



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Soldadura por explosão de Alumínio-Cobre em configuração plana**

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

**Autor**

**Gonçalo Miguel Pereira Barreto**

**Orientadores**

**Ricardo António Lopes Mendes**

**Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva</b>
<b>Vogais</b>	<b>Ribeiro</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, Fevereiro, 2014**

É preciso força para sonhar e perceber que a estrada vai além do que se vê.

Los Hermanos

Aos meus Pais e Irmã

## Agradecimentos

Antes de mais, gostaria de apresentar os meus agradecimentos a quem mais directamente contribuiu para a realização deste trabalho.

Assim, e em primeiro lugar, agradeço profundamente ao Professor Doutor Ricardo Mendes, pelo apoio incondicional, ensinamentos transmitidos e disponibilidade em todos os ensaios. O seu esforço foi notável e o empenho total ao longo da realização deste trabalho. Foi um prazer enorme tê-lo tido como orientador desta tese.

A minha gratidão também é extensiva ao Professor Doutor Altino Loureiro, meu co-orientador, pela valiosa orientação e apoio à realização da tese com boas ideias e sentido crítico. É de louvar a sua permanente disponibilidade, dedicação e generosidade. Sem ele, nunca teria sido possível a conclusão deste trabalho.

Estou muito grato ao Engenheiro Bruno Tavares e ao Engenheiro Joel de Jesus, pela discussão de tópicos importantes, pelo espírito de cooperação e pela perseverança durante a preparação e execução dos ensaios. Guardarei os bons momentos e a amizade.

Saliento ainda o Doutor Carlos Leitão, o Professor Doutor Rui Leal e a Engenheira Maria Inês, a quem agradeço pela amizade, espírito de entreatajuda e bons momentos de convívio ao longo destes últimos meses.

Não posso de deixar de dar ênfase ao apoio e amizade demonstrada pelos meus amigos ao longo da minha vida académica. O meu muito obrigado pelas fortes emoções vividas e bons momentos passados que jamais irei esquecer. Um especial obrigado à Tânia Sousa pela ajuda e apoio nos momentos mais difíceis dos últimos meses.

Por último, o agradecimento mais importante. Devo uma palavra de reconhecimento à minha família: aos meus pais e irmã, pilares da minha vida, e aos meus avós, ternura inesgotável, pelo carinho e coragem que sempre me deram e pela confiança depositada em mim ao longo de todo o meu percurso. Ajudaram-me a dar valor ao que realmente tem valor para que eu soubesse escolher o melhor caminho para mim. Contribuíram para o meu sucesso e para meu crescimento como pessoa.

## Resumo

A realização deste trabalho focou-se no estudo da influência de alguns parâmetros de soldadura por explosão, como o tipo e rácio de explosivo e o tipo de base de suporte, na morfologia, microestrutura e comportamento mecânico de soldaduras de cobre a alumínio, obtidas para uma configuração plana.

Para o efeito foram realizadas soldaduras em configuração plana, utilizando 4 diferentes tipos de explosivos (CD, ANFO, Eex+MEOV, Eex+EPS) e diversos rácios de explosivo (entre 1 e 3), entre ligas de alumínio e cobre. Foi analisada a morfologia, a microestrutura e resistência mecânica das soldaduras, com recurso a microscopia óptica e electrónica de varrimento, ensaios de microdureza e de tracção, usando extensometria óptica. Foi também variada a configuração da base de suporte da placa estacionária. Além disso foram analisadas as soldaduras obtidas em anos anteriores e comparadas com as actuais. Resultados mostraram que o efeito da variação de cada um dos parâmetros foi visível, principalmente na morfologia e nas propriedades mecânicas obtidas. A velocidade de detonação ( $V_d$ ), para um mesmo rácio de explosivo, variou consoante o tipo de explosivo usado. O aumento da velocidade no ponto de colisão ( $V_c$ ) está associada à redução do ângulo de colisão  $\beta$ . O aumento da velocidade de impacto ( $V_p$ ) conduz o aumento do ângulo de colisão  $\beta$ . A ondulação tende a crescer em termos de comprimento e amplitude com o aumento da  $V_p$ . Valores de dureza obtidos foram superiores para as bases que apresentavam maior rigidez. O aumento do rácio de explosivo conduziu à maior espessura das zonas fundidas e de uma maior presença de compostos intermetálicos, fissuração e cavidades. Ensaio mecânicos efectuados mostraram que a ligação foi mais resistente que um dos materiais base, rompendo sempre neste numa zona afastada da soldadura.

**Palavras chave:** Soldadura por explosivo, Emulsão explosiva, Cobre, Alumínio, Compostos intermetálicos.

## Abstract

The realization of this paper is focused on the study of the influence of some parameters of welding by explosion, such as the type and ratio of explosive and the anvil support on the morphology, micro-structure and mechanical behavior of copper and aluminum welding, obtained for a flat configuration.

For this effect several welding's on a flat configuration were realized, using several types of explosives (ANFO, Eex+MEOV, Eex+EPS) and several explosive ratios (between 1 and 3), for aluminum and copper alloys. The morphology was analyzed, the micro-structure and mechanical resistance of the welding's, using microscopic optical and electronic sweeping, micro-hardness rehearsals and traction, using optical extensometer. The anvil of the flat stationary plate was also varied. The welding's obtained in previous years were also compared to current samples. Results showed that the effect of the variation of each parameter was visible, specifically in the morphology and mechanical properties obtained. The detonation velocity ( $V_d$ ), to the same ratio of the explosive, varied according to the type of explosive used. The increase of speed at the collision point leads to the reduction of the collision angle  $\beta$ . This increase of the impact velocity ( $V_p$ ) leads to the increase of the angle of collision  $\beta$ . The curling tends to increase in terms of length and amplitude with the increase of  $V_p$ . Hardness values obtained was superior to the bases that presented with higher hardness. The increase in the ratio led to a larger thickness of the melted zones, cracking and cavities. Mechanical rehearsals done showed that the connection was more resistant than any base materials, ripping always in an area away from the welding.

**Keywords:** Explosive welding, Emulsion explosive, Copper, Aluminium, Intermetallic compounds.

# ÍNDICE

Índice .....	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Estado da arte.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Histórico .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Princípio de funcionamento do processo .....</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Análise dinâmica do processo.....</b>	<b>4</b>
2.3.1 Selecção do explosivo .....	4
2.3.2 Mecanismos de formação de onda.....	5
<b>2.4 Critérios de soldabilidade .....</b>	<b>8</b>
<b>2.5 Enquadramento de soldaduras no diagrama .....</b>	<b>11</b>
2.5.1 Velocidade de impacto .....	12
2.5.2 Velocidade de detonação $V_d$ .....	12
2.5.3 Ângulo de colisão $\beta$ .....	13
<b>2.6 Propriedades típicas de soldadura .....</b>	<b>13</b>
<b>2.7 Aplicações, vantagens e limitações do processo .....</b>	<b>16</b>
<b>2.8 Combinações possíveis.....</b>	<b>17</b>
<b>2.9 Actual aplicação industrial.....</b>	<b>18</b>
<b>3 Actividade experimental .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Materiais base .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Preparação dos ensaios.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Velocidade de detonação .....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 Parâmetros de soldadura .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5 Nomenclatura das amostras:.....</b>	<b>23</b>
<b>3.6 Metalografia .....</b>	<b>24</b>
3.6.1 Preparação metalográfica .....	24
3.6.2 Ataque químico .....	24
3.6.3 Análise química .....	25
<b>3.7 Análise mecânica .....</b>	<b>25</b>
3.7.1 Dureza .....	25
3.7.2 Resistência ao corte .....	25
<b>4 Resultados.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Janela de soldabilidade .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Análise Máscroscópica.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3 Micrografia .....</b>	<b>32</b>
4.3.1 Soldaduras anteriores .....	32
4.3.2 Novas soldaduras .....	34

---

<b>4.4</b>	<b>Análise de compostos intermetálicos .....</b>	<b>37</b>
<b>4.5</b>	<b>Dureza .....</b>	<b>40</b>
4.5.1	Soldaduras anteriores .....	40
4.5.2	Novas soldaduras .....	41
<b>4.6</b>	<b>Resistência ao corte:.....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>Discussão de resultados.....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>50</b>
	<b>Referências bibliográficas: .....</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXO 1 – Parametros de soldadura usados anteriormente, (Dias, 2012) e (santos, 2013).....</b>	<b>54</b>
	<b>ANEXO 2 – Velocidades de detonação das soldaduras anteriores, (dias, 2012) e (santos, 2013).....</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXO 3 – Composição química da análise química efectuada no ponto 3 e no ponto 5.....</b>	<b>56</b>
	<b>ANEXO 4 –Dureza dos compostos intermetalicos das soldaduras anteriores.....</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXO 5 – Evolução das amplitudes das ondas com o ângulo <math>\beta</math> .....</b>	<b>58</b>
	<b>ANEXO 6 – Caracteristicas finais das anteriores e novas soldaduras .....</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE A – Zona onde foram retirados provetes.....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE B – Desenho do provete para ensaios mecânicos.....</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE C – Constantes usadas para a janela de soldabilidade .....</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE D – Janela de soldabilidade para as novas soldaduras .....</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE E – Indentações nos compostos intermetálicos.....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE F – Dureza dos compostos intermetálicos das novas soldaduras .....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE G– Representação gráfica da força em função do alongamento da soldadura EW5 .....</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE H – Representação gráfica da força em função do alongamento e da deformação da soldadura EW6 .....</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Montagem experimental, configuração inclinada.....	3
Figura 2.2: Processo de soldadura numa configuração plana.....	4
Figura 2.3: Efeito do aumento do rácio de explosivo na interface, (Gulenc, 2008).....	5
Figura 2.4: Soldadura por explosão, configuração plana, (Gulenc, 2008).....	6
Figura 2.5: Mecanismo de indentação do jacto.....	7
Figura 2.6: Mecanismo turbulento (El-Sobky, 1983).....	8
Figura 2.7: Típica janela de soldabilidade (Mendes et al., 2012).....	9
Figura 2.8: Esquema do circuito eléctrico para a medição da velocidade de detonação, (Campbell et al, 1956).....	13
Figura 2.9: Interface bimetálica, análise SEM (Acarer, 2011).....	14
Figura 2.10: Durezas típicas de uma soldadura alumínio-cobre (Gulenc, 2006).....	15
Figura 2.11: Evolução da resistência mecânica com o rácio de explosivo (Durgutlu et al. 2005)....	16
Figura 2.12: Combinações possíveis, (Findick, 2011).....	17
Figura 3.1: Microestrutura das chapas de: a) alumínio; b) cobre.....	19
Figura 3.2: Montagem da configuração plana, soldadura EW1.....	20
Figura 3.3: Configuração plana, soldadura EW2.....	21
Figura 3.4: (a) EPS; (b) Aglomerados de MEOV.....	21
Figura 3.5: (a) osciloscópio digital; (b) medições realizadas para o ensaio EW5.....	22
Figura 3.6: Corte e identificação das amostras.....	24
Figura 3.7: Representação esquemática das indentações.....	25
Figura 4.1: Processo de calibração, soldadura EW5.....	27
Figura 4.2: Janela de soldabilidade para todas as soldaduras realizadas com <i>flyer</i> de 1 mm.....	28
Figura 4.3: Soldadura EW1: (a) deformação da soldadura; (b) fusão parcial do alumínio no cobre.....	29
Figura 4.4: Deformação superficial da soldadura EW2.....	30
Figura 4.5: (a) Deformação superficial da soldadura EW5_25; (b) salpicos de alumínio.....	30
Figura 4.6: (a) Deformação superficial da soldadura EW6_30; (b) morfologia da superfície de alumínio.....	31
Figura 4.7: (a) Deformação superficial da soldadura EW7_40; (b) morfologia da superfície de alumínio.....	31
Figura 4.8: (a) Morfologia da soldadura SE1_30, ampliação de 100x; (b) Morfologia da soldadura SE1_25, ampliação de 100x, (Dias, 2012) e (Santos, 2013).....	32
Figura 4.9: (a) Morfologia da soldadura SE1_20, ampliação de 100x; (b) morfologia da soldadura SE1_15, ampliação de 100x.....	33

Figura 4.10: Morfologia da soldadura EW2_20_4: (a) ampliação de 100x; (b) fissura e cavidade, ampliação de 500x. ....	34
Figura 4.11: Morfologia da soldadura EW5_25_5: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x. ....	35
Figura 4.12: Morfologia da soldadura EW6_30_5: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x. ....	36
Figura 4.13: Morfologia da soldadura EW7_40_5: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x. ....	36
Figura 4.14: (a) imagem SEM da amostra EW6_30_5 (zona 1); (b) imagem SEM da amostra EW6_30_5 (zona 2). ....	37
Figura 4.15: (a) Composição química do ponto 4; (b) composição química do ponto 6. ....	38
Figura 4.16: (a) imagem SEM da amostra EW6_25_5; (b) composição química do ponto 7. ....	39
Figura 4.17: (a) imagem SEM da amostra EW2_20_4 (zona 1); (b) imagem SEM da amostra EW2_20_4 (zona 2). ....	39
Figura 4.18: (a) composição química do ponto 8; (b) composição química do ponto 9. ....	39
Figura 4.19: Perfil de dureza da soldadura SE1_30_2 e SE1_20_5. ....	40
Figura 4.20: Perfil de dureza da soldadura SE1_25_2 e SE1_15_5. ....	40
Figura 4.21: Perfil de dureza da soldadura EW2_20_5 e EW5_25_5. ....	42
Figura 4.22: Perfil de dureza da soldadura EW6_30_5 e EW7_40_5. ....	42
Figura 4.23: Dureza transversal da soldadura EW5. ....	43
Figura 4.25: Representação gráfica da força em função do alongamento da soldadura EW3_20_3. ....	44
Figura 4.26: (a) valores percentuais da deformação obtida na soldadura EW2_20_3; (b) análise pontual. ....	44
Figura 4.27: (a) Valores percentuais da deformação obtida na soldadura EW5_25_4; (b) análise pontual. ....	45
Figura 5.1: Evolução de $V_d$ com o rácio de explosivo. ....	46
Figura 5.2: Evolução da $V_p$ com o aumento do rácio de explosivo. ....	47
Figura 5.3: Evolução de $\beta$ com a $V_p$ para os vários tipos de explosivo. ....	47
Figura 5.4: Evolução da amplitude com a $V_p$ . ....	48
Figura 5.5: Evolução do comprimento das ondas com $V_p$ . ....	48
Figura 5.6: Dureza em função da $V_p$ . ....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química dos metais usados %Wt. ....	19
Tabela 3.2: Parâmetros de soldadura actuais.....	23
Tabela 4.1: Velocidades de detonação das novas soldaduras.....	26
Tabela 4.2: Caracterização do explosivo e dimensões da banda de soldadura.....	27
Tabela 4.3: Parâmetros relativos a todas as soldaduras com <i>flyer</i> de 1 mm.....	28

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

- $\beta$  – Ângulo de colisão  
 $\rho$  – Densidade  
 $\tau$  – Constante de tempo  
 $C$  – Massa do explosivo  
 $c_p$  – Calor específico  
 $C_o$  – Velocidade do som do material  
 $C_1, C_2$  - Constantes empíricas  
 $E$  - Energia de Gurney  
 $h$  - Espessura  
 $HV$  – Dureza de Vickers  
 $k$  – Condutibilidade térmica  
 $k_1$  - Coeficiente de limpeza de superfícies  
 $M$  – Massa da placa voadora  
 $N$  – Constante para metais  
 $P_{CJ}$  – Pressão de Chapman-Jouguet  
 $R$  – Rácio de explosivo  
 $Re$  – Número de Reynolds  
 $t$  – Tempo  
 $T_m$  – Temperatura de fusão  
 $V_c$  – Velocidade no ponto de colisão  
 $V_d$  – Velocidade de detonação  
 $V_p$  – Velocidade de impacto

## Siglas

ASTM - American Society for Testing and Materials

ANFO - Ammonium Nitrate / Fuel Oil

CD – Cordão Detonante

Eex – Emulsão Explosiva

EW – Explosive Welding

MEOV – Micro Esferas Ocas de Vidro

EPS – Esferas de Poliestireno Expandido

PVC – Policloreto de Vinil

STD – Stand off Distance

EDS - Energy dispersive X-ray Spectroscopy

SEM - Scanning Electron Microscope

LEDAP - Laboratório de Energética e Detónica, Associação de apoio

ZAC – Zonas Afectadas pelo Calor

PETN – Pentaerythritol Tetranitrate

# 1 INTRODUÇÃO

O número de aplicações de engenharia que necessitam de ligar materiais dissimilares de forma permanente, com o objectivo de otimizar a utilização de propriedades específicas de cada material, está a crescer de forma significativa. As ligações Al-Cu não fogem a essa regra. Estas últimas ligações têm interesse para as indústrias de transporte de potência, as de transmissão de calor e até para a indústria electrónica, entre outras. A ligação de ligas de Al a Cu apresenta diversas dificuldades associadas à grande diferença de ponto de fusão e coeficiente de dilatação destes materiais, além da tendência à formação de compostos intermetálicos, duros e frágeis. Estes factos limitam muito a aplicação de processos de soldadura por fusão, pelo que os processos de soldadura no estado sólido se apresentam como alternativa para estas ligações. A soldadura por explosão, devido à reduzida energia térmica envolvida, constitui uma boa opção para o estabelecimento destas uniões.

O método de soldadura por explosão (*Explosive Welding*) é um processo que permite a união de dois ou mais metais dissimilares através da deformação plástica provocada pela detonação de uma quantidade controlada de explosivo. Durante o processo, os produtos de detonação exercem elevadas pressões na placa voadora (*flyer plate*), acelerando-a e obrigando-a a colidir numa outra placa, a qual permanece estacionária (*parent plate*). Antes da colisão, o ponto material do *flyer* segue uma trajectória oblíqua, e ao colidir, produz uma saliência sob a forma de um jacto metálico onde finas camadas de material são removidas, para que as superfícies se apresentem limpas durante a ligação. Uma vez que a velocidade de detonação é elevada, a transferência de calor e duração de interacção entre materiais são muito reduzidas, o que se traduz na formação de zonas fundidas residuais e numa melhoria das propriedades mecânicas da ligação. Este processo é utilizado em grande escala na área do revestimento de materiais, por os revestimentos apresentarem boas propriedades para os fins a que lhes destinam, dando a possibilidade de reduzir os custos de fabrico, pois o processo é simples, barato e rápido na sua execução.

Na literatura encontram-se já alguns estudos de soldaduras de cobre a alumínio por explosão, mas utilizando na generalidade um tipo específico de explosivo, o ANFO. Estes estudos mostram que a morfologia das soldaduras é profundamente influenciada pelos parâmetros de explosão.

Este trabalho tem por objectivo o estudo da influência de alguns parâmetros de soldadura por explosão, como o tipo e rácio de explosivo e o tipo de base de suporte, na morfologia, microestrutura e comportamento mecânico de soldaduras de cobre a alumínio, obtidas numa configuração plana. No capítulo 2 faz-se uma abordagem do estado da arte referindo o funcionamento da técnica e do seu desenvolvimento até a actualidade. O capítulo 3 refere-se a descrição dos procedimentos utilizados. No capítulo 4 faz-se uma descrição dos resultados obtidos. O capítulo 5 diz respeito à discussão dos resultados e o capítulo 6 às respectivas conclusões.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Histórico

O processo de junção de diferentes materiais foi primariamente observado na primeira guerra mundial, quando soldados assistiram a soldaduras de fragmentos de munições em várias superfícies metálicas. No seguimento destas observações, L. R. Carl, em 1944, começou a desenvolver este tipo de soldadura com objectivo de ser praticado a nível industrial, tendo evoluído em grande escala durante a segunda guerra mundial. Este investigador concluiu que este tipo de soldadura se tratava de um “processo de ligação no estado sólido” devido a ausência de zonas de fusão entre as placas metálicas (G. Young, 2004).

Nos anos seguintes foram obtidos muitos resultados no âmbito desta investigação, sendo os de maior relevo anunciados por uma equipa de investigadores liderados por M. A. Lavrent’ev em 1946-1948, que usaram duas camadas de metal de forma a obter uma estrutura bimetálica de aço-cobre. Estes investigadores verificaram a existência de ondulações na interface de ligação dos dois metais (Deribas *et al.*, 1967).

Este método conhecido como soldadura por explosão (*Explosive Welding*), foi submetido a múltiplos ensaios, tendo sido reconhecido como tecnologia apenas em 1957, quando V. Philipchuck conseguiu soldar aço a alumínio, com a área de uma polegada quadrada numa matriz de aço com perfil em U. Na sequência destes ensaios publicou um artigo descrevendo um possível método de soldadura por explosão que foi, mais tarde, patenteado. Contudo, o método descrito não era absolutamente fiável pois nem sempre obteve resultados positivos, dado haver uma constante dificuldade em manter por tempo suficiente uma força de compressão entre as placas por forma a estabelecer uma ligação entre elas (Deribas *et al.*, 1967). Em 1960 Douglas, Holtzman e Cowan melhoraram os parâmetros de soldadura usados anteriormente por V. Philipchuck, tendo sido este novo método patenteado em 1964 (Deribas *et al.*, 1967). Mais estudos foram efectuados por vários investigadores, tais como Daven e Duvall, Deribas, Boes, Sedykh, Zernov e co-autores, Bahrnai e Crossland. No entanto, foi a empresa DuPont (USA) que começou a conceber a produção industrial de placas bi-metálicas, o que deu muita utilidade na indústria química e nuclear. Após a evolução da técnica, temos hoje a possibilidade de unir materiais em mais de 260 diferentes combinações (Findik, 2011).

## 2.2 Princípio de funcionamento do processo

O método de soldadura por explosão (*Explosive Wwelding*) é um processo de soldadura peculiar dado tratar-se de um processo de ligação no estado sólido. Consiste no aproveitamento da energia de um explosivo, e das altas pressões induzidas por este, para a junção de duas ou mais camadas de metal.

Conforme se pode ver na Figura 2.1, este processo tem a participação de duas placas de metal, sendo uma delas designada por placa voadora (*flyer*) e a outra, que permanece estacionária e onde é estabelecida a ligação, designada por placa base (*parent plate*). O explosivo é colocado sob o *flyer* cujo objectivo é de o acelerar contra a placa base. O *flyer* por sua vez é montado acima da placa base segundo uma distância pré-definida (*stand-off-distance – STD*) necessária para que o *flyer* atinja a velocidade necessária no momento do impacto. O choque produzido promove a deformação plástica dos materiais estabelecendo assim a sua ligação. Uma vez que o processo ocorre num curto intervalo de tempo, a quantidade de calor transferida de uma placa para a outra considera-se desprezável, traduzindo-se numa redução de zonas afectadas pelo calor (ZAC), o que já não acontece com métodos de soldadura por fusão (Gulenc, 2008).

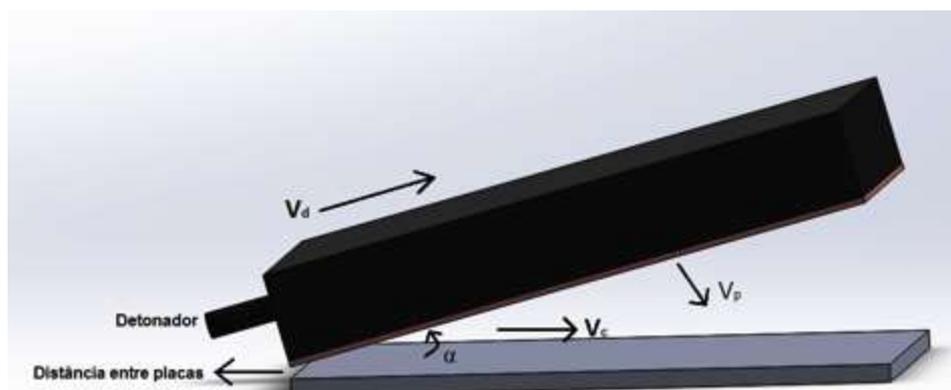
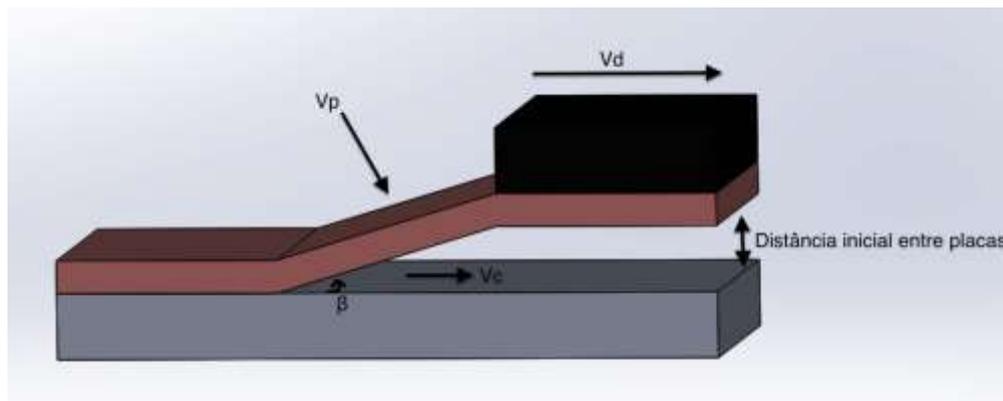


Figura 2.1: Montagem experimental, configuração inclinada.

Este método pode ser praticado de duas maneiras: na Figura 2.1 está representada uma configuração em que o *flyer* é montado numa posição inclinada segundo um ângulo característico em relação à placa estacionária; e na Figura 2.2 está representada uma segunda configuração, em que o *flyer* é posicionado paralelamente em relação à placa estacionária. Na primeira configuração mencionada é estabelecido um ângulo  $\alpha$  de ataque inicial cuja função é acelerar a placa voadora contra a placa estacionária não havendo necessidade de uma *STD*. Na segunda configuração é estabelecida uma *STD*, uma vez que não é introduzido um ângulo inicial de ataque. No entanto, durante a soldadura, o impacto acontece segundo um ângulo  $\beta$  devido à *STD* aplicada. A aplicação de uma *STD* poderá ser necessária também para a primeira configuração, dependendo da geometria e espessura das placas a utilizar (Ghomi, 2009).



