



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Soldadura Al-Cu por explosivo em configuração plana

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

Autor

Tiago Miguel Cruz Dias

Orientadores

Ricardo António Lopes Mendes

Altino de Jesus Roque Loureiro

Júri

| | |
|-------------------|---|
| Presidente | Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra |
| Vogais | Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra |

Coimbra, Julho, 2012

A perseverança é mais eficaz do que a violência, e muitas coisas que, quando reunidas, são invencíveis, cedem a quem as enfrenta uma de cada vez.

Plutarco

Aos meus pais e irmã.

Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado contou com a colaboração de algumas pessoas a quem sinto o dever de agradecer.

Ao Professor Doutor Altino Loureiro, pela orientação e permanente disponibilidade para ensinar, tendo sido indispensável na realização e conclusão deste trabalho.

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes, pelo acompanhamento nos ensaios experimentais e pelo enriquecimento trazido ao conteúdo deste trabalho.

Aos engenheiros Ivan Galvão, Carlos Leitão e Filipe Fernandes, pela disponibilidade, amizade, alegria constante e inestimável apoio durante toda a caminhada que trouxe este trabalho até ao fim.

Aos meus amigos, particularmente ao Paulo, cuja companhia durante esta longa caminhada foi muito importante. É um facto que dois têm mais força que um só.

Por fim, o mais importante, à minha família que é o esteio que me sustenta como ser, e à minha namorada, Joana, por tudo.

Resumo

O trabalho aqui apresentado tem como objectivo o estudo da influência da carga explosiva e da espessura da chapa voadora na qualidade de soldaduras realizadas entre chapas de alumínio e cobre, em geometria plana sobreposta.

A soldadura por detonação consiste num processo de junção de metais, onde a detonação de um explosivo tem lugar numa das faces de um metal, que é projectado a alta velocidade sobre o outro. O elemento que é projectado é designado como elemento voador, neste caso chapa voadora. O facto de esta união se dar no estado sólido permite que metais com propriedades distintas possam ser soldados, mantendo as propriedades úteis de ambos. A preservação dessas propriedades seria difícil na soldadura por fusão. Este processo tem uma vasta gama de aplicações, que vai desde a indústria petroquímica até à indústria naval, sendo que a sua simplicidade o torna economicamente atractivo.

Apesar desta grande variedade de aplicações, há ainda aspectos por analisar, tanto ao nível das configurações de soldadura, como dos materiais a soldar, o que leva a que haja, presentemente, uma motivação para a investigação e desenvolvimento nesta área.

Neste trabalho foram realizados dois ensaios, variando a espessura da placa voadora e, em cada ensaio, foram utilizadas duas razões entre a massa de explosivo e a massa da placa voadora. Consequentemente, a variação destes parâmetros induz uma variação na velocidade de impacto e no ângulo de colisão. Posteriormente, foi avaliada a qualidade das soldaduras obtidas e a influência dos parâmetros alterados nessa mesma qualidade. Foi também dado ênfase à variação das características da interface com a variação dos diferentes parâmetros.

Da realização deste trabalho conclui-se que é possível ligar cobre e alumínio através do método de soldadura por detonação. Conclui-se também que este processo deu origem à formação de material, possivelmente por fusão, que não é nenhum dos materiais base. Em todas as soldaduras, o valor da dureza após a execução do processo, aumentou quando comparado com a dureza dos materiais base.

Palavras-chave: Soldadura, Detonação, Cobre, Alumínio, Materiais Intermetálicos.

Abstract

The work presented aims to study the influence of the explosive charge and the flyer plate thickness in the quality of the welds performed between sheets of aluminum and copper in superimposed planar geometry.

The explosive welding is a process of joining metals, where the detonation of an explosive takes place on one side of a metal, which is projected at high speed over the other. The element which is projected is referred to as flyer, in this case flyer plate. As the joining of materials takes place in the solid state allows metals with different properties to be welded, while maintaining the intrinsic properties of both. The preservation of these properties would be difficult in fusion welding. This process has a wide range of applications, from the petrochemical industry to the naval industry, and its simplicity makes it economically attractive.

Despite this variety of applications, there are still some areas left to analyze, either in terms of welding configurations or in terms of materials to weld, which means that there is currently a motivation for research and development in this area.

In this study two experiments were performed varying the flying plate thickness, and at each test, two ratios between the mass of explosive and the mass of the flying plate were used. Consequently, the variation of these parameters induces variations in the impact velocity and angle of collision. Subsequently the welds were evaluated, in order to characterize the influence of these parameters on the weld quality. It has also been emphasized the changes of the interface morphology with the variation of weld parameters.

From this study it is concluded that it is possible to bind copper and aluminum by the method of explosive welding. It also follows that this process has given rise to the formation intermetallic materials, possibly by melting. The welding process produced a significant increase in hardness in the interface of both materials.

Keywords Explosive welding, Copper, Aluminium, Intermetallics.

