



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Soldadura por explosivo em configuração plana de Alumínio-Cobre

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

Autor

Nelson Rodrigues de Almeida Santos

Orientadores

Ricardo António Lopes Mendes

Altino de Jesus Roque Loureiro

Júri

Presidente Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro

Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2013

O primeiro passo para o conhecimento é sabermos que somos ignorantes.

Cícero

Aos meus pais e irmã.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi exequível graças ao contributo de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar a minha gratidão.

Ao Professor Doutor Altino Loureiro, pela constante disponibilidade para ensinar, orientar e corrigir, tendo sido fundamental para a concretização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes, pela permanente disponibilidade, conhecimento e acompanhamento nos ensaios experimentais.

Ao Allan Lins e Olefson Ianosi, pela colaboração na realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos pela amizade e apoio nesta nova etapa da minha formação.

À minha família pelo incentivo ao longo da minha vida académica.

Por último, e não menos importante, à minha namorada, Cláudia, por tudo.

Resumo

Este trabalho teve por objectivo o estudo da influência de parâmetros de soldadura por explosivo, como o rácio de explosivo e a espessura da chapa voadora em soldaduras alumínio-cobre em configuração plana.

Foi estudado o efeito de quatro rácios de explosivo e duas espessuras de chapa voadora de cobre na morfologia, microestrutura e propriedades mecânicas das soldaduras. Foi observado que o aumento do rácio de explosivo conduz ao aumento da velocidade do ponto de colisão e da velocidade de impacto, e conseqüentemente, à redução da espessura da chapa voadora após soldadura e à formação de interfaces com ondas de maior amplitude. O aumento da espessura da chapa voadora conduziu à redução da velocidade do ponto de colisão e da velocidade de impacto. A análise microestrutural mostrou que na zona da interface se formam compostos intermetálicos duros e frágeis, principalmente para as soldaduras realizadas com maior rácio de explosivo. Os ensaios de arrancamento mostraram que as soldaduras realizadas com maior rácio de explosivo, e portanto maior velocidade de impacto, apresentam melhores propriedades mecânicas. O ensaio de arrancamento desenvolvido no âmbito deste estudo necessita de ajustamentos, principalmente para as soldaduras com chapa voadora de espessura reduzida.

Palavras-chave: Soldadura por explosivo, Cobre, Alumínio, Configuração plana, Compostos Intermetálicos.

Abstract

This work aimed to study the influence of explosion welding parameters, as the explosive ratio and the plate thickness of the flyer, on aluminum-copper welds in flat configuration.

The effect of four explosive ratio and two copper flyer thicknesses on the morphology, microstructure and mechanical properties of welds was analyzed. It has been observed that increasing the explosive ratio leads to increased speed of the collision point and impact velocity, consequently reducing the flyer thickness after welding and producing wavy weld interfaces with greater amplitude. The increase of the flyer thickness led to a decrease in collision point speed and the impact speed of the flyer. The microstructural analysis showed that the weld interfaces display hard and brittle intermetallic compounds, mainly for the welds made with a higher ratio of explosive. The pullout tests showed that the welds performed with a higher ratio of explosive and therefore higher impact velocity exhibit better mechanical properties. The pullout test developed in this study requires adjustments, primarily for welds using flyer plates with reduced thickness.

Keywords Explosive welding, Cooper, Aluminium, Flat Configuration, Intermetallics.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas	x
Simbologia.....	x
Siglas	xi
1. Introdução.....	1
2. Estado da arte.....	2
2.1. Histórico.....	2
2.2. Soldadura por Explosão	3
2.3. Janela de Soldabilidade.....	7
2.4. Impacto da Ondulação na Soldadura por Explosão	9
2.5. Selecção do Explosivo	12
2.6. Medição da Velocidade de Impacto.....	12
2.7. Vantagens do Processo	13
2.8. Desvantagens do Processo	14
2.9. Aplicações.....	14
2.10. Combinações Possíveis	15
3. Procedimento Experimental	16
3.1. Caracterização dos Materiais Base	16
3.2. Montagem Experimental.....	17
3.3. Medição da Velocidade de Detonação.....	18
3.4. Parâmetros de Soldadura	19
3.5. Nomenclatura das Amostras	20
3.6. Procedimento da Análise Metalográfica.....	21
3.7. Análise Mecânica.....	21
3.7.1. Micro dureza.....	21
3.7.2. Ensaio de Arrancamento.....	22
4. Resultados.....	24
4.1. Janela de Soldabilidade.....	24
4.2. Análise Macroscópica das Novas Soldaduras	29
4.3. Análise Micrográfica	31
4.3.1. Soldaduras Anteriores	31
4.3.2. Novas Soldaduras	37
4.4. Análise dos Compostos Intermetálicos.....	40
4.5. Análise de Dureza	41
4.5.1. Soldaduras SE1.....	41
4.5.2. Soldaduras SE3.....	44
4.6. Ensaio de Arrancamento	46
5. Discussão dos resultados	50

6. Conclusão	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO 1 – Desenho das Peças para o Ensaio de Arrancamento	60
ANEXO 2 – Dureza das Zonas Menos Ideais das Soldaduras SE3 e SE1	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Processo de soldadura por explosão em placas paralelas.....	3
Figura 2.2. Representação de alguns parâmetros de soldadura (F.Findik, 2010).....	4
Figura 2.3. Efeito do rácio de explosivo em placas Al-Cu, (B. Gulenc, 2006).....	5
Figura 2.4. Dureza numa soldadura Al-Cu, (M. Acarer, 2011).....	6
Figura 2.5. Janela de soldabilidade, (S. Kuzmin e V.Lysak, 2011).	7
Figura 2.6. Mecanismo de formação de ondas por indentação do jacto (http://www.dhclad.co.krnewtech/tech.htm , 2012).	10
Figura 2.7. Típica onda de explosão.....	11
Figura 2.8. Combinações possíveis por soldadura por explosão.....	15
Figura 3.1. Microestrutura das placas de cobre de: (a) 1mm; (b) 3mm. Ampliação: 100x.	16
Figura 3.2. Microestrutura da placa de alumínio. Ampliação 200x.	17
Figura 3.3. Montagem do 1º ensaio experimental.	18
Figura 3.4. Esquema eléctrico para a medição da velocidade de detonação.	18
Figura 3.5. Zonas de soldadura.....	20
Figura 3.6. Nomenclatura da amostra SE3_30_1.	21
Figura 3.7. Peças concebidas para o ensaio de arrancamento.	22
Figura 3.8. Maquinação da amostra para o ensaio de arrancamento.	22
Figura 3.9. Esquema do ensaio de arrancamento.	23
Figura 4.1. Processo de calibração para V_p _calibrado e tV_p _calibrado.	26
Figura 4.2. Janela de soldabilidade para <i>flyer</i> de cobre de 1 mm, com representação das soldaduras realizadas.	27
Figura 4.3. Janela de soldabilidade para <i>flyer</i> de cobre de 3 mm, com representação das soldaduras realizadas.	27
Figura 4.4. Nova soldadura para <i>flyer</i> de 3 mm: (a) rugosidade na superfície da placa de cobre (vista de cima); (b) interface das placas de alumínio, à esquerda e cobre, à direita, do ensaio SE3_N, em que não ocorreu soldadura.	29
Figura 4.5. Aspecto geral da nova soldadura SE3_30 e SE3_20.	30
Figura 4.6. Nova soldadura SE1_25 e SE1_15.	30
Figura 4.7. Nova soldadura SE1_25/15.....	31
Figura 4.8. Interfaces Cu/Al da amostra SE1_30_1, (a) ampliação 100x; (b) ampliação 500x.....	32

Figura 4.9. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_30_2, (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x.....	32
Figura 4.10. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_ZT, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.	33
Figura 4.11. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_20_4, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 100x.....	33
Figura 4.12. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_20_5, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.....	34
Figura 4.13. Microestrutura do alumínio da amostra SE1_20_4, ampliação 200x.....	34
Figura 4.14. Interfaces Al/Cu da amostra SE3_30_1, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.....	35
Figura 4.15. Interfaces Al/Cu da amostra SE3_30_2, (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x.....	35
Figura 4.16. Interfaces Al/Cu da amostra SE3_ZT, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 100x.	36
Figura 4.17. Interfaces Al/Cu da amostra: (a) SE3_20_4; (b) SE3_20_5. Ampliação: 100x.	37
Figura 4.18. Microestrutura do alumínio da SE3_30_2, ampliação 200x.....	37
Figura 4.19. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_25_1, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 100x.....	38
Figura 4.20. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_25_2, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.....	38
Figura 4.21. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_15_4, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.....	39
Figura 4.22. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_15_5, (a) zona inicial da amostra; (b) zona final da amostra.....	39
Figura 4.23. Imagem SEM da amostra SE1_25_2, (a) ampliação 125x; (b) ampliação 500x.	40
Figura 4.24. (a) Composição da zona clara para a amostra SE1_25_2; (b) Composição da zona escura para a amostra SE1_25_2.....	40
Figura 4.25. Imagem SEM da amostra SE1_15_5, (a) ampliação 125x; (b) ampliação 500x.	41
Figura 4.26. Composição química da amostra SE1_15_5.....	41
Figura 4.27. Resultados de dureza das amostras SE1_30_2 e SE1_20_4.....	42
Figura 4.28. Indentação no composto intermetálico da amostra SE1_20_4.....	43
Figura 4.29. Resultados de dureza das amostras SE1_25_2 e SE1_15_5.....	43
Figura 4.30. Indentações na soldadura SE1: (a) SE1_25_2; (b) SE1_15_5.....	44

Figura 4.31. Indentações no composto intermetálico das amostras SE1_25_2 e SE1_15_5.	44
Figura 4.32. Resultados de dureza das amostras SE3_30_2 e SE3_20_4.	45
Figura 4.33. Indentação no composto intermetálico da amostra SE3_30_2.	45
Figura 4.34. Curvas tensão/deformação das amostras SE3_30_2 e SE3_20_4.....	46
Figura 4.35. (a) Rompimento da amostra SE3_30_2; (b) Rompimento da amostra SE3_20_4.	47
Figura 4.36. Análise SEM da zona de fractura da amostra SE3_20_4.....	47
Figura 4.37. Curvas tensão/deslocamento das amostras SE1_25_2 e SE1_15_5.	48
Figura 4.38. (a) Rompimento da amostra SE1_25_2; (b) Rompimento da amostra SE1_15_5.	48
Figura 4.39. Curvas tensão/deformação das amostras 5 e 6.....	49
Figura 4.40. Rompimento da amostra 5.	49
Figura 5.1. Evolução de V_p em função de R	52
Figura 5.2. Evolução de β em função de R	53
Figura 5.3. Evolução da redução de espessura em função de V_p	53
Figura 5.4. Evolução da amplitude de ondulação em função de V_p	54
Figura 5.5. Evolução do comprimento de ondulação em função de V_p	54
Figura 5.6. Evolução de dureza em função de V_p	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades mecânicas da placa Al-Cu, (M. Acarer, 2011).	6
Tabela 3.1. Composição química dos metais base.	16
Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura das soldaduras realizadas anteriormente, (T. Dias, 2012).....	19
Tabela 3.3. Parâmetros de soldadura das novas soldaduras.	20
Tabela 4.1. Valores das constantes utilizadas na janela de soldabilidade.	24
Tabela 4.2. Velocidade de detonação das soldaduras anteriores, (T. Dias, 2012).	25
Tabela 4.3. Velocidade de detonação das novas soldaduras.	25
Tabela 4.4. Valores dos parâmetros de soldadura do <i>flyer</i> de 3 mm, (T. Dias, 2012).	28
Tabela 4.5. Valores dos parâmetros de soldadura do <i>flyer</i> de 1 mm.	28
Tabela 5.1. Propriedades e características gerais das soldaduras SE3.	50
Tabela 5.2. Propriedades e características gerais das soldaduras SE1.	51

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

- β – Ângulo de colisão
- ρ – Densidade
- τ – Constante de tempo
- A – Área da coroa circular
- c – Massa do explosivo
- C_o – Velocidade do som do material
- C_1, C_2 - Constantes empíricas
- c_p – Calor específico
- D_e – Diâmetro externo
- D_i – Diâmetro interno
- E - Energia de Gurney
- h - Espessura
- HV – Dureza de Vickers
- k – Condutibilidade térmica
- k_1 - Constante de limpeza de superfícies
- m – Massa da placa voadora
- N – Constante para metais
- P_{CJ} – Pressão de detonação de Chapman-Jouguet
- R – Rácio de explosivo
- Re – Número de Reynolds
- t – Tempo final
- t_0 – Tempo inicial
- T_m – Temperatura de fusão
- V_c – Velocidade no ponto de colisão
- V_d – Velocidade de detonação
- V_p – Velocidade de impacto

Siglas

ANFO - Ammonium Nitrate / Fuel Oil

EDS - Energy dispersive X-ray spectroscopy

EX – Emulsão Explosiva

EXW – Explosive Welding

LEDAP - Laboratório de Energética e Detónica, Associação de apoio

MEOV – Micro Esferas Ocas de Vidro

SEM - Scanning Electron Microscope

USA – United States of America

1. INTRODUÇÃO

A soldadura por explosivo merece uma grande atenção devido ao sucesso em unir metais com diferentes estruturas químicas e físicas, ao contrário dos processos de soldadura por fusão, que não são adequados a soldaduras de materiais dissimilares.

A Soldadura por Explosivo (*Explosive Welding, EXW*) é um processo de ligação de materiais similares e dissimilares no estado sólido. Este processo aplica a energia da explosão para a união de peças metálicas, sendo um método extremamente rápido. Na configuração plana, uma placa é acelerada pela expansão dos produtos da detonação contra a placa alvo, que está em repouso. Durante a colisão de alta velocidade, é formado um jacto de metal entre as placas, que remove as impurezas das superfícies; as placas são unidas a uma pressão muito elevada, o que provoca uma deformação plástica na sua interface, ocorrendo uma ligação metalúrgica por vezes mais forte que os metais originais.

Este processo tem sido usado industrialmente para revestimentos, fabricação de chapas bimetálicas e união de metais metalurgicamente incompatíveis. Por exemplo, uma placa bimetálica de alumínio-cobre é 50% mais leve, mantém a condutividade da placa de cobre e é 35% mais barata que uma placa de cobre com as mesmas dimensões da placa bimetálica.

Esta investigação teve por objectivo estudar a influência de vários parâmetros de soldadura, como o rácio de explosivo, velocidade de detonação, e distância entre placas, na qualidade das ligações obtidas. O trabalho consistiu na união de dois materiais dissimilares, alumínio AA 5083 e cobre Cu-DHP e na análise morfológica, microestrutural e mecânica das soldaduras obtidas. Este trabalho está na continuação de uma tese de mestrado elaborada no ano anterior (T. Dias, 2012).

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Histórico

A soldadura por explosivo foi observada durante a 1ª Guerra Mundial, quando fragmentos de bombas foram encontrados soldados a estruturas metálicas, (G. Young, 2004). Desde então as tecnologias de soldadura em geral, e a soldadura por explosivo em particular, evoluíram em grande escala no decorrer da 2ª grande guerra mundial.

Em 1944, L. R. Carl reconheceu este processo como soldadura por alta velocidade, realizou várias experiências e designou-a de “soldadura no estado sólido”, pois verificou que não existia zona de fusão entre as placas metálicas (G. Young, 2004). Nos anos seguintes, várias investigações foram realizadas, em especial num grupo liderado por M. A. Lavrent’ev, em Kiev, entre 1946-1948. Estes investigadores obtiveram um componente bimetálico aço-cobre através da soldadura por alta velocidade, onde eram visíveis ondas na sua interface, o que constitui uma das características da soldadura por explosão (A. Deribas et al., 1967).

A soldadura por explosivo foi reconhecida pela primeira vez como uma nova tecnologia, em 1957, pelo americano V. Philipchuk, durante um ensaio de conformação por explosão de uma placa de alumínio numa matriz de aço com uma secção transversal em U, onde se observou, por acaso, que o aço estava soldado ao alumínio numa área de uma polegada quadrada. V. Philipchuk publicou um método para obter este tipo de soldadura, patenteado em 1962, mas não obteve resultados positivos. Em 1960, Douglass, Holtzman e Cowan apresentaram outro método de soldadura por explosivo com características semelhantes ao método de V. Philipchuk, obtendo resultados positivos, o qual foi patenteado em 1964 (A. Deribas et al., 1967).

A partir de 1964 a produção industrial de metal bimetálico foi bem-sucedida através da empresa DuPont (USA); desde então, este processo foi evoluindo, devido às necessidades da indústria química e nuclear, sendo neste momento exequível a soldadura de mais de 260 combinações de metais (F. Findik, 2010).

2.2. Soldadura por Explosão

O método de soldadura por explosivo (Figura 2.1) é conhecido principalmente pela sua capacidade de soldar uma grande variedade de metais dissimilares ao contrário de outras técnicas comuns. Este processo é capaz de unir grandes superfícies de metal graças à sua capacidade de distribuir energia de alta densidade através da explosão. É descrito por um processo a frio, uma vez que não é fornecido calor externo e o calor existente é provocado pela explosão. Devido ao reduzido tempo do processo, a transferência de calor entre as placas metálicas é reduzida, não apresentando efeito térmico nem zonas termicamente afectadas como as soldaduras por arco eléctrico (B. Gulenc, 2006).

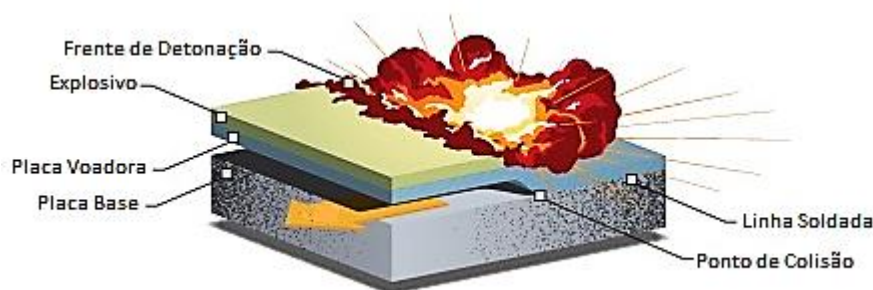


Figura 2.1. Processo de soldadura por explosão em placas paralelas.

Este tipo de soldadura é composto por duas placas caracterizadas como: placa base (placa estacionária) e placa voadora (*flyer plate*, placa que é projectada sobre a placa base). A placa base encontra-se na horizontal e a placa voadora tanto poderá estar paralela à placa base como ligeiramente inclinada, com um distanciamento entre si. Após a detonação, a placa voadora adquire uma alta aceleração, sendo projectada sobre a placa base com um determinado ângulo de colisão. Ao proporcionar-se uma colisão inclinada, leva a que uma pequena camada de metal de ambas as superfícies se ligue e forme um jacto metálico caracterizado por uma onda de choque oblíqua, (A. Popoff e H. Casey, 1977). A espessura desta camada é menor que 0,05 mm, embora seja uma camada de separação de material, ela permite remover as impurezas localizadas na superfície de ambas as placas. À medida que o jacto avança na direcção de detonação, a energia dos átomos de ambos os metais diminui, ocorrendo uma forte atracção e ligação a nível atómico entre os dois materiais (Ahmet Durgutlu et al., 2007).

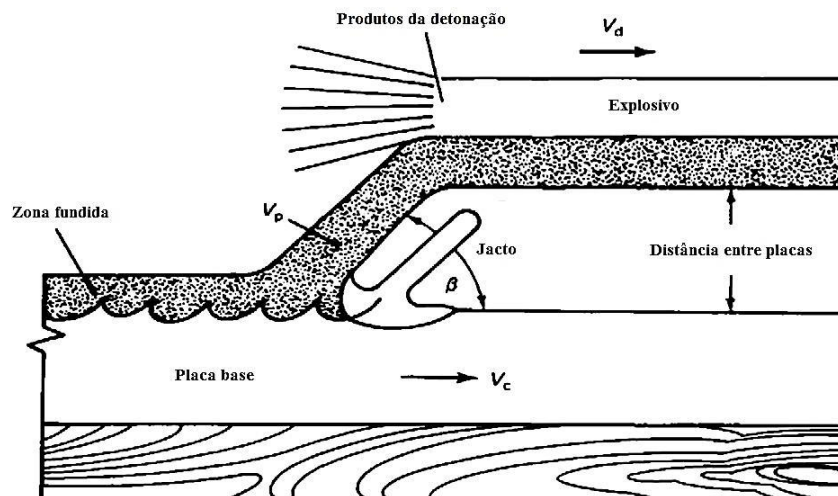


Figura 2.2. Representação de alguns parâmetros de soldadura (F.Findik, 2010).