**Figura 2.2: Processo de soldadura numa configuração plana.**

Quando ocorre o impacto da placa voadora (*flyer*), cada ponto material, pertencente a esta, segue uma trajetória oblíqua até ao momento do embate, definindo assim o ângulo de colisão entre as placas. Este parâmetro deve, assim como outros parâmetros como a velocidade de detonação ( $V_d$ ), a velocidade da placa voadora ( $V_p$ ) e a velocidade de colisão ( $V_c$ ), estar controlado dentro de um intervalo bem definido para que a soldadura aparente uma qualidade aceitável. A quantidade de explosivo a utilizar é também de extrema importância, uma vez que este parâmetro influencia não só directamente a velocidade de detonação ( $V_d$ ) como todos os outros parâmetros. A quantidade de explosivo depende essencialmente das condições iniciais de soldadura.

## 2.3 Análise dinâmica do processo

### 2.3.1 Selecção do explosivo

O tipo e quantidade de explosivo, assim como as suas dimensões, vão influenciar todo o processo de soldadura. Além disso é importante contabilizar o efeito da propagação da detonação, uma vez que a velocidade de detonação ( $V_d$ ) ao longo da explosão vai afectar directamente a velocidade do *flyer* ( $V_p$ ) e conseqüentemente a velocidade de colisão ( $V_c$ ). Segundo Crossland (1976), para a obtenção de uma soldadura com qualidade aceitável, a velocidade de colisão ( $V_c$ ) e a velocidade da placa ( $V_p$ ) terão de ser inferiores à velocidade sónica de ambas as placas. A velocidade do som na maior parte dos materiais está compreendida entre 4,5-6 km/s, enquanto que a velocidade de detonação de um explosivo comum anda sensivelmente nos 6-7 km/s. Com intuito de minimizar estes valores é normalmente usada uma mistura granulada de nitrato de amónio com 6% de fuel oil (ANFO) e uma substância inerte como areia ou perlite, conseguindo-se assim obter velocidades de 2 a 3 km/s para a prática do processo. Aquando da preparação do explosivo é muito importante tentar garantir que a velocidade de propagação da detonação seja uniforme durante a explosão, para que a velocidade de colisão ( $V_c$ ) o seja também (Findik, 2011).

Para caracterizar a quantidade de explosivo é definida uma relação entre massa de explosivo (C) e a massa do *flyer* (M), designada por rácio de explosivo. Este parâmetro serve para variar resultados, consoante a quantidade de explosivo utilizado em cada configuração. Assim, o rácio de explosivo pode ser calculado através da equação 2:

$$R = \frac{C}{M}, \quad (2)$$

A quantidade de explosivo utilizado tem grande influência na morfologia da interface de ligação da soldadura. Ao aumentar-se o rácio de explosivo, verifica-se o aumento da ondulação da interface (Gulenc, 2008). De acordo com a Figura 2.3, pode-se verificar que a forma e a dimensão da ondulação difere desde o primeiro ao quarto caso para o caso de uma ligação Al-Cu. Com o rácio de 1,5 é visível um comportamento linear uniforme na interface, enquanto que nos outros casos a interface de ligação tem um comportamento ondulado com comprimentos e amplitudes crescentes. A amplitude é definida como uma medida escalar, negativa e positiva, da magnitude de oscilação de uma onda, e o seu comprimento, como a distância entre dois valores máximos de amplitude.

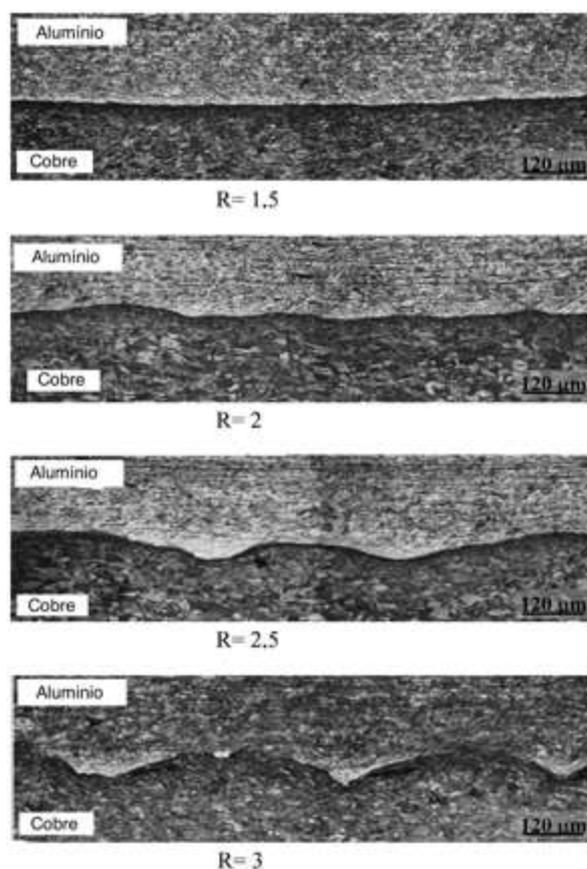


Figura 2.3: Efeito do aumento do rácio de explosivo na interface, (Gulenc, 2008).

### 2.3.2 Mecanismos de formação de onda

O aspecto mais importante na soldadura por explosão é a mecânica de formação de onda na interface. É este fenómeno que vai influenciar as características químicas e mecânicas da ligação. A representação esquemática dessa formação poderá ser observada na Figura 2.4, para uma configuração plana:

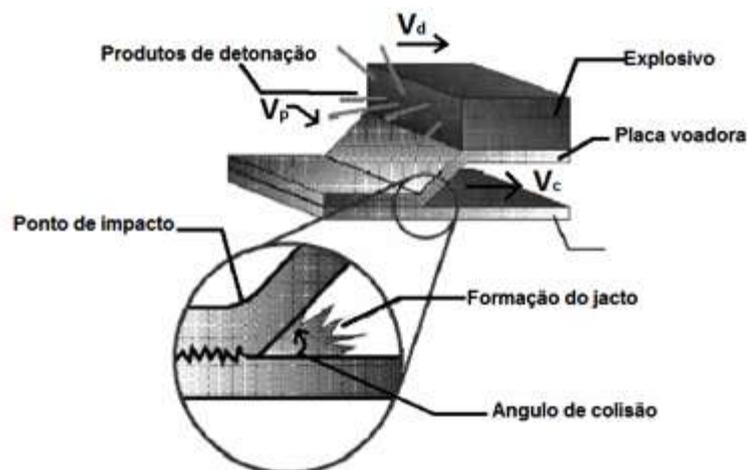


Figura 2.4: Soldadura por explosão, configuração plana, (Gulenc, 2008).

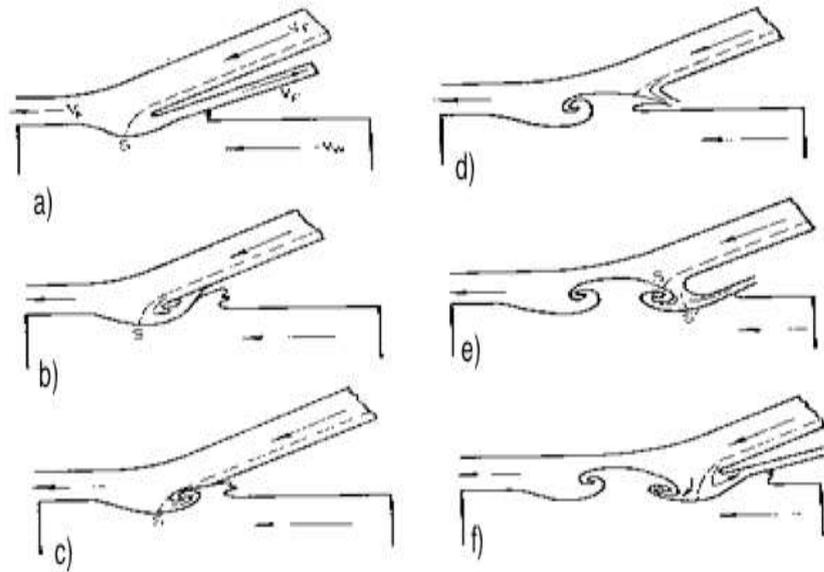
O explosivo é montado na face superior do *flyer*, a qual apresenta uma *STD* inicial em relação à placa estacionária adequada ao processo. A detonação é efectuada através de um detonador que, accionado através de uma descarga eléctrica, conduz à detonação e propagação contínua e uniforme ao longo de todo o explosivo. A propagação da detonação tem uma velocidade proporcional à quantidade de explosivo usado. Um aumento do rácio de explosivo conduz a um acréscimo da velocidade de detonação ( $V_d$ ), assim como da placa voadora  $V_p$  (Finfik, 2011). Ao detonar, os produtos provenientes da detonação exercem uma elevada pressão sobre a placa voadora, sendo esta pressão convertida em energia cinética, acelerando-a até a uma velocidade de impacto  $V_p$  contra a placa que se encontra em repouso. No momento do impacto, a nível do ponto de colisão, as superfícies metálicas são submetidas a deformação plástica local, já que a pressão exercida no momento do impacto é largamente superior à tensão de cedência plástica do material. Este fenómeno permite a remoção de uma fina camada superficial de cada uma das placas, sob a forma de um jacto, que tem a vantagem de eliminar possíveis impurezas presentes no material, deixando as superfícies completamente limpas para a conclusão da soldadura. Desse modo, é eliminada a susceptibilidade da possível contaminação, que poderia afectar marcadamente a resistência mecânica e propriedades químicas finais da interface. À medida que a limpeza é concluída, as superfícies metálicas são pressionadas entre si e ao nível atómico há uma redução global de energia, originando uma forte atracção, que resulta numa forte ligação entre os dois metais (Gulenc, 2008).

Durante muitos anos vários mecanismos de formação de onda na interface foram propostos. Apesar dos esforços, apenas foram obtidos resultados qualitativos e não quantitativos. Dentro da literatura existente podem encontrar-se quatro mecanismos possíveis:

- Mecanismo de indentação do jacto;
- Mecanismo de fluxo instável;
- Mecanismo turbulento;
- Mecanismo de tensão de ondas.

O mecanismo de indentação do jacto, proposto por Bahrani e Crossland (1966), Bergman et al. (1966) e Abrahamson (1961), descreve a forma da ondulação da interface como resultado da acção da indentação do jacto na placa base. Ao ser formado um jacto de entrada, é produzida uma saliência à frente do ponto de colisão constituída pelo material removido pela indentação. A continuidade do

processo é assegurada pela transposição da saliência formada e pela formação de um jacto de re-entrada. Segundo Bahrani et al. (1967), a formação de vórtices está relacionada com a interação entre o jacto de re-entrada e o material removido, proveniente do material (Mendes et al., 2012).



**Figura 2.5: Mecanismo de indentação do jacto.**

O mecanismo de fluxo instável, apresentado por Hunt et al. (1968), considera que o processo de formação de ondas na interface é um fenómeno hidrodinâmico semelhante àquele que se observa numa interface entre dois líquidos com diferentes velocidades horizontais, conhecido como instabilidade de kelvin-Helmholz. De acordo com Hunt et al. (1968) esta descontinuidade de velocidades ocorre entre a placa estacionária e o jacto de re-entrada. No entanto, Robinson et al. (1975) reportaram que a descontinuidade ocorre entre a placa estacionária e a saliência produzida pelo jacto. As instabilidades criadas durante o processo de formação de onda são resultado das oscilações provocadas durante a detonação. As flutuações no campo de pressões e temperatura do processo de detonação são transmitidas à placa voadora e atingem a interface de soldadura. O aumento de amplitude das oscilações no processo de detonação tende a ampliar as ondas previamente geradas pelos mecanismos acima descritos (Plaksin et al., 2003, Mendes et al., 2012). O mecanismo turbulento, sugerido por Reid (1974), explica que a ondulação é originada através de um mecanismo turbulento devido à existência de vórtices formados na presença de um ponto de estagnação (onde a velocidade do fluido é nula), os quais funcionam como obstáculo, uma vez atingido o ponto de equilíbrio. O funcionamento deste mecanismo pode ser mais facilmente compreendido através da Figura 2.6:

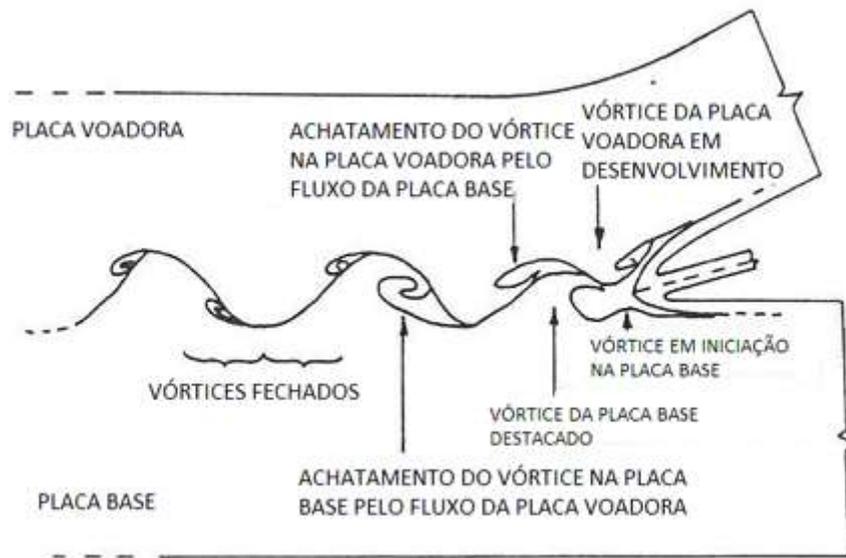


Figura 2.6: Mecanismo turbulento (El-Sobky, 1983).

Por último, temos o mecanismo de tensão de onda, proposto por El-Sobky e Blazyski (1975), que defende que a ondulação se deve a sucessivas interferências, provenientes das reflexões de onda, originadas na placa estacionária e na placa voadora (Mendes et al, 2012).

## 2.4 Critérios de soldabilidade

O processo de soldadura por explosivo pode ser dividido em três fases principais, (M. Ghomi, 2009):

1. Detonação do explosivo;
2. Aceleração e deformação da placa voadora (*flyer*);
3. Colisão entre as placas.

A primeira fase é responsável pela aceleração da placa voadora. A pressão imprimida pelos produtos de detonação e o tempo de contacto entre superfícies terão de ser suficientes para que se estabeleça uma ligação. Estas duas variáveis dependem da velocidade de detonação ( $V_d$ ). Um rácio de explosivo elevado irá corresponder a uma velocidade de detonação elevada. Quando o valor crítico é ultrapassado, irá originar um aumento da velocidade do *flyer*  $V_p$  assim como um aumento da velocidade de colisão  $V_c$ . Se estas duas velocidades ultrapassarem o limite estabelecido, o resultado poderá convergir numa má qualidade da interface. Isso ocorre devido à conversão da energia cinética da placa voadora, em energia térmica dando origem a uma área de fusão extensa composta por zonas intermetálicas (Crossland, 1982). Se o rácio de explosivo for demasiado elevado poderá mesmo não haver soldadura. A explicação para isso baseia-se no facto de os materiais poderem não ter estado em contacto o tempo suficiente para a ocorrência de ligação. A segunda fase do processo poderá ser controlada, não só pela primeira fase, mas também por um ajustamento da *STD* que deverá ser

escolhida em função da espessura do *flyer* a usar. Estudos de Durgutlu et al., (2007) revelaram que a *STD* deverá ter um valor igual ou superior a metade da espessura do *flyer*. Este investigador, após vários ensaios, concluiu ainda que com o aumento da *STD* se obtêm interfaces mais onduladas, com maior comprimento e amplitude e que, ao aumentar a distância entre placas, maior será a velocidade atingida pelo *flyer* ( $V_p$ ).

A terceira fase corresponde à colisão entre placas, altura em que se dá iniciação ao processo de formação de ondas na interface. Nesta fase, para além da transformação da energia cinética em energia de compressão, uma parte é convertida em energia criadora de fluxo na zona de deformação que posteriormente é convertida em calor. O aquecimento nesta zona é muito vantajoso, pois reduz o aumento de tensões de tracção durante a descarga prevenindo a destruição da junta (Deribas et al., 1967).

Witman (1973), Deribas (1967), Cowan (1963) e Szecket (1979) elaboraram, com base em resultados experimentais, um diagrama que define a gama de parâmetros adequados à obtenção de juntas soldadas com boa qualidade. Este diagrama, chamado janela de soldabilidade (*Welding Window*), permite o ajustamento dos vários parâmetros de soldadura de forma a adquirir resultados positivos. A janela de soldabilidade é composta por linhas direitas e curvas que definem limites de soldabilidade. Para desenhar este diagrama será necessário conhecer as características iniciais de soldadura (ângulo de colisão  $\beta$ , tipo de explosivo e características dos materiais). O resultado será semelhante ao traduzido pelo diagrama esquematizado na Figura 2.7:

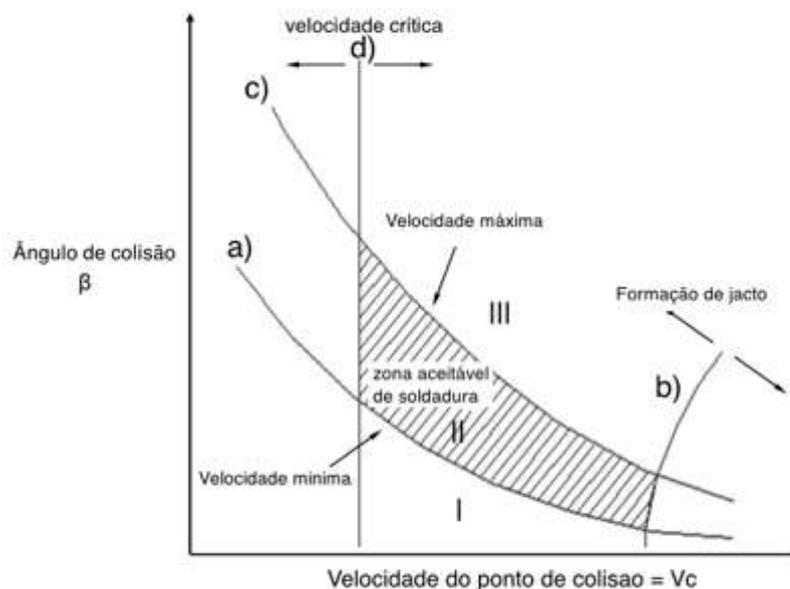


Figura 2.7: Típica janela de soldabilidade (Mendes et al., 2012).

A janela de soldabilidade é composta por três zonas principais: zona 1, 2 e 3. As soldaduras que se enquadram na zona 1 correspondem a soldaduras realizadas com velocidades de impacto insuficientes para que os metais se deformem plasticamente e a ligação ocorra. As soldaduras incluídas na zona 3 correspondem a soldaduras que foram submetidas a um excesso de fusão, o que pode provocar uma eventual formação de compostos intermetálicos que, segundo Gulenc (2008), poderão reduzir a resistência mecânica da soldadura. As soldaduras que apresentam boa qualidade

estão confinadas à zona 2. Esta zona é delimitada por 4 linhas: uma que limita a zona esquerda do gráfico, uma a zona direita, uma a zona superior e outra a zona inferior.

O limite a), limite inferior, representa a velocidade de impacto  $V_p$  mínima que o *flyer* deve possuir. A pressão a exercer no momento do impacto terá de ser superior à tensão limite de elasticidade dos materiais, de modo a promover a sua deformação plástica. O limite inferior é então consequência desta condição e é calculado através da equação 2.1, imposta por Zakharenko e Zlobin (1983), onde a velocidade mínima de colisão  $V_{c,min}$  é relacionada com a velocidade de impacto  $V_p$  através da equação 2.1 (Mendes et al., 2012),

$$V_{c,min} = \frac{K_1}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{H_v}{\rho}}, \quad (2.1)$$

onde ( $H_v$ ) é a dureza, à temperatura ambiente, da placa voadora expressa em vickers [ $N/m^2$ ],  $\rho$  a sua densidade [ $Kg/m^3$ ],  $\beta$  o ângulo de colisão e  $K_1$  um coeficiente adimensional de limpeza de superfícies que toma geralmente um valor de 0,6 para o caso de metais.

O limite imposto pela linha b) representa o ângulo crítico para a formação do jacto, sendo esta a condição mais importante imposta pela janela de soldabilidade que deve ocorrer ao longo do ponto de contacto de forma a remover impurezas e óxidos presentes nas camadas superficiais dos metais. Para que este ocorra,  $V_p$  e  $V_c$  deverão permanecer subsónicos. No entanto, é necessário praticar um ângulo mínimo para satisfazer a condição de pressão já referida no ponto anterior (Ghomi, 2009). O jacto ocorre se as soldaduras se situarem no lado esquerdo deste limite, que representa o ângulo crítico  $\beta_c$  para que o jacto ocorra. Abrahamson (1961), conseguiu relacionar o ângulo crítico  $\beta_c$  com a velocidade de colisão  $V_c$  (equação 2.2):

$$\beta = 10. (V_c - 5,5), \quad (2.2)$$

A linha c) representa a velocidade máxima limite para a velocidade de impacto  $V_p$ . De forma grosseira, este limite previne a existência de um excesso de fusão no decorrer do processo, limitando drasticamente as propriedades mecânicas da junta. Esta curva, descrita por Witman (1973), é obtida usando a equação 2.3, que traduz uma condição de solidificação na zona de fusão à medida que a ondulação chega a zona soldada:

$$V_p = \frac{1}{N} \cdot \frac{(T_m \cdot C_0)^{\frac{1}{2}}}{V_c} \cdot \left( \frac{K \cdot C_p \cdot C_0}{\rho \cdot h} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.3)$$

$N$  é um valor adimensional atribuído aos metais,  $T_m$  e  $C_0$  correspondem, respectivamente, à temperatura de fusão e à velocidade de propagação do som no material,  $K$  é a conductibilidade térmica expressa em [ $W/m.K$ ],  $C_p$  é o calor específico,  $\rho$  é a densidade e  $h$  a espessura característica do *flyer*. A velocidade do *flyer* pode ser calculada por outro modelo, descrito por Gurney (1943), que enuncia que a aceleração da placa voadora é perpendicular à direcção de propagação da detonação, usando uma energia específica com valor característico para cada tipo de explosivo (Gurney energy). Depois de várias reconstruções deste modelo, Kennedy (1972), reformulou o método tendo em conta a configuração geométrica e apresentou uma nova equação para o cálculo da velocidade do *flyer*  $V_p$  numa configuração paralela, traduzida pela equação 2.4

$$V_{pGurney} = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{3}{1+5\left(\frac{M}{C}\right)+4\left(\frac{M^2}{C^2}\right)}}, \quad (2.4)$$

em que  $V_{pGurney}$  é a velocidade do *flyer*,  $\sqrt{2E}$  é a energia de Gurney que difere de explosivo para explosivo, e é aproximadamente cerca de 60% do calor obtido,  $\Delta H$ , pela explosão (Kennedy et al., 1998).  $M$  é a massa da placa voadora,  $C$  é a massa de explosivo.

Uma vez que  $V_p$  e  $V_d$  são conhecidas, poderemos assim calcular o ângulo de colisão  $\beta$  entre placas através da equação 2.5 (Findik, 2011):

$$V_p = 2.V_d \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (2.5)$$

Por último tem-se a linha d) à esquerda do diagrama, que corresponde ao valor mínimo que a velocidade de colisão deve apresentar. Este valor representa uma transição entre uma interface com ondulação e uma sem ondulação (se se situar abaixo deste valor mínimo). Cowan, (1971) definiu este limite de acordo com a hipótese hidrodinâmica pela relação 2.6

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{V^2}{2} \cdot \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{(Hv_1 + Hv_2)} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow V_{c,tr} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \text{Re} \cdot (Hv_1 + Hv_2)}{\rho_1 + \rho_2}}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Esta equação depende do número de Reynolds (Re), que assume valores desde 8,0 a 13,0, das densidades dos materiais ( $\rho$ ) e respectivas durezas expressas em  $[\text{N}/\text{m}^2]$ .

## 2.5 Enquadramento de soldaduras no diagrama

Uma vez construída a janela de soldabilidade, a maneira de enquadrar as soldaduras no diagrama passa por estimar três parâmetros principais:

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

### 2.5.1 Velocidade de impacto $V_p$

Para obter a velocidade final do *flyer* será necessário proceder a um processo de calibração. Uma vez determinado  $V_{pGurney}$  (equação 2.4), poderá determinar-se  $V_p(t)$  através da equação 2.7 proposta por Chou e Flis (1986), que dá a evolução da velocidade de impacto em função do tempo:

$$V_p(t) = V_{pGurney} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right], \quad (2.7)$$

onde  $V_{pGurney}$  é o valor obtido da equação 2.4 e  $\tau$  uma constante de tempo que pode ser obtida pela equação 2.8, (Chou et al., 1983), em que  $M$  é a massa do *flyer*,  $P_{cj}$  a pressão de Chapman-Jouguet produzida pelos produtos de detonação e  $C_1$  e  $C_2$  constantes empíricas. Estas constantes são calibradas para que a placa voadora sofra uma aceleração até atingir uma velocidade da ordem de 80% de  $V_{pGurney}$  ( $V_{pcal} = 0,8 \times V_{pGurney}$ ). O processo de aceleração da placa voadora ocorre, tipicamente, até a onda de choque, gerada pela onda de detonação, sofrer oito reflexões no interior da placa voadora.

$$\tau = C_1 \cdot \frac{M \cdot V_{pGurney}}{P_{cj}} + C_2, \quad (2.8)$$

O tempo requerido para que o *flyer* atinja  $V_{pcal}$ ,  $t_{vcal}$  é determinado tendo em conta que a onda de choque se move no interior da placa voadora (metálica) à velocidade do som neste material. No caso do cobre  $C_b$  tem valor de 4,74 mm/ $\mu$ s (Findik, 2011). De forma grosseira,  $C_1$  e  $C_2$  são escolhidos de modo a que a velocidade do *flyer* assuma o valor de  $V_{pcal}$  no tempo  $t_{vcal}$  após as oito reflexões (Mendes et al., 2012). Depois de obtida a evolução de  $V_p(t)$  e recorrendo a uma integração desta função, obtemos a distância percorrida pelo *flyer* em função do tempo decorrido:

$$X_p(t) = V_{pGurney} \left[ t - t_0 + \tau \left( \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) - 1 \right) \right], \quad (2.9)$$

Igualando esta expressão ao valor da distância inicial entre placas (*stand-off-distance*), obtem-se a velocidade do *flyer* no momento do impacto  $V_p$ .

