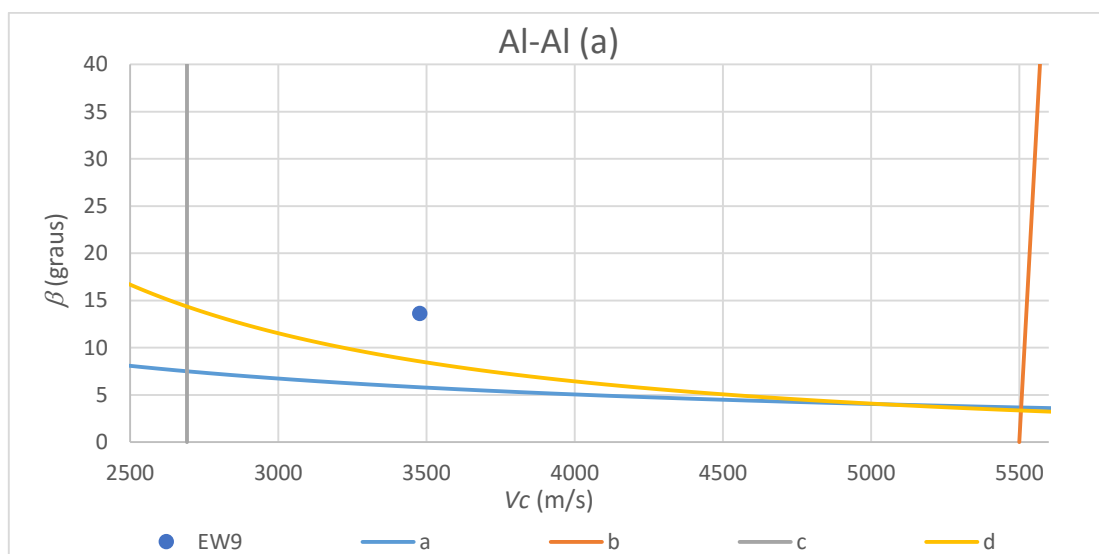


Figura G.5. Processo de calibração para o ensaio UEW4.

## APÊNDICE H JANELAS DE SOLDABILIDADE

**Tabela H.1.** Valores utilizados nas janelas de soldabilidade.

	EW8	UEW1	UEW2	EW9	UEW3	UEW4
$V_c = V_d$ (m/s)	3551,1	3588,8	3476,9		3664,5	2986,9
$\beta$ (graus)	12,26	10,59	13,62		11,23	16,12
$K_1$	0,6					
$H_{V,f}$ (N/mm <sup>2</sup> )	514,87	931,67				
$H_{V,e}$ (N/mm <sup>2</sup> )	514,87		931,67		514,87	
$\rho_e$ (kg/m <sup>3</sup> )	8924		2700		8924	
$Re$	10,5					
$h_f$ (mm)	1	3				
$T_{m,f}$ (°C)	1083	555				
$k_f$ (W/m · K)	310	180				
$c_{p,f}$ (J/kg · K)	385	894				
$N$ (a)	0,11					
$N$ (b)	0,062					



**Figura H.1.** Janela de soldabilidade Al-Al com  $N=0,11$ .



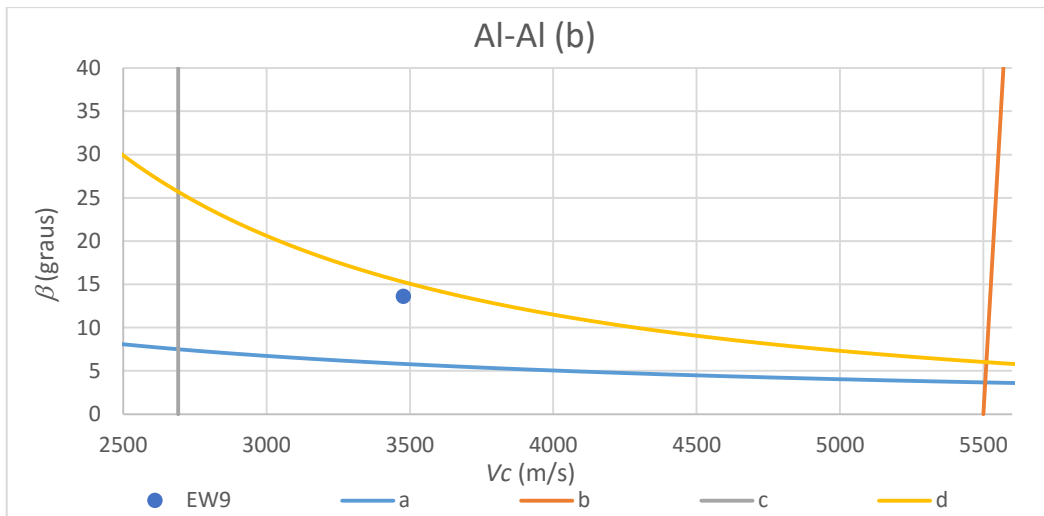


Figura H.2. Janela de soldabilidade Al-Al com  $N=0,062$ .