Como representado na Figura 2.2, as placas de metal são geralmente montadas paralelamente uma à outra, com uma distância entre elas. Uma carga explosiva é colocada sobre a superfície da placa voadora que, ao detonar ocasiona, a propagação da onda de detonação com uma velocidade (V_d). Os produtos gasosos de detonação exercem alta pressão sobre a placa voadora acelerando-a até atingir uma velocidade de impacto (V_p), na ordem de várias centenas de metros por segundo, colidindo com a placa base sob um ângulo de colisão (β). O vértice do ângulo (ponto de colisão ou linha) viaja ao longo da placa base com uma velocidade na direção da detonação (velocidade no ponto de colisão V_c). Perto da linha de colisão, são criadas condições para a união dos metais, no qual um jacto é formado à frente do ponto de colisão. O jacto produz a ruptura e supressão das superfícies da placa, onde o metal é intensamente deformado, e uma deformação é formada. Por algum tempo, atrás do ponto de colisão, surge o fenómeno da deformação, ocorrendo um aumento das ondas e de metal deformado plasticamente, (V.I. Lysak e S.V. Kuzmin, 2011).

A selecção adequada dos parâmetros de soldadura é muito importante para o estabelecimento de ligações de alta qualidade. A distância entre placas, o rácio de explosivo (R , razão entre a massa da placa voadora e a massa de explosivo), a velocidade de detonação, a velocidade de impacto, a velocidade no ponto de colisão e o ângulo de colisão são parâmetros que influenciam a qualidade de ligação.

A distância entre placas é definida em relação à espessura da placa voadora. Esta distância deve ser no mínimo igual a metade dessa espessura e suficiente para que a placa voadora seja acelerada até à velocidade de impacto necessária. A mudança desta

distância modifica a forma e a dimensão da interface de ligação ondulada; com o seu aumento uma maior ondulação é verificada. A área fundida e a quantidade de deformação são alteradas pela variação deste parâmetro (Ahmet Durgutlu et al., 2007).

O rácio de explosivo afecta directamente os parâmetros da placa voadora, como a velocidade da placa e a forma como esta choca com a placa base. Este parâmetro é obtido através da equação,

$$R = \frac{m}{c}, \quad (2.1)$$

onde m é a massa da placa voadora e c a massa do explosivo. Com o aumento do rácio de explosivo ocorrerá o aumento do comprimento e amplitude das ondas na interface. Um grande aumento do rácio levará a um excesso de ondas na interface e a maior formação de compostos intermetálicos, enfraquecendo a soldadura (B. Gulenc 2006). Para baixos valores de R , a ondulação é inexistente, conduzindo à não união das placas. Na Figura 2.3 é apresentado o efeito do rácio de explosivo na interface entre uma placa de alumínio e uma placa de cobre, ambas com espessura de 2 mm. O explosivo utilizado foi o ANFO, contendo 6% de fuel oil.

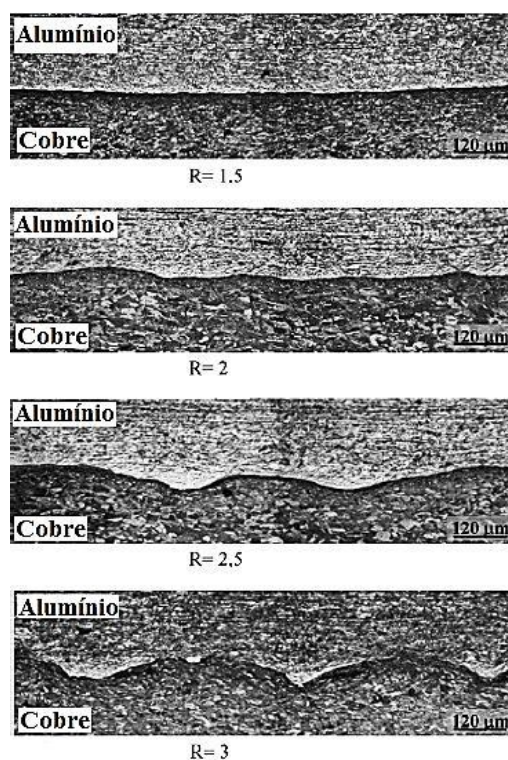


Figura 2.3. Efeito do rácio de explosivo em placas Al-Cu, (B. Gulenc, 2006).

Com os parâmetros de soldadura otimizados para ambas as placas, é possível aumentar as propriedades mecânicas dos materiais base na interface da soldadura e obter boas ligações. Na Figura 2.4, é apresentada a dureza numa soldadura Al-Cu, produzida através da técnica de soldadura por explosivo, na qual é evidente o aumento de dureza na soldadura em comparação com as durezas dos metais base.

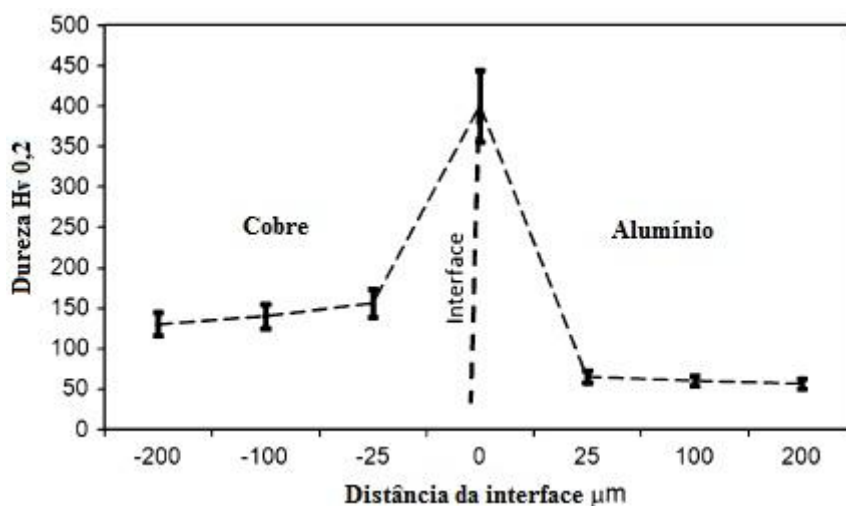


Figura 2.4. Dureza numa soldadura Al-Cu, (M. Acarer, 2011).

Na Tabela 2.1, são apresentados valores médios para os ensaios de tracção, corte e impacto Charpy para uma placa bimetálica Al-Cu obtida através do método de soldadura por explosivo.

Tabela 2.1. Propriedades mecânicas da placa Al-Cu, (M. Acarer, 2011).

Material	Tracção [MPa]	Corte [MPa]	Impacto Charpy [J]
Alumínio (série 1100)	110	-	30
Cobre	220	-	88
Al-Cu	240	140	42

A velocidade de detonação, é uma característica do explosivo utilizado e é directamente proporcional à densidade do explosivo (F. Findik, 2010, R. Mendes, 2010).

A velocidade de impacto e a velocidade no ponto de colisão têm de ser inferiores à velocidade sónica dos metais a unir (Ahmet Durgutlu et al., 2007). Se esta for ultrapassada, não existirá tempo suficiente para assegurar a estabilidade na zona de colisão.

O ângulo de colisão é essencial para a formação do jacto. Teoricamente, o jacto ocorrerá enquanto a velocidade do ponto de colisão se mantiver subsónica. Na prática, um ângulo mínimo é necessário, estando este compreendido entre 5° e 25° (M. Ghomi, 2009).

A preparação das peças, a limpeza das superfícies e ausência de imperfeições é fundamental para a obtenção de boas soldaduras.

2.3. Janela de Soldabilidade

No capítulo anterior foram introduzidas as principais variáveis do processo de soldadura por explosão. As seguintes condições são utilizadas para definir a janela de soldabilidade (F. Findik, 2010):

- Ângulo crítico para a formação do jacto (β_{crit});
- Velocidade crítica de colisão para a formação do fluxo;
- Impacto mínimo necessário para que a placa voadora forme o jacto, baseado na análise de tensões que provocam o fluxo;
- Impacto máximo sobre a placa voadora para limitar os defeitos da soldadura, baseado na retenção do jacto.

A janela de soldabilidade define o conjunto de parâmetros que proporcionam soldaduras com boa qualidade. Os seus parâmetros são seleccionados de acordo com a placa a projectar. Na Figura 2.5, é apresentada a janela de soldabilidade para a soldadura por explosão e os seus limites, em função de β e V_c .

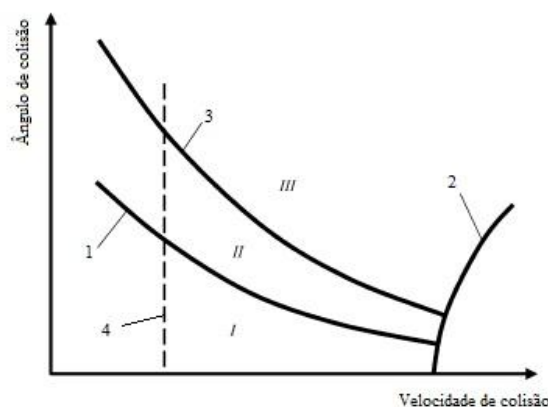


Figura 2.5. Janela de soldabilidade, (S. Kuzmin e V.Lysak, 2011).

Uma soldadura de qualidade é obtida se estiver localizada dentro da área II.

O limite à direita (Linha 2) representa a velocidade do som do material. Esta curva foi calculada através das condições críticas da formação do jacto (Walsh et al., 1953). Numa soldadura situada à direita deste limite, não ocorrerá a formação do jacto. Normalmente é impossível obter uma boa soldadura para além deste limite; o jacto só ocorre acima de um β crítico, já que a posição da Linha 2 é determinada através de β , que depende de V_c .

O limite à esquerda (Linha 4) representa a velocidade de colisão de transição $V_{c,tr}$. R. H. Wittman (1973) propôs a equação 2.2 para essa grandeza,

$$V_{c,tr} = \sqrt{\frac{2Re(HV1 + HV2)}{\rho_1 + \rho_2}}, \quad (2.2)$$

onde Re é o número de Reynolds, situado entre 8.0 e 13.0, $HV1$ e $HV2$ são as durezas Vickers de cada placa, e ρ_1 e ρ_2 são as densidades de ambas as placas. Se a soldadura se situar à esquerda deste limite, não ocorrerá formação de ondas na interface.

O limite superior (Linha 3) é determinado pelas propriedades termofísicas da placa voadora e representa a velocidade de impacto. R. H. Wittman (1973) propôs descrever esta curva usando a equação 2.3, deduzida duma condição de solidificação na zona de fusão, à medida que a ondulação chega à zona soldada.

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

em que N é uma constante que, para os metais, toma o valor de 0.11, T_m é a temperatura de fusão do material, C_0 é a velocidade do som do material, k é a condutibilidade térmica, c_p é o calor específico, ρ é a densidade e h a espessura do material. Se alguma soldadura se situar acima deste limite, ocorrerá na interface o aparecimento de uma camada contínua de material fundido.

Várias equações foram formuladas para o cálculo da velocidade da placa voadora. Uma das equações mais utilizadas é a equação de Gurney. Esta assume que a aceleração do metal após explosão é perpendicular à direcção de detonação e é função duma energia específica (Energia de Gurney) com um valor característico para cada

explosivo. J. Kennedy (1972) formulou uma equação (equação 2.4) para estimar a velocidade terminal numa configuração plana em que as placas estão paralelas,

$$V_p^2 = 2E \frac{3}{\left[1 + 5 \left(\frac{m}{c}\right) + 4 \left(\frac{m^2}{c^2}\right)\right]}, \quad (2.4)$$

em que E é a energia de Gurney do explosivo, m é a massa da placa voadora, c é a massa do explosivo e m/c é o rácio de explosivo.

Após obter V_p e V_d é possível calcular β para placas paralelas (equação 2.5),

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

O limite inferior (Linha 1) representa a pressão crítica causada pela velocidade de impacto de modo a obter a deformação plástica do material. Para o cálculo deste limite, Derivas (1980) propôs uma relação entre o ângulo crítico de colisão com a dureza Vickers do material, dada pela equação,

$$V_{C,min} = \frac{k_1}{\beta} \sqrt{\frac{HV}{\rho}}, \quad (2.6)$$

onde $V_{C,min}$ é a velocidade mínima no ponto de colisão, HV a dureza Vickers e k_1 uma constante de limpeza de superfícies. Caso alguma soldadura se situe abaixo deste limite, não ocorrerá a ligação entre os materiais, devido à velocidade de colisão ser insuficiente para os deformar plasticamente.

2.4. Impacto da Ondulação na Soldadura por Explosão

Várias teorias foram apresentadas para a formação de ondas na interface, podendo estas agrupar-se nas seguintes categorias: mecanismo de indentação do jacto, mecanismo de instabilidade do fluxo, mecanismo de formação de vórtices e mecanismo de tensão de ondas, (S. Reid, 1974). Os mecanismos propostos por Bahrani e Crossland (1966), Bergman et al. (1966) e Abrahamson (1961) podem ser agrupados no mecanismo de indentação do jacto, sendo este um dos mecanismos mais aceitáveis (A. Mousavi e S. Al-Hassani, 2004). Estes autores descrevem que as ondas na interface são formadas devido

à acção de indentaç o do jacto na placa base (Figura 2.6 a)), e   liberta o peri dica da sali ncia formada   frente do ponto de colis o pelo material removido pela indenta o (Figura 2.6 c)), permitindo ao jacto ultrapassar a sali ncia proporcionando a continua o do processo (Figura 2.6 f)).

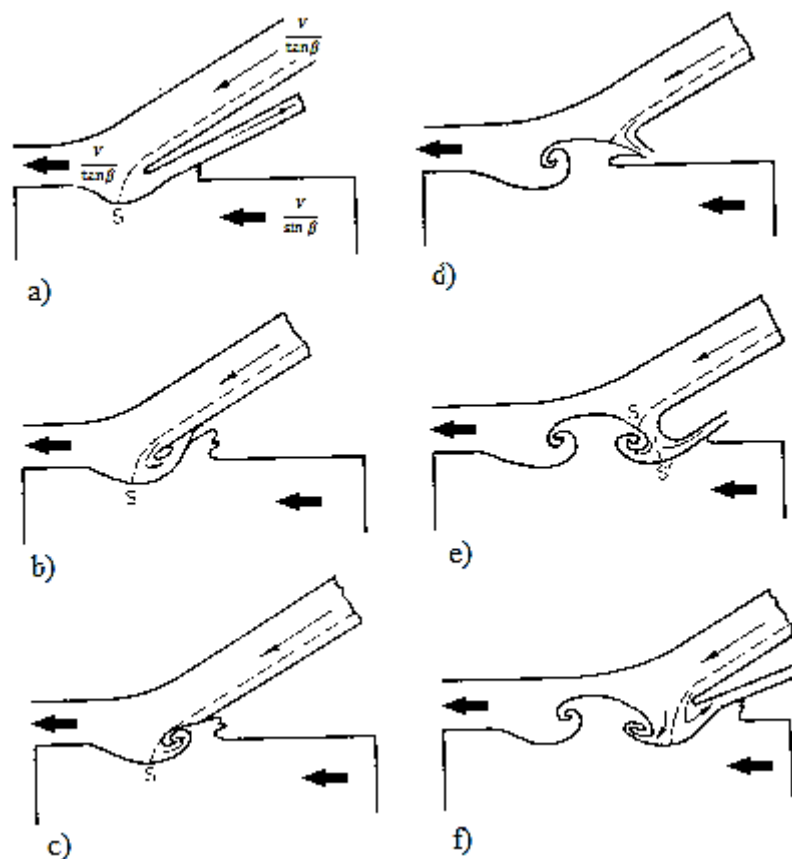


Figura 2.6. Mecanismo de forma o de ondas por indenta o do jacto (<http://www.dhclad.co.krnewtech/tech.htm>, 2012).

A forma o de ondas na interface   vista como um efeito positivo, podendo ser atribu do aos seguintes factores (A. Deribas et al., 1967):

- Durante a forma o de ondas, a maioria da energia cin tica inicial da placa voadora n o   convertida em energia de compress o, mas em energia criadora de fluxo na zona de deforma o, seguidamente transformada em calor. Esta convers o de energia previne o aumento de tens es de trac o durante a descarga, o que poderia destruir a junta. O metal na zona da junta   fortemente aquecido, o que para a maioria dos casos,   sin nimo de uma boa soldadura;
- A forma o de ondas   acompanhada pela forma o de zonas de interpenetra o das camadas superficiais dos metais, em que ambos os componentes s o

simultaneamente soldados. A existência desta zona é atribuída a processos mecânicos associados à formação de ondas;

- A formação de ondas envolve a destruição e remoção de películas de óxidos e outros contaminantes, sempre presentes nas superfícies de contacto;
- A formação de ondas aumenta a superfície total das juntas soldadas.

Através da Figura 2.7 observa-se a presença de algumas bolsas localizadas no topo e no vale da onda. Essas bolsas são compostas por uma combinação dos materiais, parcialmente ou completamente fundidos.

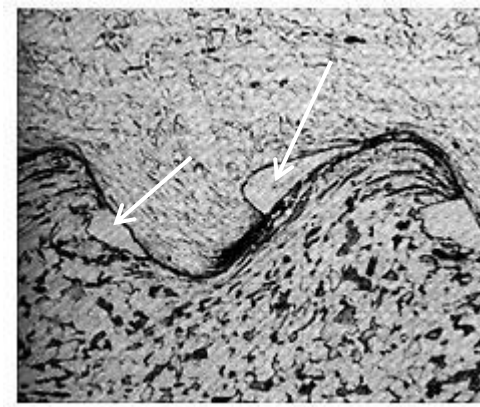


Figura 2.7. Típica onda de explosão.

Estas bolsas podem ser dúcteis, quando a combinação entre os materiais forma uma solução sólida, ou são frágeis e descontínuas, quando formadas por compostos intermetálicos. Na soldadura de cobre-alumínio os compostos intermetálicos normalmente formados são: $CuAl_2$, $CuAl$ e Cu_9Al_4 , (M. Aravind et al., 2004). Boas soldaduras produzem pequenas bolsas. Bolsas largas ocorrem com condições de colisão extremas, ou podem ser produzidas a partir da fusão contínua das superfícies, contendo vazios e descontinuidades, o que reduz a resistência e a ductilidade da soldadura.

2.5. Selecção do Explosivo

A selecção do explosivo e correspondente velocidade de detonação são importantes para a obtenção de boas soldaduras. A velocidade do ponto de colisão e a velocidade de impacto devem ser inferiores à velocidade sónica em ambos os materiais. As velocidadesónicas dos materiais usados em engenharia situam-se entre 4500 m/s e 6000 m/s, e os explosivos convencionais geram velocidades de detonação entre 6000 e 8000 m/s (R. Mendes et al., 2012). Por tal motivo, é necessária a utilização de explosivos com velocidades de detonação inferiores às convencionais. Os principais tipos de explosivos utilizados são o nitrato de amónio granulado com *fuel oil* (ANFO) e uma substância inerte como areia ou perlite; ou nitrato de amónio atomizado com alumínio, amatol e soldatol com sal e primacord. Estes explosivos geram velocidades de detonação entre 2000 m/s e 3000 m/s. O explosivo deve fornecer uma detonação uniforme para se adquirir uma velocidade do ponto de colisão constante, desde o início da explosão até ao fim da mesma. O tipo de explosivo e a quantidade por unidade de área é seleccionada para se obter a energia de detonação necessária (F. Findik, 2010).

2.6. Medição da Velocidade de Impacto

Um dos parâmetros mais importantes da detonação é a velocidade de impacto. A metodologia proposta por R. Mendes et al (2012), estima o valor de V_p através da equação proposta por Chou e Flis (1986), sendo t a variável independente, dando origem a um gráfico de evolução de V_p com t ,

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

em que V_p é o valor calculado através da equação 2.4, e τ é uma constante de tempo, referida mais a baixo. A energia de Gurney é calculada como sendo 60% do valor do calor de explosão do explosivo utilizado (D. Buczowski e B. Zygmunt, 2011). Para o cálculo de τ é utilizada a equação sugerida por P. Chou et al (1983),

$$\tau = C_1 \frac{M V_p}{P_{CJ}} + C_2, \quad (2.8)$$

em que M é a massa por unidade de comprimento do *flyer*, C_1 e C_2 são constantes empíricas e P_{CJ} é a pressão de detonação de Chapman-Jouguet que toma o valor de 1,5 GPa para o ANFO (R. Mendes et al., 2012).

A velocidade de um *flyer* metálico acelerado por uma explosão atinge o valor de 80% de V_p , (C. Tarver et al., 1997). O tempo necessário para que o *flyer* atinga essa velocidade, foi calculado considerando que a onda de choque se move no interior da placa à velocidade do som do material, por uma distância igual a oito vezes a espessura do mesmo. As constantes C_1 e C_2 são utilizadas como calibração, para que a velocidade do *flyer* iguale o valor da velocidade após as oito reflexões.