### 2.5.2 Velocidade de detonação $V_d$

A velocidade de detonação é medida através de um método cronográfico. Este método é constituído por sondas que emitem sinais eléctricos e por um osciloscópio onde estes são registados. O osciloscópio é um componente electrónico que fornece uma base de tempo onde os sinais eléctricos são apresentados. Esta base de tempo é representada num padrão quadriculado onde cada quadrícula corresponde a um intervalo de tempo de 5  $\mu$ s. Os sinais gerados pelas sondas são transportados através de um circuito eléctrico e enviados para o osciloscópio. Deste modo consegue-se obter os intervalos de

tempo em que os sinais ocorrem. As sondas onde são gerados os impulsos eléctricos estão inseridas num circuito, semelhante ao representado na Figura 2.8:

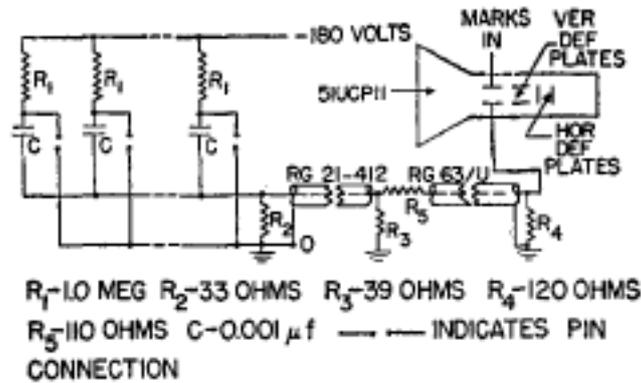


Figura 2.8: Esquema do circuito eléctrico para a medição da velocidade de detonação, (Campbell et al, 1956).

O circuito eléctrico é constituído por uma rede de condensadores e resistências, que enviam impulsos eléctricos para o cronógrafo, indicando a chegada da onda de detonação para as várias posições das sondas ao longo do explosivo. Os condensadores são carregados através de resistências e, quando a onda de detonação provoca a ionização de uma sonda, o condensador faz uma descarga para um cabo de sinal, produzindo um impulso. Para evitar reflexões de sinal para a extremidade inicial do cabo, devido a um defeito da ligação, é montada uma impedância para prevenir erros de medição (Campbell et al, 1956). Logo, se ao montar as sondas regularmente espaçadas entre si e se obtiver a leitura do intervalo de tempo em que cada sonda é ionizada, consegue-se então obter o valor da velocidade de detonação. Esta aplicação é, portanto, uma medida da distância percorrida pela onda de detonação em função do tempo decorrido entre dois impulsos eléctricos.

### 2.5.3 Ângulo de colisão $\beta$

O ângulo de colisão  $\beta$  é um parâmetro fácil de determinar a partir da velocidade de impacto ( $V_p$ ) e da velocidade de detonação ( $V_d$ ) usando a equação 2.5. Uma vez que  $V_d = V_c$  e na janela de soldabilidade se tem a velocidade de colisão ( $V_c$ ), no eixo das abcissas, e o ângulo de colisão ( $\beta$ ), no eixo das ordenadas, consegue-se então enquadrar a soldadura em questão no diagrama.

## 2.6 Propriedades típicas de soldadura

As propriedades mecânicas de uma soldadura por explosão dependem das condições iniciais de cada ensaio. Após várias experiências, Ben-Artzy et al. (2010), Broeckhove (2010),

Mousavi et al. (2009) e Durgutlu et al. (2008), verificaram que para uma soldadura se enquadrar dentro do diagrama apresentado na secção anterior e apresentar qualidades mecânicas aceitáveis, não deverão ser ultrapassados os limites dos seguintes parâmetros:

- Ângulo de colisão  $\beta$ : este ângulo é formado no momento do impacto e deverá estar compreendido entre  $3^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ ;
- Velocidade de colisão ( $V_c$ ): este parâmetro é controlado pela velocidade de detonação  $V_d$ , ou seja, depende do tipo de explosivo escolhido. Dado que a velocidade de colisão terá de ser inferior à velocidade sónica de ambos os materiais, então poderá variar de 1500 a 3000 m/s, (Ben-Artzy et al., 2010);
- Velocidade do *flyer* ( $V_p$ ): é uma correlação entre o ângulo de impacto e a velocidade de colisão, onde  $V_p = V_c \times \sin(\beta)$ , (Mousavi et al., 2009). A velocidade recomendada deverá estar compreendida entre os 250 a 500 m/s;
- *Stand-off-distance* (*STD*): experiências demonstram que a *STD* poderá ir de um valor igual a metade da espessura do *flyer* até três vezes a espessura deste, ou seja,  $0,5t \leq STD \leq 3t$ , onde  $t$  é a espessura do *flyer* e *STD* o *stand-off-distance*, (Durgutlu et al., 2008).

Conforme já mencionado, a interface de soldadura pode mudar de uma geometria linear para uma geometria ondulada. Esta transição pode ser explicada pelo aumento do rácio de explosivo: quanto maior a quantidade de explosivo usado, maior será a pressão induzida pelos produtos de detonação, conseguindo uma maior aceleração do *flyer* e uma maior deformação das placas. A obtenção de uma interface ondulada poderá também estar relacionada com a variação da *STD*; ao aumentar o valor deste parâmetro aumenta também o tempo disponível para o *flyer* atingir maiores velocidades até ao momento do embate. Ao aumentar progressivamente a velocidade de impacto, as ondas da interface tendem a aumentar de comprimento e amplitude, ganhar vórtices e adquirir zonas fundidas, criando bolsas, que são constituídas por ambos os materiais, podendo apresentar compostos intermetálicos. A Figura 2.9 mostra a geometria típica de uma bolsa criada durante a formação de onda.

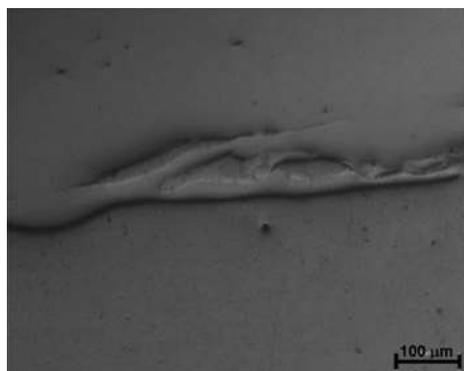


Figura 2.9: Interface bimetalica, análise SEM (Acarer, 2011).

Os compostos intermetálicos agrupam-se em zonas bifásicas frágeis que podem diminuir a ductilidade e causar o aparecimento de fissuras ao longo da interface, limitando grandemente a capacidade de

carga da soldadura. Estas bolsas poderão também ser dúcteis, se a combinação dos materiais formar soluções sólidas. No caso de soldaduras alumínio-cobre, as zonas intermetálicas são uma mistura de cobre e alumínio que normalmente apresentam fases como  $\text{CuAl}$  e  $\text{CuAl}_2$  (Acarer, 2011).

A obtenção controlada de ondas na interface pode também beneficiar as propriedades mecânicas, aumentar a área total de superfície soldada e envolver a destruição de eventuais contaminantes e películas de óxidos (Verstraete et al., 2011).

Analogamente, a dureza também está relacionada com o rácio de explosivo usado, Gulenc (2006). A Figura 2.10 ilustra a variação de dureza com a distância à interface, no caso de soldaduras Al-Cu, realizadas com diversos rácios de explosivo.

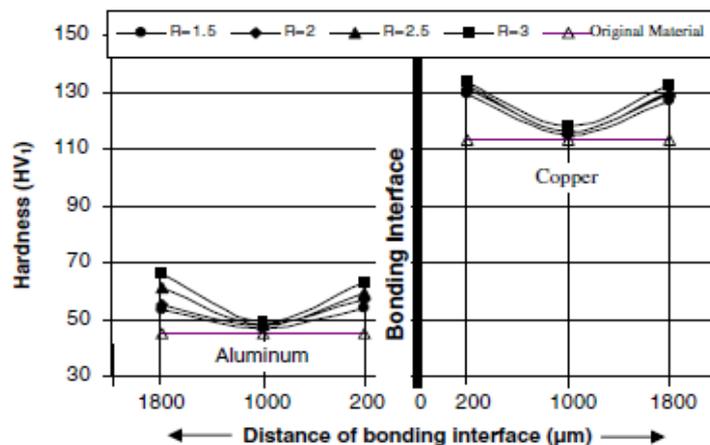


Figura 2.10: Durezas típicas de uma soldadura alumínio-cobre (Gulenc, 2006).

Como se pode inferir, a dureza toma valores mais elevados em zonas próximas da interface e em zonas próximas do bordo das placas. À medida que se aumenta o rácio de explosivo, maiores foram os valores de dureza registados nessas zonas. De acordo com este investigador, este facto deve-se ao aumento brusco de deformação plástica no decorrer da detonação. A dureza medida nas zonas de bordo das placas pode ser explicada pela deformação provocada pelo impacto da placa base com o bloco de apoio, no caso do cobre, e pela deformação provocada pelo choque de detonação no *flyer*, no caso do alumínio.

Relativamente à resistência mecânica, verifica-se igualmente a mesma evolução em relação ao rácio de explosivo utilizado. O mesmo acontece com a variação da *STD*. Durgutlu et al. (2005) testaram a resistência mecânica de acordo com a norma ASTM D 3165-95 de soldaduras obtidas em cobre/aço inoxidável com dimensões 200 mm x 200 mm x 1,5 mm e 200 mm x 200 mm x 2 mm, respectivamente, para o *flyer* e placa base, para rácios de explosivo desde  $1,5 \leq R \leq 2,5$ , com variação de *stand-off-distance* de  $0,5t \leq STD \leq 3t$ . Esses resultados estão representados na Figura 2.11:

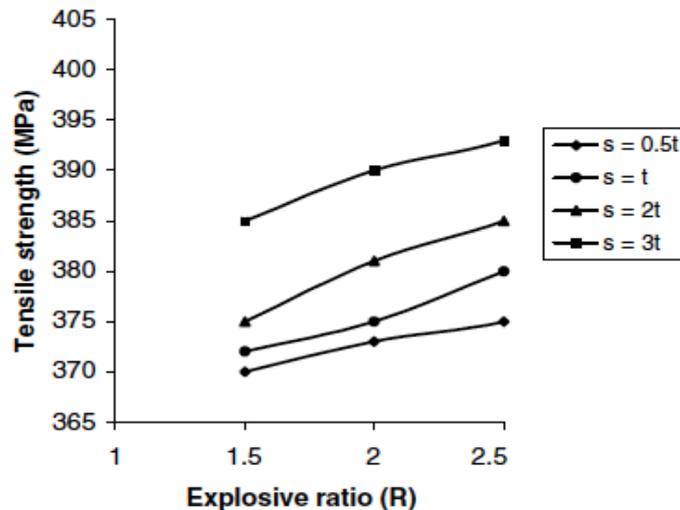


Figura 2.11: Evolução da resistência mecânica com o rácio de explosivo (Durgutlu et al. 2005).

Estes investigadores constataram que durante o ensaio de tracção a rotura sempre ocorreu na placa de cobre, numa zona afastada da interface. Os resultados demonstraram que a resistência mecânica era superior para rácios mais elevados, o que se explica pelo aumento da deformação plástica. Também se verificou uma subida da resistência mecânica com o aumento da *STD*, por exemplo, para um rácio fixo de  $R = 2,5$ , a resistência para um  $STD = 0,5t$  foi de 375 MPa, enquanto que para um  $STD = 3t$  foi de 398 Mpa (Durgutlu et al. 2005).

## 2.7 Aplicações, vantagens e limitações do processo

Durante a década de 50 esta técnica de soldadura por explosão foi abordada apenas a nível laboratorial. A prática comum deste método de soldadura chegou à indústria a partir de 1960, após ter sido patenteado. Inicialmente, despertou a curiosidade das indústrias química, aeroespacial e nuclear. O principal interesse do uso deste processo era a possibilidade de juntar diferentes materiais sem prejudicar as suas propriedades físicas e químicas, o que não era possível com outros processos, (Denyachenko et al., 1978). Actualmente, este processo apresenta diversas vantagens em relação a outros tipos de soldadura, (Findick, 2011):

- Possibilidade de junção de diferentes materiais;
- Aquisição de uma soldadura de boa qualidade;
- Obtenção de grandes áreas soldadas;
- Economia do processo;
- Capacidade de ser accionado por controlo remoto;
- Realização de soldaduras em condições ambientais diversas.

Para além destas, podem ainda apontar-se outras vantagens:

- Simplicidade do processo;
- Inexistência de limitação relativamente à área a usar;
- Possibilidade de soldar chapas com diferentes espessuras;
- Uso de pequena quantidade de explosivo.

Contudo, existem também limitações associadas a este método, tais como:

- Necessidade de metais com propriedades adequadas, nomeadamente ductilidade e resistência ao impacto, de modo a absorver o choque de detonação sem que ocorra fractura;
- Exigência de cuidados especiais por parte do operador, devido a elevada perturbação sonora provocada pela explosão;
- Interdição do uso de explosivos em zonas industriais, devido à pressão sonora e vibrações causadas pela explosão;
- O uso de geometrias simples, tomando como referência a geometria plana, cilíndrica ou cónica.

## 2.8 Combinações possíveis

No âmbito da engenharia, a soldadura por explosão tornou-se numa solução viável para o revestimento de metais com diferentes materiais, de forma a protegê-los da corrosão e a aumentar a sua durabilidade. Na Figura 2.12 podem-se observar as combinações possíveis que se podem efectuar com este método:

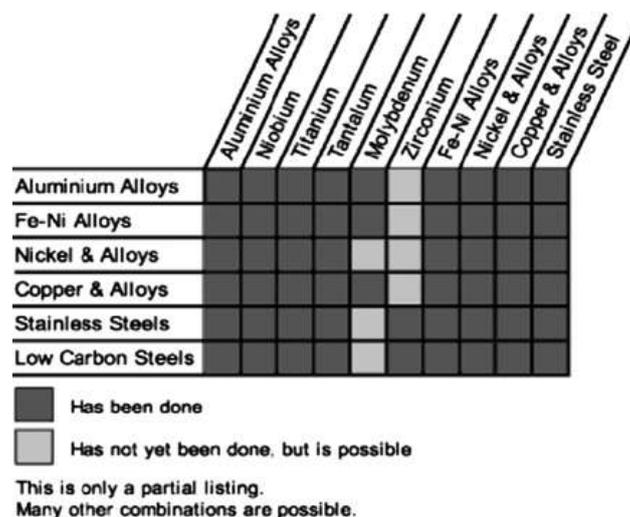


Figura 2.12: Combinações possíveis, (Findick, 2011).

## 2.9 Actual aplicação industrial

O processo de soldadura por explosão, sendo usado em maioria para fins de revestimento, tem utilidade em áreas como, (Findick, 2011):

- produção de reactores nucleares;
- permutadores de calor;
- construção naval;
- transformadores eléctricos;
- fuselagem de aviões;
- juntas sobrepostas.

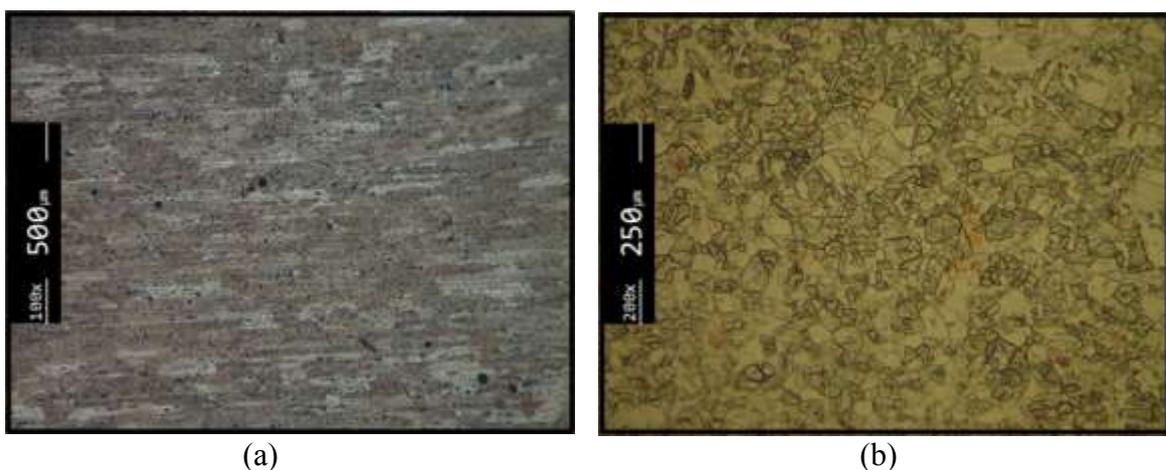
### 3 ACTIVIDADE EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais base

Para a realização das soldaduras foram usadas placas de cobre DHP e alumínio ASTM 6082 T6 como materiais base. O cobre DHP conhecido como cobre desoxidado, apresenta considerável teor em fosforo e possui um tamanho de grão médio de 31,40  $\mu\text{m}$ . Por sua vez, a liga de alumínio ASTM 6082 T6 é considerada, dentro da sua classe, a liga com maior resistência mecânica apresentando boa resistência à corrosão e boa tenacidade. As placas de alumínio foram escolhidas para assumir o papel de placa estacionária (*parent plate*), enquanto o papel de placa voadora (*flyer*) foi desempenhado pelas placas de cobre pois o objectivo era estabelecer uma ligação do cobre ao alumínio. Usaram-se dimensões de 120 x 95 x 1 mm para as placas de cobre e para o alumínio 120 x 95 x 3 mm. A espessura mais elevada foi escolhida com o objectivo de suportar o impacto da placa voadora, sem deformação excessiva. A morfologia e composição química dos materiais são apresentadas na Figura 3.1 e Tabela 3.1 respectivamente:

Tabela 3.1: Composição química dos metais usados %Wt.

Composição química	% Al	% Cu	% Fe	% Si	% Mg	% Cr	% Zn	% Ti	% P	% Mn	% Outros
Cobre DHP	-	99,9	-	-	-	-	-	-	0,04	-	0,06
Alumínio 6082	restante	0,1	0,5	0,7-1,3	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	-	0,4-1	0,05-0,15



(a) (b)  
Figura 3.1: Microestrutura das chapas de: a) alumínio; b) cobre.

### 3.2 Preparação dos ensaios

Na preparação dos ensaios, todas as placas foram cuidadosamente cortadas, limpas e polidas com lixas P320 na direcção de laminagem, para impedir a presença de sujidade e impurezas na interface de ligação durante o processo de soldadura. A montagem e a execução dos ensaios foram realizadas no laboratório de energia e detónica (LEDAP), em Condeixa. Nos ensaios foram utilizados três tipos de explosivos: ANFO, emulsão explosiva (*Eex*) e cordão detonante (CD). A escolha da *Eex* foi motivada pelo estudo da influência deste tipo de explosivo nas ligações de Cu a Al, uma vez que estas, na literatura existente, foram realizadas em maior parte com ANFO. O CD foi usado apenas no primeiro ensaio. Este explosivo possui um núcleo de pentrite PETN (Pentaerythritol tetranitrate) protegido por uma série de camadas à base de fibras de polipropileno, sendo coberto externamente por uma camada extrudada de policloreto de vinil (PVC). Caracteristicamente é flexível, resistente à água e possui alguma resistência mecânica, o que facilita a sua manobrabilidade e utilização. O CD utilizado tem 15 g/m de PETN, apresenta uma densidade da ordem de 780 Kg/m<sup>3</sup>, um diâmetro exterior de 5,7 mm e velocidades típicas de 7000 m/s. Neste ensaio, não foi necessário medir a velocidade de detonação, uma vez que esta não sofre variações bruscas durante a detonação. Além disso, foi o ensaio que requereu a preparação mais simples no que toca a rapidez e execução, conforme se pode observar na Figura 3.2:



Figura 3.2: Montagem da configuração plana, soldadura EW1.

O CD foi colocado na face superior da placa de cobre e esta por sua vez foi colocada com a sua face inferior sobre a placa de alumínio, separadas por uma *STD* de 1,35 mm. A detonação do cordão foi provocada através de um detonador, accionado por uma descarga eléctrica. Como suporte à placa de alumínio, foi usada uma base de aço com espessura de 50 mm, para assegurar a rigidez necessária para que a ligação ocorresse. Para impedir que o *flyer* de cobre chocasse contra a base de aço, usou-se entre estes uma placa de aço inoxidável.

Para as restantes soldaduras foi necessária uma preparação mais cuidadosa. Foram preparadas caixas de cartão para inserir o explosivo, apresentando secção quadrada e rectangular, sendo montadas na face superior das placas de cobre. A configuração da junta usada nestas soldaduras foi semelhante à geometria da Figura 3.2, como se pode observar na Figura 3.3:

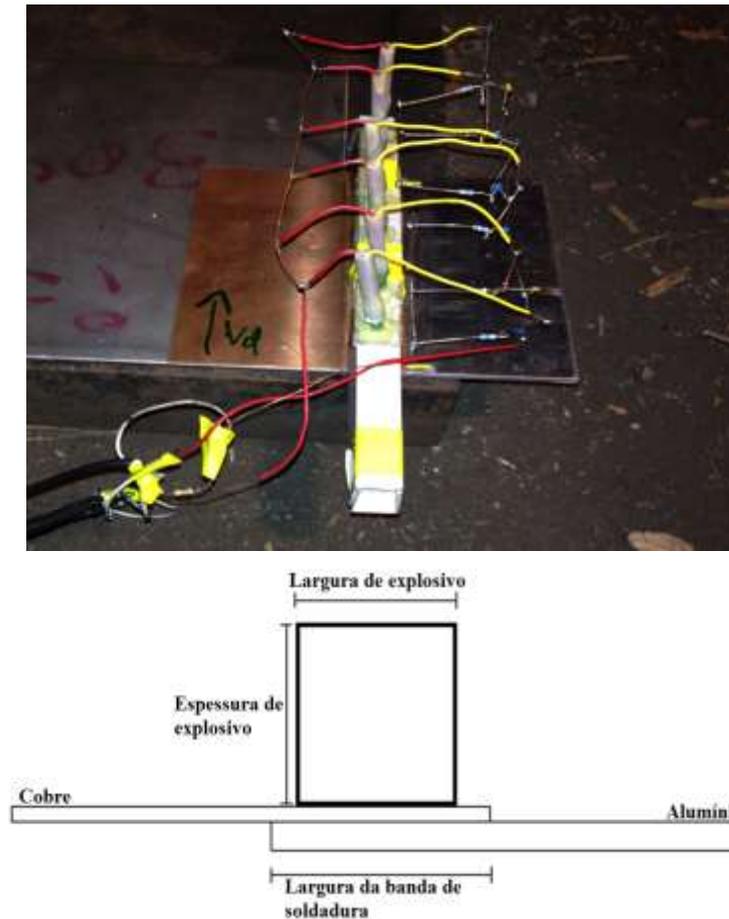


Figura 3.3: Configuração plana, soldadura EW2.

Os explosivos escolhidos para estes ensaios foram o ANFO e a *Eex*. O ANFO era constituído por nitrato de amónio granulado e 6% de fuel oil. Por sua vez, a emulsão (*Eex*) era constituída por uma matriz de nitrato de amónio, água, óleos e emulsionantes. Posteriormente, a *Eex*, nuns ensaios, foi sensibilizada com micro esferas ocas de vidro (MEOV) numa proporção de 15%, enquanto noutros foi sensibilizada com poliestireno expandido (EPS) numa proporção de 1,2% em peso. A Figura 3.4 mostra a morfologia do EPS, com esferas de diâmetro 1,25 mm, ao contrário das MEOV, que têm diâmetro médio de 40  $\mu\text{m}$ .

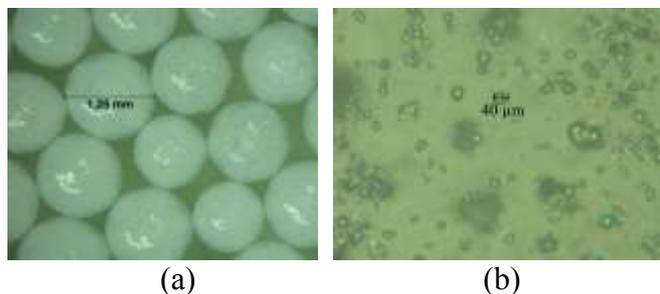


Figura 3.4: (a) EPS; (b) Aglomerados de MEOV.

Como *stand-off-distance*, foram usados espaçadores de 1,35 em cada vértice da face inferior das placas de cobre.

### 3.3 Velocidade de detonação $V_d$

Para obter as velocidades de detonação, foi usado um método cronográfico, conforme já descrito na secção 2.5.2. Foram montadas 6 sondas de ionização em cada ensaio, sendo cada uma destas constituída por um tubo de aço com 0,8 mm de diâmetro, dois fios de cobre revestidos, dois fios condutores, um díodo semiconductor, uma resistência e um condensador. Os fios de cobre foram soldados aos fios condutores e entrelaçados entre si, sendo de seguida inseridos no tubo de aço. Uma das pontas foi soldada ao cátodo do díodo, ficando o ânodo ligado em paralelo com a resistência e o condensador. A outra extremidade do fio de cobre foi soldada a um outro fio condutor e este ligado às restantes sondas. Todas as sondas foram postas em contacto com o explosivo através do tubo de aço e fixas na caixa de cartão. Posteriormente a esta montagem, foi estabelecida a ligação das resistências a uma tensão de 16 volt, e dos condensadores ao cabo de sinal do osciloscópio digital de forma a obter os sinais eléctricos indicando a chegada da onda de detonação. No osciloscópio foi possível ver o intervalo de tempo em que cada sinal ocorreu, devido ao curto-circuito estabelecido entre o tubo de aço e o fio condutor e que foi provocado pela onda de detonação. Sabendo o tempo entre os sinais ocorridos e as distâncias entre sondas, obteve-se então a velocidade de detonação de cada explosivo utilizado.

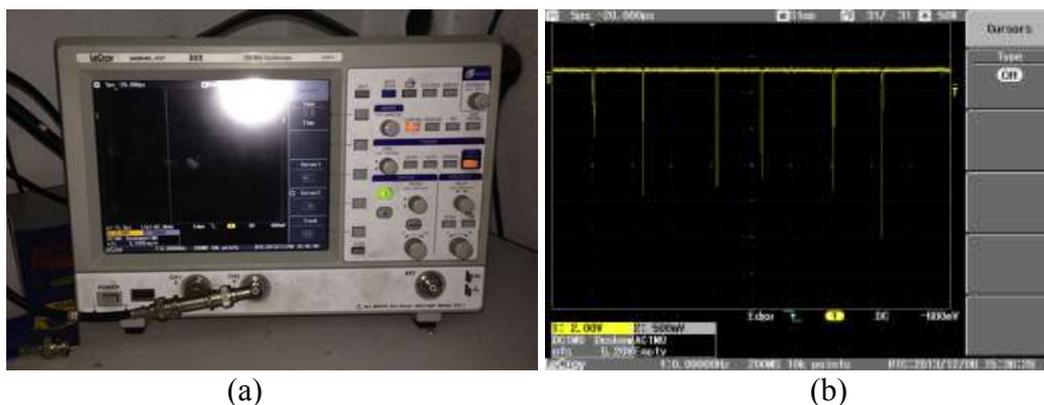


Figura 3.5: (a) osciloscópio digital; (b) medições realizadas para o ensaio EW5.