Índice

| | |
|---|------|
| Índice de Figuras | vi |
| Índice de Tabelas | viii |
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Estado da Arte | 2 |
| 2.1. Enquadramento histórico | 2 |
| 2.2. Princípios de funcionamento | 3 |
| 2.3. Mecanismos de formação da onda | 12 |
| 2.4. Selecção do explosivo | 14 |
| 2.5. Combinações de materiais realizadas em soldadura por detonação | 16 |
| 2.6. Vantagens, limitações e aplicações do processo | 17 |
| 2.6.1. Vantagens | 17 |
| 2.6.2. Limitações | 18 |
| 2.6.3. Aplicações | 18 |
| 2.7. Segurança | 18 |
| 3. Procedimento Experimental | 20 |
| 3.1. Materiais base | 20 |
| 3.2. Preparação do material para os ensaios | 22 |
| 3.3. Montagem Experimental | 23 |
| 3.4. Ensaios e Nomenclatura dos provetes | 24 |
| 3.5. Preparação das amostras para a análise de resultados | 25 |
| 3.5.1. Corte | 25 |
| 3.5.2. Polimento | 26 |
| 3.5.3. Ataque químico | 26 |
| 3.5.4. Micro durezas | 27 |
| 3.5.5. Microanálise | 27 |
| 3.5.6. Ensaio de tracção | 27 |
| 4. Resultados | 29 |
| 4.1. Janela de soldabilidade | 29 |
| 4.2. Análise morfológica | 33 |
| 4.2. Soldaduras SE3 (<i>flyer</i> de 3 mm) | 35 |
| 4.2.1. SE3_30 e SE3_20 | 35 |
| 4.2.2. Zona de transição SE3 | 40 |
| 4.3. Soldaduras SE1 (<i>flyer</i> de 1 mm) | 41 |
| 4.3.1. SE1_30 e SE1_20 | 41 |
| 4.3.2. Zona de transição SE1 | 44 |
| 4.4. Análise das propriedades mecânicas | 46 |
| 4.4.1. Resultados de dureza | 46 |
| 4.4.2. Ensaio de tracção | 50 |
| 5. Discussão dos Resultados | 53 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 6. Conclusão | 56 |
| Referências Bibliográficas..... | 57 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Ilustração do processo de soldadura por detonação em placas paralelas. | 4 |
| Figura 2.2. Pormenor da interface no momento da colisão. | 4 |
| Figura 2.3. Representação das velocidades e ângulo de colisão. | 5 |
| Figura 2.4. Janela de soldabilidade. | 9 |
| Figura 2.5. Mecanismo de formação de onda proposto por Bahrani, (H. El-Sobky, 1983).13 | |
| Figura 2.6. Mecanismo de formação de onda proposto por Kowalick e Hay, (H. El-Sobky, 1983). | 14 |
| Figura 2.7. Algumas combinações de materiais possíveis de realizar hoje, (F. Findik, 2011) | 17 |
| Figura 3.1. Microestrutura do alumínio. Ampliação: 100x. | 21 |
| Figura 3.2. Microestrutura do cobre na chapa de: (a) 3 mm; (b) 1mm. | 21 |
| Figura 3.3. Ilustração da montagem experimental. | 23 |
| Figura 3.4. Fotografia da montagem completa, relativa ao 1º ensaio. | 23 |
| Figura 3.5. Fotografia da montagem completa, relativa ao 2º ensaio. | 24 |
| Figura 3.6. Vista da soldadura SE3, já efectuada, com identificação das amostras a analisar. | 26 |
| Figura 3.7. Esquema do ensaio de tracção. | 28 |
| Figura 4.1. Curva $V_p(t)$ calibrada para coincidir com V_{p_cal} e t_{vp_cal} | 31 |
| Figura 4.2. Janela de soldabilidade do par Al-Cu, com representação das soldaduras SE3_30, SE3_20, SE1_30 e SE1_20. | 32 |
| Figura 4.3. Observação macroscópica do provete SE3: (a) rasgamento da extremidade; (b) deformação transversal. | 33 |
| Figura 4.4. Vista geral do provete SE1 com indicação da direcção da detonação. | 34 |
| Figura 4.5. Aspectos do provete SE1: (a) deterioração superficial no início do provete; (b) vista de topo do provete. | 34 |
| Figura 4.6. SE3, ampliação 50x: (a) SE3_30_1; (b) SE3_20_5. | 35 |
| Figura 4.7. SE3 ampliada 100 x: (a) SE3_30_1; (b) SE3_20_5. | 36 |
| Figura 4.8. SE3, ampliação 200x: (a) SE3_30_1; (b) SE3_20_5. | 37 |
| Figura 4.9. Cavidade e fenda na soldadura SE3_30. | 38 |
| Figura 4.10. Resultados, em percentagem ponderal, da análise com microsonda da soldadura SE3_30. | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.11. Imagem das zonas analisadas na soldadura SE3: (a) SE3_30; (b) SE3_20. ... | 39 |
| Figura 4.12. Resultados, em percentagem ponderal, da análise com microsonda da soldadura SE3_20. | 39 |
| Figura 4.13. SE3_ZT, ampliação 100x: (a) extremidade referente à soldadura SE3_30; (b) extremidade referente à soldadura SE3_20. | 40 |
| Figura 4.14. SE3_ZT: (a) cavidades; ampliação 100x; (b) fissuras; ampliação 200x. | 41 |
| Figura 4.15. SE1, ampliação 50x: (a) SE1_20_1; (b) SE1_30_5. | 42 |
| Figura 4.16. SE1, ampliação 200x: (a) SE1_20_1; (b) SE1_30_5. | 42 |
| Figura 4.17. Soldadura SE1_30, ampliação 200x: (a) cavidades e fissuras; (b) fissuras e ilhas de cobre. | 43 |
| Figura 4.18. Deformação da chapa de cobre na soldadura SE1: (a) SE1_20; (b) SE1_30. | 44 |
| Figura 4.19. SE1_ZT, ampliação 50x: (a) extremidade referente à soldadura SE1_20; (b) extremidade referente à soldadura SE1_30. | 45 |
| Figura 4.20. Defeitos na amostra SE1_ZT: (a) zona de 20 mm de explosivo; (b) zona de 30 mm de explosivo. | 45 |
| Figura 4.21. Perfis de dureza das soldaduras SE3_30 e SE3_20. | 47 |
| Figura 4.22. Indentações na soldadura SE3_30: (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x. | 47 |
| Figura 4.23. Indentações na zona da interface da soldadura SE3_30. | 48 |
| Figura 4.24. Indentações na soldadura SE3_20: (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x. | 49 |
| Figura 4.25. Perfis de dureza das soldaduras SE1. | 49 |
| Figura 4.26. Valores máximos de dureza no material intermetálico: (a) soldadura SE1_20, 200x; (b) soldadura SE1_30, 500x. | 50 |
| Figura 4.27. Amostras depois de traccionadas: (a) SE3_30_2; (b) SE3_20_4. | 51 |
| Figura 4.28. Curvas tensão/deformação de cada uma das amostras. | 51 |
| Figura 4.29. Zona de cedência: (a) SE3_30_2; (b) SE3_20_4. | 52 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1. Composição química dos metais. | 20 |
| Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura. | 24 |
| Tabela 3.3. Nomenclaturas das soldaduras e amostras. | 25 |
| Tabela 4.1. Dados para o cálculo da velocidade de detonação de cada soldadura. | 29 |
| Tabela 4.2. Valores das constantes utilizadas na construção da janela de soldabilidade. ... | 31 |
| Tabela 4.3. Parâmetros de soldadura. | 32 |
| Tabela 5.1. Características e parâmetros das soldaduras. | 54 |