Integrando a equação 2.7 obtém-se a expressão da distância percorrida pelo *flyer*:

$$x_p(t) = V_p \left[t - t_0 + \tau \left(\exp \left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) - 1 \right) \right] \quad (2.9)$$

Igualando $x_p(t)$ à distância entre placas, obtém-se a velocidade atingida pela placa voadora aquando do impacto (V_p).

2.7. Vantagens do Processo

As principais vantagens deste processo em comparação com as técnicas convencionais são (F. Findik, 2010):

- Soldadura de materiais dissimilares;
- Mantém a qualidade dos metais originais;
- Soldadura de grandes áreas;
- Investimento pequeno;
- Permite soldar em ambientes hostis.

Este processo contém outras vantagens, como:

- Processo a frio;
- Portátil e accionamento por controlo remoto;
- Pequena quantidade de explosivo;
- União de chapas finas e grossas;
- Aumento de produtividade devido a ser um processo de alta velocidade;
- Método simples.

2.8. Desvantagens do Processo

As principais desvantagens deste processo são (F. Findik, 2010):

- Os materiais devem ter resistência ao impacto e ductilidade suficientes para suportar uma rápida deformação plástica sem que ocorra fractura;
- O ruído provocado e a onda de choque podem obrigar ao uso de equipamento de protecção por parte do operador, bem assim como câmaras de vácuo, ou ainda que o processo se realize debaixo de terra ou água;
- O uso de explosivos em zonas industriais é interdito devido ao ruído e às vibrações provocadas pela detonação;
- A geometria dos elementos a ligar tem que ser simples (plana, cilíndrica ou cónica).

2.9. Aplicações

As principais aplicações deste processo são:

- União de tubos;
- Revestimento de tubagens;
- Fabrico de juntas sobrepostas;
- União de espessuras dissimilares;
- Transformadores eléctricos;
- Fabrico de alhetas para refrigeração;
- Fabrico e reparação de reactores nucleares e acessórios;
- Revestimento de armamento;
- Fuselagem de aviões.

2.10. Combinações Possíveis

Soldadura por explosivo é um método criado pela engenharia para solucionar a união de metais dissimilares e similares. Este processo pode ser usado na ligação homogénea da maioria dos metais e também para ligação de metais dissimilares. Na Figura 2.8, é apresentado um conjunto de possíveis combinações através deste método.

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

Figura 2.8. Combinações possíveis por soldadura por explosão.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterização dos Materiais Base

Os materiais usados no primeiro ensaio foram uma placa de cobre (placa voadora) de dimensões 230×90×3 mm e uma placa de alumínio 5083 (placa base) de dimensões 213×72×30 mm. No segundo ensaio, foi utilizado uma placa de cobre de dimensões 200×90×1 mm e uma placa de alumínio 5083 de dimensões 185×72×30 mm. A composição química de ambas as placas é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composição química dos metais base.

	%Cu	%Al	%Si	%Fe	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ti	%Outros
Cobre	99.9	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
Al 5083	0.1	94.15	0.4	0.4	0.4	4	0.05	0.25	0.15	0.05-0.15

Na Figura 3.1, é apresentada a microestrutura das placas de cobre utilizadas.

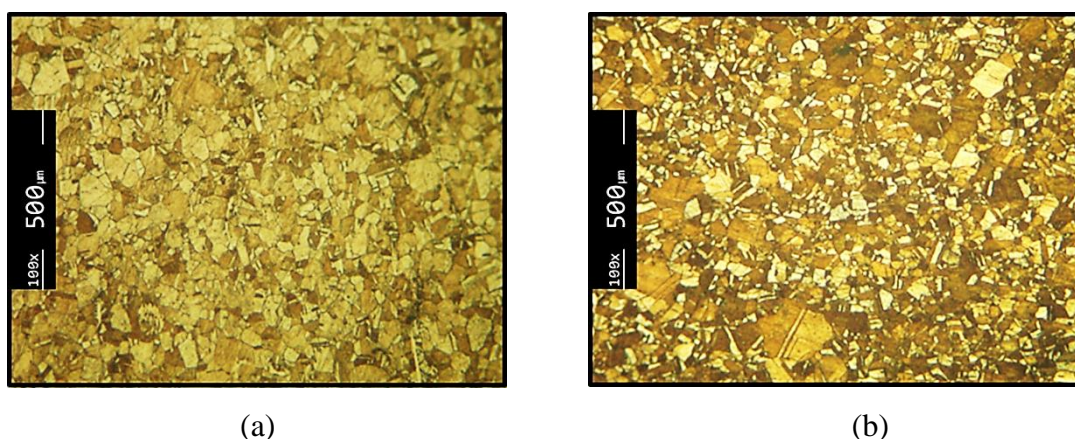


Figura 3.1. Microestrutura das placas de cobre de: (a) 1mm; (b) 3mm. Ampliação: 100x.

Na Figura 3.2, é apresentada a microestrutura da placa de alumínio.

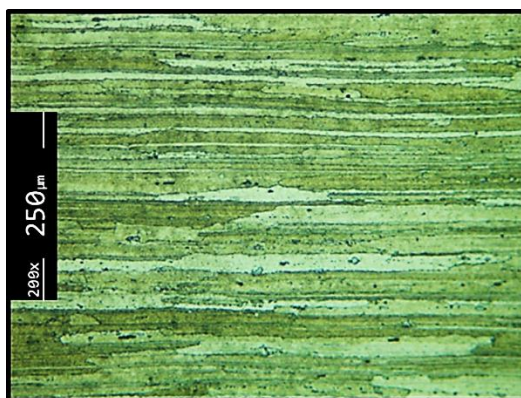


Figura 3.2. Microestrutura da placa de alumínio. Ampliação 200x.

3.2. Montagem Experimental

A montagem experimental e a execução das soldaduras teve lugar no LEDAP (Laboratório de Energética e Detónica, Associação de apoio), em Condeixa. Foram realizadas duas montagens de cartão em formato de caixa, para confinar o explosivo, possibilitando a colocação e utilização de duas espessuras de explosivo, sendo a montagem colada sobre a placa de cobre, conforme Figura 3.3. As faces a unir de cada placa foram limpas e lixadas com o intuito de retirar imperfeições e impurezas à superfície, com vista ao melhoramento da qualidade de ligação. O explosivo utilizado foi o ANFO, misturado com uma matriz de nitrato de amónio para se obter velocidades de detonação ligeiramente superiores às do ANFO. No primeiro e segundo ensaios utilizou-se uma mistura de 80% de ANFO e 20% de matriz. Para cada ensaio foram utilizados oito espaçadores, com uma altura de 3.7 mm (1º ensaio) e 1.4 mm (2º ensaio) correspondendo à distância entre placas. A detonação em cada ensaio foi iniciada no lado de maior espessura de explosivo.

Em cada ensaio foram utilizadas sete sondas de ionização para a medição da velocidade de detonação. Cada sonda era constituída por um tubo de aço de 0.8 mm de diâmetro, um fio de cobre revestido, um díodo semiconductor, um condensador e uma resistência. O fio de cobre é inserido no tubo de aço, uma das pontas é posta em contacto e soldada com o cátodo do díodo, o condensador e a resistência são soldados ao ânodo. A outra ponta do fio é posta em contacto com o explosivo. Posteriormente foi soldado um fio condutor no exterior de cada tubo. O conjunto de sondas é fixado na caixa de cartão após a colocação do explosivo e ligado a um osciloscópio digital através de fios condutores.

Após a montagem dos elementos citados anteriormente e representados na Figura 3.3, foi utilizada uma caixa contendo areia molhada para servir de base no primeiro

ensaio. No segundo ensaio utilizou-se como base uma placa de aço de 50 mm de espessura, para aumentar a rigidez da base.

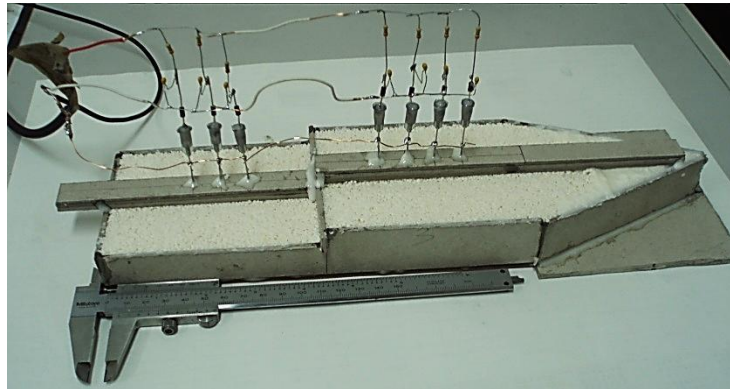


Figura 3.3. Montagem do 1º ensaio experimental.

3.3. Medição da Velocidade de Detonação

Para a medição da velocidade de detonação utilizou-se o método cronográfico, em que sondas de ionização são colocadas em pontos fixos sobre ou dentro do explosivo. Criou-se um circuito eléctrico (Figura 3.4), constituído por condensadores e resistências que formam e enviam impulsos eléctricos indicando a chegada da detonação. Os condensadores são carregados através das resistências, quando a onda de detonação atinge a sonda, ocorre uma ionização provocada pelo curto-circuito entre o tubo de aço e o fio condutor, fazendo com que o circuito externo associado às sondas, gere um sinal de medida causado pela descarga dos condensadores. Em seguida, esses sinais são enviados para um osciloscópio digital, fornecendo o tempo entre cada sinal. Com o conhecimento do tempo e da distância entre sondas, pode estimar-se a velocidade de detonação pelo método dos mínimos desvios quadrados.

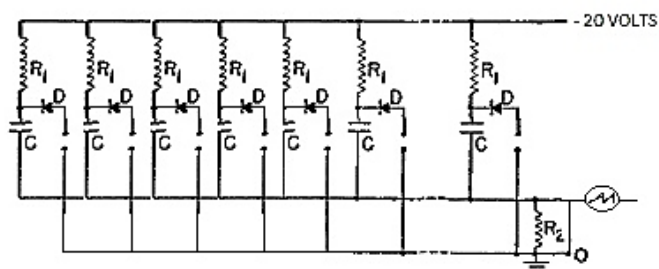


Figura 3.4. Esquema eléctrico para a medição da velocidade de detonação.

3.4. Parâmetros de Soldadura

No ano lectivo 2011/2012, foi realizada uma tese de Mestrado (Tiago Dias, 2012), em que foram realizados dois ensaios com configurações e metais semelhantes aos ensaios realizados no presente trabalho, dando origem a quatro soldaduras que foram analisadas, sendo os seus parâmetros de soldadura apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura das soldaduras realizadas anteriormente, (T. Dias, 2012).

	Soldaduras Anteriores			
	SE3_30	SE3_20	SE1_30	SE1_20
Espessura do flyer [mm]	3	3	1	1
Espessura do explosivo [mm]	30	20	30	20
Massa do explosivo [Kg]	0,23	0,16	0,23	0,16
Massa placa voadora [Kg]	0,26	0,26	0,087	0,087
Rácio de explosivo	0,88	0,59	2,64	1,78
Distância entre placas [mm]	3,65	3,65	1,42	1,42
Densidade do explosivo [Kg/m³]	800	800	800	800
Densidade do Cu [Kg/m³]	8924	8924	8924	8924
Base	Areia	Areia	Areia	Areia

No ano anterior, não foi feita a análise completa dos resultados obtidos, trabalho que foi realizado este ano e comparado com os resultados dos novos ensaios. Na Tabela 3.3, são apresentados os parâmetros utilizados nas soldaduras realizadas no presente trabalho. A nomenclatura das soldaduras e respectivas amostras é apresentada no ponto 3.5.

Tabela 3.3. Parâmetros de soldadura das novas soldaduras.

	Novas Soldaduras			
	SE3_30_N	SE3_20_N	SE1_25	SE1_15
Espessura do <i>flyer</i> [mm]	3	3	1	1
Espessura do explosivo [mm]	30	20	25	15
Massa do explosivo [Kg]	0,26	0,18	0,18	0,11
Massa placa voadora [Kg]	0,28	0,28	0,08	0,08
Rácio de explosivo	0,93	0,64	2,25	1,4
Distância entre placas [mm]	3,7	3,7	1,4	1,4
Densidade do explosivo [Kg/m^3]	820	820	820	820
Densidade do Cu [Kg/m^3]	8924	8924	8924	8924
Base	Areia	Areia	Aço	Aço

3.5. Nomenclatura das Amostras

Após a realização dos ensaios obtiveram-se várias soldaduras, as quais foram cortadas e analisadas em várias zonas. Para facilitar a sua designação, criou-se a nomenclatura SEx_xx_x, em que SE significa soldadura por explosivo; o número seguinte indica a espessura da placa voadora em mm; os dois algarismos seguintes a altura do explosivo em mm; e por último a zona a que pertence a amostra. Na Figura 3.5, são apresentadas as várias zonas da soldadura, representando a zona 1 o início da detonação e a zona 5 o final da mesma. A zona Z3/ZT na Figura 3.5 representa a região onde se faz a transição de altura do explosivo.

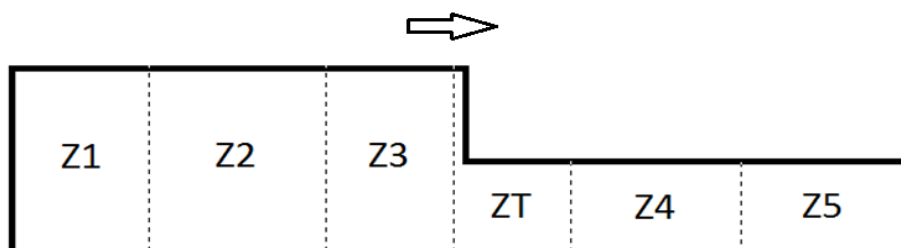


Figura 3.5. Zonas de soldadura.

Na Figura 3.6, é apresentado um exemplo da nomenclatura da amostra SE3_30_1.

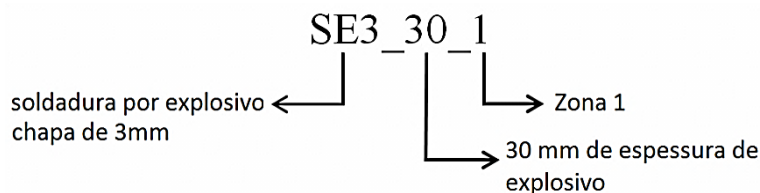


Figura 3.6. Nomenclatura da amostra SE3_30_1.

Para as novas soldaduras da chapa de 3 mm foi adicionado na sua nomenclatura a letra “N”, para se distinguir das soldaduras anteriores para a mesma espessura de chapa.

3.6. Procedimento da Análise Metalográfica

Após a obtenção das soldaduras, estas foram cortadas conforme o esquema da Figura 3.5. Em seguida cada amostra foi desbastada e polida com lixas P180, P320, P600, P1000 e P2500. Para o polimento final, utilizou-se uma solução de pó de diamante, com 3 μm de diâmetro e com a adição de um lubrificante para prevenir o aquecimento das amostras.

Depois de as amostras estarem polidas, foi efectuado um ataque químico com o propósito de tornar visíveis a microestrutura dos metais. Para o cobre utilizou-se uma solução de 5 ml H_2O_2 em 50 ml de NH_4OH . Para o alumínio utilizou-se o reagente de “Poulton”, cuja composição consistiu em 6 ml de HCl , 9 ml de HNO_3 , 0.5 ml de HF , 6.5 ml de H_2O e 1 ml de CrO_3 . Para se evitar a contaminação do cobre, aquando do ataque químico do alumínio, utilizou-se fita-cola para o isolar. O tempo de ataque para ambos os metais foi de 10s, de cada vez, sendo o tempo total de exposição cerca de 30s. Posteriormente as amostras foram analisadas ao microscópio.

3.7. Análise Mecânica

3.7.1. Micro dureza

A evolução da dureza ao longo da soldadura foi medida utilizando uma máquina *Shimadzu Micro Hardness Tester-Type M*. Foram efectuadas medições de dureza

ao longo de cada amostra das soldaduras anteriores e das novas soldaduras. As indentações foram realizadas, ao longo de uma linha transversal à interface que atravessasse toda a ligação cobre-alumínio, com uma força de 200 gf e um tempo de indentação de 15s. O espaçamento entre medições foi de 250 μm . Para a medição de dureza dos compostos intermetálicos, utilizou-se uma carga de apenas 50 g, de modo a reduzir a dimensão da indentação, para esta cair por inteiro no composto intermetálico.

3.7.2. Ensaio de Arrancamento

Para a realização deste ensaio, foi concebido o conjunto de ferramentas representadas na Figura 3.7, cujos desenhos estão no Anexo 1. Estas duas peças foram fabricadas com aço H13, e devido à geometria da peça 1, foi analisada a força à flambagem, tendo-se obtido uma força de 65112 N. Neste ensaio, estima-se que se atinjam forças máximas de 32515 N, logo não ocorrerá o risco de flambagem da peça 1. Posteriormente, esta concepção foi inserida na máquina denominada *Instrom 4206* para a execução do respectivo ensaio. Esta máquina tem capacidade máxima de carga de 100 KN e foi concebida para testar materiais quanto à tracção, compressão, flexão e corte.

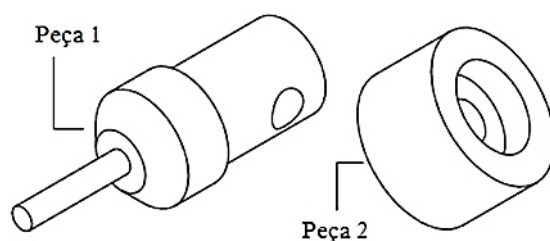


Figura 3.7. Peças concebidas para o ensaio de arrancamento.

As amostras foram maquinadas cilíndricamente, conforme a Figura 3.8, para serem introduzidas na peça 2 e feita uma furação centrada, até atingir a ligação cobre-alumínio. Esta modificação é representada na Figura 3.8.

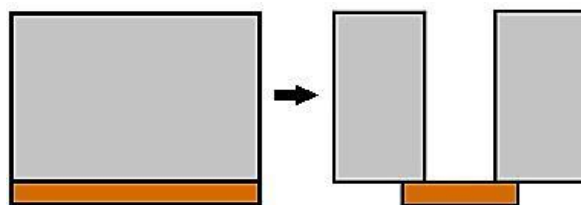


Figura 3.8. Maquinação da amostra para o ensaio de arrancamento.

O esquema do ensaio é representado na Figura 3.9, em que o arrancamento da ligação cobre-alumínio é numa coroa circular de 2.5 mm de largura.

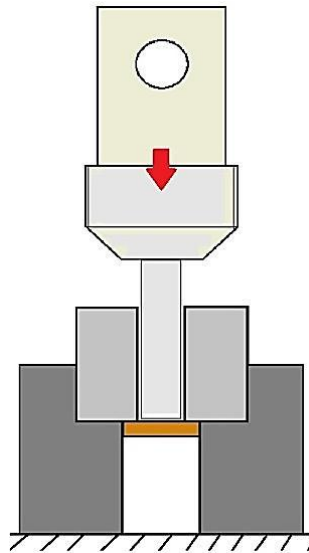


Figura 3.9. Esquema do ensaio de arrancamento.

A máquina utilizada para este ensaio indica a força máxima que atinge a ligação e o seu deslocamento. Para apresentar os dados de resistência ao arrancamento em MPa, é calculada a área da coroa circular através da equação,

$$A = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2), \quad (3.1)$$

em que A é a área da coroa circular, D_e é o diâmetro externo da coroa e D_i é o diâmetro interno da coroa. Com o conhecimento da área a que está a ser exercida a força, já é possível calcular o valor da tensão de arrancamento através da equação,

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.2)$$

em que σ é a tensão de arrancamento e F a força exercida pela peça 1. A dimensão de 2.5 mm foi seleccionada com base nos ensaios de tracção em provetes colados realizados no ano anterior, que garantiam uma resistência ao arrancamento mínima de 60 MPa. Foi, portanto, seleccionada uma área de coroa circular soldada que exigisse um esforço axial no punção reduzido. Posteriormente veio-se a verificar que este esforço ainda é excessivo no caso de chapas voadoras de 1 mm e 3 mm de espessura, pois o punção rompe a chapa de cobre sem ter arrancado a soldadura.

4. RESULTADOS

4.1. Janela de Soldabilidade

Os valores das constantes utilizadas na construção da janela de soldabilidade da ligação cobre-alumínio estão apresentados na Tabela 4.1 (T. Dias, 2012).

Tabela 4.1. Valores das constantes utilizadas na janela de soldabilidade.