### 3.4 Parâmetros de soldadura

Os parâmetros de soldadura foram escolhidos com objectivo de comparar todas as soldaduras realizadas com *flyer* de 1 mm, resultantes das teses de mestrado de Dias (2012) e de Santos (2013), revelando a influência do rácio e do tipo de explosivo usado na interface de ligação. Os materiais usados nestes ensaios foram o cobre DHP e alumínio AA 5083. Os parâmetros utilizados nos ensaios anteriores estão indicados no Anexo 1, enquanto os usados nos ensaios actuais na Tabela 3.2. Há ainda uma diferença básica entre as geometrias de provete anteriores e a actual; nas anteriores a chapa de cobre de 1 mm de espessura foi soldada a chapas de alumínio com 30 mm de espessura, ao contrário da geometria actual, conforme referido acima.

Tabela 3.2: Parâmetros de soldadura actuais.

	Novas Soldaduras						
Parâmetros de ensaio	EW1	EW2	EW3	EW4	EW5	EW6	EW7
Tipo de explosivo	CD	Eex + 15% MEOV	ANFO	ANFO	Eex + 15% MEOV	Eex + 1,2% EPS	Eex + 1,2% EPS
Dimensões de explosivo (mm <sup>3</sup> )	3392,9	15x20x120	15x20x120	20x25x120	20x25x120	25x30x120	25x40x120
Densidade de explosivo (kg/m <sup>3</sup> )	780	740	800	800	762	900	959
Massa de explosivo (g)	2,4	26,64	29,6	49,4	45,7	81	115,08
Espessura do flyer (mm)	1	1	1	1	1	1	1
Densidade do flyer (kg/m <sup>3</sup> )	8924	8924	8924	8924	8924	8924	8924
Massa do flyer (g)	6,1	26,77	26,77	32,12	22,43	37,48	37,48
Rácio de explosivo	0,39	1	1,1	1,5	2,1	2,1	3,1
STD (mm)	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
Base	Aço	Aço	Aço	Aço	Aço/areia	Aço/areia	Aço/areia

### 3.5 Nomenclatura das amostras:

As amostras foram cortadas numa guilhotina, com uma espessura alternada entre 10 e 20 mm, dando um total de 8 amostras por ensaio, sendo três usadas para metalografia e outras três para ensaios mecânicos. A Figura 3.6 ilustra o modo de extracção dos provetes.



Figura 3.6: Corte e identificação das amostras.

Na designação das amostras tem a forma EW<sub>x</sub>\_xx\_x, onde EW é uma abreviatura para *Explosive Welding*, o primeiro algarismo representa o número do ensaio, os dois algarismos seguintes representam a espessura em mm de explosivo usado, e o último algarismo corresponde ao número da amostra. A amostra EW5\_25\_1 corresponde ao ensaio número 5, em que se usou 25 mm de espessura de explosivo e o número 1 corresponde à zona onde se iniciou a soldadura, ou seja, o último algarismo da nomenclatura tem ordem crescente na direcção da detonação.

## 3.6 Metalografia

### 3.6.1 Preparação metalográfica

Foram preparadas amostras correspondentes às zonas de início, meio e fim de cada soldadura. Cada amostra foi inserida num molde de resina epoxi, polida inicialmente com lixa P180, e depois sucessivamente com lixas P320, P600, P1000 e P2500 grãos por polegada linear. Para obter o acabamento espelhado, poliu-se cada amostra com uma solução de pó de diamante, com 3  $\mu\text{m}$  de diâmetro, acompanhada de lubrificação, para impedir o aquecimento da amostra e reduzir o atrito no pano.

### 3.6.2 Ataque químico

Para evidenciar as fronteiras de grão e morfologias da interface, efectuou-se um ataque químico do lado do cobre com uma solução de 5 ml de peróxido de hidrogénio a 30% misturada com 25 ml de hidróxido de amónio a 25%. O ataque ao alumínio foi realizado com o reagente “poulton”, cuja solução continha: 6 ml de ácido clorídrico (HCl), 9 ml de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), 0,5 ml de ácido fluorídrico (HF), 6,5 ml de água (H<sub>2</sub>O) e 1 ml de trióxido de crómio (CrO<sub>3</sub>). O ataque das amostras foi feito por imersão, sendo cada uma colocada duas vezes em contacto com a referida solução por 15 segundos, dando um tempo total de exposição de 30 segundos. De seguida, as amostras foram lavadas em água, álcool e secas com ar quente.

### 3.6.3 Análise química

A análise da microestrutura foi efectuada com a ajuda de um microscópio electrónico de varrimento (*SEM*), acoplado a um sistema de microanálise de energia dispersiva de raio-X (*EDS*). Foi possível fixar alguns pontos e analisar quimicamente alguns dos compostos intermetálicos presentes.

## 3.7 Análise mecânica

### 3.7.1 Dureza

Os ensaios de micro-dureza foram realizados com a ajuda de uma máquina *Shimadzu Micro Hardness Tester-Type M*. Foram feitas medições de dureza em todas as amostras segundo uma linha transversal à interface, com distância de separação entre indentações de 250  $\mu\text{m}$ , atravessando integralmente toda a ligação de cobre-alumínio. Em cada indentações usou-se uma carga de 200 gf durante 15 segundos, à excepção dos ensaios nos compostos intermetálicos, em que a carga usada foi de 25 gf, de modo a amostrar apenas a zona referida. Foram também feitas indentações segundo uma linha transversal à velocidade de detonação, efectuadas a meia espessura em ambos os materiais. Estas indentações foram realizadas desde a zona central da banda de soldadura até uma distância de 30 mm desta. A Figura 3.7 representa um esquema dos locais das medições.

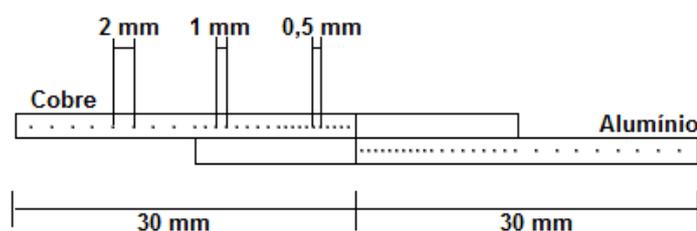


Figura 3.7: Representação esquemática das indentações.

### 3.7.2 Resistência ao corte

Os ensaios de tracção foram realizados através da máquina *Shimadzu*. Esta tem a possibilidade de traccionar provetes até uma carga máxima de 5000 N. Os provetes concebidos para este tipo de ensaio serviram para testar a resistência da ligação em solitação de corte. Através do programa *ARAMIS* foi possível obter as curvas da força em função do deslocamento e do tempo. Houve também a possibilidade de extrair curvas da força em função da deformação em alguns pontos ao longo de cada provete, por forma a identificar a zona onde ocorreu deformação máxima. Das soldaduras obtidas apenas se analisaram provetes provenientes das soldaduras EW2, EW5 e EW6 em zonas onde o processo se considerou estabilizado. O Apêndice A mostra a zona onde foram retirados os provetes. Estes foram maquinados no lado do alumínio para que a sua espessura fosse semelhante à do cobre. O seu desenho encontra-se no Apêndice B.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Janela de soldabilidade

Durante os ensaios, das soldaduras realizadas em trabalhos anteriores e das novas soldaduras, foram registados os valores de espaço e tempo necessários ao cálculo da velocidade de detonação. Estes estão representados no Anexo 2 e na Tabela 4.1:

**Tabela 4.1: Velocidades de detonação das novas soldaduras.**

Novas Soldaduras										
	EW1		EW2		EW5		EW6		EW7	
	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)
	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-
	-	-	20,24	6,08	19,30	5,88	18,48	8,46	-	-
	-	-	49,96	15,80	49,98	14,00	48,74	21,76	-	-
	-	-	70,08	21,84	69,12	20,08	68,24	32,06	-	-
	-	-	100	30,38	99,72	29,10	99,02	-	-	-
	-	-	120,2	36,72	119,7 2	34,94	117,64	-	-	-
<b>Vd (m/s)</b>	7000		3275		3430		2121		2271	

Os sinais foram gerados em todos os ensaios, à excepção do ensaio EW1 em que se usou CD. Para este tipo de explosivo não foi necessário medir a velocidade de detonação, uma vez que apresenta valores constantes durante todo o processo. Para a soldadura EW6, dado ter apresentado velocidade bastante inferior, só se registaram 4 sinais. Para tal contribuiu a banda de tempo escolhida para o ensaio, a qual foi insuficiente para obter um registo completo. Não se conseguiu registar nenhum sinal relativo ao ensaio EW7, devido a uma falha experimental. Por esse motivo considerou-se incrementar 150 m/s ao valor da velocidade obtida do ensaio EW6, uma vez que o rácio de explosivo foi superior. Após a obtenção destes valores, estão reunidas as condições necessárias para o cálculo da velocidade de impacto  $V_p$ . Os valores das constantes utilizadas nos cálculos necessários à definição da janela de soldabilidade estão indicados no Apêndice C.

Pela Figura 3.3, mostrada na secção anterior, pode observar-se que a área ocupada pelo explosivo é inferior à área de superfície do *flyer*, o que significa que  $V_p$  não foi constante em toda a sua superfície. Logo, a área da superfície do *flyer* afectada pelo explosivo foi quantificada como sendo o produto de toda a largura da banda de soldadura obtida pelo comprimento do *flyer*. É este valor que irá ser considerado nos cálculos analíticos. Na Tabela 4.2 são apresentados os tipos de explosivos usados, as suas dimensões e as larguras obtidas das bandas de soldadura.

Tabela 4.2: Caracterização do explosivo e dimensões da banda de soldadura.

Ensaio	Tipo de explosivo	Largura (mm)	Altura (mm)	Largura da banda de soldadura (mm)
1	CD	Secção circular $\varnothing = 6$ mm		6
2	Eex +15% MEOV	15	20	25
3	ANFO	15	20	Não soldado
4	ANFO	20	25	Não soldado
5	Eex +15% MEOV	20	25	20,95
6	Eex +1,2% EPS	25	30	34,96
7	Eex +1,2% EPS	25	40	35

Para enquadrar as soldaduras na janela de soldabilidade basta proceder ao processo de calibração descrito na secção 2.5.1, metodologia proposta por Mendes et al. (2012). O exemplo pode ser dado com o caso da soldadura EW5. Esta soldadura foi realizada com rácio de 2,1 e, segundo a Tabela 4.3 apresentada,  $\sqrt{2E}$  toma o valor de 0,1095 mm/ $\mu$ s. Aplicando a equação 2.4, obtém-se  $V_{pGurney} = 942$  m/s e, considerando que a velocidade do *flyer* atinge 80 % desse valor depois de sofrer oito reflexões de onda, temos  $V_{pcal} = 753,61$  m/s. O tempo necessário para que o *flyer* atinja essa velocidade foi calculado considerando que, durante as reflexões, a onda de choque viaja ao longo da superfície metálica e à sua velocidade sónica, por uma distância equivalente a oito vezes a espessura do *flyer*. Assim, o tempo encontrado para que o *flyer* atinja essa velocidade foi  $T_{pcal} = 1,68$   $\mu$ s. É neste ponto que a calibração ocorre. As constantes C1 e C2 são estimadas de modo que a curva descrita pela equação 2.7 coincida com o valor de  $V_{pcal}$  no tempo  $T_{pcal}$ . Este processo pode ser visualizado na Figura 4.1.

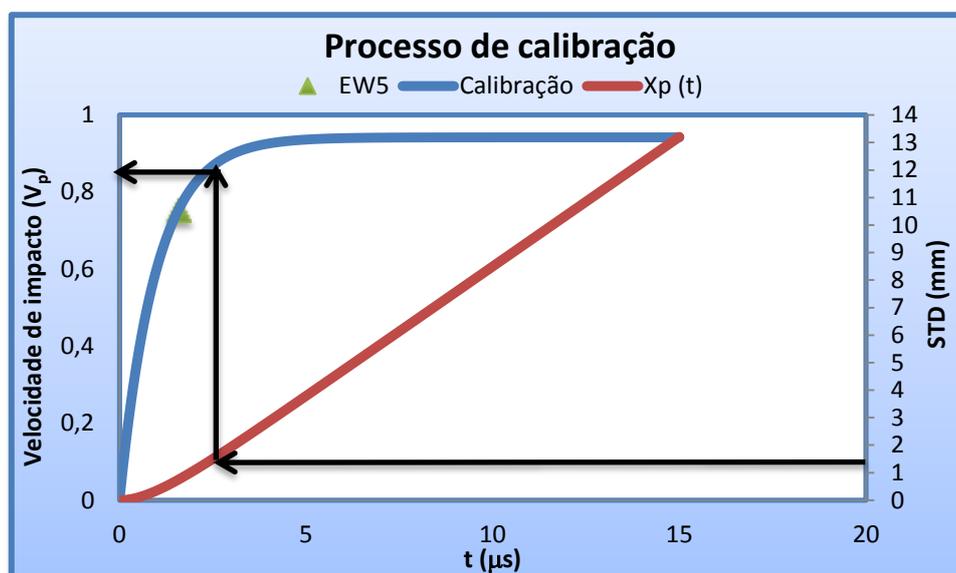


Figura 4.1: Processo de calibração, soldadura EW5.

Finalmente, com a curva descrita pela equação 2.9, que dá a distância percorrida pelo *flyer*, consegue-se obter a velocidade de impacto final. Para isso, há que igualar a distância ao valor da *stand-off-distance* usado e obter a leitura da velocidade. No caso da soldadura EW5, tem-se

uma velocidade de impacto final de  $0,851 \text{ mm}/\mu\text{s}$ , ou seja,  $851 \text{ m/s}$ . Encontrados os valores de  $V_p$  e  $V_d$ , basta desenhar os limites e enquadrar a soldadura no diagrama. O ângulo de colisão  $\beta$  é facilmente determinado pela equação 2.5. Neste caso obteve-se um valor de  $14,3^\circ$ . A janela de soldabilidade para as novas soldaduras e para todas as soldaduras realizadas até à data, com espessuras de  $1 \text{ mm}$  para o *flyer*, estão representadas no Apêndice D e na Figura 4.2, respectivamente.

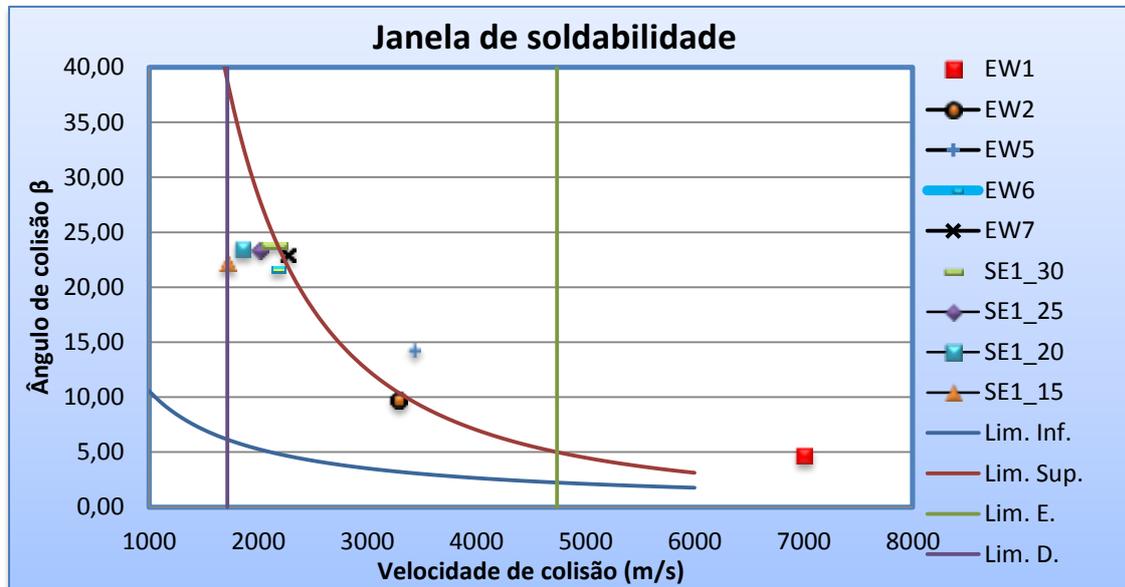


Figura 4.2: Janela de soldabilidade para todas as soldaduras realizadas com *flyer* de  $1 \text{ mm}$ .

Os ensaios correspondentes às soldaduras EW3 e EW4, realizadas com explosivo ANFO, não se encontram no diagrama em virtude da inexistência de detonação. Estes ensaios não se realizaram com sucesso, provavelmente por não ter sido alcançado o diâmetro mínimo de detonação, apesar dos rácios usados serem semelhantes aos dos ensaios que foram realizados com tipos diferentes de explosivos. Os valores dos parâmetros relativos às restantes soldaduras estão apresentados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3: Parâmetros relativos a todas as soldaduras com *flyer* de  $1 \text{ mm}$ .

Soldaduras	Rácio [C/M]	$V_d = V_c$ [m/s]	$V_p$ [m/s]	$\beta$ [°C]	Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]
SE1_30	2,64	2149	885	23,8	800
SE1_25	2,25	2013	830	23,4	820
SE1_20	1,78	1855	755	23,5	800
SE1_15	1,4	1712	660	22,2	820
EW1	0,39	7000	574	4,7	780
EW2	1	3286	560	9,8	740
EW5	2,05	3430	851	14,3	762
EW6	2,16	2121	795	21,6	900
EW7	3,07	2271	905	22,9	959

Relativamente às novas soldaduras, a soldadura EW2 e EW6 estão inseridas dentro da janela de soldadura. As soldaduras EW5 e EW7 encontram-se posicionadas ligeiramente acima do limite superior. De acordo com a literatura existente, esta zona é caracterizada pela existência de excesso de fusão na interface de ligação. A soldadura EW1 é a única que se encontra completamente fora da janela de soldadura, uma vez que apresentou velocidade de detonação muito elevada, traduzindo-se num insucesso da formação do jacto metálico, condição necessária para a obtenção de uma soldadura. Esta soldadura encontra-se à direita do limite direito do diagrama, o que significa que não se atingiu o ângulo crítico de colisão para a formação do jacto. Pode-se também comprovar, pela Tabela 4.4, que a natureza do próprio explosivo tem grande influência nas velocidades de detonação. Apesar do material energético base usado na elaboração do explosivo ser o mesmo em todos os ensaios, a escolha do agente sensibilizante mostrou ter muito maior influência na velocidade de detonação do que a densidade do próprio explosivo. Por exemplo, a velocidade de detonação obtida na soldadura EW5 é bastante superior em relação à da soldadura SE1\_20, apesar das densidades dos explosivos serem praticamente semelhantes.

## 4.2 Análise Macroscópica

Depois de efectuado o ensaio EW1, a placa de cobre parecia aparentemente soldada à placa de alumínio. Na Figura 4.3 (a) consegue-se verificar claramente vestígios dos produtos de detonação ao longo da placa na sua direcção longitudinal. É possível constatar que a zona onde o explosivo foi colocado terá sido sujeita à deformação plástica provocada pela pressão induzida pelos produtos de detonação, o que indica que a pressão existente na zona a soldar seria suficiente para que a ligação acontecesse. Contudo, no momento do corte e de preparação das amostras, verificou-se que facilmente se arrancava o cobre do alumínio manualmente. Na zona onde houve contacto do cobre com o alumínio, verificou-se que houve fusão parcial do alumínio. Esta fusão parcial pode ser observada na Figura 4.3 (b).



Figura 4.3: Soldadura EW1: (a) deformação da soldadura; (b) fusão parcial do alumínio no cobre.

Uma possível explicação para a soldadura não ter ocorrido, é o facto da velocidade de detonação ter sido demasiado elevada, o que implicou que o tempo de contacto entre ambos os materiais não foi suficiente para que a ligação se estabelecesse.

Na soldadura EW2, realizada com matriz de nitrato de amónio e sensibilizada numa proporção de 15% em micro esferas ocas de vidro (MEOV), os resultados macroscópicos apresentam diferenças acentuadas. Apesar da largura de explosivo escolhida para o ensaio ter sido

maior, o rácio de explosivo usado foi também de valor superior, o que se reflectiu nos resultados obtidos, como se pode observar na Figura 4.4



Figura 4.4: Deformação superficial da soldadura EW2.

É visível um maior grau de deformação plástica e rugosidade comparativamente à soldadura EW1. Pela Figura 4.4, é possível verificar que a zona superficial de cobre que esteve em contacto com o explosivo foi pressionada violentamente contra a placa de alumínio. Aquando do corte e da preparação das amostras, houve uma separação do cobre do alumínio nas zonas correspondentes ao início e fim da soldadura. Isto pode ser explicado pelo facto de que, no início da soldadura, o processo não se encontrava ainda estabilizado e, no final, ter havido uma possível extinção da detonação.

A soldadura EW5 foi realizada com maior rácio de explosivo, tendo também uma banda de soldadura com maiores dimensões. Comparativamente com a soldadura EW2, é visível uma deformação superficial ligeiramente superior, principalmente na zona final da soldadura. Não houve grandes alterações em termos de rugosidade de superfícies ao comparar com a soldadura EW2. É de salientar que na face inferior da placa de cobre (face que esteve em contacto com o alumínio), se encontraram vestígios de material removido pelo jacto metálico, o que é característico do processo de soldadura por explosão. É possível observar na Figura 4.5 (b) salpicos de alumínio provenientes do jacto metálico. A deformação apresentada na face inferior da placa de alumínio foi devida a altas pressões induzidas entre esta e a base de aço.



Figura 4.5: (a) Deformação superficial da soldadura EW5\_25; (b) salpicos de alumínio.

A soldadura EW6, realizada com um rácio de explosivo semelhante ao da soldadura EW5, apresentou ainda maior deformação e rugosidade. Este resultado justificou-se pelo uso de poliestireno expandido (EPS) como agente sensibilizante. Além de uma maior deformação, é visível tanto para a placa de alumínio como para a placa de cobre, vestígios de cobre e de alumínio, respectivamente, provenientes do jacto metálico. A morfologia apresentada pela superfície de alumínio também diferiu, dado que a sua rugosidade é menos acentuada do que nas soldaduras anteriores. Isto é explicado pelo uso de uma folha de papel entre a superfície de alumínio e a base de aço. Estas diferenças podem ser visualizadas na Figura 4.6.



Figura 4.6: (a) Deformação superficial da soldadura EW6\_30; (b) morfologia da superfície de alumínio.

A soldadura EW7, que diferiu apenas no rácio de explosivo e na qual se observou, macroscopicamente, uma morfologia semelhante à da soldadura EW6. A Figura 4.7 mostra a referida semelhança.



Figura 4.7: (a) Deformação superficial da soldadura EW7\_40; (b) morfologia da superfície de alumínio.

## 4.3 Micrografia

### 4.3.1 Soldaduras anteriores

Destas soldaduras, apenas foram analisadas amostras onde o processo se considerou estabilizado. A soldadura SE1\_30, foi realizada com um rácio de explosivo de 2,64 e a sua morfologia é mostrada na Figura 4.8 (a). Esta soldadura tem ondulação crescente na direcção de detonação e são visíveis zonas de cor distinta na interface. Nessas zonas verifica-se a presença de cavidades resultantes da solidificação que indica que houve fusão, pelo menos do alumínio, pois é o material com menor ponto de fusão. É possível visualizar zonas com três cores distintas: uma castanha, em cima, que corresponde ao lado do cobre; uma azul, em baixo, que corresponde ao lado do alumínio; e outra com uma tonalidade diferente de azul, presente na interface, que contém compostos intermetálicos e fissuras. Essa fissuração deverá resultar da estrutura ser dura e frágil associada a tensões residuais resultantes do processo de solidificação. A sua posição na janela de soldadura encontra-se sobreposta ao limite superior, limite este que impõe um valor máximo para a velocidade de impacto para que as soldaduras não sejam submetidas a um excesso de fusão, sendo por isso uma possível justificação para a morfologia apresentada. A ondulação nesta amostra tem comprimento médio de 456,45  $\mu\text{m}$  e amplitude média de 42,4  $\mu\text{m}$ .

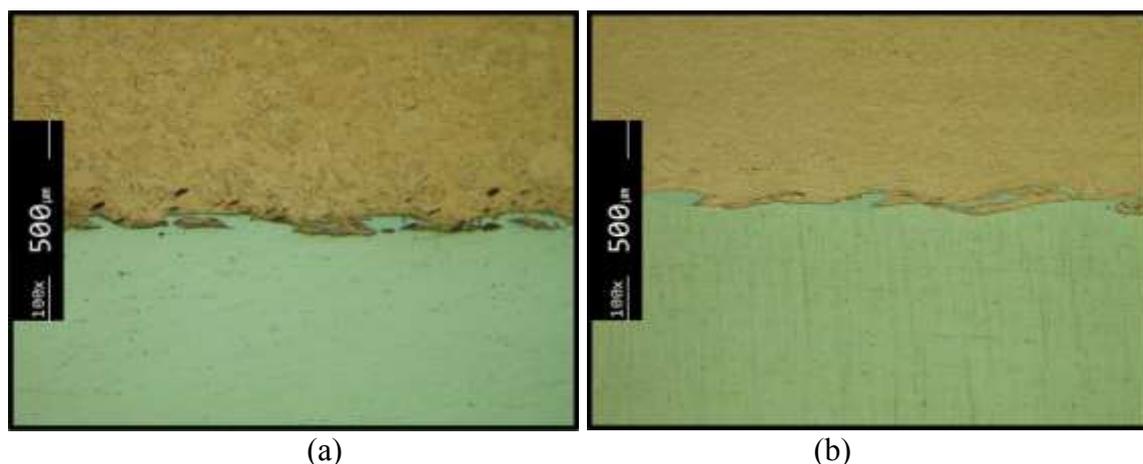


Figura 4.8: (a) Morfologia da soldadura SE1\_30, ampliação de 100x; (b) Morfologia da soldadura SE1\_25, ampliação de 100x, (Dias, 2012) e (Santos, 2013).