1. INTRODUÇÃO

A soldadura por detonação é um processo de ligação de materiais com bastante interesse pois permite unir materiais com características dissimilares, sem algumas das inconveniências inerentes aos processos de ligação, ditos por fusão. Neste processo, uma chapa é acelerada por acção da detonação de um explosivo e colide com elevada velocidade com outra chapa, que se encontra estacionária, causando assim a deformação das superfícies que contactam, e promovendo a ligação dos materiais. É também um processo de execução relativamente simples e com um custo relativamente baixo no que diz respeito à montagem e à própria execução.

Ao nível académico, os estudos existentes acerca deste processo e da influência dos parâmetros de soldadura na qualidade da união são ainda escassos. Estes são alguns dos factores que tornam o processo apetecível e, como tal, justificam os estudos nesta área tendo em vista o aprofundamento do conhecimento e o conseqüente aumento da importância e da abrangência deste processo na indústria.

O objectivo deste trabalho foi estudar a influência dos parâmetros de soldadura, nomeadamente o rácio de explosivo, (razão entre a massa de explosivo e a massa da placa voadora), a velocidade de colisão e a velocidade de detonação, nas características da interface das soldaduras realizadas, utilizando como placas voadoras chapas de cobre com 1 mm e 3 mm, e como placa base chapa de alumínio 5083. Foram efectuados dois ensaios que deram origem a quatro soldaduras que foram posteriormente analisadas.

O tema da soldadura por detonação é um tema multidisciplinar que necessita de conhecimentos em áreas que vão da engenharia de materiais até à mecânica de fluidos, o que o torna adequado à conclusão de uma formação em engenharia mecânica.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Enquadramento histórico

A soldadura por explosivo é uma tecnologia que surgiu, como muitas outras, no decorrer da guerra. Não apareceu através do desenvolvimento de nenhuma tecnologia anterior, mas sim da observação. É quase certo que, desde que se começaram a utilizar projecteis metálicos acelerados através da acção de explosivos, a soldadura por explosivo terá sido observada. O primeiro registo escrito de estilhaços soldados a blindagens, tem origem na 1ª Grande Guerra, mas é possível que, desde que inventaram a pólvora, os chineses tenham, inadvertidamente, descoberto a soldadura por explosivo, (G. Young, 2004).

Foi já no decorrer da 2ª Guerra Mundial, em 1944, que L. R. Carl primeiro observou a soldadura a alta velocidade. Carl levou a cabo uma série de experiências para reproduzir a “soldadura no estado sólido”, como lhe chamou, tendo estas primeiras experiências sido realizadas em latão. As suas fotomicrografias não revelavam qualquer zona de fusão nas juntas, daí a caracterização como soldadura no estado sólido, (G. Young, 2004). Os atuais e potentes microscópios electrónicos revelam que existe, de facto, uma finíssima camada onde ocorre fusão na zona da junta.

Nos anos que se seguiram, e até ao final da década de 50 do séc. XX, não houve actividade significativa nesta área até que, em 1962, Holtzman deu entrada no registo de patentes a um pedido, com o objectivo de patentear, para os Estados Unidos, o processo de soldadura por explosivo. A patente foi-lhe concedida em 1964 e, em 1965, a DuPont deu início à produção e comercialização de metais unidos através do processo de soldadura por explosão, (G. Young, 2004).

Hoje em dia, é possível soldar mais de 260 combinações de metais semelhantes e dissemelhantes, bem assim como ligas metálicas, fruto da investigação levada a cabo nesta área, tendo como motivo impulsionador a considerável procura por parte das indústrias química e nuclear, (F. Findik, 2011).

2.2. Princípios de funcionamento

O processo de soldadura por explosivo, contrariamente à maioria dos processos de soldadura de metais, não requer a fusão dos materiais a unir. Este processo utiliza antes a energia libertada aquando da detonação do explosivo, para acelerar e fazer colidir, com elevada energia, um material contra o outro. Não existe transferência de calor de uma placa para a outra, uma vez que não há tempo, pois todo o processo é muito rápido. Não existindo transferência de calor, também não vai existir uma zona termicamente afectada (ZTA) como existe nos casos da soldadura por fusão. Este facto faz com que seja possível soldar placas com uma espessura bastante reduzida. Uma vez que aqui se trata de uma rápida libertação de energia, é de ver que todos os parâmetros da soldadura têm que ser definidos antes do início do processo porque, depois de este ter início, é impossível a alteração dos mesmos.

As placas a unir têm o nome de placa base, aquela que fica estacionária, e placa voadora, (*flyer plate*), aquela que vai ser acelerada por acção da detonação do explosivo. A placa voadora e a placa base colidem com um determinado ângulo no ponto de colisão, formando assim um jacto de reentrada, caracterizado por uma onda de choque oblíqua, originada pelas elevadas pressões no ponto de colisão, (A. Popoff e H. Casey, 1977). A formação do jacto é amplamente aceite como condição essencial à boa união dos materiais. Este fenómeno faz com que uma fina camada de material de cada uma das placas seja arrancada, e assim fiquem expostas ambas as superfícies, em boas condições para que se dê a união efectiva dos materiais. Para que estas condições sejam cumpridas é necessário que seja libertada uma quantidade de energia suficiente. Uma vez atingidas as condições de equilíbrio, a velocidade da detonação iguala a velocidade no ponto de colisão. Uma característica fundamental e comum a todo o processo é o facto de a velocidade de detonação do explosivo, e conseqüentemente a velocidade no ponto de colisão, ter que ser inferior à velocidade do som dos metais a unir, uma vez que esta é uma condição essencial à formação do jacto e de uma interface ondulada com propriedades mecânicas satisfatórias, (A. Popoff e H. Casey, 1977; F. Findik, 2011).