Variável	Unidade	Equação	Cobre	Alumínio	ANFO
k_1	[-]	(2.5)	0,6	0,6	-
N	[-]	(2.2)	0,11	0,11	-
C_p	[J/Kg.K]	(2.2)	385	-	-
k (526,85°C)	[W/m.K]	(2.2)	366	-	-
ρ	[Kg/m ³]	(2.1), (2.2), (2.5)	8924	2700	-
H_V	[KN/m ²]	(2.1), (2.5)	9881×10^5	8601×10^5	-
h	[m]	(2.2)	0,001 / 0,003	-	-
Re	[-]	(2.1)	10,5	10,5	-
T_m	[°C]	(2.2)	1083	-	-
C_0	[m/s]	(2.2)	4740	-	-
$\sqrt{2E}$	[m/s]	(2.3)	1055	-	-
P_{CJ}	[GPa]	-	-	-	1,5

Como exposto no capítulo anterior, a velocidade de detonação é calculada através do método cronográfico. Nas Tabelas 4.2 e 4.3, são apresentados os resultados das medições da velocidade de detonação das soldaduras realizadas anteriormente e das novas soldaduras.

Tabela 4.2. Velocidade de detonação das soldaduras anteriores, (T. Dias, 2012).

Soldaduras Anteriores								
SE3_30		SE3_20		SE1_30		SE1_20		
pos sonda [mm]	tempo [μ s]	pos sonda [mm]	tempo [μ s]	pos sonda [mm]	tempo [μ s]	pos sonda [mm]	tempo [μ s]	
0	0,1	116,4	54,3	0	0,72	83,82	38,24	
15,25	7,4	----	----	14,95	9,68	98,87	46,6	
30,98	15,05	148,35	73,7	29,6	13,96	113,72	54,36	
V_d [m/s]		2072		1647		2149		1855

Tabela 4.3. Velocidade de detonação das novas soldaduras.

Novas Soldaduras								
SE3_30N		SE3_20N		SE1_25		SE1_15		
pos sonda [mm]	tempo [μ s]	pos sonda [mm]	tempo [μ s]	pos sonda [mm]	tempo [μ s]	pos sonda [mm]	tempo [μ s]	
0	----	114,54	0	0	0	112,24	53,5	
15,38	----	129,94	6,3	15,7	7,65	127,64	----	
30,38	----	144,82	12,5	30,4	16,2	143,28	----	
45,38	----	----	----	45,22	21,9	----	----	
V_d [m/s]		-		2423		2013		1712

Verificou-se que os sinais gerados por algumas sondas, nas soldaduras SE3_30 e SE1_15, não foram registados no osciloscópio; este problema parece estar relacionado com a condução de energia eléctrica através do explosivo utilizado.

Após a obtenção de V_d , foi utilizada a metodologia proposta por R. Mendes et al (2012), para o cálculo da velocidade de impacto descrita no Capítulo 2. Para uma melhor interpretação, utiliza-se como exemplo a soldadura SE1_25.

Para $R_{25} = 2,25$ e $\sqrt{2E} = 0,1055 \text{ mm}/\mu\text{s}$, obtém-se pela equação 2.3 o valor de $V_p = 0,920 \text{ mm}/\mu\text{s}$. Considera-se que após oito reflexões da onda de choque no *flyer* metálico, a velocidade da placa atinge 80% o valor de V_p , sendo $V_{p_calibrado} = 0,8 \times V_p = 0,736 \text{ mm}/\mu\text{s}$. O tempo necessário para que o *flyer* atinga a $V_{p_calibrado}$, foi calculado considerando que a onda de choque se move no interior do *flyer*, à velocidade do som no cobre, por uma distância equivalente a oito vezes a espessura do *flyer*, assim $t_{Vp_calibrado} = 1,68 \mu\text{s}$.

Foi introduzido um processo de calibração através das equações 2.6, 2.7 e 2.8, para que a curva $V_p(t)$ coincida com os valores calibrados com o auxílio das constantes empíricas C_1 e C_2 . Este processo é representado na Figura 4.1.

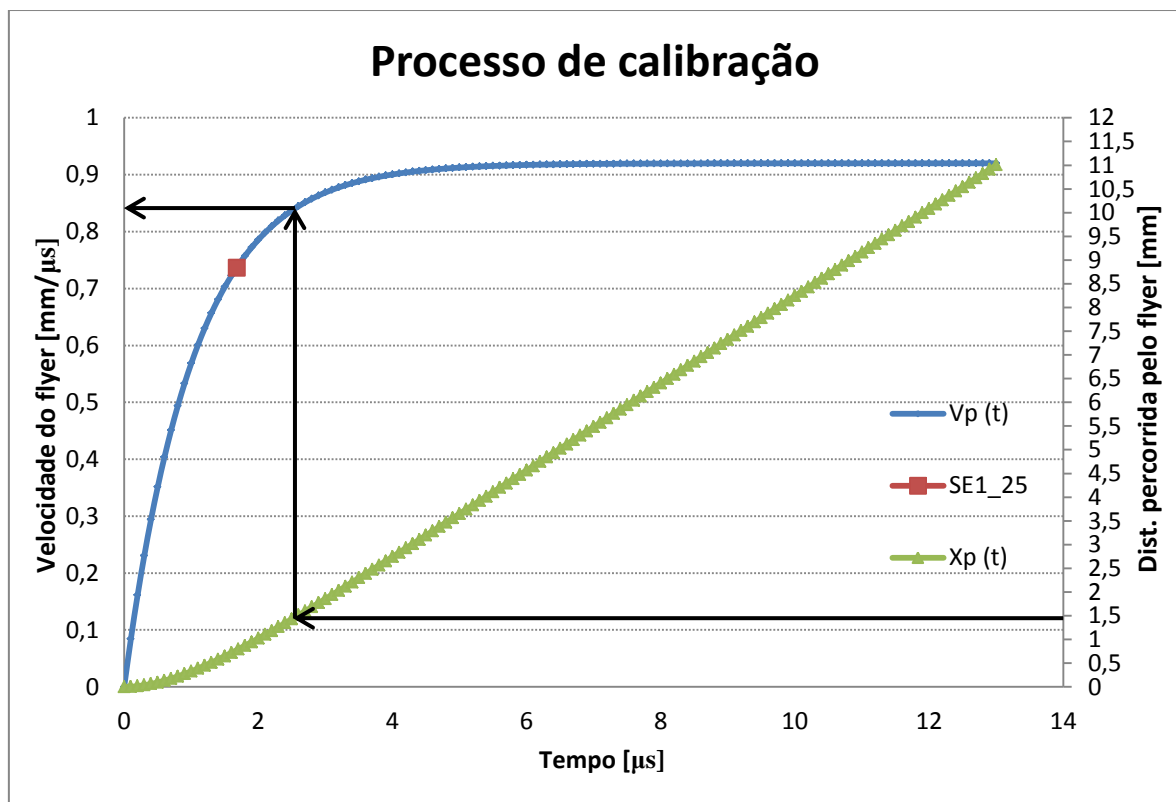


Figura 4.1. Processo de calibração para $V_{p_calibrado}$ e $t_{Vp_calibrado}$.

Após o processo de calibração estar concluído, e sabendo que a distância entre placas da soldadura SE1_25 é de 1,4 mm, obtêm-se a leitura da velocidade de impacto atingida pelo *flyer*, que neste caso será de $V_p = 0,830 \text{ mm}/\mu\text{s}$.

Com o conhecimento de V_d , V_p e definidos os valores das constantes, já é possível construir e enquadrar as soldaduras na janela de soldabilidade através das equações 2.1, 2.2, 2.4 e 2.5. Nas Figura 4.2 e 4.3, estão apresentadas as janelas de soldabilidade para cada placa de cobre e o enquadramento das soldaduras.

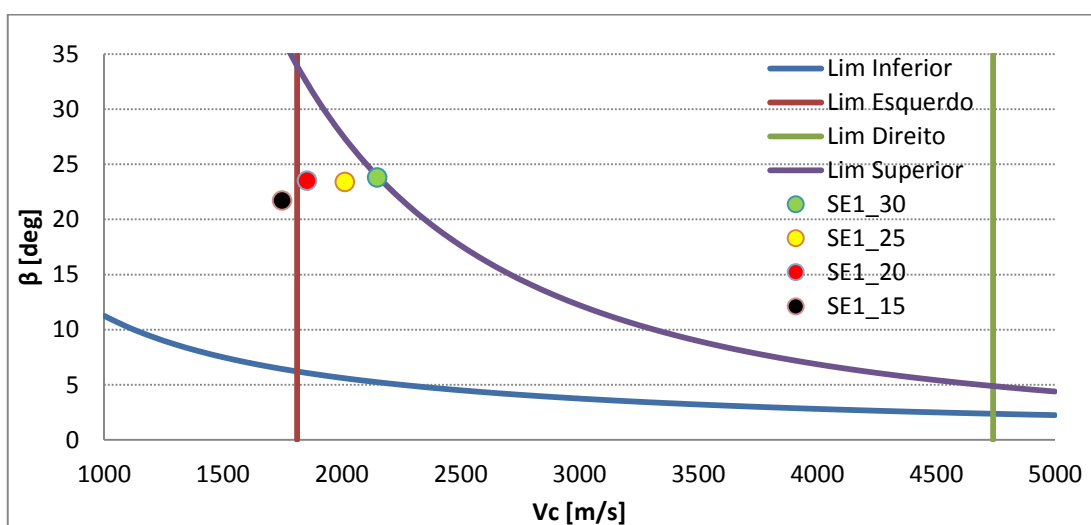


Figura 4.2. Janela de soldabilidade para *flyer* de cobre de 1 mm, com representação das soldaduras realizadas.

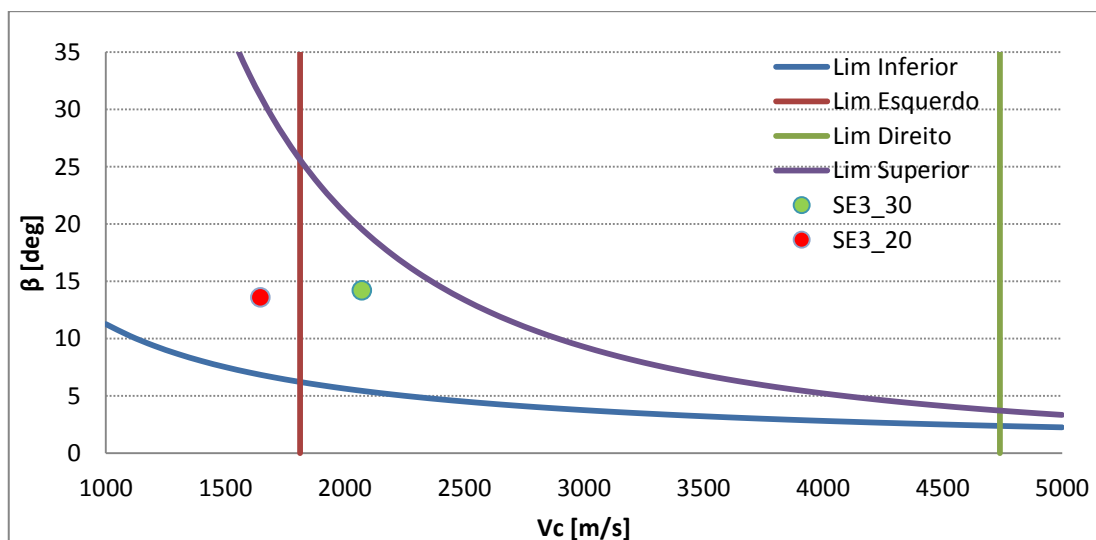


Figura 4.3. Janela de soldabilidade para *flyer* de cobre de 3 mm, com representação das soldaduras realizadas.

Visualizando a Figura 4.2, verifica-se que a soldadura SE1_15 se encontra fora da janela de soldabilidade, indicando que não será uma soldadura de qualidade e que não apresentará ondulação na sua interface. A soldadura SE1_20 localiza-se dentro da janela, mas muito próxima do limite esquerdo, zona que separa a existência de ondulação. A soldadura SE1_25 também se encontra dentro da janela sugerindo uma soldadura de qualidade. A soldadura SE1_30 situa-se no limite superior da janela, zona que separa a existência de zona fundida na interface.

Na Figura 4.3, só estão expostas duas soldaduras, em vez das quatro inicialmente previstas para o *flyer* de 3 mm. Este facto deve-se ao insucesso do ensaio da nova soldadura para o respectivo *flyer*. A soldadura SE3_20 encontra-se fora da janela de soldabilidade, na zona que separa a existência de ondulação. A soldadura SE3_30 localiza-se dentro da janela, sugerindo que esta será uma soldadura de qualidade. Os parâmetros de soldadura para ambos os *flyers* estão apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4. Valores dos parâmetros de soldadura do *flyer* de 3 mm, (T. Dias, 2012).

	SE3_30	SE3_20
V_p [m/s]	512	390
V_c [m/s]	2072	1647
β [deg]	14,2	13,6
$\rho_{explosivo}$ [g/cm ³]	0,8	0,8

Tabela 4.5. Valores dos parâmetros de soldadura do *flyer* de 1 mm.

	SE1_30	SE1_25	SE1_20	SE1_15
V_p [m/s]	885	830	755	660
V_c [m/s]	2149	2013	1854	1712
β [deg]	23,8	23,4	23,5	22,2
$\rho_{explosivo}$ [g/cm ³]	0,8	0,82	0,8	0,82

4.2. Análise Macroscópica das Novas Soldaduras

Após a realização do primeiro ensaio da chapa de cobre de 3 mm, executou-se uma análise macroscópica deste. Observou-se que o cobre apresentava uma superfície muito rugosa no lado de iniciação da explosão e de contacto com o explosivo, ou seja, o lado de maior quantidade de explosivo (Figura 4.4). A rugosidade foi diminuindo ao longo da direcção de detonação. Também se verificou uma deformação elevada, tanto no cobre, como no alumínio, na zona de maior quantidade de explosivo, devido à forte libertação de energia. Na zona de menor quantidade de explosivo, a amostra soldada apresenta uma deformação moderada. Seguidamente a esta visualização procedeu-se ao corte da placa soldada para análise, tendo-se verificado que a soldadura entre os dois materiais não se verificou. As razões para o insucesso deste ensaio, podem ter sido motivadas pelo processo de iniciação da explosão. De facto, no sentido de se gerar uma onda de detonação aproximadamente plana na mistura ANFO+EX, esta foi iniciada por uma lente côncava de EX+5%MEOV, no entanto, o ângulo médio com o eixo de propagação deve ter sido inferior ao ângulo crítico, resultando na formação de um choque triplo conhecido por onda de Mach (R. Mendes, 2002). Por isso, a velocidade de detonação foi muito superior à velocidade normal da mistura ANFO+EX, resultando numa deformação acentuada da placa de base e ausência de ligação na interface, mas apresentando indícios de alguma fusão parcial. De salientar que os parâmetros para o *flyer* de 3 mm da nova soldadura, comparados com os parâmetros da soldadura anterior, são muito idênticos, sendo a maior diferença a velocidade de detonação, que é maior na nova soldadura.

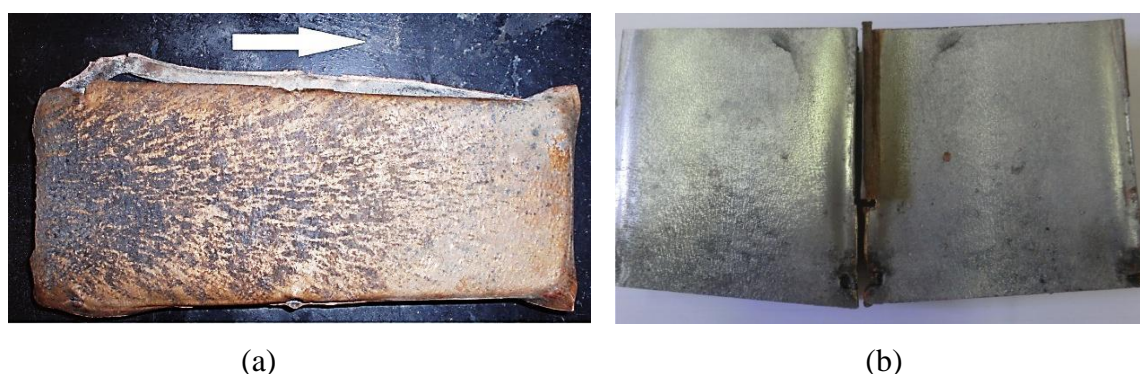


Figura 4.4. Nova soldadura para *flyer* de 3 mm: (a) rugosidade na superfície da placa de cobre (vista de cima); (b) interface das placas de alumínio, à esquerda e cobre, à direita, do ensaio SE3_N, em que não ocorreu soldadura.

Na Figura 4.5, é visível que a soldadura não se efectuou. Também se observa um rasgamento do *flyer* nas extremidades, isto acontece porque a área do *flyer* é maior que a área da placa base.



Figura 4.5. Aspecto geral da nova soldadura SE3_30 e SE3_20.

No segundo ensaio para a chapa voadora de 1 mm, examina-se uma deformação geral da placa cobre-alumínio provocada pela explosão, sendo maior no lado de maior quantidade de explosivo. Através da Figura 4.6, verifica-se que houve soldadura entre os metais, embora nas extremidades seja inexistente a sua ligação.



Figura 4.6. Nova soldadura SE1_25 e SE1_15.

Na Figura 4.7, observa-se uma rugosidade moderada do *flyer* desta soldadura, sendo maior na zona de maior quantidade de explosivo. A rugosidade superficial da soldadura SE1 parece ser inferior à soldadura SE3, embora as rugosidades não tenham sido avaliadas. Como a base utilizada neste ensaio foi de aço, esta apresentava uma rigidez muito superior à da base de areia, consequentemente a placa de cobre-alumínio sofreu maiores forças de compressão, tendo como efeito secundário a sua diminuição de largura.

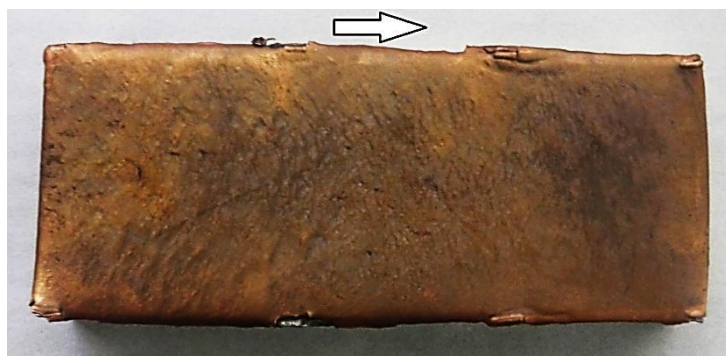


Figura 4.7. Nova soldadura SE1_25/15.

4.3. Análise Micrográfica

4.3.1. Soldaduras Anteriores

4.3.1.1. Soldadura por explosivo para *flyer* de 1 mm

A soldadura SE1 foi dividida em 5 amostras e analisada separadamente em cada zona.

A soldadura SE1_30_1 encontra-se no início da direcção da detonação, ou seja, na iniciação da soldadura, onde o rácio de explosivo foi de 2,64. Na Figura 4.8, são apresentadas as micrografias de duas zonas da interface desta amostra. Observa-se uma pequena ondulação na interface inicial, devendo-se isto ao facto de a soldadura se situar no início do processo. Já no final desta amostra a ondulação é crescente, sendo possível identificar compostos intermetálicos, graças à sua diferente coloração. Para uma maior ampliação na zona da interface, visualiza-se que esses compostos apresentam cor azul e algumas fissuras transversais, sugerindo a grande fragilidade desses compostos. Estes compostos são justificados pela localização desta soldadura na janela de soldabilidade, já que a soldadura SE1_30 se situa no limite em que existe fusão de metais. Sendo a ondulação uma característica da soldadura por explosão foi medida a distância entre ondas (comprimento de onda) e a sua amplitude. Assim, esta amostra contém um comprimento médio de onda de 279 μm e uma amplitude média de 31 μm .