A soldadura SE1\_25, realizada com rácio de explosivo mais baixo, de 2,25, apresenta amplitude e ondulação semelhantes, conforme se mostra na Figura 4.8 b). No entanto, o cobre aparenta ter menor deformação. O comprimento e a amplitude média das ondas registadas nesta soldadura foram de 41,7 e 311,5  $\mu\text{m}$ . Estes valores são semelhantes aos da soldadura SE1\_30, o que pode ser justificado pela base utilizada nos ensaios. Enquanto para a soldadura SE1\_30 foi utilizada uma base em areia, na soldadura SE1\_25 foi utilizada uma base de aço, proporcionando maior rigidez à montagem. Esta soldadura encontra-se dentro da janela de soldabilidade, zona caracterizada por se obter condições ideais de soldadura, mas próxima do limite superior. A ligeira diminuição da zona de compostos intermetálicos face à soldadura SE1\_30, compare-se Figuras 4.8 a) e 4.8 b), justifica-se pela redução de rácio de explosivo. A redução da área e do volume fundido é acompanhada pela redução de fissuras e cavidades.

Na Figura 4.9 a) encontra-se apresentada a morfologia da soldadura SE1\_20. Esta soldadura foi realizada com um rácio de 1,78, numa base de areia. Apesar desta se ter realizado com menor rácio de explosivo, a amplitude e o comprimento da ondulação têm em média 56,5  $\mu\text{m}$  e 440,9  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Comparando com as soldaduras referidas acima, esta parece estar mais próxima da soldadura SE1\_30. Esta soldadura encontra-se dentro da janela de soldabilidade, ligeiramente à esquerda da soldadura SE1\_25, mais próximo da velocidade mínima de colisão.

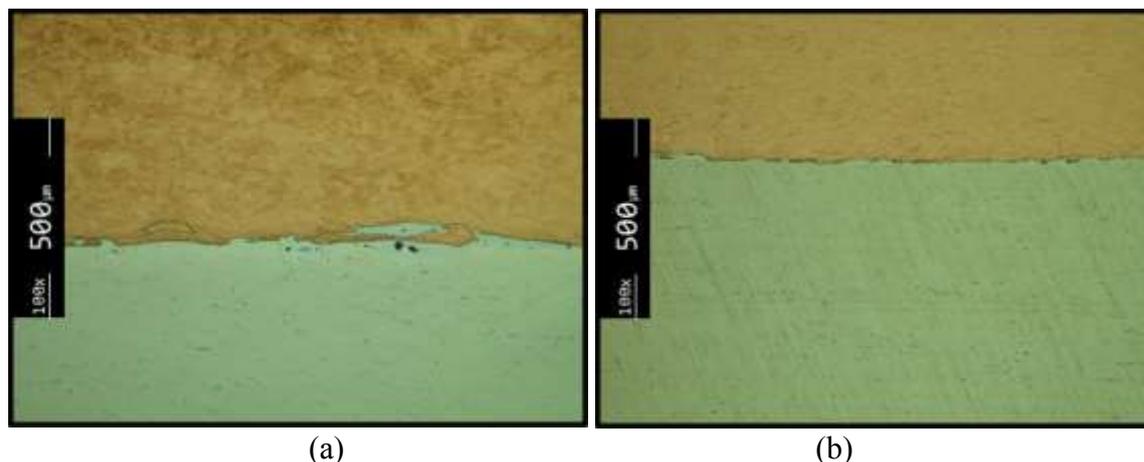


Figura 4.9: (a) Morfologia da soldadura SE1\_20, ampliação de 100x; (b) morfologia da soldadura SE1\_15, ampliação de 100x, (Dias, 2012) e (Santos, 2013).

Na Figura 4.9 a) é visível a presença de muitas cavidades e fissuras nas zonas fundidas. Estas zonas encontram-se distribuídas por toda a interface, tendo periodicidade semelhante à da soldadura SE1\_30.

A soldadura SE1\_15 foi executada com o menor rácio de explosivo, com valor de apenas 1,4, apresentando por isso menor velocidade de impacto  $V_p$ . Na janela de soldabilidade encontra-se próxima do limite esquerdo, limite este que impõe uma velocidade de colisão mínima para que a interface transite de uma morfologia linear para uma morfologia ondulada. A morfologia da interface da soldadura SE1\_15, apresentada na Figura 4.9 b), é consequência da sua posição da janela de soldadura. Como se pode verificar, a interface apresenta uma geometria quase linear para uma ampliação de 100x, o que não acontece com as restantes soldaduras. Esta geometria apresenta amplitude média de 18,1  $\mu\text{m}$  e um comprimento de onda médio de 210,9  $\mu\text{m}$ . É também possível concluir que as zonas fundidas são reduzidas face às restantes soldaduras, assim como a presença de compostos intermetálicos, fissuras e cavidades. Neste caso, embora se tenha utilizado base de aço, a deformação apresentada pelo lado do cobre foi de todos os casos menos acentuada pois a velocidade de impacto da placa de cobre foi também bastante menor.

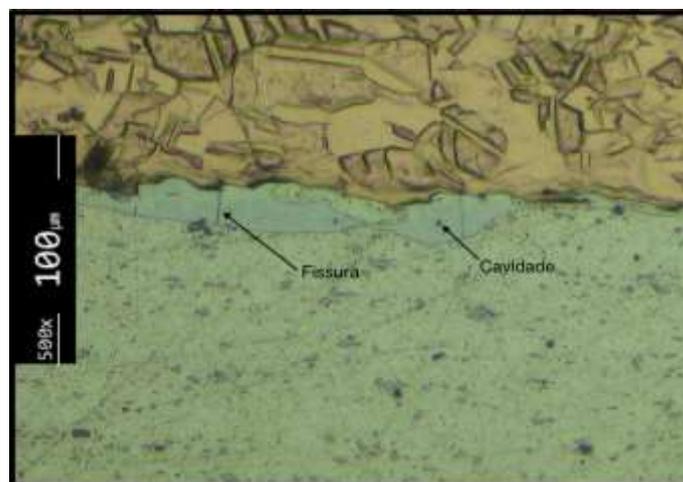
Conclui-se portanto que a morfologia da interface e a presença de fases frágeis com cavidades e fissuras depende não só do rácio de explosivo e da velocidade de impacto  $V_p$  do *flyer*, mas também da rigidez da base utilizada. A análise química mostrou que as fases encontradas estavam próximas das fases  $\text{CuAl}$  e  $\text{CuAl}_2$  que, segundo Wulf et al. (2004), apresentam percentagens de cobre de 49,8 % e 31,9 %, respectivamente.

### 4.3.2 Novas soldaduras

Nas novas soldaduras foram preparadas 3 amostras para metalografia, de cada chapa soldada. Contudo, apenas se irá analisar uma amostra de cada chapa soldada numa zona onde o processo se considerou estabilizado. Todas estas foram analisadas na direcção de detonação do explosivo. Na Figura 4.10 está representada a morfologia obtida para a soldadura EW2, para uma ampliação de 100 x e 500x. Nesta soldadura foi usada uma emulsão explosiva (Eex), possuindo 15% de MEOV, como tipo de explosivo e um rácio de explosivo de 1. Para este ensaio utilizou-se uma base de aço com 50 mm de espessura e a largura e altura de explosivo foi de 15 mm e 20 mm respectivamente. Por sua vez, a largura da banda soldada estendeu-se para os 25 mm, largura 10 mm mais extensa do que a largura de explosivo utilizado.



(a)



(b)

Figura 4.10: Morfologia da soldadura EW2\_20\_4: (a) ampliação de 100x; (b) fissura e cavidade, ampliação de 500x.

A morfologia desta soldadura apresenta ondulação periódica e amplitude bastante reduzida face às soldaduras realizadas por Dias (2012) e Santos (2013). A amplitude e comprimento de onda médios medidos foram 5,3  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ , respectivamente, valores próximos da soldadura SE1\_15 efectuada por Santos (2013). Ao longo da interface também se podem encontrar ilhas de cobre retidas nas zonas fundidas, provavelmente provenientes de material removido pela indentação do jacto, o qual

não foi ejetado. A sua posição na janela de soldabilidade encontra-se imediatamente abaixo do limite superior, que representa a velocidade máxima limite de impacto  $V_p$ , de modo a evitar fusão excessiva. Como consequência disso, verifica-se a presença de zonas fundidas contendo fissuras, veja-se Figura 4.10 b), que conforme referido anteriormente devem corresponder à presença de compostos intermetálicos. Análises posteriores mostraram que se tratam de facto de compostos intermetálicos.

A soldadura EW5 está representada na Figura 4.11. Foi efectuada com um rácio de 2,05 e com o mesmo tipo de explosivo usado na soldadura EW2, mas utilizando uma largura de 20 mm e uma altura de 25 mm de explosivo. Morfologicamente pode-se constatar que a interface é linear, sendo muito semelhante à da soldadura EW2, apesar de se ter utilizado maior rácio de explosivo. A ondulação teve uma amplitude média de  $7,1 \mu\text{m}$  e um comprimento de onda de  $152 \mu\text{m}$ . Este tipo de morfologia pode estar associado ao uso de uma base diferente no ensaio. Além da base de aço, introduziu-se por baixo desta uma cama de areia molhada com uma espessura aproximada de 20 mm. Este parâmetro foi usado com objectivo de reduzir o efeito de reflexão de onda de choque, que poderia separar as placas durante o processo de soldadura. Refira-se que este fenómeno já foi observado noutros ensaios.



Figura 4.11: Morfologia da soldadura EW5\_25\_5: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x.

Contudo, apesar da sua posição na janela de soldabilidade se apresentar numa zona que é caracterizada por soldaduras que foram submetidas a um excesso de fusão, são praticamente inexistentes zonas fundidas assim como compostos intermetálicos. A presença de fissuração e cavidades foi também muito pontual. Apesar da sua velocidade no momento do impacto  $V_p$  ter tido um valor superior à da soldadura EW2, a deformação do *flyer* foi menos acentuada. Este facto pode ser justificado, como referido, pela presença da cama de areia, que terá absorvido parte da onda de choque.

A soldadura EW6 foi realizada com rácio semelhante ao da soldadura EW5 contudo, nesta soldadura, o explosivo foi misturado com EPS em vez das MEOV. Na Figura 4.12 a) é possível observar um aumento de ondulação na interface, em termos de amplitude e periodicidade das ondas, apesar da base utilizada ser igual à da soldadura EW5. O comprimento e amplitude de onda aumentaram significativamente, adquirindo valores médios de  $204,5 \mu\text{m}$  e  $24,2 \mu\text{m}$ , respectivamente. São também visíveis zonas fundidas e alguns compostos intermetálicos ao longo da interface. No entanto, a fissuração é reduzida se compararmos com a soldadura EW2, o que pode ser explicado pela velocidade no ponto de colisão. Uma vez que houve maior quantidade de energia envolvida e dado que a fissuração pode ser causada pelo efeito das tensões residuais, uma

velocidade de colisão reduzida pode produzir tempo de contacto necessário para haver um alívio dessas tensões e evitar fracturas na interface. Este fenómeno de aumento da dimensão das ondas na interface quando se mistura EPS no explosivo, veja-se Figura 4.12 b), já foi observado por Mendes et al. (2012) no caso do revestimento de aço carbono com aço inoxidável. Estes autores atribuíram este efeito ao facto de o EPS possuir esferas na ordem de 1,25 mm de diâmetro, ao contrário dos 40  $\mu\text{m}$  das MEOV, o que parece instabilizar o processo de detonação e degrada a superfície do *flyer*.

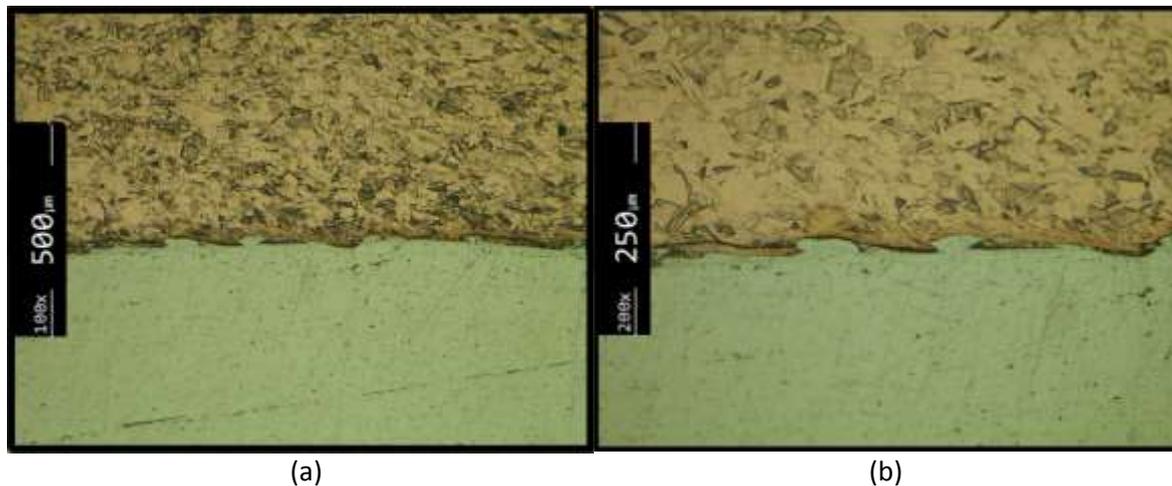


Figura 4.12: Morfologia da soldadura EW6\_30\_5: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x.

Numa tentativa de analisar o comportamento morfológico da interface variando apenas o rácio de explosivo, foi realizado o ensaio EW7 no qual foi usado o mesmo tipo de explosivo do ensaio EW6, mas com um rácio de explosivo de 3,1. A sua morfologia pode ser visualizada na Figura 4.13. Ao comparar-se com a soldadura EW6, é visível um aumento de deformação do cobre. A ondulação aumentou ligeiramente em relação à soldadura anterior. A ondulação apresentou comprimento médio de 205,7  $\mu\text{m}$  e amplitude média de 29,3  $\mu\text{m}$ , o que traduz um ligeiro aumento em relação aos parâmetros equivalentes da soldadura EW6. Este aumento modesto deverá estar relacionado com o efeito amortecedor da camada de areia, pois foi mais significativo nas soldaduras em aço, Mendes et al. (2012). Observa-se ainda uma camada contínua de material fundido que, pelo facto de ser acompanhada por zonas fissuradas, deixa antever que se tratam de compostos intermetálicos. A espessura destas zonas também aumentou significativamente, de onde se infere que a quantidade de explosivo a utilizar é determinante na morfologia obtida.

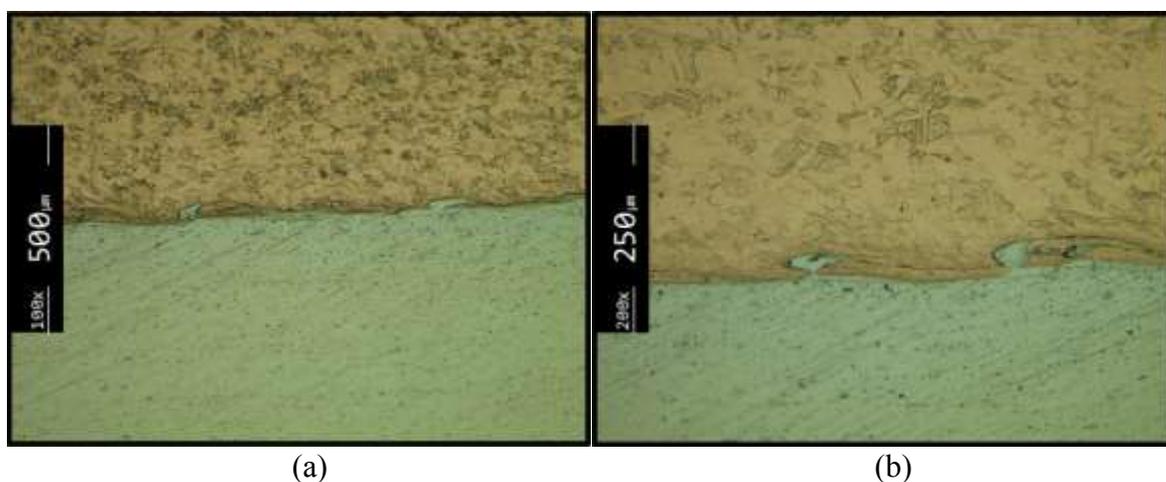


Figura 4.13: Morfologia da soldadura EW7\_40\_5: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x.

## 4.4 Análise de compostos intermetálicos

Após a análise da microestrutura, foi possível avaliar quimicamente alguns dos compostos intermetálicos presentes nas soldaduras. Com a ajuda de um microscópio electrónico de varrimento (*SEM*), acoplado a um sistema de microanálise de energia dispersiva de raio-X (*EDS*), foi possível fixar alguns pontos e analisar quimicamente alguns destes compostos. Na Figura 4.14 está representada uma zona que corresponde à amostra EW6\_30\_5, zona da interface da soldadura onde o processo se considerou estabilizado.

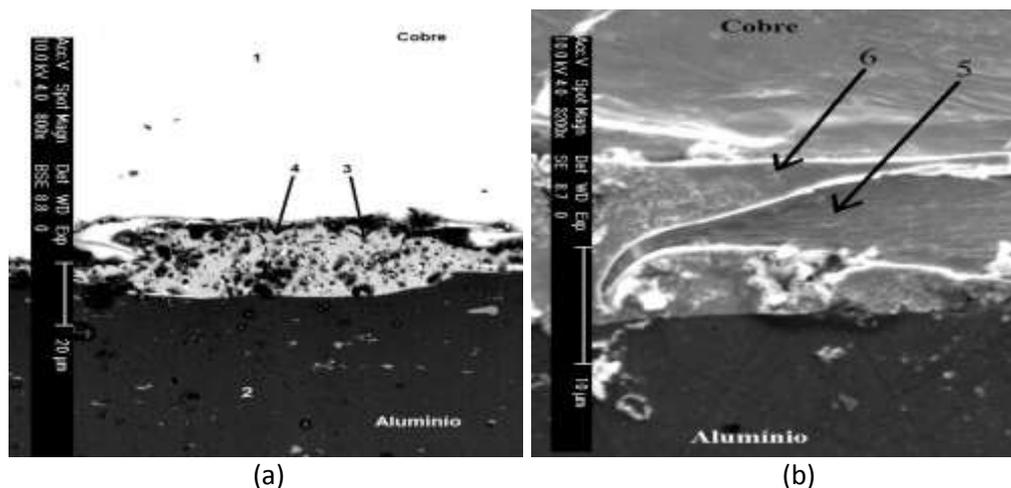


Figura 4.14: (a) imagem SEM da amostra EW6\_30\_5 (zona 1); (b) imagem SEM da amostra EW6\_30\_5 (zona 2).

Na Figura 4.14 a) (zona 1) podem distinguir-se claramente 3 subzonas de cores distintas: uma de cor branca onde se situa o ponto 1, que pertence ao cobre; uma com cor cinza escuro onde se situa o ponto 2, que pertence ao alumínio; e outra de cor cinza clara, correspondente ao ponto 4, onde se localiza a zona fundida e que se pensa tratar-se de um composto intermetálico devido à fenda existente. A zona fundida apresenta várias manchas pretas que lhe conferem um aspecto heterogéneo. O ponto 3 corresponde a uma dessas manchas. Da sua análise, que mostrou uma composição em atómico de 94,4 % de alumínio, deduziu-se que as referidas manchas pretas pertencem a material removido pelo jacto que terá ficado retido na interface. A sua composição química encontra-se no Anexo 3. Na Figura 4.15 a), pode-se ver a análise química efectuada ao ponto 4, que serviu para estimar a composição da zona cinza clara próxima da fenda. Desta análise pode-se antever que estão presentes percentagens ponderais de elementos como o oxigénio (O), o carbono (C), o silício (Si) e o magnésio (Mg). Estes elementos correspondem a contaminações presentes nas soldaduras. Desta forma, das tabelas fornecidas pela análise química *EDS* apenas se irão considerar o cobre e o alumínio, eliminando os restantes elementos da seguinte forma:

$$M_{(\text{Cu})} = 63,546 \text{ u.m.a}$$

$$M_{(\text{Al})} = 26,981 \text{ u.m.a}$$

Pela Figura 4.15 (a), considerando que em 100 gramas tem-se 42,85 g de Cu e 46,56 g de Al;

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n_{Cu} = \frac{42,85}{63,546} = 0,674 \text{ mol}$$

$$n_{Al} = \frac{46,56}{26,981} = 1,725 \text{ mol}$$

$$n_{total} = n_{Cu} + n_{Al} = 2,40 \text{ mol}$$

$$\% \text{ Atómico Cu} = \frac{0,674}{2,40} = 28,1\%$$

$$\% \text{ Atómico Al} = \frac{1,725}{2,40} = 71,9\%$$

A referida composição apresenta 28,1% de Cu e 71,9% de Al, sendo legítimo considerar que este composto está próximo da fase  $\text{CuAl}_2$ , (Hang et. al., 2008). Na Figura 4.14 b) (zona 2), o ponto 5, pareceu corresponder a uma ilha de cobre presente na interface, o que foi confirmado pela análise química, que apresentou uma percentagem de 92,1% de cobre. A sua composição química está presente no Anexo 3. O ponto 6, ao comparar à zona analisada no ponto 4, corresponde a uma zona onde é possível verificar uma cor cinza mais escura próxima do cobre. A sua composição química apresenta 55% de Al e 45% de Cu, o que, de acordo com a literatura existente, é legítimo considerar que este composto está próximo da fase  $\text{CuAl}$ , (Hang et. al., 2008). A sua composição química pode ser observada na Figura 4.18 b).

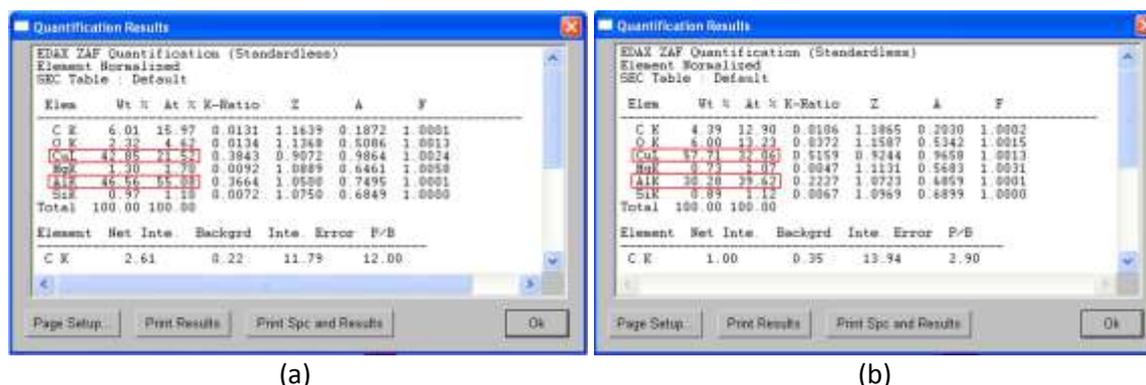


Figura 4.15: (a) Composição química do ponto 4; (b) composição química do ponto 6.

A Figura 4.16 a) representa a zona analisada da amostra EW5\_25\_5. A análise química desta amostra foi igualmente feita numa zona próxima de uma fenda existente (ponto 7). A sua composição química apresenta uma percentagem de 35,6% para o Cu e 64,4% para o Al, aproximando-se da fase  $\text{CuAl}_2$ , (Hang et. al., 2008). A percentagem em peso e em atómico destes elementos pode ser visualizada na Figura 4.16 b).

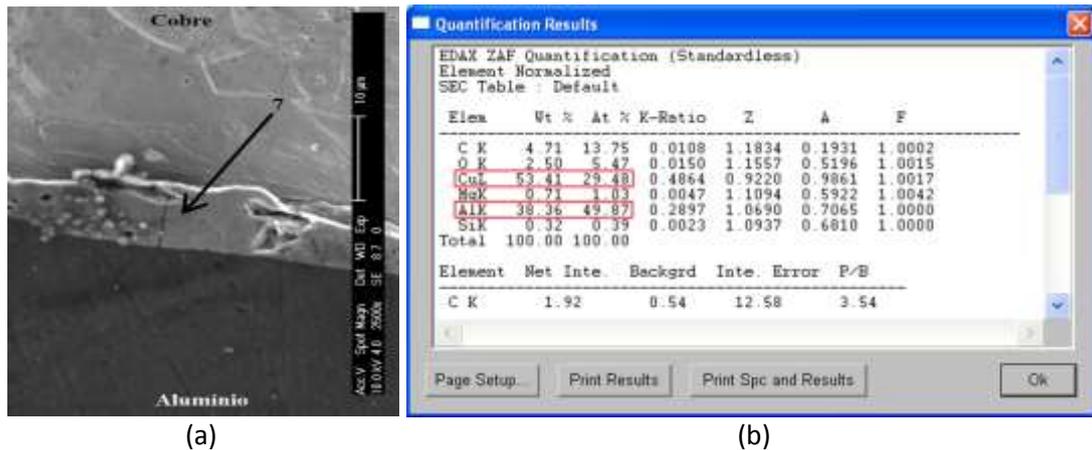


Figura 4.16: (a) imagem SEM da amostra EW6\_25\_5; (b) composição química do ponto 7.

Por último, foi avaliada a composição química dos compostos intermetálicos da soldadura EW2. Analisando a amostra EW2\_20\_4 detectaram-se duas zonas com fases distintas. No ponto 8, representado na Figura 4.17 a) (zona 1), foi identificada uma composição que não corresponde a nenhuma fase encontrada na literatura existente. A sua composição contém 88,9 % de alumínio e 11,1 % de cobre a nível atômico.

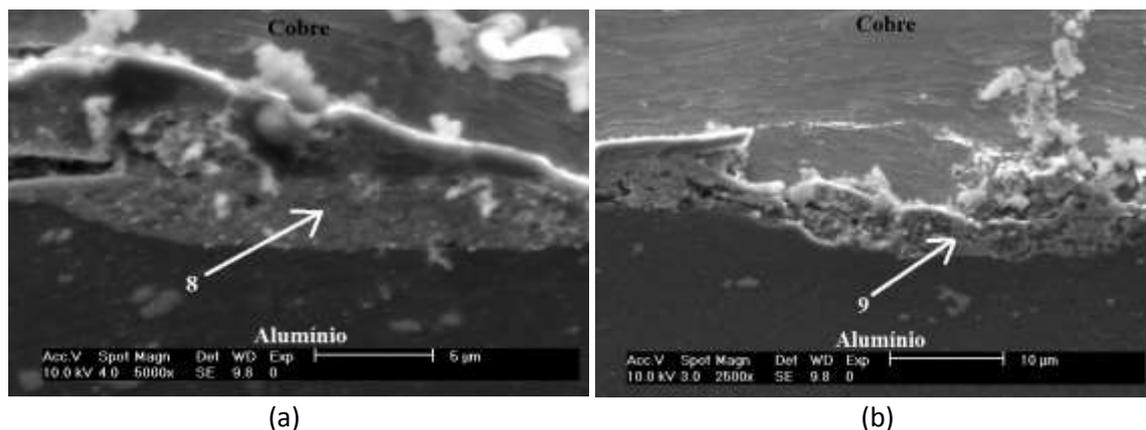


Figura 4.17: (a) imagem SEM da amostra EW2\_20\_4 (zona 1); (b) imagem SEM da amostra EW2\_20\_4 (zona 2).