A Figura 2.1 mostra um esquema do processo de soldadura por detonação em placas paralelas.

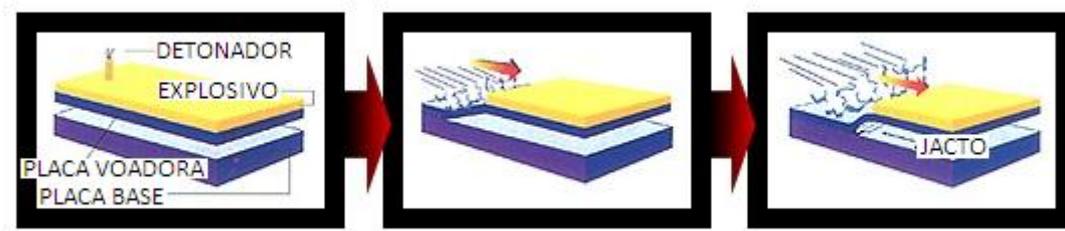


Figura 2.1. Ilustração do processo de soldadura por detonação em placas paralelas.

Na Figura 2.2 está representado o momento em que ocorre o contacto entre as placas.

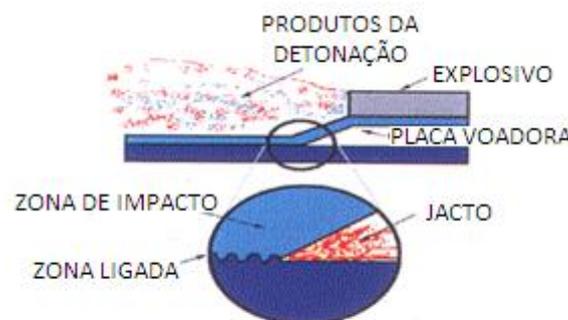


Figura 2.2. Pormenor da interface no momento da colisão.

O processo de soldadura pode ser dividido nas seguintes 3 etapas, (M. Ghomi, 2009):

- i. Detonação da carga explosiva
- ii. Aceleração e deformação da placa voadora
- iii. Colisão das placas

A primeira etapa é responsável pela transferência de energia do explosivo para a placa voadora. Na segunda etapa, a placa voadora é acelerada e deformada, adquirindo uma velocidade (V_p), que será a velocidade de impacto. A terceira etapa tem lugar aquando da colisão das placas e é onde se dá a união, ao nível atómico, dos materiais. No caso da execução de soldaduras com várias camadas de material, a energia cinética fornecida pela explosão vai-se dissipando com os sucessivos contactos entre as placas, o que provoca a diminuição do valor do ângulo de colisão. É também defendido por alguns investigadores o

uso de uma camada de material colocada sobre a placa voadora, designada por *buffer*, que tem como objectivo protegê-la dos produtos da detonação do explosivo. Noutros casos ainda, pode usar-se uma camada intermédia de material, com o objectivo de dificultar a difusão no estado sólido. (L. Tricarico *et al*, 2009) referem, para o caso de juntas de transição estruturais aplicadas na indústria de construção naval, a inclusão de uma camada de alumínio (AA1050) de pureza comercial, entre a placa base de aço ASTM A516, e a placa voadora de alumínio A5083, com o objectivo de melhorar a resistência da junta de transição à difusão no estado sólido, entre o ferro e o alumínio.

A qualidade das juntas depende, em primeira análise, do processamento dos materiais que vão ser soldados, mas também das suas propriedades mecânicas, espessura das placas a soldar e do tipo de base utilizada, (B. Wronka, 2010). Depende também de outras condições, que serão consequência dos parâmetros de soldadura escolhidos. Estes parâmetros são: o rácio de explosivo, (R), (razão entre a massa de explosivo e a massa da placa voadora), a distância de separação entre as placas (*stand-off distance*), a velocidade de detonação (V_d), a velocidade de impacto (V_p), a velocidade no ponto de colisão (V_c), o ângulo dinâmico de colisão (β), e o tipo de explosivo utilizado. Na Figura 2.3 estão representados alguns dos parâmetros anteriormente referidos. A variação do rácio de explosivo, da distância de separação das placas, ou da configuração da montagem, leva a que as velocidades e geometria da colisão também variem. Hoje em dia, o estudo e optimização destes parâmetros encontram-se já numa fase avançada, o que permite definir com alguma certeza os parâmetros de soldadura em função dos materiais a unir e dos resultados pretendidos, principalmente para os materiais mais comuns.

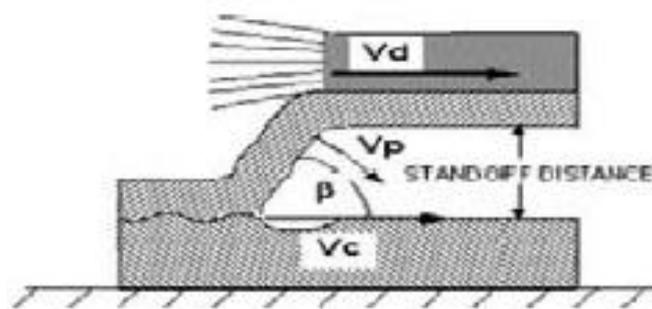


Figura 2.3. Representação das velocidades e ângulo de colisão.

É com base na variação dos parâmetros atrás referidos que se podem obter diferentes tipos de interface, e soldaduras com melhores ou piores propriedades, mas, para

que a soldadura propriamente dita tenha lugar, devem ser respeitadas algumas condições sem as quais não é possível obter ligações de qualidade. Essas condições estão descritas de seguida, (M. Ghomi, 2009).