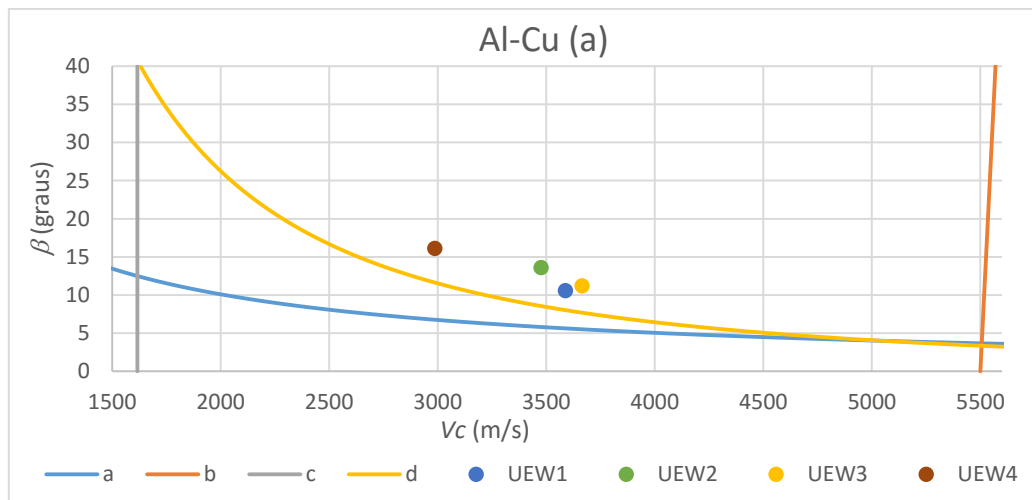


Figura H.3. Janela de soldabilidade Al-Cu com  $N=0,11$ .

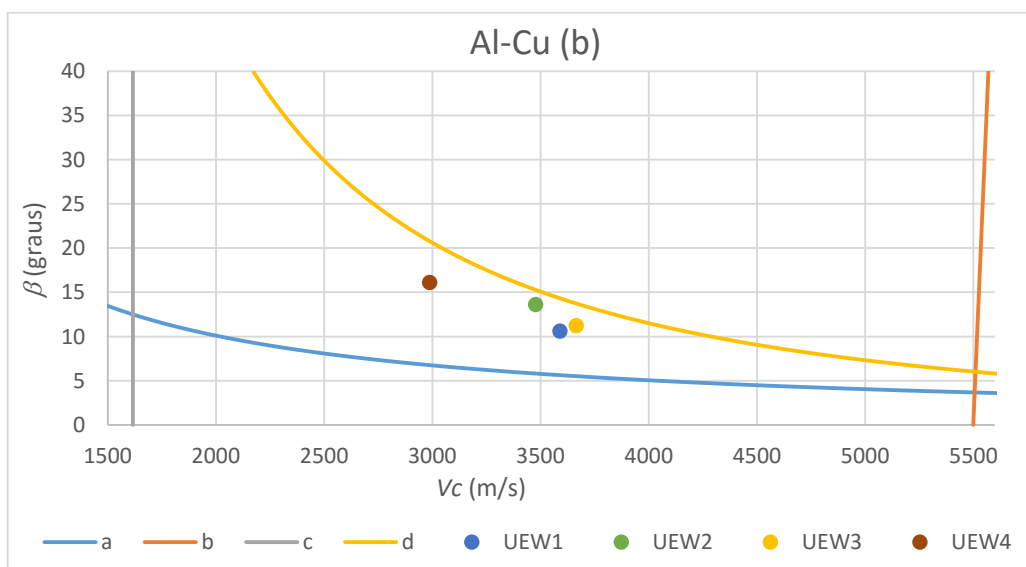


Figura H.4. Janela de soldabilidade Al-Cu com  $N=0,062$ .