No ponto 9, representado na Figura 4.17 b) (zona 2), foi identificada uma composição próxima da fase  $\text{CuAl}_2$  (Hang et. Al., 2008). As composições e percentagens que dizem respeito ao ponto 8 e ao ponto 9 podem ser observadas nas Figuras 4.18 a) e b), respectivamente.

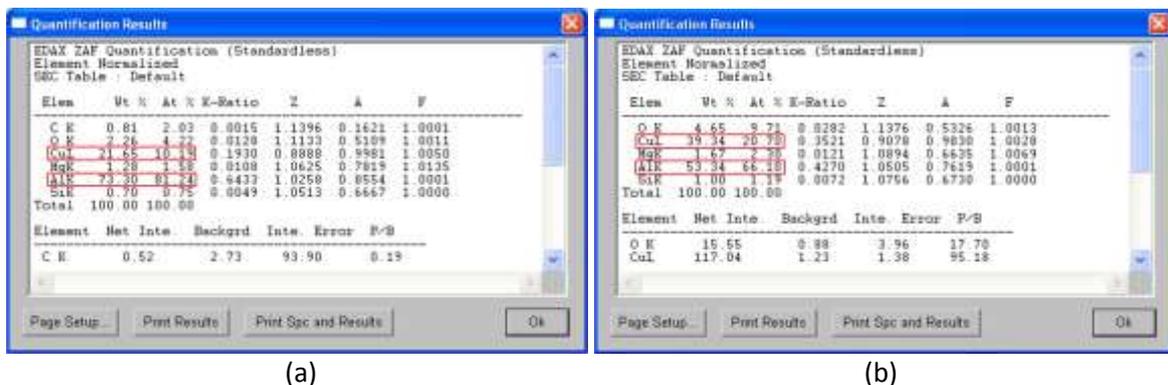


Figura 4.18: (a) composição química do ponto 8; (b) composição química do ponto 9.

## 4.5 Dureza

Ensaio de dureza foram realizados em amostras pertencentes às zonas intermédias das soldaduras, amostras estas que foram analisadas morfológicamente na secção 4.3.2. As medições de dureza foram realizadas segundo uma linha transversal à interface de soldadura, com intervalos de 250 ( $\mu\text{m}$ ) entre elas. Numa fase inicial foram efectuadas várias medições nos materiais base, obtendo-se um valor médio de 99 HV para o alumínio e 99,5 HV para o cobre.

### 4.5.1 Soldaduras anteriores

As soldaduras com *flyer* de 1 mm, realizadas por Dias (2012) e Santos (2013), possuem o perfil de dureza apresentado pela Figura 4.19 e 4.20. Os perfis de dureza apresentados pela Figura 4.19 correspondem a soldaduras efectuadas com base de areia enquanto que os perfis mostrados na Figura 4.20 correspondem à base de aço.

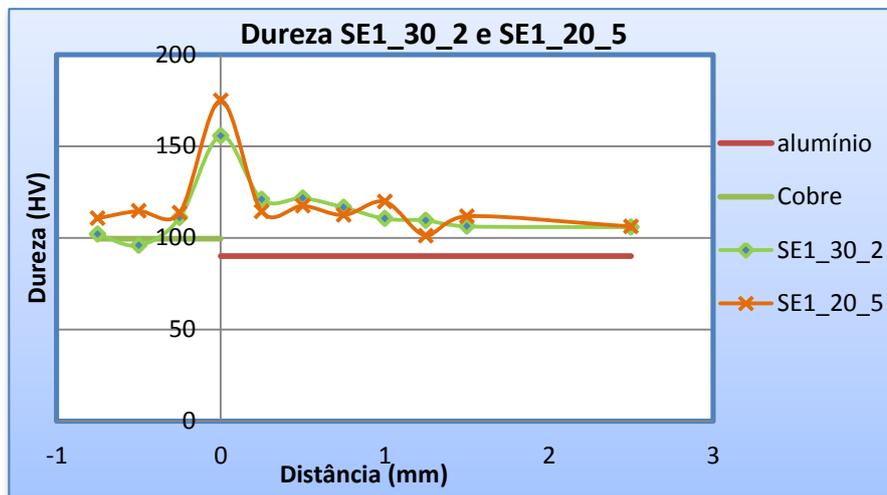


Figura 4.19: Perfil de dureza da soldadura SE1\_30\_2 e SE1\_20\_5.

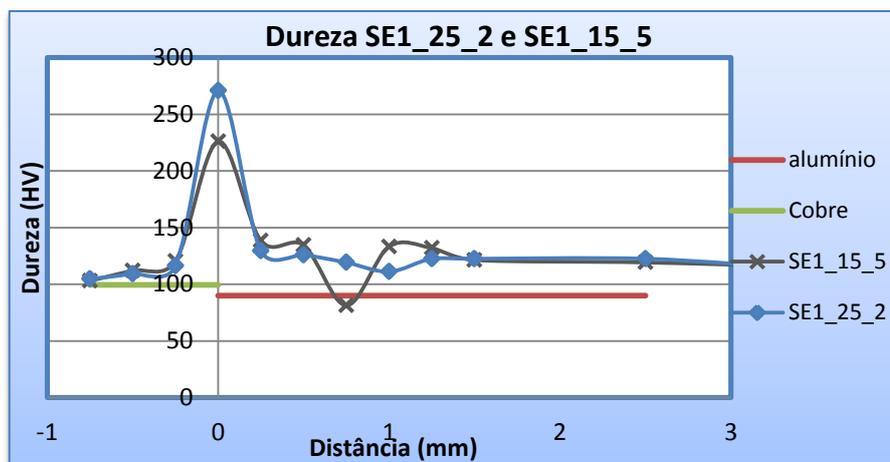


Figura 4.20: Perfil de dureza da soldadura SE1\_25\_2 e SE1\_15\_5.

Na generalidade, o aumento de dureza é visível ao longo de toda a linha onde foram feitas as medições. No entanto, os valores máximos foram registados na interface para todas as soldaduras.

Este aumento de dureza pode ser explicado pelo encruamento ocorrido devido à deformação plástica a que os materiais foram sujeitos durante o processo de soldadura, ou então podem também ser característicos dos compostos intermetálicos presentes na interface. Como já explicado anteriormente, a formação de compostos intermetálicos pode ocorrer essencialmente devido à fusão localizada dos materiais, o que pode induzir a formação de novas fases. Na tentativa de esclarecer essa questão, foram feitas várias indentações em zonas fissuradas e comparadas as durezas com as obtidas. Os resultados são apresentados no Anexo 4. Para a soldadura SE1\_30 foi obtido um valor máximo de 380,9 HV, marcadamente superior ao medido anteriormente, o que indica que a dureza medida é característica de um composto intermetálico e não da deformação que os materiais sofreram. Um valor elevado foi também registado na soldadura SE1\_20, de 339HV, embora inferior ao da soldadura SE\_30. É legítimo concluir que se trata de durezas de compostos intermetálicos. Para as soldaduras SE1\_25 e SE1\_15 foram registados, respectivamente, valores máximos de 439,7 HV e 454,3 HV, valores estes que são mais elevados do que os das soldaduras SE1\_30 e SE1\_20. Este fenómeno pode ser explicado pela formação de uma fase diferente durante a fusão dos materiais. Contudo, pelas Figuras 4.19 e 4.20, vemos que as durezas das soldaduras SE1\_30 e SE1\_20 medidas na interface diferiram nos seus valores se comparados com os das soldaduras SE1\_25 e SE1\_15, facto que pode ser explicado pela base utilizada. Enquanto nas primeiras duas soldaduras se utilizou uma base de areia, na terceira e quarta usou-se uma base de aço, que proporcionou maior rigidez e deu lugar a uma deformação plástica superior. Concluindo, os valores medidos na interface que estão patentes nas Figuras 4.19 e 4.20, não são devidos a compostos intermetálicos, mas sim à deformação plástica causada pelo impacto das placas.

#### 4.5.2 Novas soldaduras

O procedimento usado na medição de dureza nas novas soldaduras foi análogo ao usado nas soldaduras anteriores. Foram feitas indentações segundo uma linha perpendicular à interface para todas as amostras e para os compostos intermetálicos com uma carga de 25 gramas, de modo a testar apenas o composto.

Na Figura 4.21 mostram-se os perfis de dureza das soldaduras executadas com MEOV. Tal como nas soldaduras anteriores, são visíveis aumentos significativos de dureza na interface de ligação. No entanto, na dita zona, foi registado um maior valor de dureza para a soldadura EW2 do que para a soldadura EW5, o que indica que o tipo de base utilizada na soldadura teve influência na deformação plástica dos materiais durante o processo. Os valores mostram que a base de areia usada no ensaio para a execução da soldadura EW5 absorveu parte da energia transmitida pelo impacto das placas, o que causou uma redução na deformação plástica dos materiais. No entanto, a deformação plástica em ambas as soldaduras aumentou a dureza ao longo de toda a espessura da ligação cobre-alumínio. Foram também visíveis diferenças nos valores de dureza nas soldaduras EW6 e EW7, soldaduras estas que foram realizadas com explosivo contendo EPS na sua constituição e tendo como suporte uma base de areia. É visível o efeito do rácio nos seus valores de dureza. Os referidos perfis de dureza são apresentados na Figura 4.22. O efeito do rácio de explosivo foi significativo na deformação dos materiais. Para a soldadura EW7 foi registado um valor de 256,38 HV, enquanto que para a soldadura EW6 se registou o valor de 156,18 HV. A natureza do próprio explosivo também é determinante nas propriedades mecânicas obtidas. Para a soldadura EW5, realizada com rácio de explosivo semelhante ao da soldadura EW6, obteve-se um valor de 131,91 HV, enquanto que para a soldadura EW6 se obteve um valor de 152,18 HV. Este valor superior para a soldadura EW6 pode ser explicado pela instabilidade na

detonação do explosivo causada pelo EPS como já referido anteriormente. A degradação da superfície do *flyer* causada pelo EPS pode estar na origem do aumento da sua dureza.

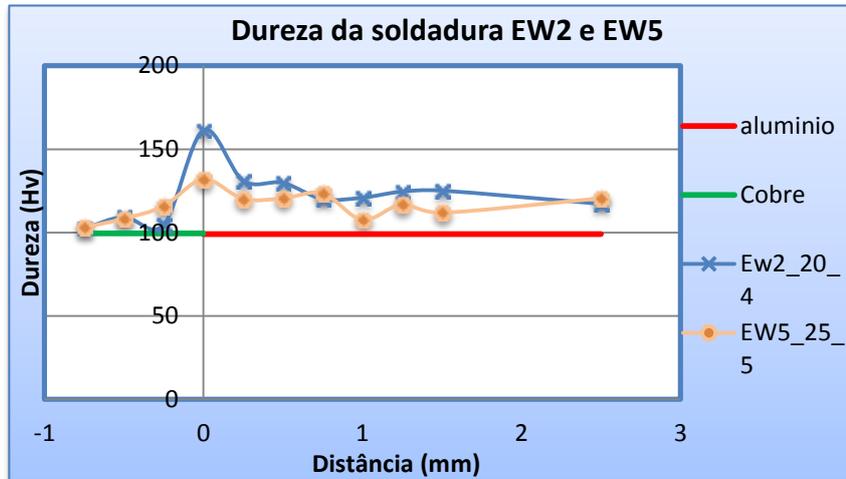


Figura 4.21: Perfil de dureza da soldadura EW2\_20\_5 e EW5\_25\_5.

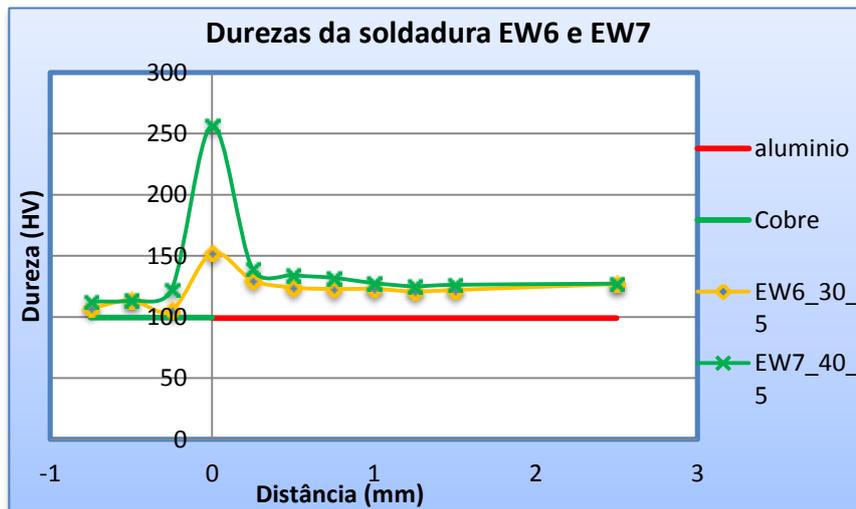


Figura 4.22: Perfil de dureza da soldadura EW6\_30\_5 e EW7\_40\_5.

Numa amostra foi também analisada a variação de dureza segundo uma linha transversal à direcção da velocidade de detonação, medida a meia espessura em ambos os materiais. A sua representação gráfica encontra-se ilustrada na Figura 4.23. O eixo vertical representa a interface de ligação, correspondendo o eixo das abcissas às distâncias relativamente a esta. Tal como esperado, o efeito da deformação plástica é visível tanto do lado do cobre como do alumínio. Na zona da soldadura a dureza aumenta atingindo um valor máximo de 126 HV, sendo legítimo concluir que as durezas anteriormente medidas correspondem ao encruamento dos materiais e não a compostos intermetálicos. No lado do cobre, verifica-se um aumento de dureza até uma zona próxima da interface, atingindo um valor máximo. Contudo, desde esse mesmo ponto até à zona central da interface observou-se um decréscimo no valor da dureza. Uma possível explicação para este fenómeno ter acontecido pode ser explicado pelo encruamento que ocorreu devido a deformação plástica numa zona onde a transferência de calor foi baixa. Já na interface soldada, além de ter ocorrido encruamento pode ter sido de seguida acompanhado por alguma restauração ou mesmo recozimento, devido a elevada energia sob a forma de calor fornecida pelo

explosivo nessa zona. No lado do alumínio apenas se verifica aumento de dureza devido a deformação plástica sofrida.

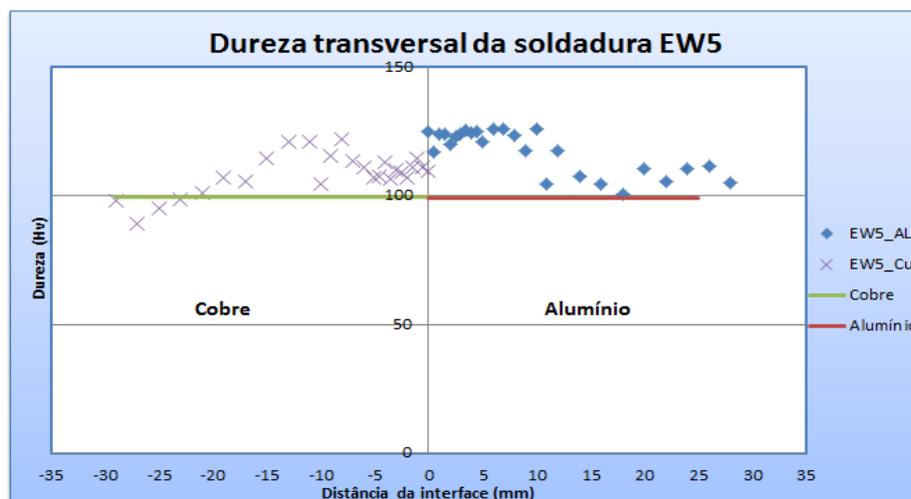


Figura 4.23: Dureza transversal da soldadura EW5.

Uma vez que estes valores medidos são representativos da deformação plástica sofrida pelos materiais, foram também medidos valores de dureza nos compostos intermetálicos. O Apêndice E ilustra as medições realizadas nessas zonas. Os valores medidos são consideravelmente superiores aos restantes medidos nas soldaduras. Na soldadura EW2 foi registado o valor de 239,5 HV, que parece não estar próximo da fase encontrada pela análise química (*EDS*). Já na soldadura EW5 foi registado um valor médio de 366,2 HV, que de acordo com a literatura está próximo da fase  $\text{CuAl}_2$ , o que se confirma pela análise química efectuada. Para a soldadura EW6 encontrou-se um valor de 459,4 HV, que segundo Wulff et al., (2004) é um valor compreendido entre as fases  $\text{CuAl}$  e  $\text{CuAl}_2$ , sendo consistente com a análise química efectuada. Terminando com a soldadura EW7, embora não se tenha efectuada análise química, foi medido nos compostos intermetálicos um valor médio de 608,9 HV, valor próximo da fase  $\text{Cu}_4\text{Al}_3$ , (Wulff et al., 2004). A representação gráfica dos valores medidos nos compostos intermetálicos nas novas soldaduras apresenta-se no Apêndice F.

## 4.6 Resistência ao corte:

Para estes ensaios foram maquinados provetes provenientes de zonas intermédias das ditas soldaduras, onde o processo foi considerado estabilizado. Os ensaios de tracção foram realizados com objectivo de testar a resistência da ligação quando solicitada ao corte. No entanto, para todos os provetes ensaiados a rotura teve lugar no cobre, numa zona afastada da soldadura. No ensaio realizado na soldadura EW2, a rotura deu-se para uma força máxima de 2720 N, tendo-se verificado um alongamento até a rotura de 4,63 mm. A representação gráfica da força exercida em função do alongamento encontra-se na Figura 4.25.

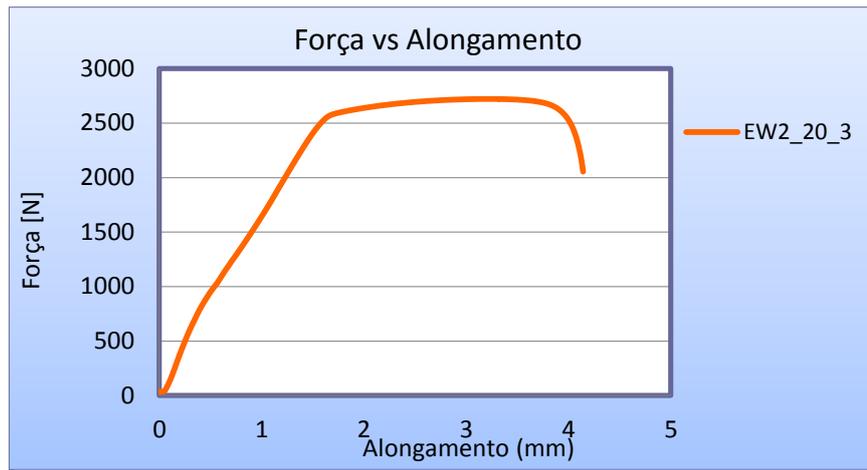


Figura 4.24: Representação gráfica da força em função do alongamento da soldadura EW2\_20\_3.

Feita a análise da deformação, verificou-se que parte substancial desta teve origem igualmente no cobre. A análise pontual realizada comprova isso mesmo conforme se pode verificar na Figura 4.25.

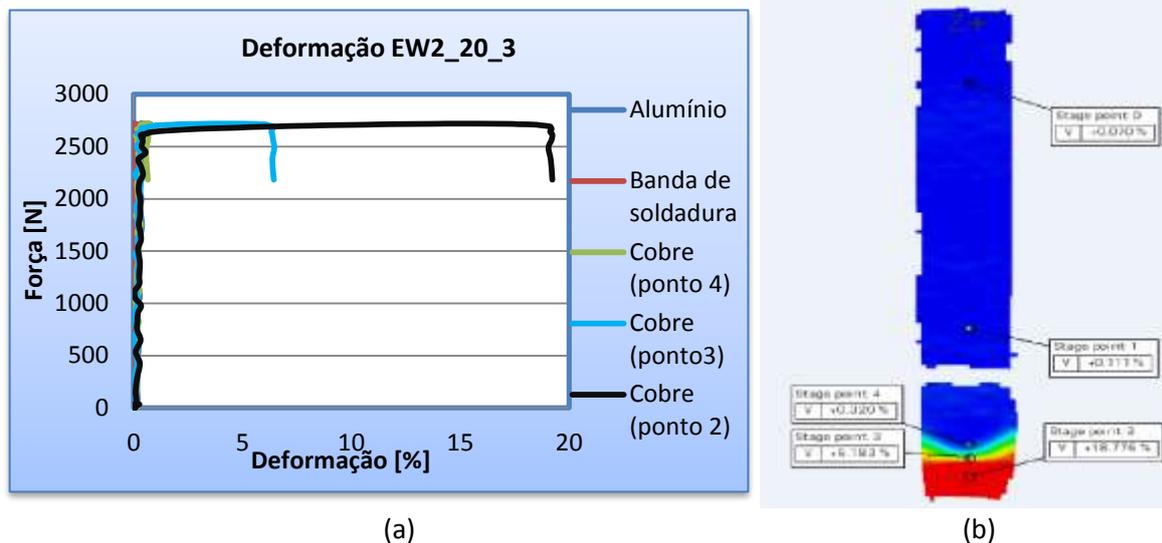


Figura 4.25: (a) valores percentuais da deformação obtida na soldadura EW2\_20\_3; (b) análise pontual.

Pela Figura 4.25 b) verifica-se que a deformação que ocorreu na ligação soldada assim como no lado do alumínio foi muito reduzida. No lado do alumínio obteve-se 0,010 % de deformação enquanto na ligação soldada se obteve um valor de 0,11%. Já no lado do cobre foi visível um comportamento diferente. Feita a análise no ponto 2, 3, e 4, verificou-se que a deformação aumentou a medida que nos aproximávamos da zona de rotura, tendo-se registado um valor máximo de 18,78 %. Logo, tendo em conta esta deformação, pode-se considerar que o alongamento obtido para este provete, presente na Figura 4.25, teve lugar apenas no lado do cobre.

O ensaio realizado à soldadura EW5 mostrou o mesmo comportamento. Uma vez concluído o ensaio verificou-se uma vez mais que a deformação e respectiva rotura teve lugar no lado do cobre. Na Figura 4.26 apresenta-se as curvas de deformação obtidas e os pontos onde foram feitas as análises respectivamente.

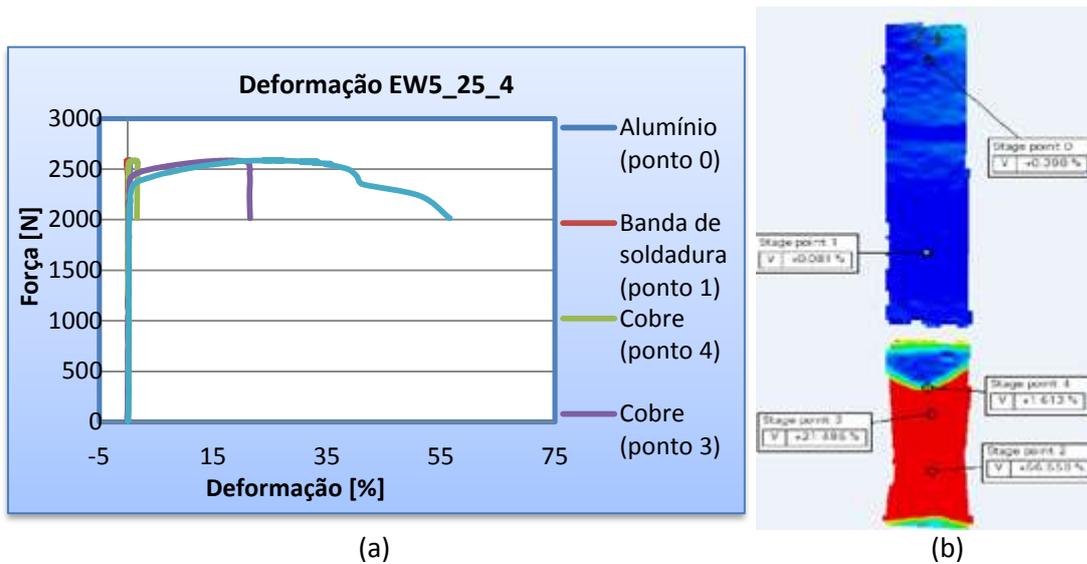


Figura 4.26: (a) Valores percentuais da deformação obtida na soldadura EW5\_25\_4; (b) análise pontual.

Para esta soldadura obteve-se um alongamento de 5,64 mm e a força máxima suportada foi de 2576 N. Na zona de rotura atingiu-se uma deformação de 56,55 %, valor superior visto que o alongamento foi maior que o da soldadura EW2. A representação gráfica do alongamento em função da força encontra-se no Apêndice G.

A soldadura EW6 foi a última a ser ensaiada. O comportamento foi semelhante, o alongamento registado para esta soldadura foi de 3,67 mm. A força máxima registada foi de 2619 N, valor próximo dos registados nos restantes ensaios. A deformação observada no ponto onde se deu a rotura foi de 76,30 %. A representação gráfica da deformação e do alongamento em função da força encontra-se no Apêndice H.

## 5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O trabalho apresentado teve como objectivo a análise da influência do tipo e rácio de explosivo, e da base da placa estacionária, na morfologia e qualidade das ligações Al-Cu. Tal como ilustrado na Figura 4.3, a generalidade das soldaduras enquadrara-se na janela de soldabilidade, à excepção da soldadura EW1, produzida com cordão detonante. Conforme referido anteriormente, a ligação Cu-Al nesta soldadura não se estabeleceu devido à velocidade de detonação  $V_d$  deste tipo de explosivo ser demasiado elevada. As soldaduras EW3 e EW4 não foram analisadas em consequência do insucesso dos ensaios, devido à inexistência de detonação. Nas soldaduras em que foi estabelecida a ligação Al-Cu foi observada a influência dos parâmetros acima descritos. A influência do tipo de explosivo na  $V_d$  é apresentada na Figura 5.1. Verifica-se que o explosivo Eex+15% MEOV apresenta velocidade de detonação ( $V_d$ ) muito superior aos restantes tipos de explosivos usados. Nos restantes casos, a  $V_d$  segue uma tendência crescente com o rácio de explosivo.