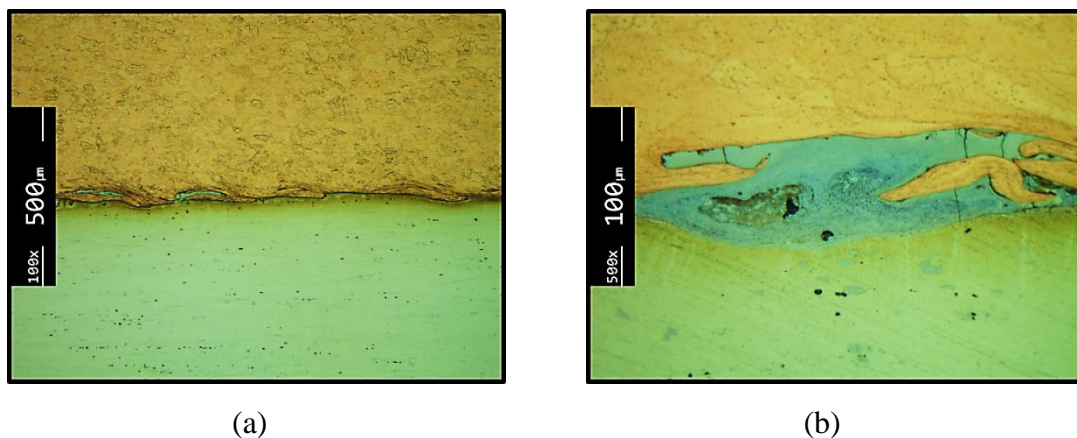


Figura 4.8. Interfaces Cu/Al da amostra SE1_30_1, (a) ampliação 100x; (b) ampliação 500x.

Para o mesmo R , a amostra SE1_30_2 situa-se numa zona já estabilizada da indentação do jacto. Na Figura 4.9, são expostas duas zonas da interface com ampliações diferentes. Visualiza-se uma ondulação constante e uma maior deformação da interface quando comparada com a da amostra SE1_30_1. Esta amostra contém um comprimento médio de onda de 459 μm e uma amplitude média de 43,6 μm. É possível observar nesta amostra a existência de maior quantidade de compostos intermetálicos comparando com a amostra anterior, também se visualiza um conjunto de defeitos como fendas e cavidades. Estes defeitos são formados durante o arrefecimento dos metais, embora este não seja um processo de fusão de metais. Isto acontece devido à dissipação de energia do *flyer* num intervalo de tempo muito curto. As fissuras ocorrem devido às elevadas tensões residuais provocadas pelo rápido arrefecimento. As cavidades são criadas durante a solidificação, já que o volume do metal solidificado é inferior ao volume do metal no estado líquido, formando-se cavidades.

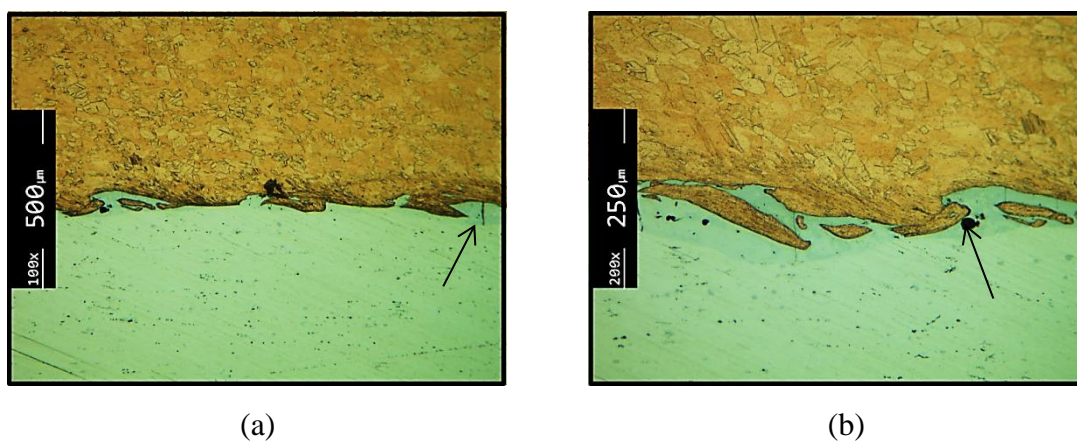


Figura 4.9. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_30_2, (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x.

A amostra SE1_ZT corresponde à zona de transição entre as duas soldaduras, ou seja, a zona em que a espessura do explosivo varia de 30 mm para 20 mm, estando representada na Figura 4.10. É visível nesta amostra uma diminuição de ondulação no início da amostra, com menor amplitude de ondas. Na zona final, observa-se um aumento da ondulação, sugerindo a iniciação da soldadura SE1_20. Confirma-se também a existência de compostos intermetálicos ao longo da interface, fissuras e algumas cavidades.

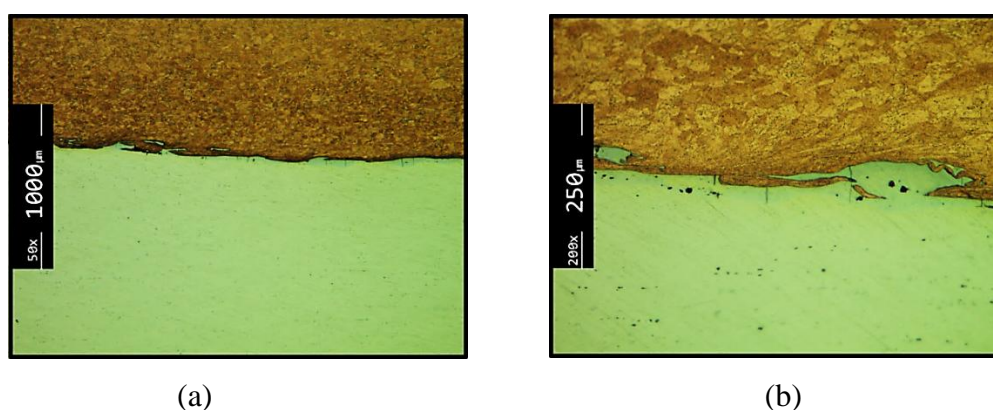


Figura 4.10. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_ZT, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.

A soldadura SE1_20_4 apresenta um rácio de explosivo de 1,78. Na Figura 4.11, estão representadas duas interfaces, em ampliações diferentes. Esta soldadura situa-se dentro da janela de soldabilidade, próxima do limite esquerdo. Observa-se uma maior amplitude de ondulação quando comparada com a amostra SE1_ZT. Verifica-se uma deformação acentuada do cobre na interface. O aparecimento de compostos intermetálicos é visível, bem como algumas cavidades na zona final da amostra. As ondas apresentam uma amplitude média de 42,9 μm e um comprimento médio de onda de 469 μm.

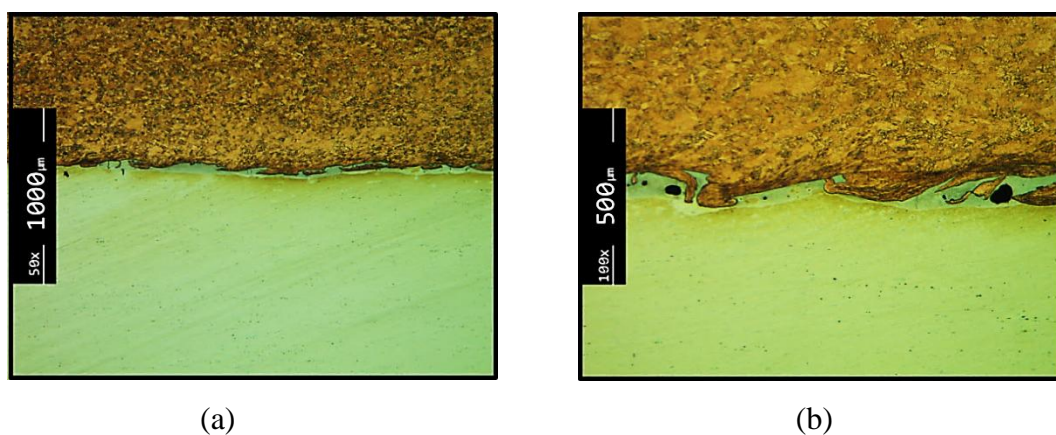


Figura 4.11. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_20_4, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 100x.

Para o mesmo R , a soldadura SE1_20_5 foi a última a ser realizada segundo a direcção de detonação. Na Figura 4.12, estão exibidas duas zonas de interface com ampliações distintas. Nesta amostra, observa-se uma interface ondulada onde é possível identificar compostos intermetálicos, fissuras e cavidades.

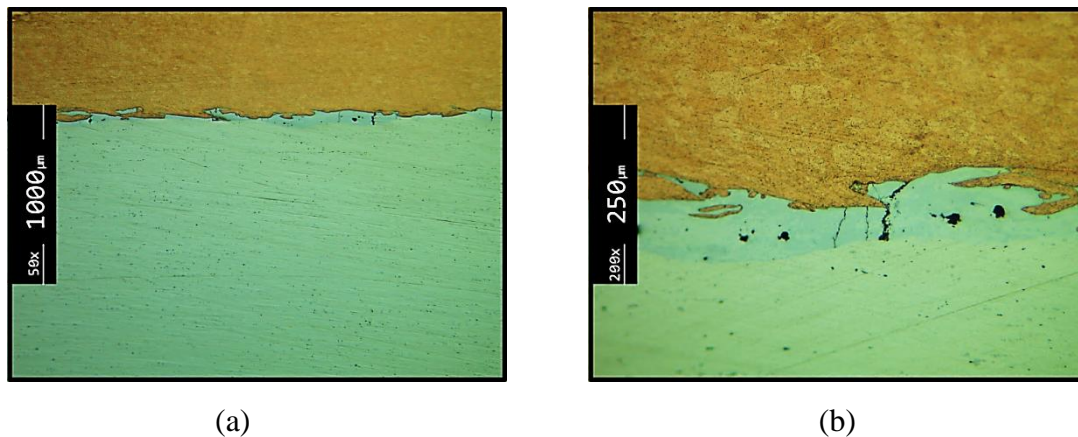


Figura 4.12. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_20_5, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.

Após a visualização das 5 amostras da soldadura SE1, também se observou a microestrutura do alumínio na soldadura SE1_30 e SE1_20. Na soldadura SE1_30 observou-se uma maior deformação dos grãos de cobre quando comparada com a soldadura SE1_20; estes grãos são mais alongados e orientados na direcção de detonação. Este facto explica-se pela maior quantidade de explosivo utilizado na soldadura SE1_30. Na microestrutura do alumínio, a deformação é pouco significativa ao longo da soldadura SE1, como mostra a Figura 4.13 para a amostra SE1_20_4.

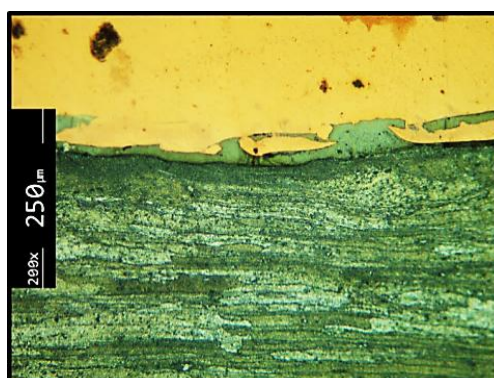


Figura 4.13. Microestrutura do alumínio da amostra SE1_20_4, ampliação 200x.

4.3.1.2. Soldadura por explosivo para flyer de 3 mm

A soldadura SE3 foi dividida em 5 amostras e analisada isoladamente por cada zona. A soldadura SE3_30_1 encontra-se no início da direcção da detonação. Na Figura 4.14, são apresentadas duas zonas da interface dessa soldadura. Esta soldadura foi realizada com um rácio de explosivo de 0,88 e encontra-se dentro da janela de soldabilidade. Nesta amostra, observa-se uma presença regular de ondas ao longo da soldadura. Também se verifica a presença na interface de intermetálicos, cavidades e fissuras.

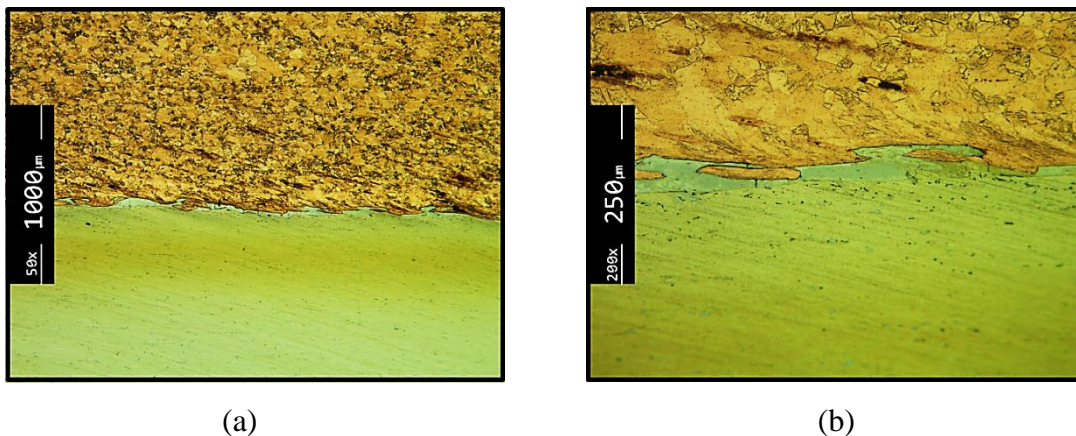


Figura 4.14. Interfaces Al/Cu da amostra SE3_30_1, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.

Na amostra SE3_30_2 o processo de soldadura já de encontra estabilizado. Para o mesmo R da soldadura anterior, são expostas na Figura 4.15, duas zonas da sua interface com ampliações distintas.

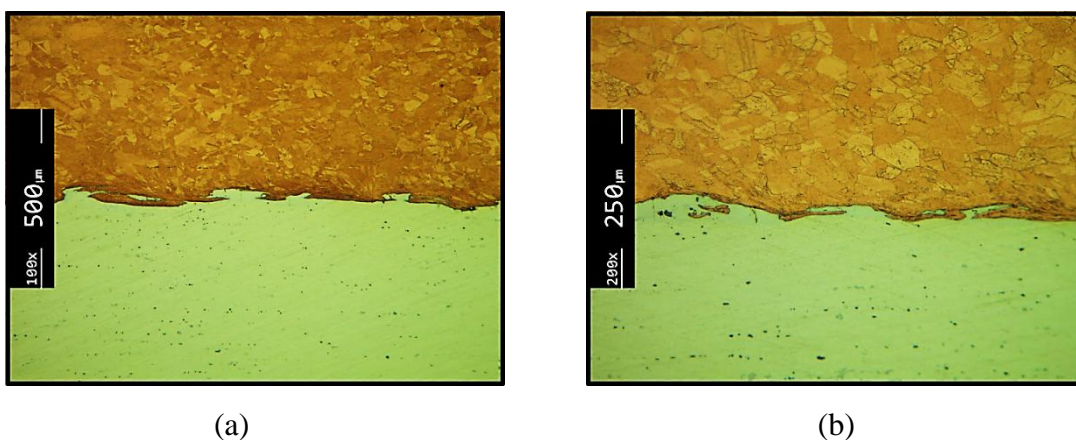


Figura 4.15. Interfaces Al/Cu da amostra SE3_30_2, (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x.

Na Figura 4.15 a), também é possível identificar uma interface ondulada, com uma periodicidade de ondulação superior à soldadura SE3_30_1. Nesta amostra, alcançou-se um comprimento médio de onda de 244 μm e uma amplitude média de 44,4 μm . A presença de composto intermetálicos é visível, com quantidade inferior em relação à amostra anterior. A existência de pequenos defeitos é também observada.

A zona de transição da soldadura SE3 é composta pela diferenciação de altura de explosivo e está representada na Figura 4.16. Observa-se que a ondulação é decrescente ao longo da amostra. Ainda são observados compostos intermetálicos e algumas cavidades.

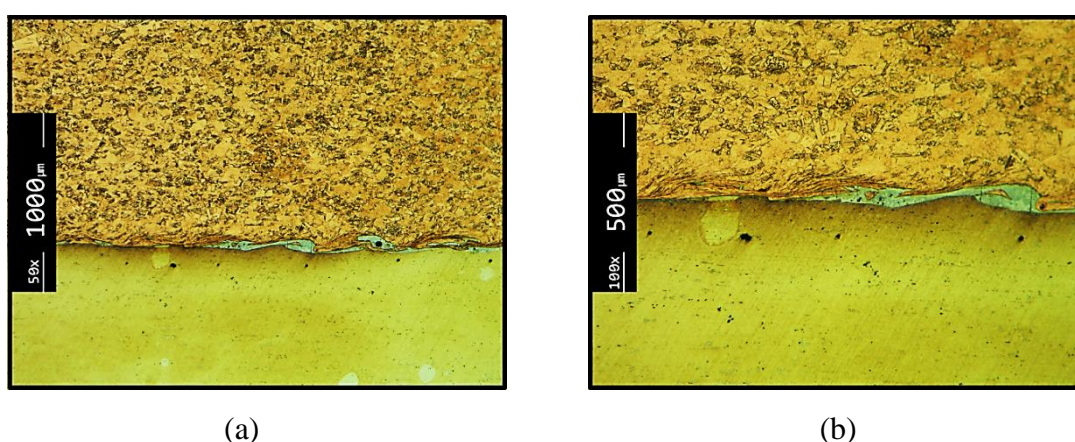


Figura 4.16. Interfaces Al/Cu da amostra SE3_ZT, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 100x.

A soldadura SE3_20 situa-se fora da janela de soldabilidade, o que significa que não se deve observar a formação de ondas na interface. Na Figura 4.17, estão representadas as interfaces das amostras SE3_20_4 e SE3_20_5. É visível que ambas as amostras apresentam ondulação muito reduzida, sendo que na amostra SE3_20_5 a interface Al/Cu é praticamente plana. Esta morfologia da interface está portanto de acordo com a indicação da janela de soldabilidade.

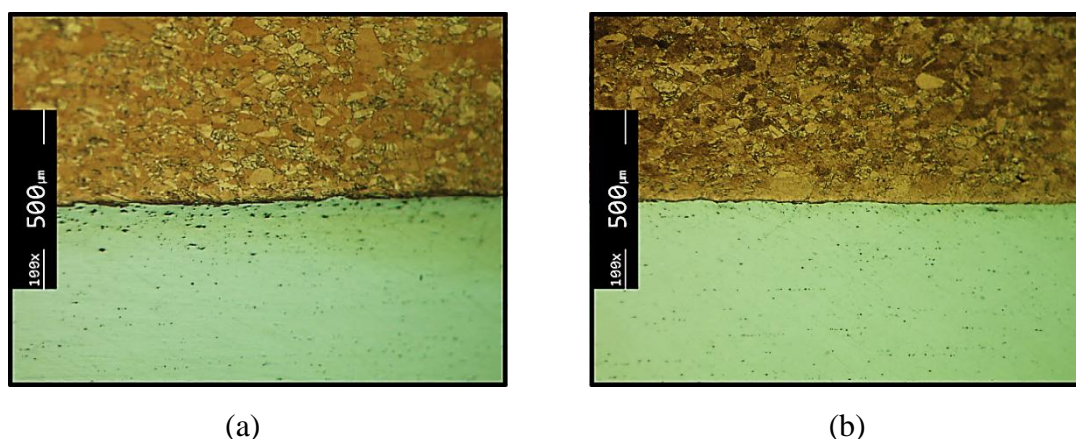


Figura 4.17. Interfaces Al/Cu da amostra: (a) SE3_20_4; (b) SE3_20_5. Ampliação: 100x.

Analisando a microestrutura do cobre ao longo da soldadura, a sua deformação é pouco significativa, sendo maior no lado de maior espessura de explosivo. A microestrutura do alumínio também sofre uma baixa deformação, conforme se ilustra na Figura 4.18. Nessa figura, observa-se também uma zona escura na interface, que sugere uma zona não soldada, contudo, trata-se apenas de uma zona de intermetálicos contrastados pelo reagente de Poulton.

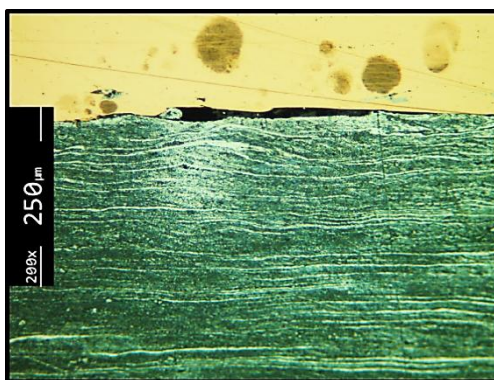


Figura 4.18. Microestrutura do alumínio da SE3_30_2, ampliação 200x.

4.3.2. Novas Soldaduras

4.3.2.1. Soldadura por explosivo para flyer de 1 mm

A nova soldadura SE1 foi dividida em 5 amostras e cada zona estudada separadamente. A soldadura SE1_25_1 encontra-se no início da direcção da detonação, ou seja, na iniciação da soldadura. A Figura 4.19 ilustra duas zonas da interface dessa amostra. A soldadura SE1_25 foi realizada com um rácio de explosivo de 2,25 e encontra-se representada dentro da janela de soldabilidade. Observa-se uma pequena ondulação e

uma baixa periodicidade de ondas, devendo-se este comportamento ao facto de o processo estar no seu começo e não se encontrar perfeitamente estabilizado. Identifica-se uma pequena presença de compostos intermetálicos e fissuras ao longo da interface.