- As velocidades de impacto (V_p) e do ponto de colisão (V_c) devem ser inferiores à velocidade sónica dos metais a ligar. É reconhecido que, com velocidades supersónicas, a pressão dinâmica não é mantida tempo suficiente para que se atinjam as condições de equilíbrio na zona a soldar.
- É necessária a formação de um jacto, e o ângulo de impacto (β) deve estar compreendido entre 5° e 25° , (M. Ghomi, 2009). O ângulo de impacto é função da velocidade no ponto de colisão.
- É necessária uma pressão mínima de impacto para que seja gerada energia de impacto suficiente para que seja produzida uma soldadura. Contudo o limite superior da energia de impacto é determinado pela necessidade que existe de evitar produção de calor em excesso, o que pode levar à fusão dos metais e assim criar camadas frágeis na interface.
- A distância de separação entre as placas deve ser a suficiente para permitir que a placa voadora seja acelerada até à velocidade de impacto requerida. Esta distância deverá ser, no mínimo, igual a metade da espessura da placa voadora.
- A superfície das placas deve ser o mais plana possível, uma vez que se assim não for o jacto pode vir a concentrar-se num ponto, em vez de uma linha, o que leva ao aparecimento de elevadas temperaturas que irão diminuir a qualidade da soldadura.

Diversos estudos demonstram que, com o aumento do rácio de explosivo, o comprimento e a amplitude das ondas na interface aumentam, conforme mostrado por A. Durgutlu *et al*, 2005 e B. Gulenc, 2008. Foi também observado que rácios de explosivo muito elevados levam à formação de interfaces excessivamente onduladas, e nalguns casos também à formação de compostos intermetálicos. Uma vez que a ligação mecânica tem

início com a ondulação crescente da interface, e esta última depende, entre outros factores, do rácio de explosivo, pode afirmar-se que as propriedades mecânicas da soldadura são influenciadas pelo rácio de explosivo. Em geral, o aumento do rácio de explosivo leva a um aumento da ondulação da interface, o que conduz a uma melhoria nas propriedades mecânicas da soldadura. Também a velocidade e pressão da colisão aumentam com R , o que conduz a um aumento da deformação e da ondulação na interface. Existe também um aumento da dureza dos metais soldados tanto na zona mais interna, como na zona mais externa, relativamente à interface, com o aumento de R , devido ao aumento da deformação a frio. Este aumento de dureza é proporcional à distância de separação das placas, e a R , (A. Durgutlu *et al*, 2005). Um valor de R excessivamente baixo pode conduzir a uma produção insuficiente de energia e, conseqüentemente, a uma soldadura de fraca qualidade, (B. Gulenc, 2008). Durante a detonação deve ser produzida energia suficiente para que a velocidade de colisão da placa voadora seja, no mínimo, da ordem de 300 m/s, para assim garantir uma boa qualidade das soldaduras, (A. Durgutlu, 2003).

A distância de separação entre as placas, (*stand off distance*), é também uma variável que afecta a qualidade das soldaduras, sendo que há estudos que apontam para o facto de que, mesmo com valores de R da ordem de 1.5, é possível obter uma interface ondulada aumentando a distância de separação entre as placas, (A. Durgutlu *et al*, 2005).

Num estudo realizado para o par cobre – aço inoxidável, não foram detectadas zonas de fusão ou formação de compostos intermetálicos, (A. Durgutlu *et al*, 2005). Também para o mesmo par de materiais, uma análise EDS (*Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy*) revelou não haver difusão durante o processo de soldadura por detonação.

Sendo a soldadura por detonação um processo onde ocorre deformação dos materiais, o aparecimento de tensões residuais é um factor a ter em conta. Estas tensões são originadas pelos diferentes coeficientes lineares de expansão dos diferentes materiais, e são passíveis de afectar o desempenho mecânico dos mesmos. A sua existência é particularmente nefasta quando ocorre na superfície dos materiais, uma vez que aumenta a susceptibilidade destes à fadiga e à corrosão sob tensão. As tensões residuais de tracção em estruturas de engenharia potenciam o aparecimento e propagação de fendas que podem levar à fractura do material, (M. Sedighi e M. Honarpisheh 2011).

No caso dos materiais multicamada soldados por detonação, a distribuição das tensões residuais tem uma relação directa com alguns parâmetros, tais como: as

propriedades dos materiais de cada camada, os parâmetros da soldadura por explosão, e, principalmente, a distribuição das camadas, (M. Sedighi e M. Honarpisheh 2011). Num estudo efectuado, onde duas camadas de alumínio são intercaladas por uma de cobre, a distribuição das camadas provoca tensões residuais de tração na superfície. Estas tensões são indesejáveis, pois provocam uma diminuição do limite elástico do material, além de poderem também provocar o seu empenamento durante os trabalhos posteriores de maquinação. O mecanismo de criação deste padrão de tensões residuais de tração à superfície pode ser explicado pelo movimento da onda de choque, causada pela explosão, na direcção da explosão. Este movimento cria, na camada de alumínio, tensões de tração. As tensões de tração são também transmitidas à camada de cobre, aquando do contacto da camada de alumínio com esta, a alta velocidade, mas o alongamento da camada de alumínio é maior que a de cobre, devido aos seus diferentes módulos de elasticidade. A presença de estruturas frágeis associada ao desenvolvimento de tensões residuais de tração leva ao aparecimento de fissuras. Também existe um gradiente de tensão residual elevado nas interfaces das multi-camadas devido às diferenças nas propriedades dos materiais. Esta diferença de propriedades tem um efeito significativo na distribuição e magnitude das tensões residuais, tanto na superfície como nas interfaces. Foi também observado que a espessura inicial das camadas de Al-Cu-Al não tem um papel importante na distribuição das tensões residuais à superfície, (M. Sedighi e M. Honarpisheh, 2011). Podem realizar-se tratamentos de alívio de tensões nestes materiais mas, segundo (L. Tricarico *et al*, 2009), a quantidade de compostos intermetálicos aumenta com o aumento de temperatura a que estão sujeitos os materiais, durante os tratamentos térmicos. (L. Tricarico *et al*, 2009), propõem também que a resistência ao corte diminui com a extensão de compostos intermetálicos.