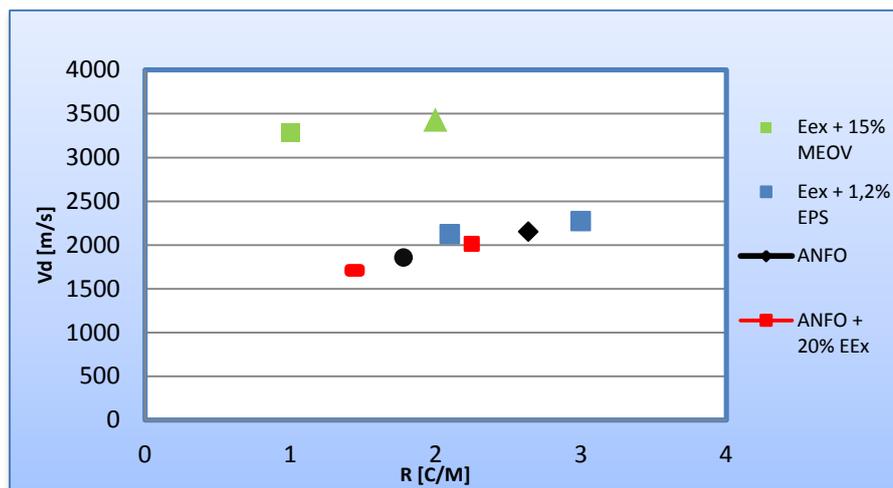


Figura 5.1: Evolução de  $V_d$  com o rácio de explosivo.

Ao contrário de  $V_d$ , a  $V_p$  mostra não ser influenciada pelo tipo de explosivo. Na Figura 5.2 pode constatar-se que, independentemente do tipo de explosivo utilizado, a velocidade de impacto  $V_p$  cresce uniformemente com o aumento do rácio de explosivo, o que é consistente de acordo com Gulenc, (2006).

Na Figura 5.3 está representada a evolução do ângulo de colisão  $\beta$  em função da  $V_p$ . Nas soldaduras EW2 e EW5, produzidas por explosivo com MEOV verifica-se uma redução sensível do ângulo  $\beta$ . Observa-se ainda que, para um mesmo tipo de explosivo, o ângulo  $\beta$  aumenta com  $V_p$ .

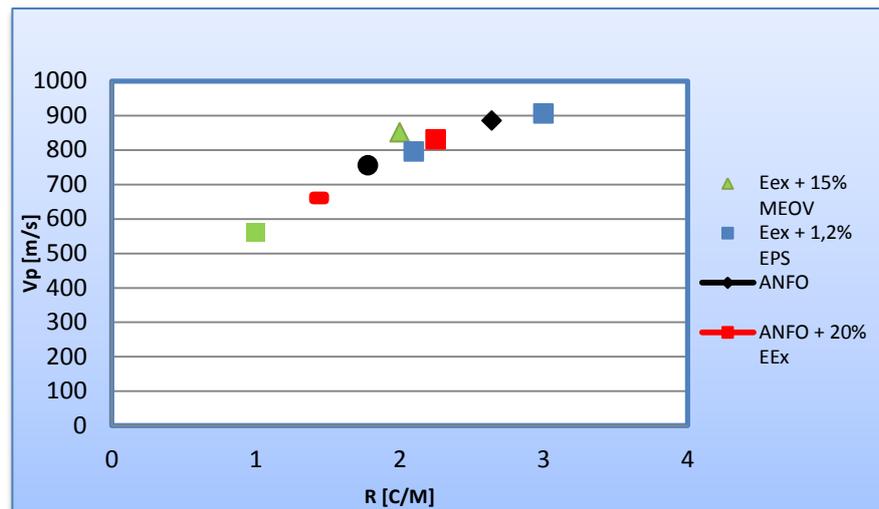


Figura 5.2: Evolução da  $V_p$  com o aumento do rácio de explosivo.

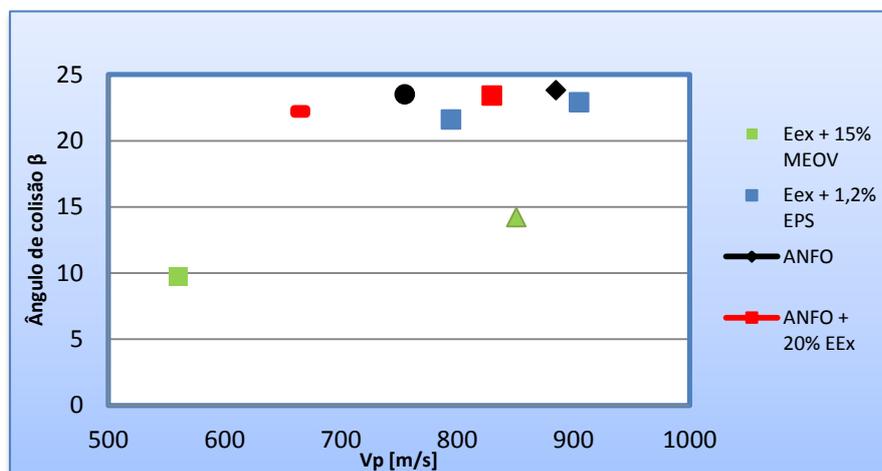


Figura 5.3: Evolução de  $\beta$  com a  $V_p$  para os vários tipos de explosivo.

Em relação à morfologia obtida, verifica-se que as amplitudes das ondas aumentam com o ângulo de colisão  $\beta$ , veja-se representação gráfica patente no Anexo 5. Observa-se ainda que os valores médios das amplitudes das ondas medidos nas soldaduras anteriores, realizadas com ANFO e com ANFO + 20% Eex, são superiores aos nas novas soldaduras, veja-se Figura 5.4. Este resultado é típico das oscilações provocadas durante o processo de detonação. O aumento da amplitude destas oscilações tendem a criar instabilidades durante o processo de formação de onda. Quanto maiores forem as instabilidades criadas, maiores serão as amplitudes das ondas geradas. No caso do ANFO as instabilidades criadas são superiores. Nas novas soldaduras verifica-se também que, na soldadura EW6, as instabilidades criadas pelo Eex + EPS, apesar de não serem tão elevadas se comparadas com as criadas pelo ANFO, são superiores às criadas pelo Eex + MEOV na soldadura EW5, apesar desta soldadura ter apresentado maior velocidade de impacto ( $V_p$ ). O tipo de base utilizada também mostra alguma influência na ondulação. Ao comparar a soldadura EW2 à EW5 e a soldadura SE1\_25 à soldadura SE1\_30 observa-se que a base de areia absorve uma parte do impacto durante o embate das chapas. Estas, apesar de apresentarem  $V_p$  muito diferentes, apresentam amplitudes muito semelhantes.

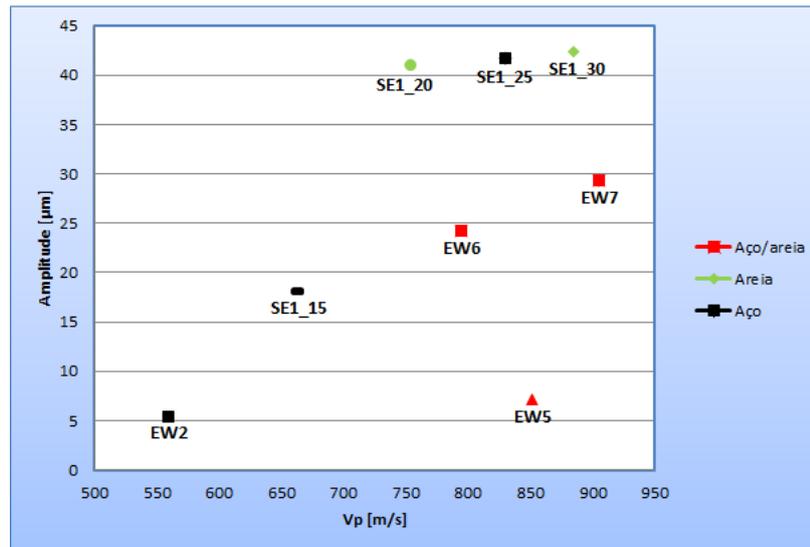


Figura 5.4: Evolução da amplitude com a  $V_p$ .

No entanto, para o mesmo tipo de explosivo e sensibilizante, observa-se o aumento do valor médio da amplitude com a  $V_p$ , conforme resulta da comparação de EW6 e EW7.

Na Figura 5.5 observa-se que as soldaduras realizadas com ANFO proporcionaram maiores comprimentos de onda na interface, embora a adição de emulsão explosiva ao ANFO reduza substancialmente esses comprimentos. Como seria de esperar em face deste resultado, as soldaduras realizadas com emulsão explosiva com sensibilizante apresentam comprimento de onda mais baixo, mesmo para  $V_p$  mais elevada. A sensibilização da emulsão explosiva com EPS proporcionou um ligeiro aumento do comprimento de onda em relação ao sensibilizante MEOV. Este efeito na amplitude e comprimento de onda do sensibilizante EPS relativamente ao MEOV já tinha sido observado anteriormente no caso do revestimento do aço carbono por aço inoxidável, em configuração cilíndrica, (Mendes et al., 2012). O aumento de comprimento de onda com o rácio de explosivo é também consistente com a literatura, (Gulenc, 2006).

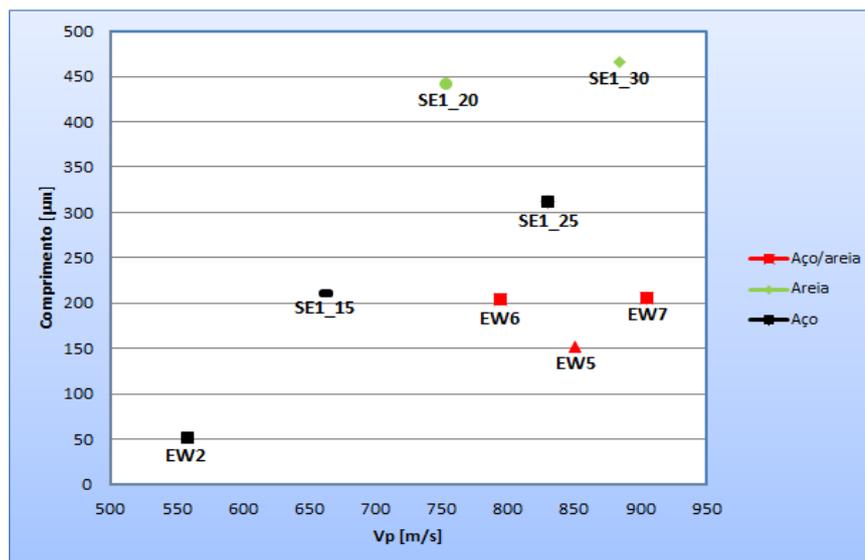


Figura 5.5: Evolução do comprimento das ondas com  $V_p$ .

No que toca às durezas obtidas, o tipo de base utilizada influenciou nas suas magnitudes. Vê-se, pela Figura 5.6, que as soldaduras realizadas com a base de aço apresentam valores de dureza consideravelmente superiores face às restantes soldaduras. É notável também o efeito do tipo de explosivo utilizado. Ao comparar a soldadura EW5 à EW6, ambas realizadas com o mesmo rácio de explosivo, obteve-se valores de dureza diferentes. Este fenómeno é explicado pelo aumento de deformação plástica da soldadura EW6 devido as instabilidades causadas pelo EPS durante a detonação. O rácio de explosivo, no caso das soldaduras EW6 e EW7, também se fez sentir. A soldadura EW7, realizada nas mesmas condições de rigidez que a soldadura EW6, apresenta maior dureza na interface. Contudo, na generalidade, pode afirmar-se que a dureza na interface apresenta-se superior para soldaduras realizadas em bases de aço, o que é justificável pela rigidez que fornece. Os valores de dureza presentes na interface para todas as soldaduras com *flyer* de 1 mm estão patentes na Figura 5.5.

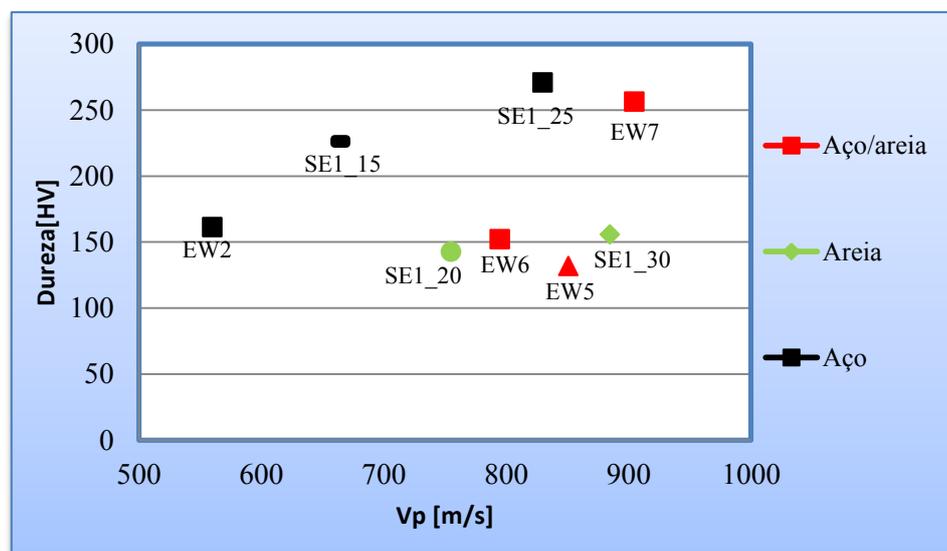


Figura 5.6: Dureza em função da Vp.

Os compostos intermetálicos foram identificados em todas as soldaduras embora no caso da soldadura EW5 a sua presença seja muito pontual. Esta soldadura ocupa uma posição na janela de soldabilidade que é caracterizada por soldaduras que apresentam excesso de fusão e compostos intermetálicos. A redução destas zonas neste caso está relacionada com a base de areia utilizada. As restantes soldaduras apresentam características na interface que estão de acordo com a posição ocupada na janela de soldabilidade. Verifica-se que o aumento do rácio de explosivo está relacionado com o aumento da espessura das zonas fundidas, o que leva à formação de novas fases. As análises químicas realizadas mostram que as fases  $\text{CuAl}_2$  se formam para baixos rácios de explosivo enquanto que as fases  $\text{CuAl}$  se apresentam para rácios de explosivo mais elevados, o que é consistente com os resultados das análises químicas efectuadas por Dias (2012) e Santos (2013). As características finais das soldaduras antigas e das novas soldaduras são apresentadas no Anexo 6.

## 6 CONCLUSÕES

O estudo da influência do tipo e rácio de explosivo na qualidade das soldaduras por explosão de Cu a Al permitiu retirar as seguintes conclusões:

- As velocidades de detonação mais elevadas foram observadas para a emulsão explosiva, sensibilizada com MEOV.
- A velocidade de detonação ( $V_d$ ) cresce com o rácio de explosivo (R), consoante o tipo de explosivo usado.
- A velocidade de impacto ( $V_p$ ), aumenta com R, independentemente do tipo de explosivo.
- O aumento de  $V_p$  conduz ao aumento do ângulo de colisão ( $\beta$ ).
- A redução da velocidade no ponto de colisão ( $V_c$ ) está associada a uma redução do ângulo  $\beta$ .
- Os explosivos ANFO e Eex + EPS proporcionam ondas na interface de soldadura com maior amplitude e comprimento de onda.
- A amplitude e comprimento de onda crescem com o aumento de  $V_p$  e  $\beta$ .
- O aumento do R conduziu a uma maior espessura das zonas fundidas e a maior presença de compostos intermetálicos, fissuras e cavidades na interface das soldaduras.
- Valores de dureza obtidos foram superiores para as bases que apresentavam maior rigidez.
- O aumento do R conduz à formação de compostos intermetálicos com fases próximas de CuAl e CuAl<sub>2</sub>.
- As soldaduras realizadas apresentaram sempre resistência superior ao material menos resistente, neste caso o cobre, rompendo sempre neste numa zona afastada da soldadura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Abrahamson G. R. J., (1961), Appl. Mech.
- Acarer M. (2011), Electrical, Corrosion, and Mechanical Properties of Aluminum-Copper Joints Produced by Explosive Welding, *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Bahrani A. S., Black T. J., Crossland B. (1967), The mechanics of wave formation in explosive welding, *Proc. Roy Soc. A*; 296(9):123–36.
- Ben-Artzy A., A. Sternb, N. Frage, V. Shribman, O. Sadot (2010), Wave formation mechanism in magnetic pulse welding, *International Journal of Impact Engineering* 37 (2010) 397–404.
- Broeckhove J., L. W. (2010), Experimental research on magnetic pulse welding of dissimilar metals, *UGent*.
- Buczowski D., Zygmunt B. (2011), Detonation Properties of Mixtures of Ammonium Nitrate Based Fertilizers and Fuels, *Central European Journal of Energetic Materials*, 8(2), 99-106.
- Chou P. C., and W. J. Flis. (1986), Recent Developments in Shaped Charge Technology. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 11 (4):99-114.
- Chou P. C., J. Carleone, W. J. Flis, R. D. Ciccarelli, and E. Hirsch (1983), Improved formulas for velocity, acceleration, and projection angle of explosively driven liners, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 8 (6):175-183.
- Cowan G. R., and A. H. Holtzman (1963), Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding, *Journal of Applied Physics* 34 (4):928-939.
- Cowan G. R., O. R. Bergaman, and A. H. Holtzman (1971), Mechanics of bond wave formation in explosive cladding of metals, *Metallurgical Transactions* 2:3145.
- Crossland B. (1982), Explosive welding of metals and its application, *Edited by Oxford, Oxford Series on Advanced Manufacturing, Oxford, UK: Clarendon Press*.
- Denyachenko O. A., S. P. Timchenko (1978), Explosive Welding In Chemical Engineering, *Foreign Technology*.
- Deribas A. A., Kudinov V. M., Matveenkov F. I., and Simonov V. A. (1967), Explosive welding, *Siberian branch of academy of sciences in explosive welding. Fiz Goreniya Vol. 3, No. 1, pp. 111-118*.
- Dias T. (2012), Soldadura Al-Cu por explosivo em configuração plana, *Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de*

*Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.*

- Durgutlu A., Okuyucu H., Gulenc B. (2007), Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel, *Materials and Design* 29 (2008) 1480–1484.
- El-Sobky H., and T. Z. Blazynski (1975), Experimental investigation of the mechanisms of explosive welding by means of a liquid analogue, *Proceedings of the Proceedings of the Fifth international Conference on High Energy Rate Fabrication, 1-21, at Denver, Colorado.*
- Findik F. (2011), Recent Developments in Explosive Welding, *Materials and Design* 32 (2011) 1081–1093.
- Ghomi M. (2009), Impact Wave Process Modeling and Optimization in High Energy Rate Explosive Welding, *Mälardalen University Press Licentiate Theses, No. 106.*
- Gulenc B. (2006), Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method, *Materials and Design* 29 (2008) 275–278.
- Hang C. J., C. Q. Wang, M. Mayer, Y. H. Tian, Y. Zhou, H. H. Wang (2008), Growth behavior of Cu/Al intermetallic compounds and cracks in copper ball bonds during isothermal aging, *Microelectronics Reliability* 48 416–424.
- Hunt J. N. (1968), *Phil. Mag.*, 17, 669-80.
- Kennedy J. E., Davidson L., Coffey F. (1972), Explosive output for driving metal, *Proc behavior and utilization of explosives in engineering design conf. ASME; p. 109 [New Mexico Section].*
- Kennedy, James E., Jonas A. Zukas, and William P. Walters (1998), The Gurney Model of Explosive Output for Driving Metal, *Explosive Effects and Applications, 221-257, edited by L. Davison and Y. Hori: Springer New York.*
- Kim H., Lee J. Y., Paik K. (2003), Effects of Cu/Al Intermetallic Compound (IMC) on Copper Wire and Aluminum Pad Bondability, *IEEE transactions on components and packaging technologies, vol. 26, no. 2.*
- Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J. and Farinha R. (2010), Non monotonic detonation velocity and pressure behavior of emulsion explosive, *13th Int. Seminar NTREM; Pardubice; Czech Republic, pp 221-228.*
- Mendes R., Ribeiro J. B., Loureiro A. (2012), Effect of the explosive characteristics on explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration, *Journal of materials and design.*
- Mousavi A., P. Farhadi Sartangi (2009), Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel, *School of Metallurgy and Materials Engineering,*

- University College of Engineering, University of Tehran, P.O. Box 11365-4563, Tehran, Iran.*
- Plaksin I., Campos J., Ribeiro J., Mendes R., Direito J., Braga D., and Pruemmer R. (2003), Novelties in physics of explosive welding and powder compaction, *J. Phys. IV France* 110 797-802.
- Reid S. R. (1974), A discussion of the mechanism of interface wave generation in explosive welding, *International. J. Mech. Sci.* 16, 399–413.
- Robinson J. L. (1975), *Phil. Mag.*, 31, 587-97.
- Santos N. (2013), Soldadura por explosivo em configuração plana de Alumínio-Cobre, *Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projecto, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.*
- Sedighi M., M. Honarpisheh (2011), Experimental study of through-depth residual stress in explosive welded Al–Cu–Al multilayer, *School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*
- Szecket A. (1979), An experimental study of the explosive welding window. *PhD, thesis, Queen's University of Belfast.*
- Verstraete J., Waele W., Faes K. (2011), Magnetic Pulse Welding: Lessons To Be Learned From Explosive Welding, *Ghent University, Laboratory Soete, Belgium.*
- Wittman R. H. (1973), The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welded aluminum alloy, *Proceedings of the Second International Symposium on the Use of Explosive Energy in Manufacturing, 153-168, at Mariánské Lázně, Czechoslovakia.*
- Wuhrer R., M. Lee, K. Moran, and W.Y. Yeung (2006), X-Ray Mapping of Metallic Elements in Roll Bonded Metal Laminates, *Mater. Forum*, 2006, 30, p 225–232.
- Wulff F. W., C. D. Breach, D. Stephan, Saraswati, K. J. Dittmer (2004), Characterization of Intermetallic Growth in Copper and Gold Ball Bonds on Aluminium Metallization, *Materials and applications centre.*
- Young G. (2004), Explosion Welding. Technical Growth and Commercial History, *Dynamic Materials Corporation, U.S.A., Stainless Steel World 2004 © KCI Publishing BV.*

## ANEXO 1 – PARAMETROS DE SOLDADURA USADOS ANTERIORMENTE, (DIAS, 2012) E (SANTOS, 2013).

	Parâmetros de soldadura anteriores			
	SE1_30	SE1_20	SE1_25	SE1_15
<b>Tipo de explosivo</b>	ANFO	ANFO	80 % ANFO + 20 % EEx	80 % ANFO + 20 % EEx
<b>Massa de explosivo [g]</b>	230	155	180	110
<b>Massa do flyer [g]</b>	87	87	80	80
<b>Rácio de explosivo</b>	2,64	1,78	2,25	1,4
<b>Stand of distance (STD) [mm]</b>	1,42	1,42	1,4	1,4
<b>Densidade do flyer [kg/m<sup>3</sup>]</b>	8924	8924	8924	8924
<b>Densidade de explosivo [kg/m<sup>3</sup>]</b>	800	800	820	820
<b>Volume de explosivo [cm<sup>3</sup>]</b>	288,2	193,8	450	270
<b>Volume do flyer [cm<sup>3</sup>]</b>	9,78	9,78	18	18
<b>Base</b>	Areia	Areia	Aço	Aço

## ANEXO 2 – VELOCIDADES DE DETONAÇÃO DAS SOLDADURAS ANTERIORES, (DIAS, 2012) E (SANTOS, 2013)

Soldaduras anteriores								
	SE1_30		SE1_20		SE1_25		SE1_15	
	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Sonda pos. (mm)	Tempo ( $\mu$ s)
	0	0,72	83,82	38,24	0	0	112,24	53,5
	14,95	9,68	98,87	46,6	15,7	7,65	127,64	-
	29,6	13,96	113,72	54,36	30,4	16,2	143,28	-
	-	-	-	-	45,22	21,9	-	-
<b>Vd(m/s)</b>	2149		1855		2013		1712	

## ANEXO 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ANÁLISE QUÍMICA EFECTUADA NO PONTO 3 E NO PONTO 5

Quantification Results

EDAX ZAF Quantification (Standardless)  
Element Normalized  
SEC Table : Default

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	6.04	12.87	0.0114	1.1129	0.1694	1.0001
O K	5.57	8.91	0.0302	1.0875	0.4984	1.0009
CuL	10.50	4.23	0.0891	0.8684	0.9712	1.0061
MgK	1.46	1.54	0.0133	1.0348	0.8597	1.0183
AlK	75.31	71.43	0.6870	1.0001	0.9120	1.0002
SiK	1.12	1.02	0.0079	1.0257	0.6879	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Backgrd	Inte. Error	P/B
C K	2.49	0.25	13.09	10.00

Page Setup... Print Results Print Spc and Results Ok

Quantification Results

EDAX ZAF Quantification (Standardless)  
Element Normalized  
SEC Table : Default