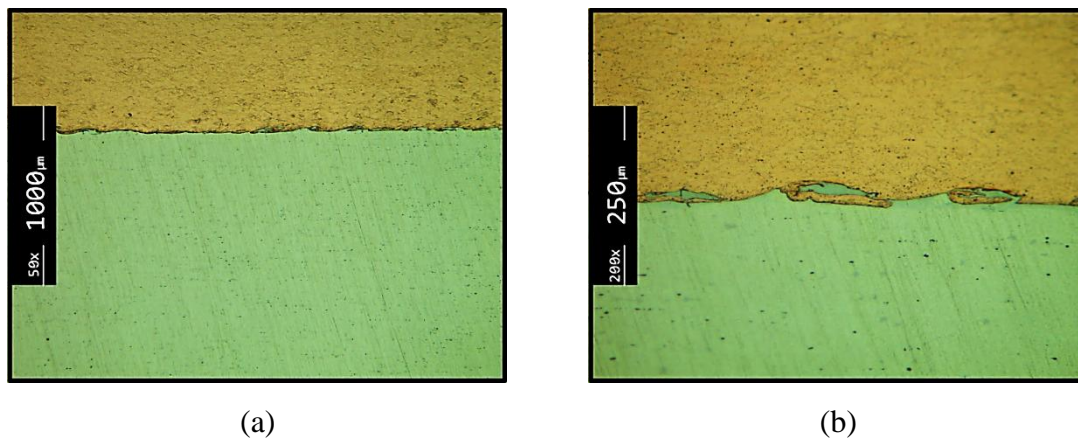


Figura 4.19. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_25_1, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 100x.

Para a amostra SE1_25_2 o processo de soldadura já se encontra otimizado. Duas imagens da sua interface estão expostas na Figura 4.20. Observa-se uma maior periodicidade de ondas, quando comparada com a da amostra anterior, bem como uma maior existência de compostos intermetálicos. É visível uma maior deformação do cobre ao longo da amostra, bem como a presença de defeitos de soldadura. Nesta amostra, obteve-se um comprimento médio de onda de 321 μm e uma amplitude média de 43 μm.

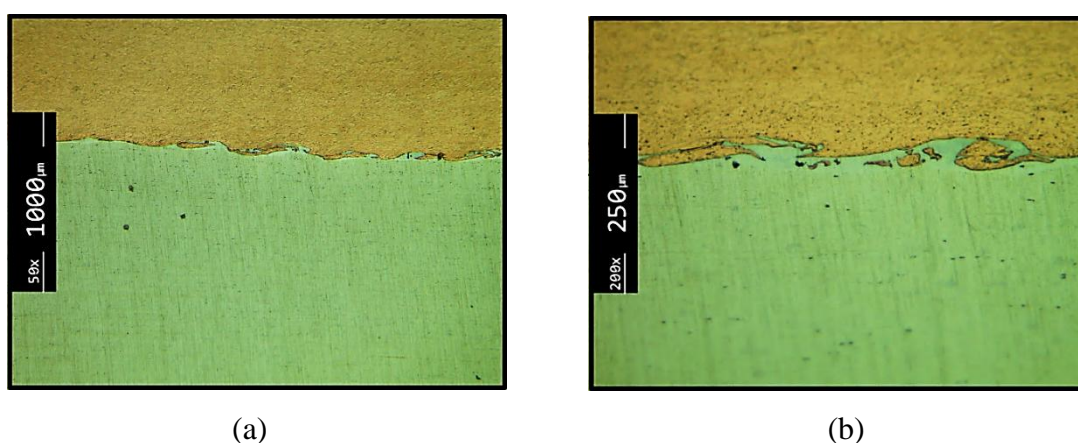


Figura 4.20. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_25_2, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.

Na Figura 4.21, são exibidas duas zonas de interface da soldadura SE1_15_4. A soldadura SE1_15 já se encontra fora da janela de soldabilidade, muito próxima do limite esquerdo e ostenta um R de 1,4. A soldadura SE1_15_4 apresenta uma baixa ondulação que vai diminuindo ao longo da amostra. Este facto deve-se ao local onde se encontra esta soldadura na janela de soldabilidade. Também são visíveis fissuras, cavidades e pequenos compostos intermetálicos.

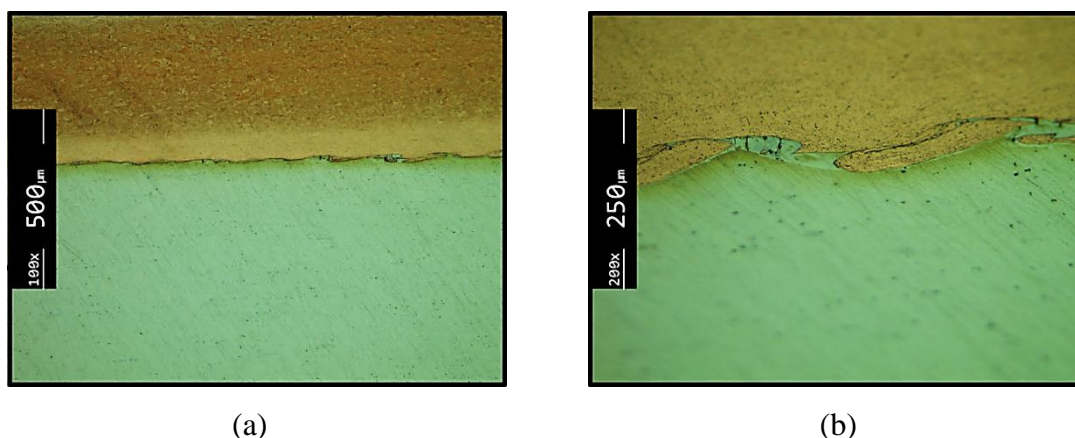


Figura 4.21. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_15_4, (a) ampliação 50x; (b) ampliação 200x.

Para o mesmo R , é apresentada na Figura 4.22 a soldadura SE1_15_5. No início desta soldadura observa-se uma ondulação moderada, tornando-se plana no seu final, podendo confundir-se a ondulação com a deformação causada pela explosão nos materiais envolventes. De facto, em algumas zonas, a cada onda segue-se uma parte de interface pouco deformada, antes da onda seguinte. Nesta amostra, alcançou-se um comprimento médio de onda de 238 μm e uma amplitude média de 19 μm.

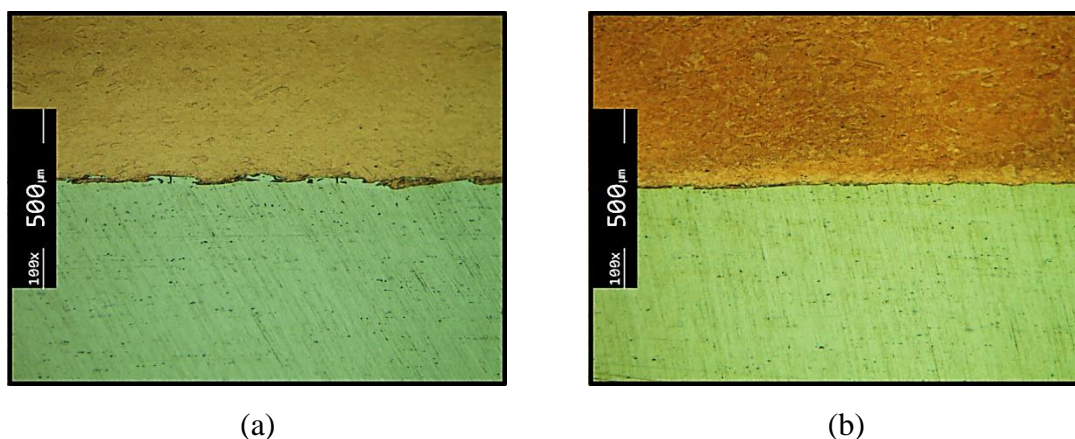


Figura 4.22. Interfaces Al/Cu da amostra SE1_15_5, (a) zona inicial da amostra; (b) zona final da amostra.

4.4. Análise dos Compostos Intermetálicos

Após as observações microscópicas, foram analisados quimicamente os intermetálicos presentes nas novas soldaduras. Esta análise foi realizada através dum microscópio electrónico de varrimento (SEM), equipado com um sistema de microanálise EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy). Na Figura 4.23, é apresentada a zona analisada da amostra SE1_25_2.

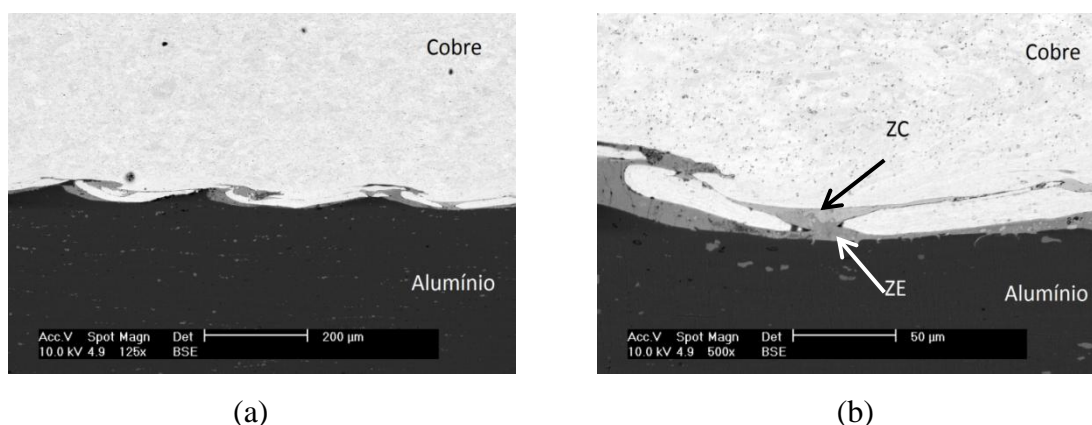


Figura 4.23. Imagem SEM da amostra SE1_25_2, (a) ampliação 125x; (b) ampliação 500x.

Observa-se um composto intermetálico na interface Cu/Al com cores distintas, uma zona mais clara (ZC) próxima do cobre e uma zona mais escura (ZE) próxima do alumínio, ambas indicadas com setas na Figura 4.23 b). Pela Figura 4.24 a), a composição química da zona clara sugere que a composição química do composto intermetálico presente está próxima da fase $CuAl$, (H. Kim *et al*, 2003). A composição química da zona escura é exibida na Figura 4.24 b), sugerindo que a composição química do composto intermetálico identificado está próxima da fase $CuAl_2$, (H. Kim *et al*, 2003).

EDAX ZAF Quantification (Standardless)						
Element Normalized						
SEC Table : Default						
Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	1.92	5.02	0.0063	1.1446	0.2866	1.0024
CuL	63.76	41.89	0.5970	0.9558	0.9778	1.0018
MgK	0.00	0.00	0.0000	1.0969	0.2397	1.0042
AlK	34.31	53.09	0.1244	1.0643	0.3406	1.0000
Total	100.00	100.00				
Element	Net Inte.	Backgrd	Inte. Error	P/B		
O K	1.76	4.36	16.48	0.40		
CuL	99.33	5.02	0.94	19.80		
MgK	0.00	5.47	0.00	0.00		

(a)

EDAX ZAF Quantification (Standardless)						
Element Normalized						
SEC Table : Default						
Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	1.95	4.35	0.0061	1.1205	0.2764	1.0020
CuL	44.71	25.06	0.4124	0.9358	0.9821	1.0034
MgK	1.32	1.94	0.0045	1.0741	0.3144	1.0081
AlK	52.01	68.65	0.2317	1.0423	0.4275	1.0000
Total	100.00	100.00				
Element	Net Inte.	Backgrd	Inte. Error	P/B		
O K	1.73	4.18	16.15	0.42		
CuL	70.53	4.85	1.12	14.53		
MgK	1.87	5.20	16.55	0.36		

(b)

Figura 4.24. (a) Composição da zona clara para a amostra SE1_25_2; (b) Composição da zona escura para a amostra SE1_25_2.

Na Figura 4.25, é exposta a zona analisada da amostra SE1_15_5. A seta na Figura 4.25 b) indica a zona analisada. Só se identifica uma cor presente, ou seja, que corresponde a só uma fase. Através da Figura 4.26, verifica-se que a composição química medida não parece corresponder a nenhum dos intermetálicos habituais para este tipo de ligações.

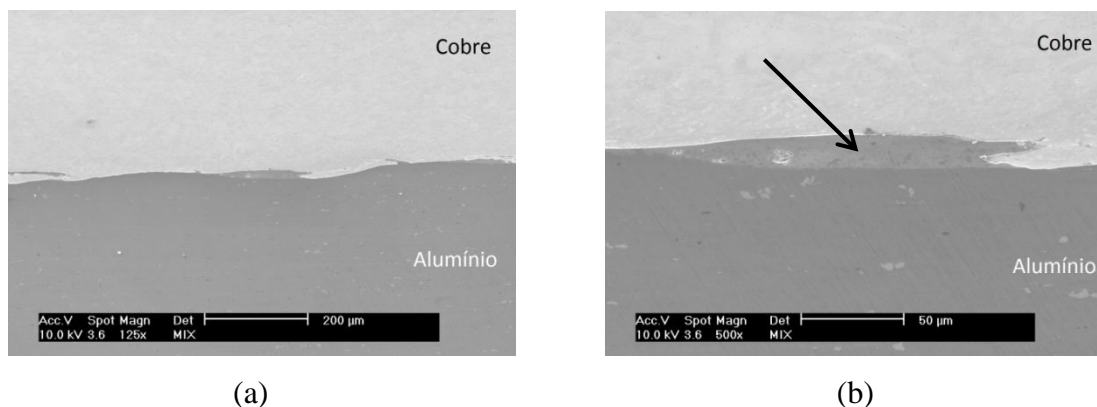


Figura 4.25. Imagem SEM da amostra SE1_15_5, (a) ampliação 125x; (b) ampliação 500x.

EDAX ZAF Quantification (Standardless)						
Element Normalized						
SEC Table : Default						
Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	1.04	1.96	0.0030	1.0929	0.2617	1.0016
CuL	20.16	9.57	0.1861	0.9130	1.0036	1.0073
MgK	3.38	4.19	0.0185	1.0481	0.5145	1.0185
AlK	75.42	84.28	0.4730	1.0171	0.6166	1.0000
Total	100.00	100.00				
Element	Net Inte.	Backgrd	Inte. Error	P/B		
O K	0.28	1.11	52.66	0.25		
CuL	10.54	1.27	3.23	8.28		
MgK	2.55	1.40	8.53	1.82		

Figura 4.26. Composição química da amostra SE1_15_5.

4.5. Análise de Dureza

4.5.1. Soldaduras SE1

Foram efectuadas medições de dureza nos materiais base utilizados, tendo o cobre apresentado uma dureza média de 91 HV e o alumínio de 88 HV. As indentações foram realizadas ao longo de uma linha transversal à interface Cu/Al. De salientar que, foram seleccionadas as soldaduras que apresentaram as condições ideais de soldadura, isto é, aquelas onde o processo de soldadura foi considerado estabilizado. As durezas das restantes zonas são apresentadas no Anexo 2.

Para as soldaduras SE1_30_2 e SE1_20_4 verifica-se um aumento de dureza nos metais base para ambas as amostras, conforme se observa na Figura 4.27.

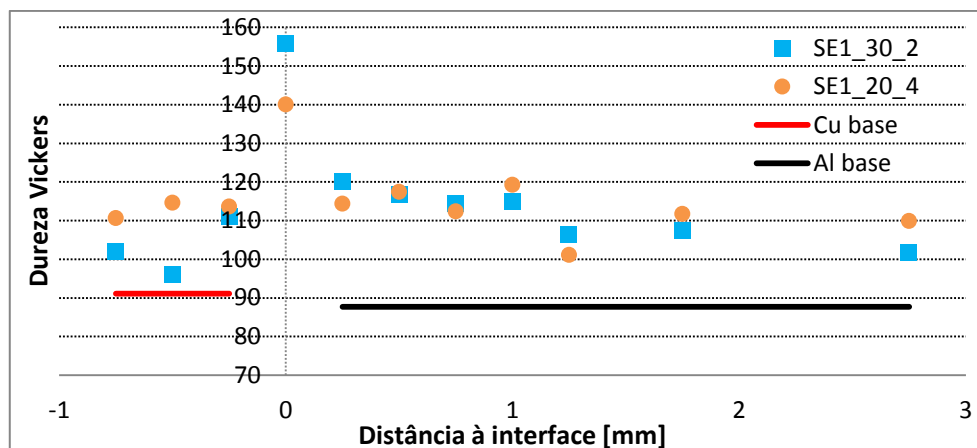


Figura 4.27. Resultados de dureza das amostras SE1_30_2 e SE1_20_4.

Na interface encontra-se o maior aumento de dureza. O aumento da dureza dos metais base deve-se à deformação plástica sofrida pelas chapas aquando do impacto. As indentações realizadas próximo da interface apresentaram um aumento de dureza considerável em ambas soldaduras. Ao observar-se este aumento substancial de dureza na zona da junta, levantou-se a questão de saber se é originado pela deformação plástica dos metais base ou pela presença de intermetálicos. Para esclarecer esta questão, realizaram-se várias tentativas para que a indentação concordasse com a zona da interface, mais precisamente no composto intermetálico presente, e reduziu-se a carga de medição para 50 g. Para a amostra SE1_30_2 não foi possível concretizar essa intenção, já para a amostra SE1_20_4, houve uma tentativa que coincidiu com o composto intermetálico (Figura 4.28), obtendo-se o valor de 338 HV0.2. Este valor elevado, é justificado pela fusão localizada dos metais base e consequente formação de composto intermetálico, referido acima na análise química. Este resultado mostra que o endurecimento ilustrado na Figura 4.27, se deve principalmente, à deformação plástica induzida nos materiais pela onda de choque. O resultado apresentado na figura mostra precisamente, que a soldadura realizada com maior rácio de explosivo apresenta maior endurecimento na interface.

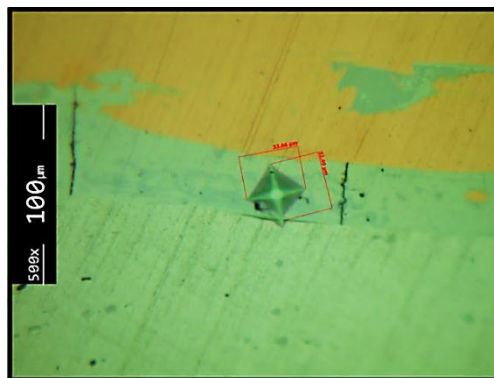


Figura 4.28. Indentação no composto intermetálico da amostra SE1_20_4.

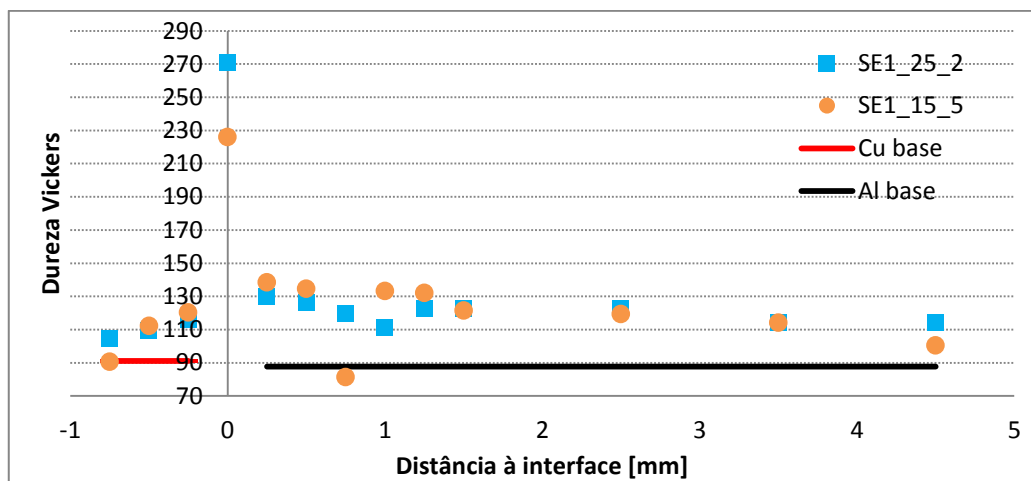


Figura 4.29. Resultados de dureza das amostras SE1_25_2 e SE1_15_5.