## APÊNDICE I DESENHO DOS PROVETES MAQUINADOS PARA OS ENSAIOS MECÂNICOS

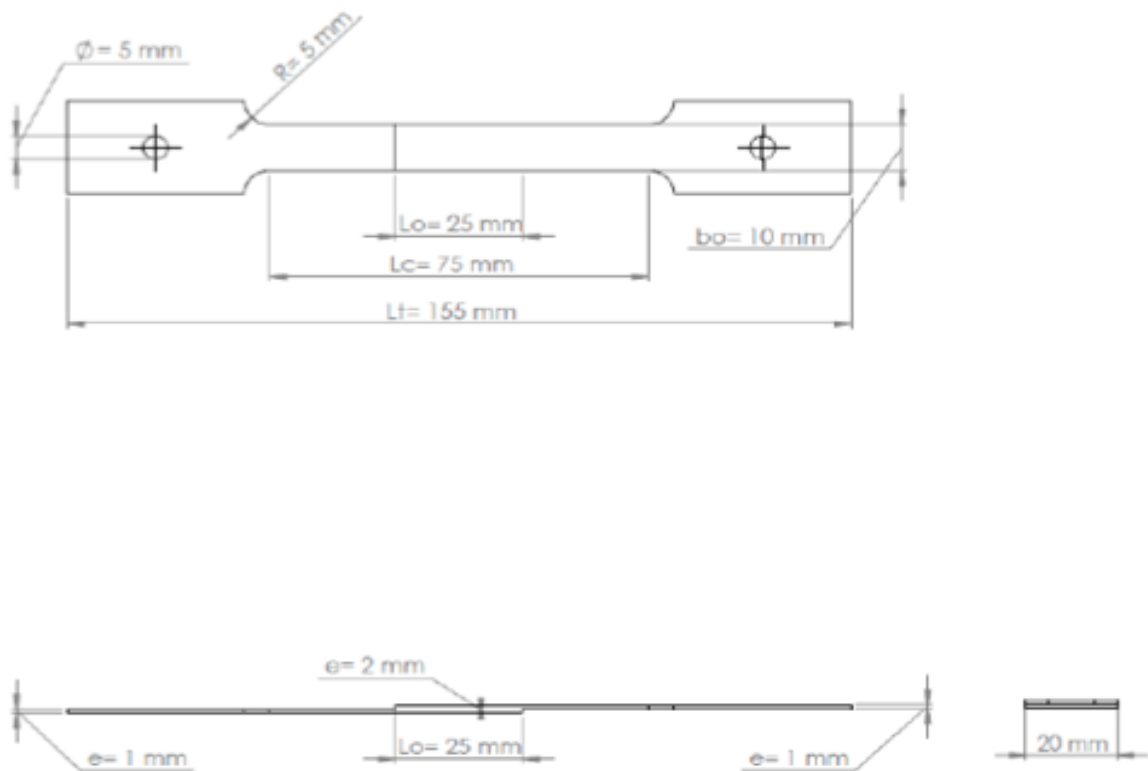


Figura I.1. Desenho dos provetes maquinados para os ensaios de tração.

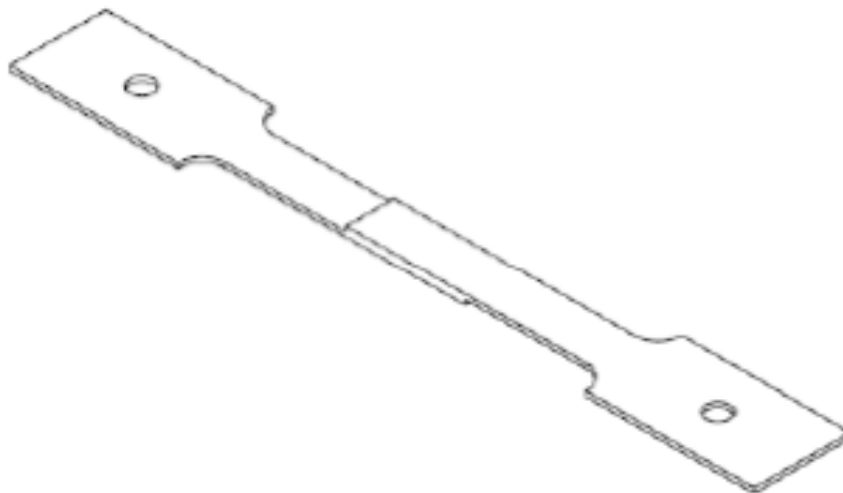


Figura I.2. Desenho 3D dos provetes maquinados para os ensaios de tração.