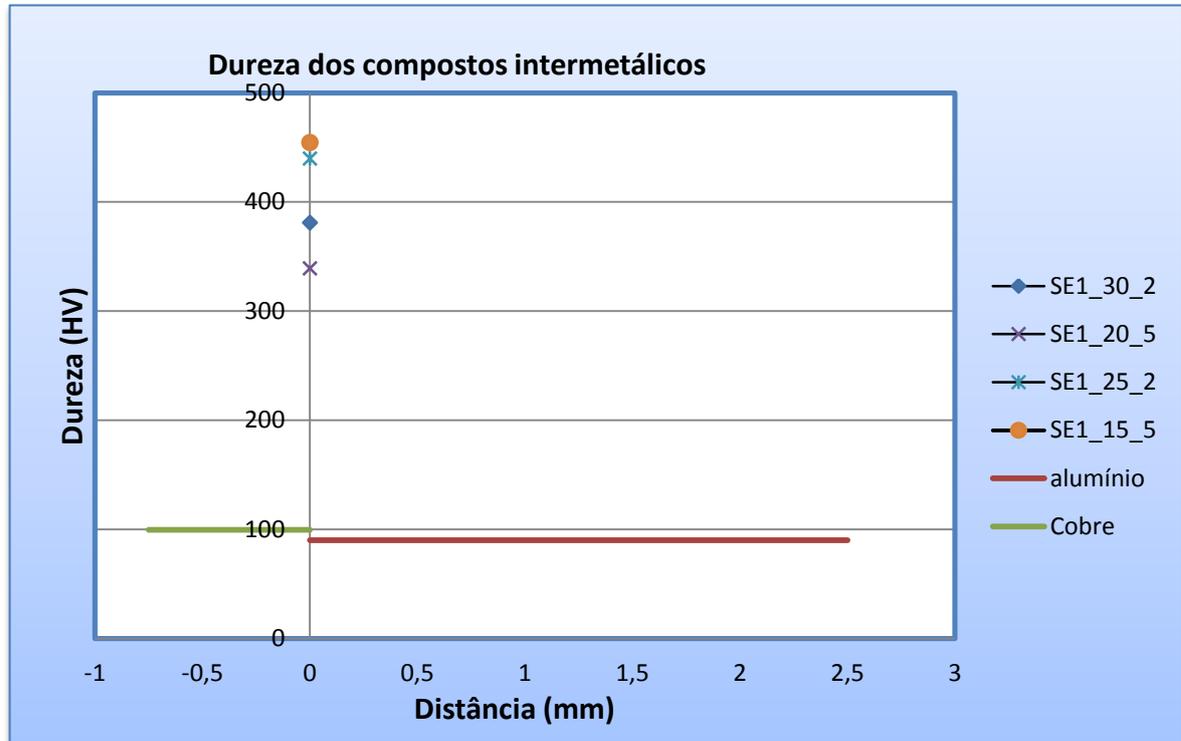
Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	5.89	22.65	0.0166	1.2443	0.2267	1.0002
O K	2.06	5.94	0.0134	1.2145	0.5342	1.0021
CuL	87.54	63.65	0.8319	0.9682	0.9814	1.0001
MgK	0.51	0.98	0.0028	1.1742	0.4595	1.0003
AlK	3.17	5.43	0.0210	1.1286	0.5866	1.0001
SiK	0.83	1.37	0.0066	1.1524	0.6885	1.0000
Total	100.00	100.00				

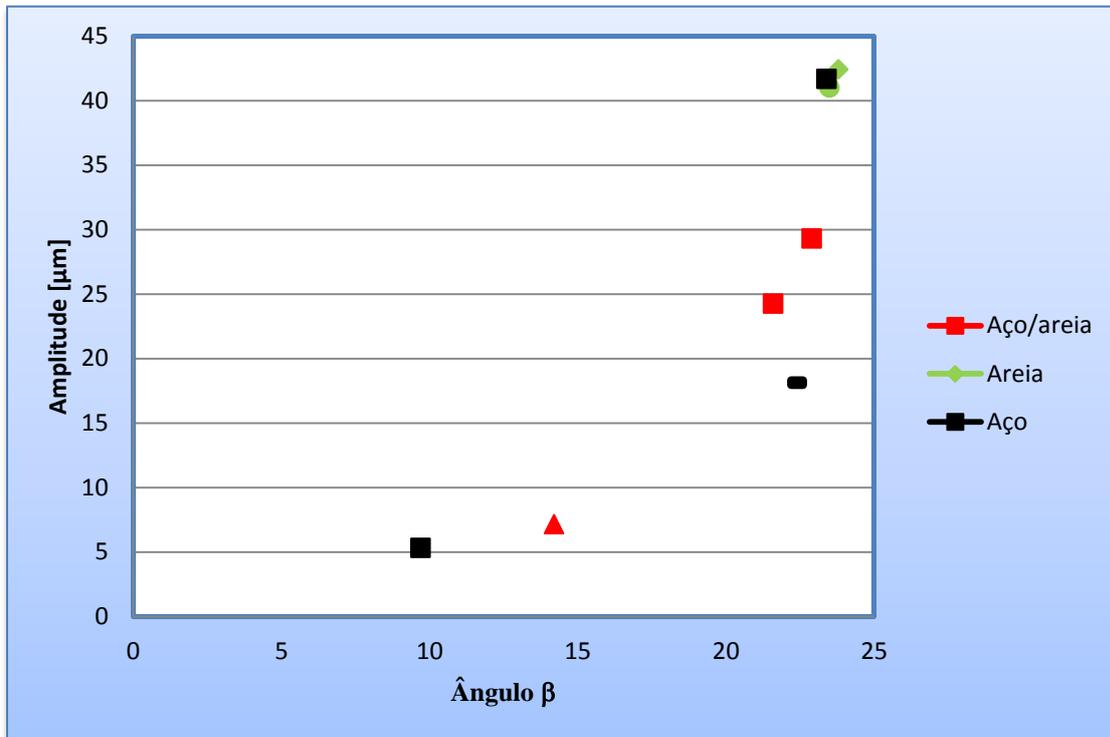
Element	Net Inte.	Backgrd	Inte. Error	P/B
C K	1.51	0.33	12.15	4.62

Page Setup... Print Results Print Spc and Results Ok

## ANEXO 4 – DUREZA DOS COMPOSTOS INTERMETÁLICOS DAS SOLDADURAS ANTERIORES



## ANEXO 5 – EVOLUÇÃO DAS AMPLITUDES DAS ONDAS COM O ÂNGULO $\beta$

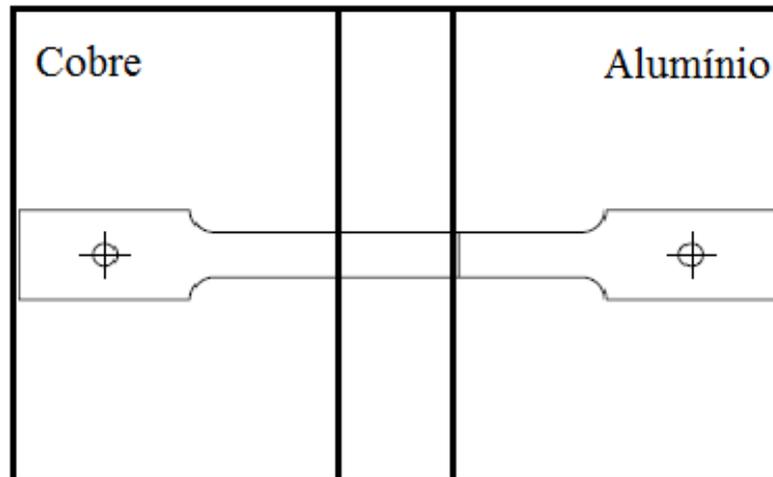


## ANEXO 6 – CARACTERISTICAS FINAIS DAS ANTERIORES E NOVAS SOLDADURAS

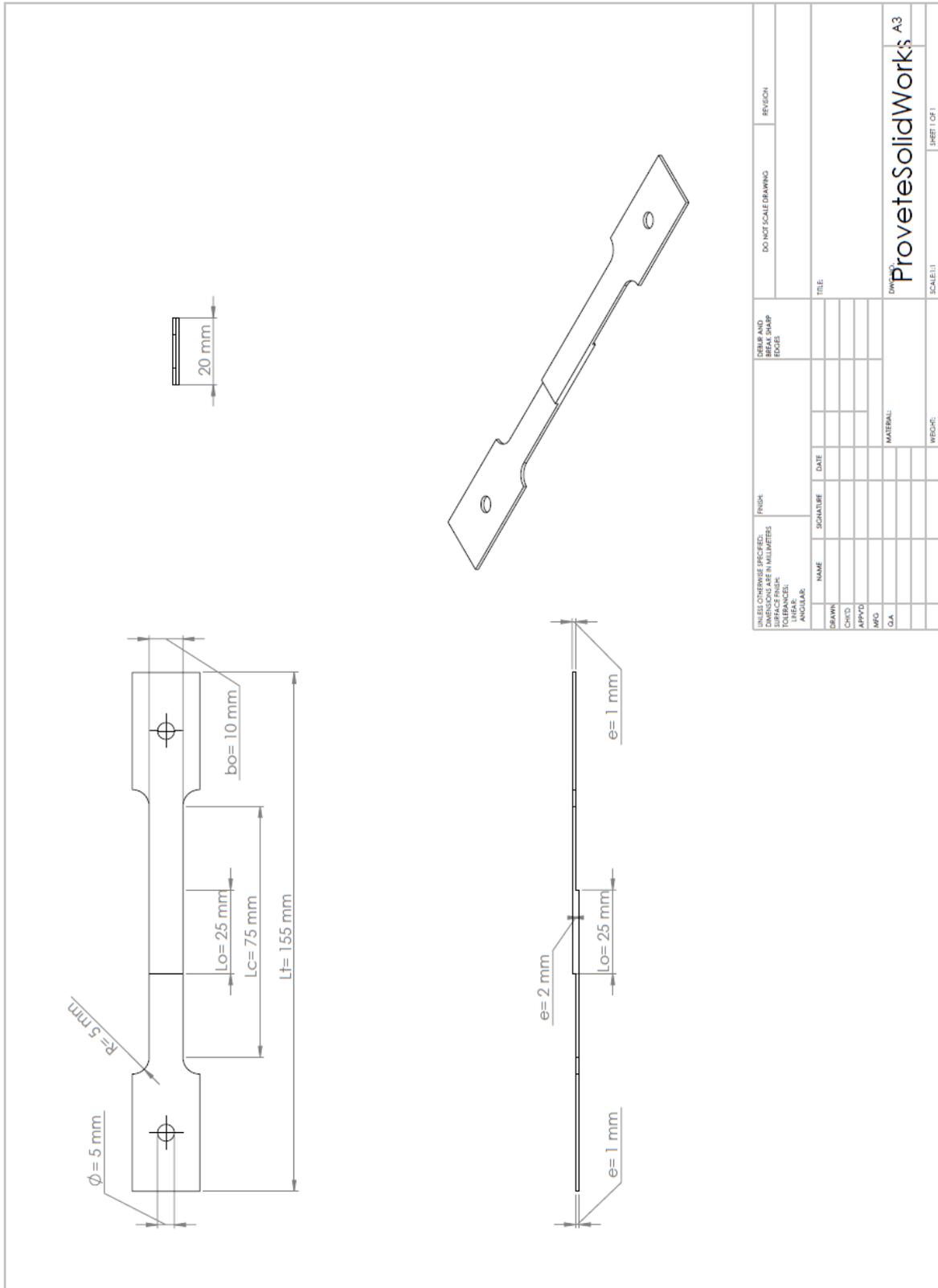
Parâmetros	Soldaduras anteriores			
	SE1_30	SE1_25	SE1_20	SE1_15
Tipo de explosivo	ANFO	80 % ANFO + 20 % Eex	ANFO	80 % ANFO + 20 % Eex
R [c/m]	2,64	2,25	1,78	1,4
Vp [m/s]	885	830	755	660
Vc [m/s]	2149	2013	1855	1712
$\beta$ [graus]	23,8	23,4	23,5	22,2
Amplitude média [ $\mu\text{m}$ ]	42,4	41,67	40,98	18,1
Comprimento médio [ $\mu\text{m}$ ]	465,45	311,5	440,9	210,86
Dureza interface [HV]	155,67	270,85	142,68	226,06
Dureza intermetálicos [HV]	380,86	439,69	338,95	454,27
Redução de espessura do flyer [%]	9,3	8,4	5,7	4,3
Base	areia	aço	areia	aço

Parâmetros	Novas soldaduras				
	EW1	EW2	EW5	EW6	EW7
Tipo de explosivo	CD	Eex + 15 % MEOV		Eex + 1,2% EPS	
R [c/m]	0,39	1	2	2,1	3
Vp [m/s]	574	560	851	795	905
Vc [m/s]	7000	3286	3430	2121	2271
$\beta$ [graus]	4,7	9,7	14,2	21,6	22,9
Amplitude média [ $\mu\text{m}$ ]	-	5,3	11,1	24,2	29,2
Comprimento médio [ $\mu\text{m}$ ]	-	50	151,9	204,4	205,6
Dureza interface [HV]	-	161,3	131,9	152,1	256,3
Dureza intermetalicos [HV]	-	239,4	366,2	459,3	608,8
Resistência ao corte [N]	-	2720	2586	2623	-
Redução de espessura do flyer [%]	1,4	11,7	13,4	11,71	15,1
Base	aço	aço	aço/areia	aço/areia	aço/areia

## APÊNDICE A – ZONA ONDE FORAM RETIRADOS PROVETES



# APÊNDICE B – DESENHO DO PROVETE PARA ENSAIOS MECÂNICOS.

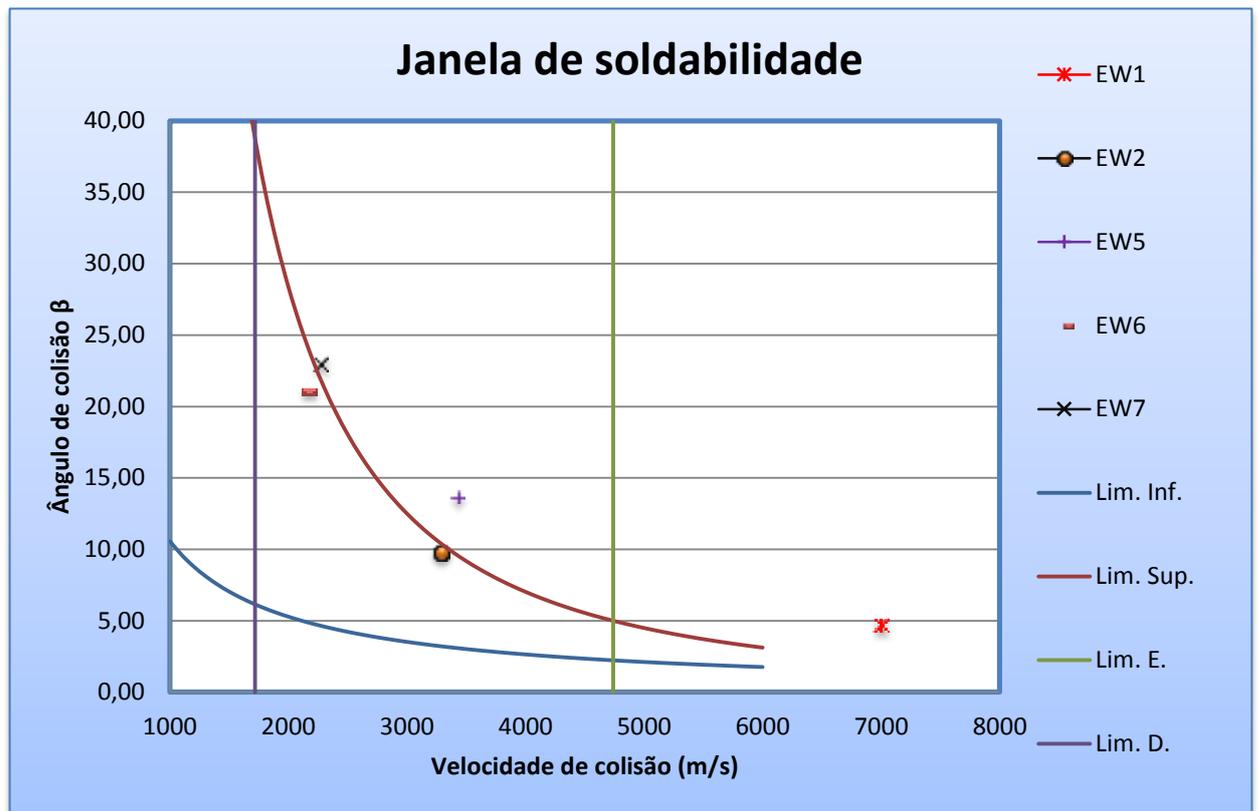


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS DIMENSIONS IN PARENTHESES ARE IN INCHES		FINISH		DO NOT SCALE DRAWING		REGION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE	
CHECKED		NAME		SIGNATURE		DATE	
APPROVED		NAME		SIGNATURE		DATE	
MFC		NAME		SIGNATURE		DATE	
QA		NAME		SIGNATURE		DATE	
MATERIAL:		MATERIAL:		MATERIAL:		MATERIAL:	
DWG NO: ProveteSolidWorks A3		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1			

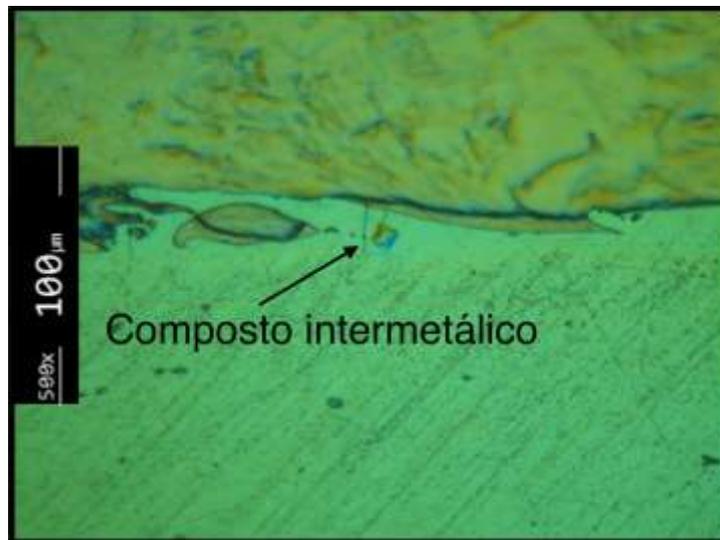
## APÊNDICE C – CONSTANTES USADAS PARA A JANELA DE SOLDABILIDADE

Variável	Unidades	Equação	Cobre	Alumínio	CD	ANFO	Eex + 15% MEOV	Eex + 1,2% EPS
$K_1$	[-]	(2.1)	0,6	0,6	-	-	-	-
N	[-]	(2.3)	0,11	0,11	-	-	-	-
$C_p$	[J/Kg.K]	(2.3)	385		-	-	-	-
K (526,85°C)	[W/m.K]	(2.3)	401	-	-	-	-	-
$\rho$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	(2.1),(2.3),(2.1)	8924	2697	-	-	-	-
$H_v$	[N/m <sup>2</sup> ]	(2.1),(2.6)	1177,2x10 <sup>6</sup>	1079,1x10 <sup>6</sup>	-	-	-	-
h	[mm]	(2.3)	1	3	-	-	-	-
$R_e$	[-]	(2.6)	10,5	10,5	-	-	-	-
$T_m$	[°C]	(2.3)	1083	-	-	-	-	-
$C_0$	[m/s]	(2.3)	4740	-	-	-	-	-
$\sqrt{2E}$	[m/s]	(2.6),(2.4)	-	-	2333	1055	1095	1000
$P_{cj}$	[GPa]	(2.8)	-	-	5	1,5	3,1	2,8

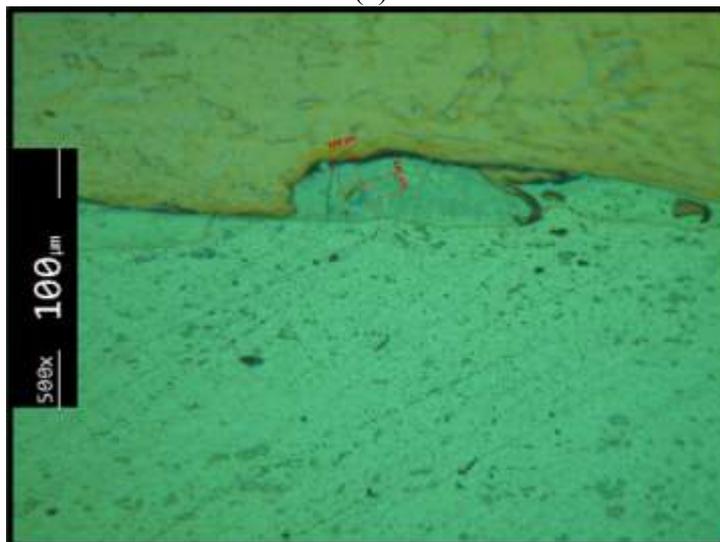
## APÊNDICE D – JANELA DE SOLDABILIDADE PARA AS NOVAS SOLDADURAS



## APÊNDICE E – INDENTAÇÕES NOS COMPOSTOS INTERMETÁLICOS



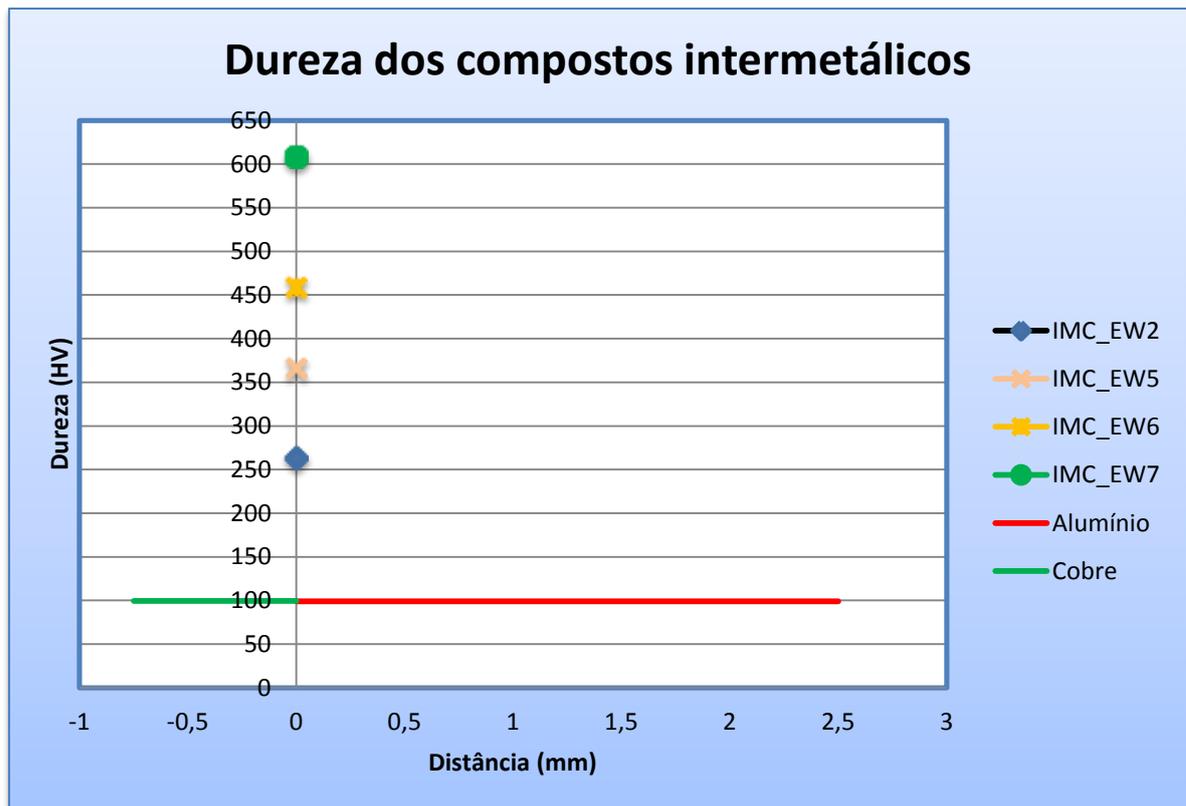
(a)



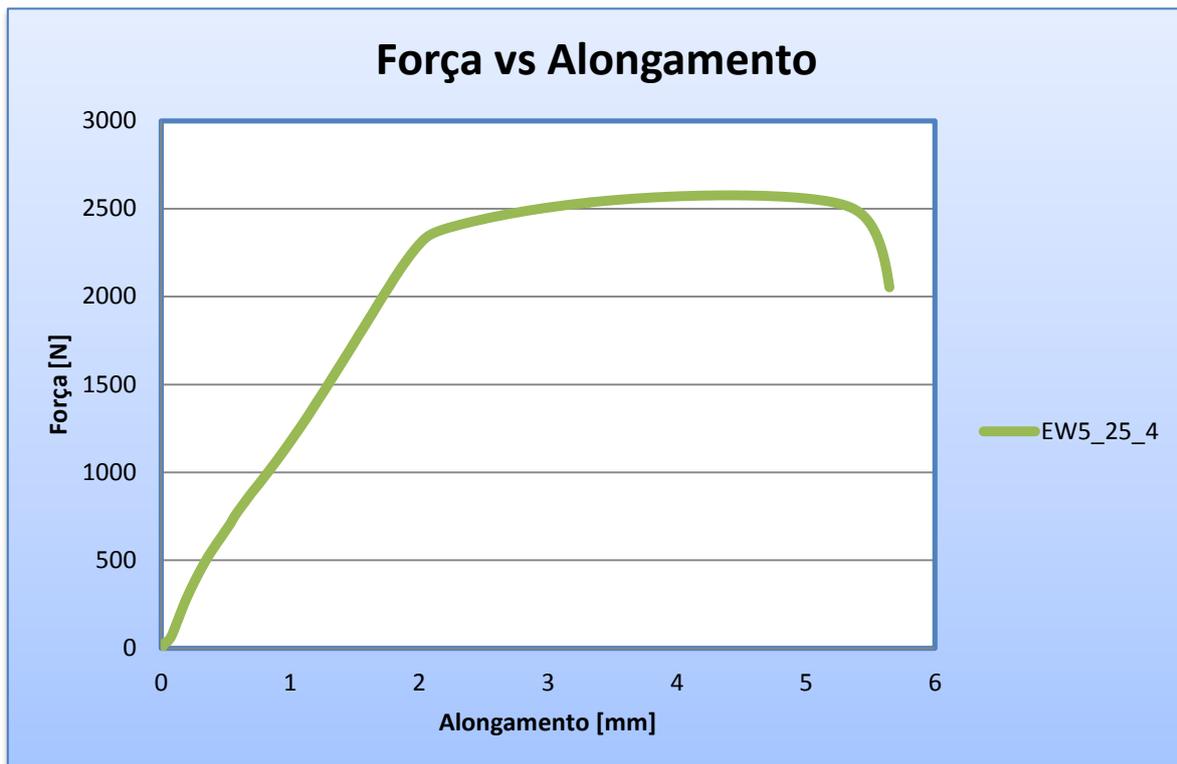
(b)

(a) Soldadura EW6; (b) soldadura EW7.

## APÊNDICE F – DUREZA DOS COMPOSTOS INTERMETÁLICOS PARA AS NOVAS SOLDADURAS



## APÊNDICE G – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FORÇA EM FUNÇÃO DO ALONGAMENTO DA SOLDADURA EW5



## APÊNDICE H – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FORÇA EM FUNÇÃO DO ALONGAMENTO E DA DEFORMAÇÃO DA SOLDADURA EW6