O conjunto de parâmetros que proporcionam ligações soldadas aceitáveis são normalmente caracterizados num diagrama V_c/β , através de uma janela de soldabilidade. Os parâmetros utilizados para estabelecer a janela de soldabilidade são:

- O ângulo crítico de impacto para que haja formação de jacto (β)
- A velocidade no ponto de colisão (V_c) deve ser superior a um valor crítico, acima do qual se formará uma interface ondulada

- A energia cinética e conseqüente pressão na zona de impacto, que é função da velocidade da placa voadora (V_p), deve ser tal que, no ponto de colisão, o impacto exceda a tensão de cedência dos materiais envolvidos, para assim provocar a sua deformação plástica
- V_p deve ter um valor tal que, a dissipação da energia cinética não seja suficiente para produzir uma camada fundida contínua na interface dos materiais a unir

A Figura 2.4 mostra uma janela de soldabilidade para o par Al-Cu onde se pode ver a sombreado a área onde ocorre uma ligação aceitável dos materiais, em função de β e V_c .

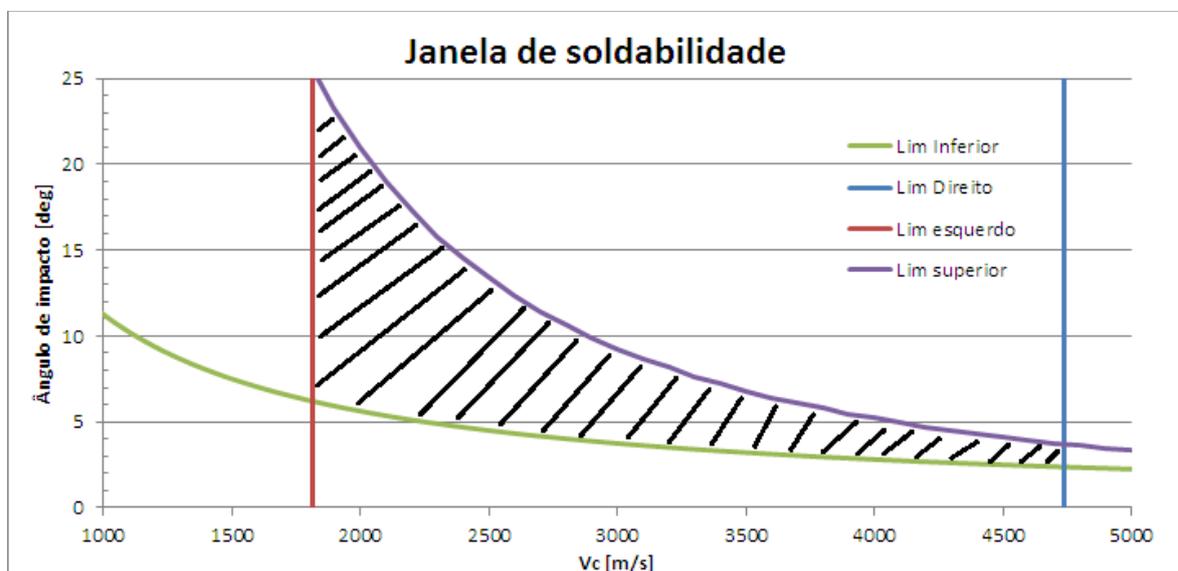


Figura 2.4. Janela de soldabilidade.

O limite esquerdo da janela representa a velocidade de colisão de transição $V_{c,tr}$, a partir da qual se obtém uma interface ondulada, e foi obtido através da equação (2.1), proposta por (G. Cowan *et al*, 1971). Se uma soldadura estiver localizada à esquerda deste limite, a sua interface deverá ser aproximadamente lisa, ou seja, sem ondulação.

$$V_{c,tr} = \sqrt{\frac{2R_{cr} (H_{V,p} + H_{V,f})}{(\rho_p + \rho_f)}} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), R_{cr} é um Número de Reynolds crítico que toma valores entre 8.0 e 13.0, $H_{V,p}$ e $H_{V,f}$ são, respectivamente, as durezas de Vickers da placa base e do *flyer*, e ρ_p e ρ_f são, respectivamente, as densidades da placa base e do *flyer*.

O limite à direita na janela representa a velocidade do som no cobre, acima da qual não se forma o jacto que é, como já foi dito, uma condição essencial a uma soldadura satisfatória. No caso de uma soldadura se localizar à direita deste limite, o que significa que a velocidade de detonação foi superior à velocidade do som no material, a formação do jacto não terá lugar, faltando assim ao processo uma das principais características deste. A ausência da formação do jacto leva a que as superfícies a unir não se encontrem devidamente limpas no momento do contacto, o que levará à inclusão de óxidos e outras impurezas na interface. Além disso, o jacto é também condição essencial à formação de uma interface ondulada, que confere melhores propriedades mecânicas à soldadura do que uma interface lisa.

O limite inferior é consequência da condição de que é necessário atingir uma velocidade de impacto, V_p , tal que a pressão no ponto de colisão seja suficiente para vencer a tensão de cedência do material, de modo a provocar a sua deformação plástica. Esta condição é obtida através da equação (2.2), (I. Zakharenko *et al*, 1983), que relaciona a velocidade mínima no ponto de colisão, $V_{C,min}$, com a dureza de Vickers e a densidade do material, H_V e ρ , o ângulo de impacto β , e uma constante, k_1 , que diz respeito à limpeza das superfícies que vão ser ligadas e que toma valores entre 0.6 para superfícies limpas, e 1.2 para superfícies não limpas. Quando uma soldadura se encontra abaixo deste limite, não se dará a ligação entre os materiais pois a velocidade de colisão não terá sido suficiente para os deformar plasticamente e assim garantir a partilha de electrões.

$$V_{C,min} = \frac{k_1}{\beta} \sqrt{\frac{H_V}{\rho}} \quad (2.2)$$

Finalmente, a quarta condição, referente ao limite superior da janela de soldabilidade, reflecte o facto de que V_p deve ser inferior a um valor tal que a dissipação da energia cinética não seja suficiente para produzir uma camada fundida contínua na interface dos materiais. (R. H. Wittman, 1973) desenvolveu a equação (2.3) que quando combinada com a equação (2.6) permite obter uma relação entre o ângulo de colisão (β) e a velocidade no ponto de colisão, V_c , obtida através da equação (2.4)

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

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{1}{N} \frac{(T_m C_0)^{1/2}}{2V_c^2} \left(\frac{kc_p C_0}{\rho h} \right)^{1/4} \quad (2.4)$$

onde β é o ângulo de impacto, N é uma constante que para diversos 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, V_c é a velocidade no ponto de colisão, k é a condutibilidade térmica, c_p é o calor específico, ρ é a densidade, e h a espessura do material. Todos os valores atrás enunciados são referentes à placa voadora. Para uma soldadura localizada acima deste limite, será previsível que a sua interface apresente uma camada contínua de material fundido.