Na Figura 4.29, são apresentados os resultados de dureza para as amostras SE1_25_2 e SE1_15_5. Também se observa aqui, uma disposição idêntica às soldaduras anteriores, uma vez que os valores de dureza atingem o seu máximo nas zonas adjacentes e na interface para ambas as soldaduras. Na figura observa-se que a soldadura SE1_25_2 apresenta maior dureza que a soldadura SE1_15_5, pelas razões apontadas acima. Contudo, verifica-se que qualquer destas soldaduras apresenta maior dureza na interface que as anteriores, realizadas com maior rácio de explosivo. A razão para este facto estará relacionada com a utilização de uma base de aço nestas últimas soldaduras, ao contrário das anteriores, em que se utilizou uma base de areia molhada. A Figura 4.30 mostra as indentações efectuadas nas duas amostras.

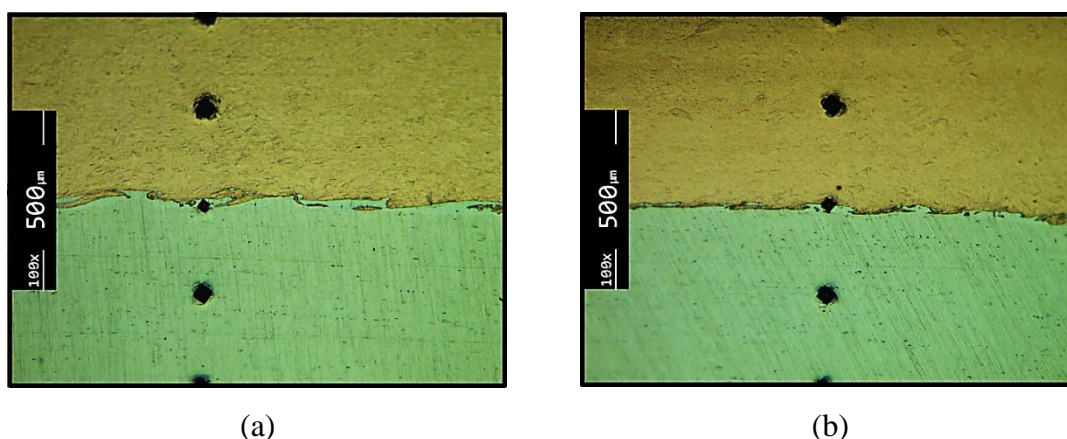


Figura 4.30. Indentações na soldadura SE1: (a) SE1_25_2; (b) SE1_15_5

Foram ainda realizados ensaios para se obter a dureza dos compostos intermetálicos localizados na interface para ambas as soldaduras, utilizando cargas mais baixas. Na Figura 4.31, mostram-se as imagens das medições de dureza nos intermetálicos das SE1_25_2 e SE1_15_5.

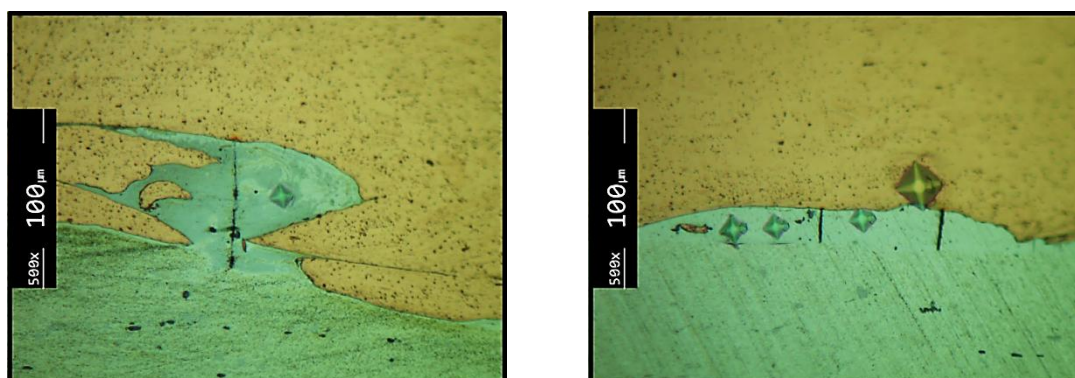


Figura 4.31. Indentações no composto intermetálico das amostras SE1_25_2 e SE1_15_5.

Para as soldaduras SE1_25_2 e SE1_15_5 obteve-se um valor máximo de 303 HV e 412 HV, respectivamente. Esta diferença de durezas pode-se explicar pela diferente composição química de cada componente intermetálico.

4.5.2. Soldaduras SE3

Efectuadas as medições de dureza para esta soldadura, obteve-se para o cobre o valor de 97,7 HV e para o alumínio o valor de 87,7 HV. Através da Figura 4.32, observa-se que a dureza vai aumentando das zonas contíguas até à interface. A explicação para este facto, reside no aumento de resistência mecânica por deformação plástica, já referido

anteriormente. Tal como anteriormente, as soldaduras realizadas com maior rácio de explosivo apresentam maior dureza máxima.

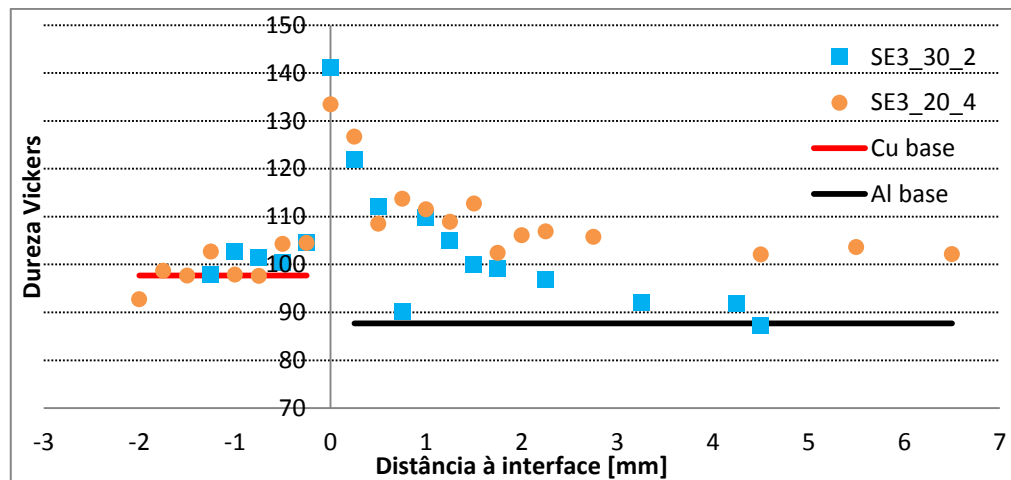


Figura 4.32. Resultados de dureza das amostras SE3_30_2 e SE3_20_4.

Após várias tentativas para que a indentação concordasse com a interface, foi possível coincidir na amostra SE3_30_2, como se pode ver pela Figura 4.33. Já com a amostra SE3_20_4, não foi possível coincidir porque não existe compostos intermetálicos na sua interface, de facto, esta soldadura encontra-se fora da janela de soldabilidade. Para a amostra SE3_30_2 obteve-se um valor máximo de 509 HV.

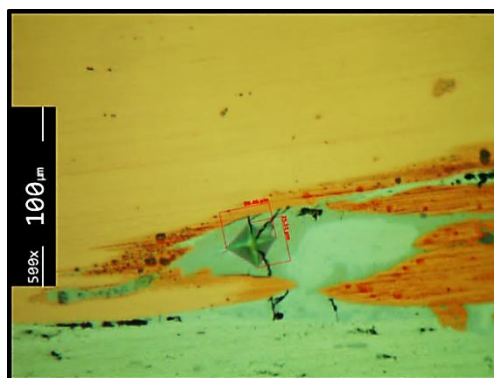


Figura 4.33. Indentação no composto intermetálico da amostra SE3_30_2.

4.6. Ensaio de Arrancamento

A realização deste ensaio teve por objectivo avaliar a resistência mecânica da ligação. Foram realizados ensaios de arrancamento às soldaduras SE3_30_2, SE3_20_4, SE1_25_2 e SE1_15_5, de acordo com o esquema apresentado no ponto 3.7.2. Para as soldaduras SE1_30 e SE1_20 também se realizou este ensaio, mas após a maquinagem das amostras, não foi possível identificar a que zona pertenciam. Na Figura 4.34, são apresentados os resultados do ensaio para as amostras SE3_30_2 e SE3_20_4.

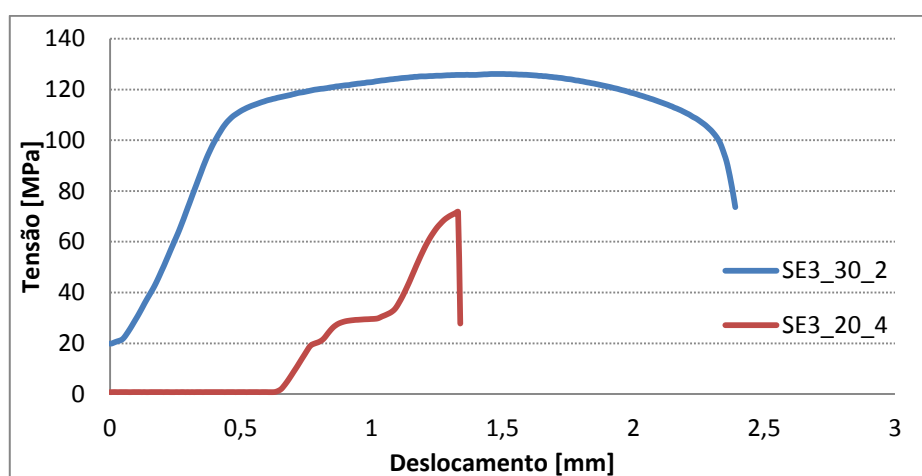


Figura 4.34. Curvas tensão/deformação das amostras SE3_30_2 e SE3_20_4.

Na soldadura SE3_30_2 atingiu-se o valor máximo de tensão de 126 MPa, correspondendo a um deslocamento de 1,5 mm. O rompimento desta ligação deu-se pelo cobre, ou seja, a zona da interface permaneceu intacta indicando que a soldadura apresenta resistência mecânica superior a este valor. A soldadura SE3_20_4 atingiu o valor máximo de tensão de 72 MPa, correspondendo a um deslocamento de 1,3 mm. A curva de ensaio deste provete apresenta uma parte praticamente horizontal, que corresponde à alguma flexão da chapa voadora durante o ensaio. O rompimento desta ligação deu-se nas imediações da interface mais precisamente no lado do alumínio, para uma resistência bastante inferior à anterior. As imagens dos provetes testados são mostradas na Figura 4.35.



Figura 4.35. (a) Rompimento da amostra SE3_30_2; (b) Rompimento da amostra SE3_20_4.

A análise da superfície de fractura do provete da soldadura SE3_20_4 está ilustrada na Figura 4.36, realizada com recurso à microscopia electrónica de varrimento.

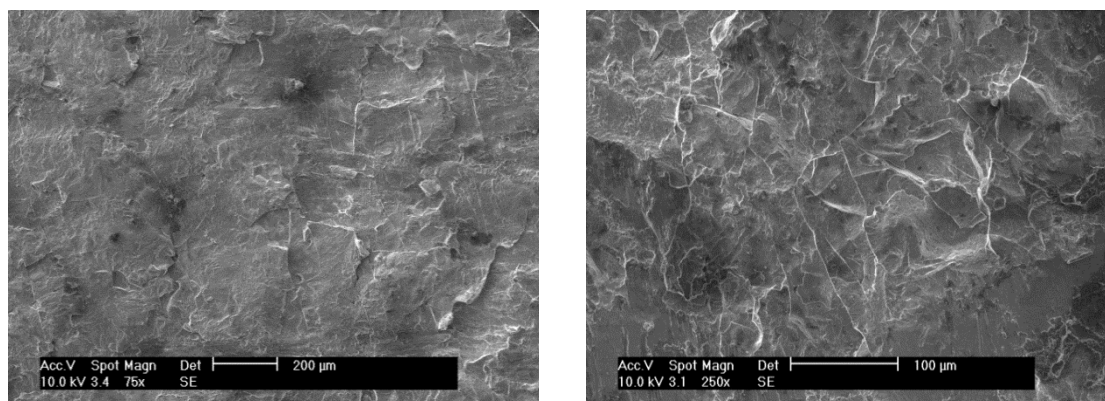


Figura 4.36. Análise SEM da zona de fractura da amostra SE3_20_4.

As imagens foram recolhidas em locais distintos da coroa circular fracturada. Qualquer das imagens apresenta um carácter frágil, com superfícies lisas e degraus, sem deformação plástica significativa. Observam-se também algumas linhas claras, presumivelmente correspondentes a arestas de desagarramento. Esta morfologia sugere que a fractura ocorreu na zona onde se concentram os compostos intermetálicos mais frágeis, o que justifica a baixa tensão de arrancamento observada nesta amostra.

Na Figura 4.37, são apresentados os resultados do ensaio para as amostras SE1_25_2 e SE1_15_5.

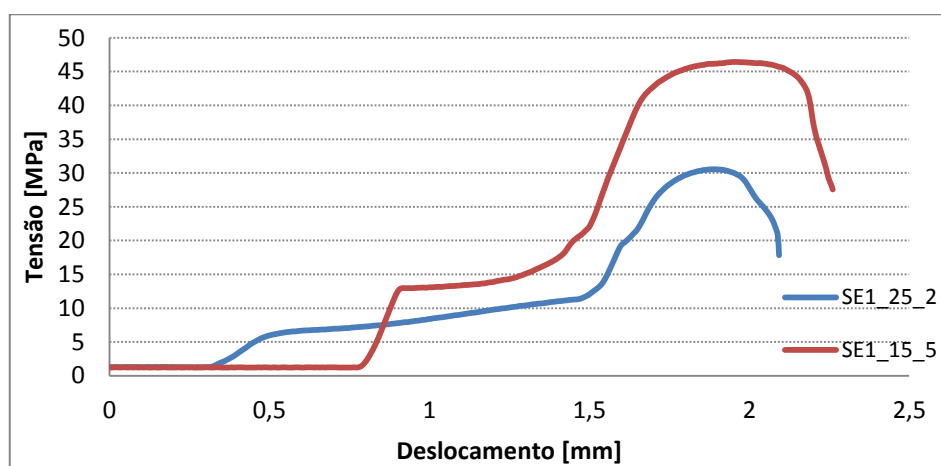


Figura 4.37. Curvas tensão/deslocamento das amostras SE1_25_2 e SE1_15_5.

Na soldadura SE1_25_2 atingiu-se o valor máximo de tensão de 31 MPa, correspondendo a um deslocamento de 1,9 mm. A soldadura SE1_15_5 atingiu o valor máximo de tensão de 46 MPa, correspondendo a um deslocamento de 2 mm. Nas curvas da Figura 4.37 observa-se uma grande componente horizontal, devido à fraca rigidez da chapa voadora. A rotura ocorreu em ambos casos no cobre e não na ligação soldada, conforme se mostra na Figura 4.38.

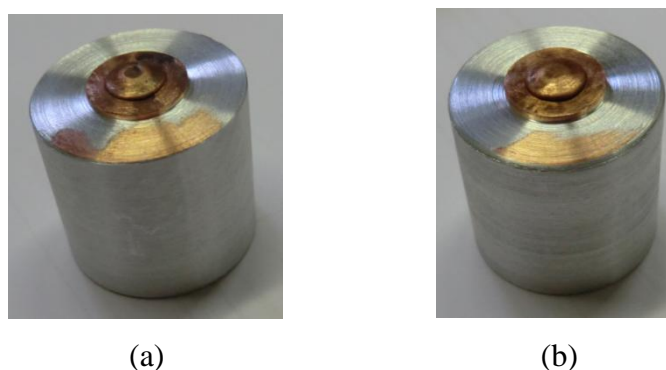


Figura 4.38. (a) Rompimento da amostra SE1_25_2; (b) Rompimento da amostra SE1_15_5.

Embora tenham obtido tensões diferentes, estas amostras têm em comum o facto de o rompimento se circunscrever à placa de cobre. Este rompimento verificou-se por falta de rigidez da *chapa voadora*, ou seja, para este tipo de ensaio deve-se diminuir a área da coroa circular, de modo a que a rotura ocorra na ligação.

As soldaduras SE1_30 e SE1_20 apresentaram comportamento idêntico, conforme se mostra na Figura 4.39, embora não fosse possível distinguir os provetes um do outro, devido ao desaparecimento das marcas.

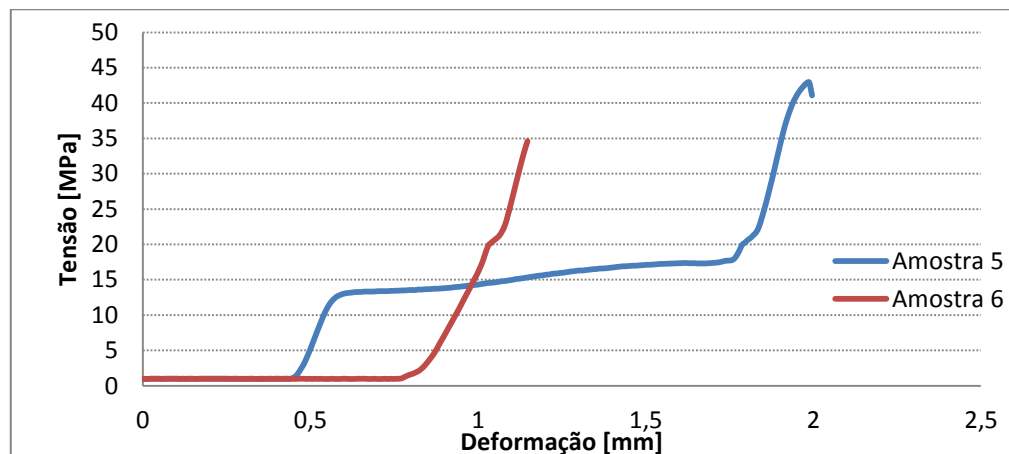


Figura 4.39. Curvas tensão/deformação das amostras 5 e 6.

Na Amostra 5 atingiu-se o valor máximo de tensão de 43 MPa, correspondendo a uma deformação de 2 mm. A Amostra 6 atingiu o valor máximo de tensão de 35 MPa, correspondendo a uma deformação de 1,1 mm. Um dos rompimentos está apresentado na Figura 4.40.

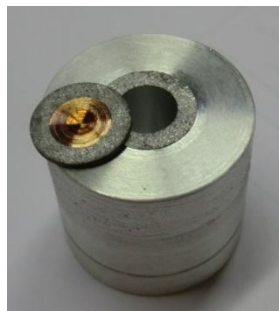


Figura 4.40. Rompimento da amostra 5.

A rotura desta ligação deu-se nas imediações da interface, mais precisamente no lado do alumínio, sugerindo uma soldadura de má qualidade. Nestas duas amostras não ocorreu rompimento da *chapa voadora*, sugerindo assim que as soldaduras anteriores contêm uma qualidade de ligação superior.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho foi possível construir janelas de soldabilidade para o par alumínio-cobre, nas condições testadas, e definir a localização das soldaduras realizadas. A nova soldadura para o *flyer* de 3 mm não foi analisada devido ao insucesso do ensaio, causado pela iniciação do processo. Na Tabela 5.1, é apresentado um resumo das propriedades e características da soldadura SE3, na zona estabilizada da soldadura, para a espessura de explosivo de 30 e 20 mm. Esta tabela mostra que o aumento do rácio de explosivo aumentou todas as grandezas relevantes para a soldadura, como a velocidade de colisão, a velocidade de impacto e o ângulo de colisão. O aumento destes parâmetros alterou significativamente as características das soldaduras, conforme se ilustra na mesma tabela.

Tabela 5.1. Propriedades e características gerais das soldaduras SE3.

	SE3_30_2	SE3_20_4
V_p [m/s]	512	390
V_c [m/s]	2072	1647
β [graus]	14,2	13,6
R	0,9	0,6
Amplitude das ondas [μm]	44,4	-
Comprimento médio das ondas [μm]	244	-
Dureza na interface [HV]	141	133
Dureza no intermetálico [HV]	509	-
Tensão de arrancamento [MPa]	126	72
Redução de espessura do <i>flyer</i>	6,7%	5,3%
Base	Areia	Areia

A soldadura SE3_30 apresentou uma interface ondulada mas não regular, com presença de compostos intermetálicos. O ensaio de arrancamento mostrou que esta soldadura apresenta boa qualidade, pois a rotura não ocorreu na interface. Estes resultados são compatíveis com a localização na janela de soldabilidade do ponto que representa a soldadura. Já a soldadura SE3_20 encontra-se representada fora da janela de soldabilidade, localizada numa área em que não é verificada a existência de ondulação, o que foi confirmado pela análise microscópica. Verificou-se que um $R = 0,6$ é muito baixo para a formação de ondas para uma chapa voadora de cobre de 3 mm de espessura. A dureza máxima na interface, ocasionada pela deformação plástica é maior na soldadura realizada com maior rácio de explosivo. Além disso, a falha no ensaio de arrancamento ocorreu na interface para tensões relativamente baixas, ao contrário do que se observou na soldadura SE3_30.

Na Tabela 5.2, é apresentado um resumo das propriedades e características gerais das soldaduras SE1.

Tabela 5.2. Propriedades e características gerais das soldaduras SE1.

	SE1_30_2	SE1_25_2	SE1_20_4	SE1_15_5
V_p [m/s]	885	830	755	660
V_c [m/s]	2149	2013	1854	1712
β [graus]	23,8	23,8	23,5	22,2
R	2,6	2,3	1,8	1,4
Amplitude das ondas [μm]	43,6	43	42,9	19
Comprimento médio das ondas [μm]	459	321	499	238
Dureza na interface [HV]	156	271	140	226
Dureza no intermetálico [HV]	375	303	339	412
Tensão de arrancamento [MPa]	-	31	-	46
Redução de espessura do <i>flyer</i>	9,3%	8,4%	5,7%	4,3%
Base	Areia	Aço	Areia	Aço

Verifica-se que o aumento do rácio de explosivo aumentou todas as grandezas importantes para a soldadura SE1, como a velocidade de colisão, a velocidade de impacto e o ângulo de colisão. Embora as soldaduras fossem produzidas com bases diferentes, a amplitude de ondulação aumentou com o rácio de explosivo. Para as soldaduras realizadas com base de areia, a dureza máxima na interface encontra-se na soldadura com maior rácio de explosivo, assim como para as soldaduras que utilizaram base de aço. Observa-se que as durezas são mais elevadas para a base de aço, sugerindo que a base utilizada tem influência nesta característica. A quantidade de intermetálicos presentes na soldadura SE1_30 é superior à soldadura SE1_20, o que é compatível com a localização de cada soldadura na janela de soldabilidade. A soldadura SE1_25 apresenta ondulação na interface, sendo assim compatível com a sua posição na janela de soldabilidade. Já a soldadura SE1_15 apresenta uma ondulação inferior, vindo assim ao encontro da sua posição na janela de soldabilidade, já que está próxima do limite de ocorrência de ondulação. Embora não fosse possível identificar as amostras com base em areia aquando a realização do ensaio de arrancamento, o rompimento destas deu-se pela ligação para tensões muito baixas, apontando para a má qualidade das soldaduras. As falhas no ensaio de arrancamento para as soldaduras de base em aço ocorreram no cobre, indicando que eram de qualidade superior às soldaduras realizadas com base de areia.

Na Figura 5.1, é apresentado a relação de V_p com R para ambos os *flyers*.

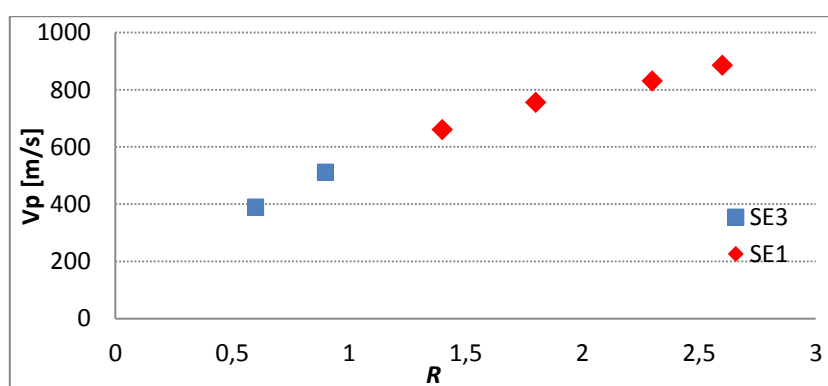


Figura 5.1. Evolução de V_p em função de R .

Verifica-se que a velocidade de impacto depende directamente do rácio de explosivo, quanto maior for R , maior é V_p para ambos os *flyers*.

Na Figura 5.2, é apresentado a relação de β com R para ambos os *flyers*.

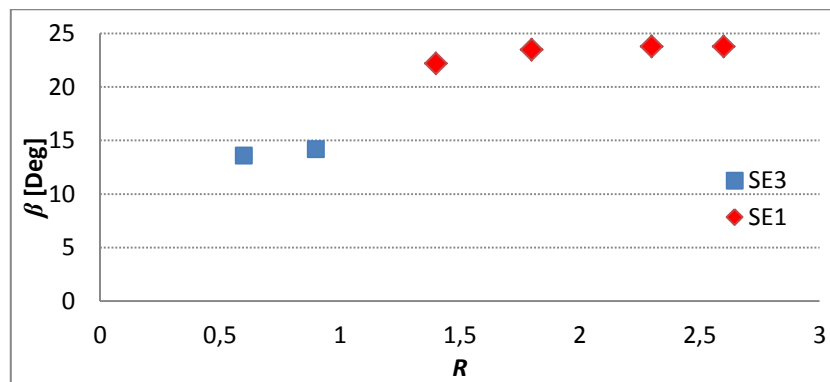


Figura 5.2. Evolução de β em função de R .

Observa-se para o aumento do rácio de explosivo que o ângulo de colisão também aumenta. Para um R superior a 2, verifica-se que β tem um aumento pouco significativo.

Na Figura 5.3, é apresentada a relação entre V_p e a redução de espessura no *flyer*.

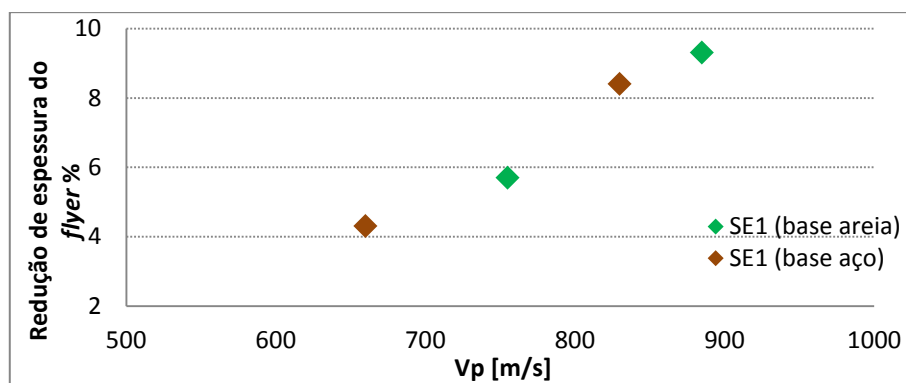


Figura 5.3. Evolução da redução de espessura em função de V_p .

Constata-se que com o aumento da velocidade de impacto, a redução de espessura do *flyer* aumenta. Esta figura sugere que a base utilizada não influencia muito significativamente a percentagem de redução de espessura do *flyer*.

Na Figura 5.4, é apresentada a evolução da amplitude de ondulação com a velocidade de impacto para as soldaduras SE1.

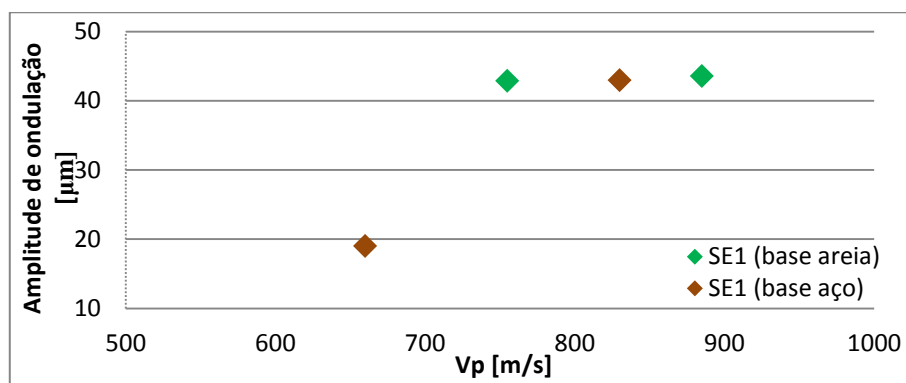


Figura 5.4. Evolução da amplitude de ondulação em função de V_p .

Verifica-se, que a evolução da amplitude da ondulação com a velocidade de impacto para estas soldaduras não é consistente de acordo com a literatura estudada (B. Gulenc, 2006), sugerindo que a base tem influência nas amplitudes das ondas. Nas soldaduras com base de areia o aumento de amplitude é mínimo para uma diferença de R significativa. Para as soldaduras com base de aço, observa-se claramente que para maiores velocidades de impacto, maior será a sua amplitude de ondulação. Para além do efeito da base, esta evolução da amplitude das ondas também poderá ser parcialmente explicada pela dificuldade de caracterização das ondas, devido a estas serem muito irregulares ao longo da soldadura

Na Figura 5.5, apresenta-se a evolução do comprimento da ondulação com V_p .

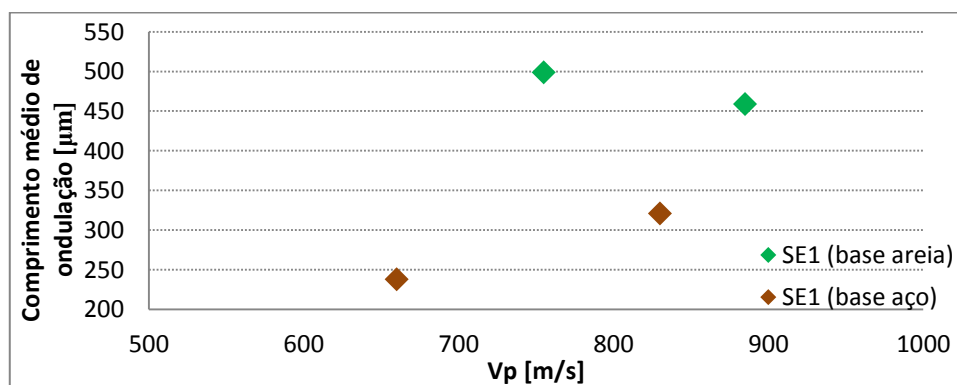


Figura 5.5. Evolução do comprimento de ondulação em função de V_p .

Verifica-se novamente uma incongruência na evolução do comprimento das ondas para as soldaduras realizadas com base em areia. Uma das possíveis razões para este acontecimento, pode ser por erro de medições, já que a ondulação evidenciada não é regular tornando-se difícil a sua caracterização. Também se poderá identificar a influência

da base utilizada, já que as soldaduras com base em aço apresentaram uma evolução concordante com a velocidade de impacto.

Na Figura 5.6, é apresentada a evolução da dureza na interface com a velocidade de impacto.

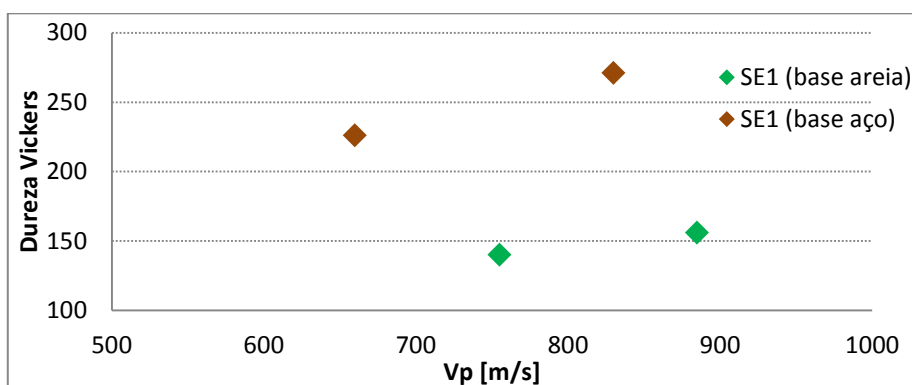


Figura 5.6. Evolução de dureza em função de V_p .

Observa-se pela figura, que a evolução de dureza na interface para cada soldadura aumenta com a velocidade de impacto. Porém, verifica-se que as durezas das soldaduras com base de aço são superiores às durezas da soldadura com base em areia, tendo estas menor rácio de explosivo. A explicação para este facto pode dever-se à maior rigidez da base utilizada.

Por último, refira-se que os compostos intermetálicos formados, nas soldaduras realizadas com maiores rácios de explosivo são diferentes dos formados nas soldaduras produzidas com menor rácio de explosivo. Este facto pode estar relacionado com o volume de metal fundido, produzido em cada caso e com a comparticipação da chapa base e da chapa voadora na zona fundida.

6. CONCLUSÃO

A investigação realizada na soldadura por explosão de chapas de cobre a alumínio permitiu extrair as seguintes conclusões:

- O aumento do rácio de explosivo (R) conduz a um aumento da velocidade de impacto (V_p) em todas as soldaduras;
- Para um rácio de explosivo superior a 2, o aumento do ângulo de colisão (β) é pouco significativo para as soldaduras realizadas com chapa voadora de 1 mm de espessura;
- A amplitude das ondas na interface aumenta com V_p ;
- Com o aumento do rácio de explosivo, a espessura da placa voadora diminui após soldadura;
- Todas as soldaduras localizadas na janela de soldabilidade apresentaram morfologia compatível com essa localização;
- A presença de compostos intermetálicos na interface é superior para um maior rácio de explosivo; uma maior presença leva a um acréscimo de cavidades e fissuras nessas zonas;
- Observou-se um aumento de dureza na zona da interface para maiores R e V_p em todas as soldaduras, sendo que as soldaduras com placa base em aço, apresentaram maiores durezas comparadas com as soldaduras realizadas com placa base em areia;
- A resistência ao arrancamento da ligação cobre/alumínio para o *flyer* de 3 mm é no mínimo de 126 MPa. Para a chapa voadora de 1 mm, não foi possível estabelecer um mínimo.

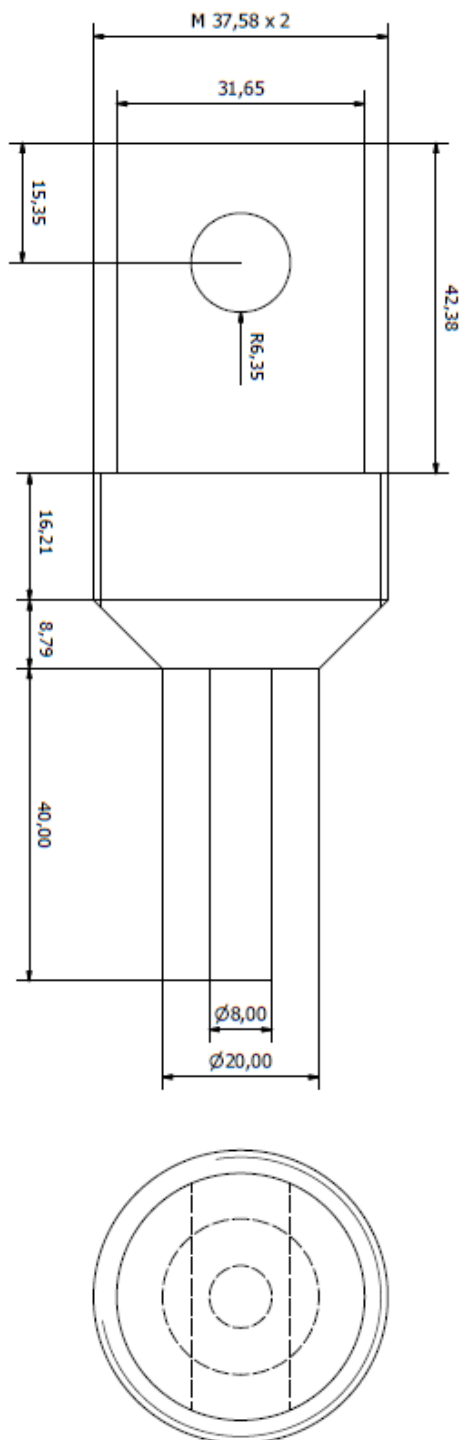
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

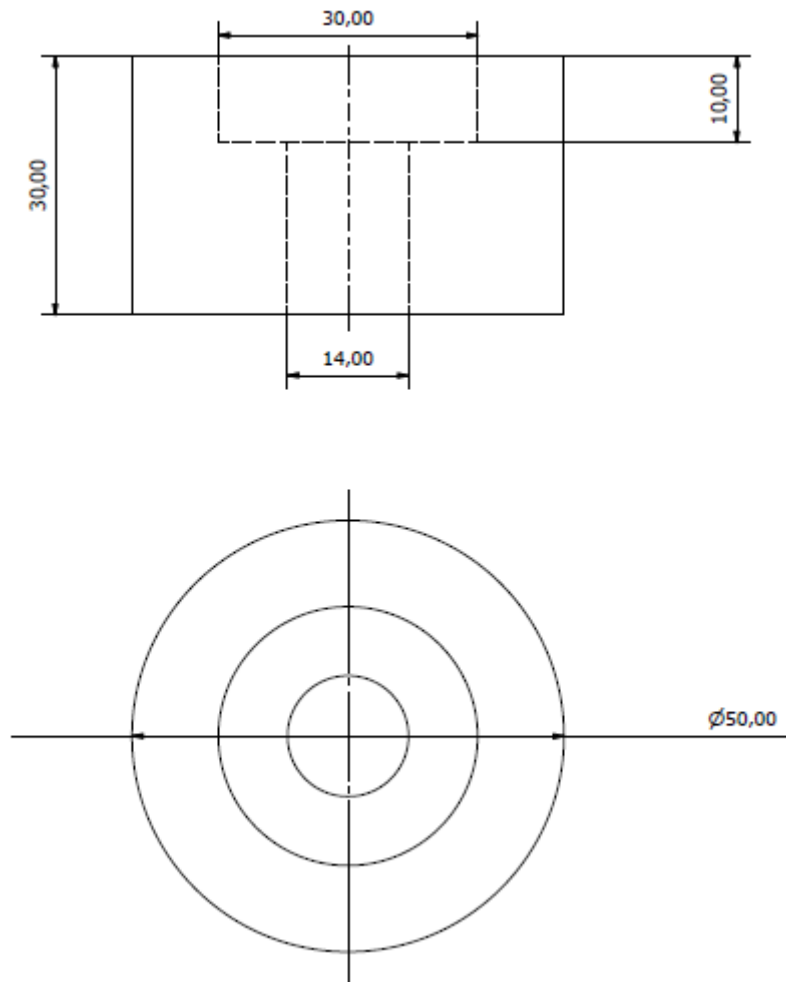
- Abrahamson G. R. J., (1961), Appl. Mech
- Acarer M. (2011), Electrical, Corrosion, and Mechanical Properties of Aluminum-Copper Joints Produced by Explosive Welding, *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Aravind M., P. Yu, M.Y. Yau, Dickon H.L. Ng. (2004), Formation of Al₂Cu and AlCu intermetallics in Al(Cu) alloy matrix composites by reaction sintering, *Materials Science and Engineering A* 380 (2004) 384–393.
- 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.
- Bergman O., Cowan G., Holtzman A. (1966), Experimental evidence of jet formation during explosion cladding, *Trans. Metal Soc. AIME*, pp. 646–653.
- 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.
- Campbell A. W., Malin M. E, Boyd T. J, JR., and Hull J. A. (1956), Precision Measurement of Detonation Velocities in Liquid and Solid Explosives, *Review of Scientific Instrument*, Volume: 27: 567- 574.
- 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.
- Chou P. C., and W. J. Flis. (1986), Recent Developments in Shaped Charge Technology. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 11 (4):99-114.
- Deribas, A.A. (1980), Physics of Strengthening and of Explosive Welding, *Novosibirsk: Nauka*, p. 220.
- 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 Gorennya 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.
- 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.
- 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].*
- 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.*
- Lysak V. I., Kuz'min S. V. (2011), Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas, *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 150–156.
- Mendes R., (2002), Iniciação e detonação de explosivo plástico de RDX, *Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Universidade Coimbra.*
- 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, a publicar, *Journal of materials and design.*
- 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.

-
- Mousavi A.A., S.T.S. Al-Hassani. (2004), Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 53 (2005) 2501–2528.
- Popoff A. A. and Hugh C. (1977), Application of Explosion Welded Transition Joints, *WESTEC '77 Conference, Los Angeles, California, March 14-17*.
- Tarver, C. M., Breithaupt R. D. and Kury J. W. (1997), Detonation waves in pentaerythritol tetranitrate, *Journal of Applied Physics* 81 (11):7193-7202.
- Reid S. R. (1974), A discussion of the mechanism of interface wave generation in explosive welding, *International. J. Mech. Sci.* 16, 399–413.
- Walsh, J.M., Shreffler, R.G., Willig F.J. (1953), Limiting conditions for jet formation in high velocity conditions. *Journal of Applied Physics* 24 (3), 349–359.
- 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*.
- 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 – Desenho das Peças para o Ensaio de Arrancamento





ANEXO 2 – Dureza das Zonas Menos Ideais das Soldaduras SE3 e SE1