Diferentes autores consideraram diferentes equações para a velocidade da placa voadora, V_p . Assim, várias fórmulas empíricas e semi-empíricas foram sugeridas, todas elas com uma concordância satisfatória entre os resultados experimentais e os valores esperados. A equação (2.5), (H. El-Sobky, 1983), chamada equação de Gurney, e introduzida por este no decorrer da 2ª Guerra Mundial, relaciona a velocidade da placa voadora, com a energia do explosivo e com o rácio de explosivo, para geometrias planas, da seguinte forma:

$$V_p = \sqrt{2E} \left(\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Onde:

$V_p \rightarrow$ Velocidade da placa voadora [m/s];

$\sqrt{2E} \rightarrow$ Energia de Gurney [m/s];

$m \rightarrow$ Massa da placa voadora [kg];

$c \rightarrow$ Massa do explosivo [kg];

$R = (c/m) \rightarrow$ Factor de carga explosiva

Depois de conhecidos V_p e V_d , encontra-se, através da geometria, o ângulo β que a placa voadora faz com a placa base. Mais uma vez para placas paralelas, temos a equação (2.6)

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

2.3. Mecanismos de formação da onda

A deformação periódica da interface, comumente referida como ondas da interface, é um dos aspectos mais discutidos na soldadura por detonação. O aspecto ondulado apresentado não é exclusivo das interfaces da soldadura por detonação, mas, ao contrário, é comum encontrá-lo em objectos sólidos sujeitos à acção erosiva de camadas de fluidos a alta velocidade, como pás de turbinas de vapor, bombas, e também na interface da atmosfera com o oceano. De facto, a formação de ondas na interface dos materiais soldados pelo processo de soldadura por detonação pode ser considerada como um caso particular de um fenómeno mais geral de formação de ondas, sob certas condições de fluxo. A presença do jacto na zona de colisão levou muitos investigadores a procurar a explicação e caracterização destas ondas em termos de um mecanismo de fluxo de um ou de outro tipo. Foram sugeridos diversos mecanismos para justificar a ocorrência deste fenómeno, mas, numa observação mais detalhada, verifica-se que estes são de natureza mais qualitativa, não fornecendo assim os dados necessários a um tratamento analítico ou quantitativo. Uma questão importante foi também levantada, sendo esta que existem vários tipos de onda e como tal existe a possibilidade de que cada tipo de mecanismo proposto seja capaz de descrever um tipo de onda, mas não outro. Assim surgiu a necessidade de estudar mais de perto a zona da colisão no âmbito da mecânica dos fluidos, de maneira a estabelecer um mecanismo que contivesse os meios para explicar os vários tipos de ondas. A seguir apresenta-se uma breve revisão dos mecanismos existentes, que podem ser divididos em três grupos.

I. Mecanismo de indentação do jacto

Foi postulado por (G. Abrahamson, 1961), que as ondas são formadas devido à acção de indentação do jacto na placa base, e à libertação periódica da saliência formada à frente do ponto de colisão pelo material removido pela indentação. Isto permite que o jacto ultrapasse a saliência e possibilite a continuação do processo. Uma descrição mais detalhada de como as ondas se formam foi apresentada por (Bahrain *et al.* 1967), mas a indentação foi atribuída ao jacto de reentrada e à formação dos vórtices ao aprisionamento do material contido no jacto de reentrada, entre a saliência e o jacto de saída. A Figura 2.5 ilustra este mecanismo.

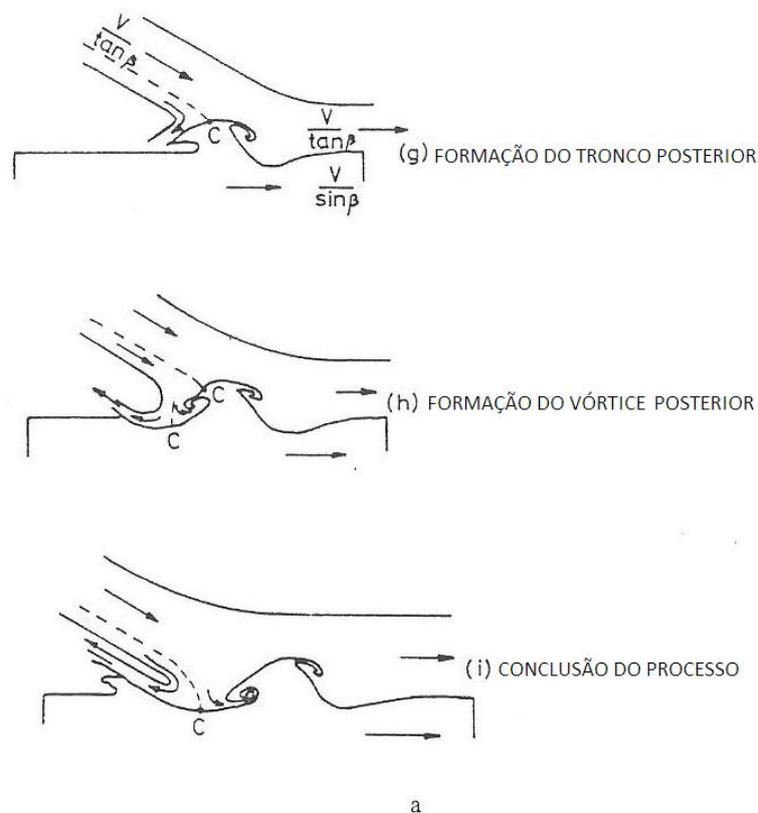


Figura 2.5. Mecanismo de formação de onda proposto por Bahrani, (H. El-Sobky, 1983).

II. Mecanismo da instabilidade do fluxo

Enquanto os mecanismos de indentação do jacto apontam para que a formação das ondas tenha lugar essencialmente no ponto de colisão, o mecanismo da instabilidade do fluxo propõe que estas sejam formadas à frente (H. El-Sobky, 1983; J. Kowalick, 1971) ou atrás (H. El-Sobky, 1983) do ponto de colisão, como resultado de uma descontinuidade no perfil de velocidades ao longo da interface envolvendo o jacto de saída e o jacto de reentrada, respectivamente. O processo de formação de onda é tratado como instabilidade de Helmholtz. No trabalho de (J. Hunt, 1968), é postulado que a descontinuidade é brusca e que o jacto de reentrada é necessário à formação da onda. É também assumido que o jacto de reentrada se mantém em contacto com a placa base e que o comportamento de fluido não é extensivo ao jacto de saída. No trabalho desenvolvido por (J. Robinson, 1975), cálculos mostraram que as tensões relativas ao jacto de saída eram suficientemente elevadas para justificar um comportamento típico de um fluido, e que o perfil de velocidade ao longo da interface tem um ou dois pontos de inflexão.

III. Mecanismo turbulento

Foi sugerido por (J. Kowalick e D. Hay, 1971), que o ponto de estagnação, onde a velocidade do fluido é zero, funciona como um obstáculo sólido uma vez atingido o estado de equilíbrio, e que as ondas são formadas devido a um mecanismo turbulento - análogo ao trabalho de Von Kármán sobre vórtices - iniciado no ponto de estagnação e que continua a crescer por trás da zona de colisão. A Figura 2.6 mostra este mecanismo.

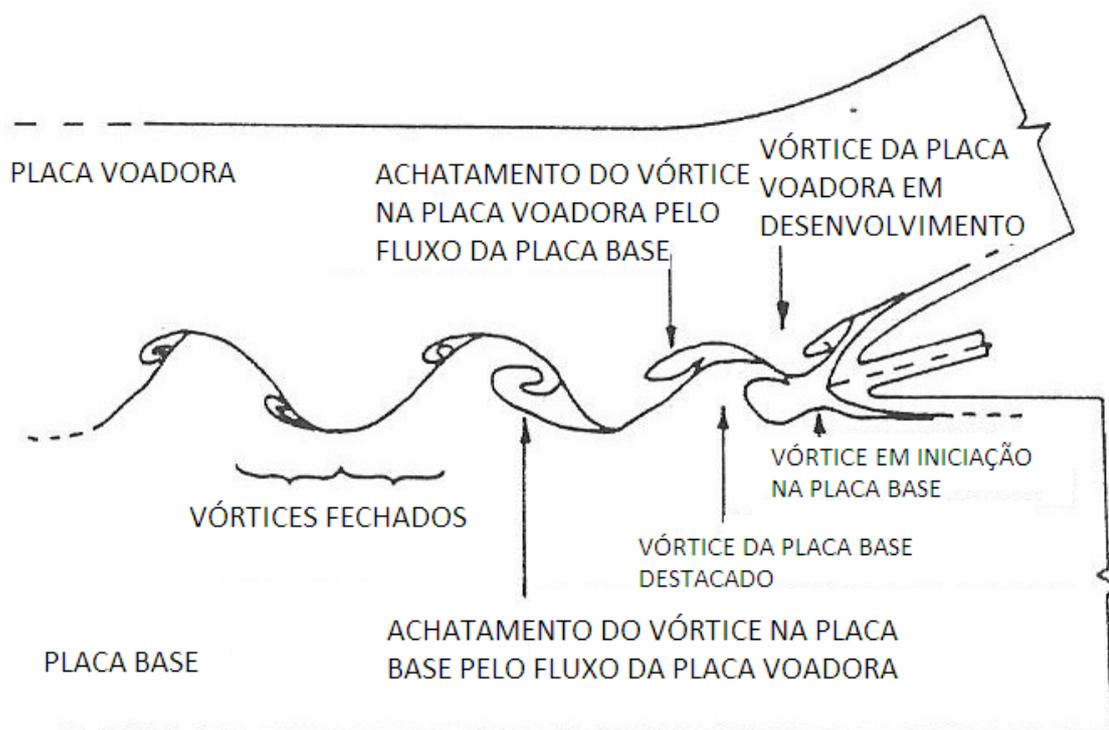


Figura 2.6. Mecanismo de formação de onda proposto por Kowalick e Hay, (H. El-Sobky, 1983).

É também sabido que o aumento do rácio de explosivo (razão entre a massa de explosivo e a massa da placa voadora), e o aumento da distância de separação entre as placas, influenciam o grau de ondulação da interface, sendo que este aumenta com o aumento do valor dos parâmetros referidos, (B. Gulenc, 2008).

2.4. Seleção do explosivo

A energia necessária para executar a soldadura, como já foi referido, provém da detonação do explosivo. Como tal, este é um dos parâmetros mais importantes a seleccionar para obter uma soldadura de qualidade. O rácio de explosivo, razão entre a massa de explosivo e a massa da placa voadora, é também um factor a ter em conta, pois

influencia directamente a velocidade da placa voadora e a forma como esta choca com a placa base. A velocidade de detonação do explosivo não pode ser superior à velocidade sónica dos materiais, uma vez que se assim for, não vai ocorrer formação de jacto, que é uma condição essencial para o sucesso da soldadura, (A. Mousavi e S. Al-Hassani, 2005).

Nos materiais utilizados em engenharia, a velocidade sónica varia tipicamente entre os 4500 e os 6000 m/s, esta condição leva a que não seja possível utilizar os explosivos comerciais mais comuns, os explosivos plásticos, pois a velocidade de detonação destes é da ordem dos 6000 a 8000 m/s, (F. Findik, 2011). Assim, para realizar soldaduras de qualidade, é necessário utilizar explosivos com velocidades de detonação menores que permitam uma boa execução do processo. As velocidades deste tipo de explosivos podem variar entre os 1500 e os 3500 m/s, e existem diversas combinações de fácil obtenção, sendo o ANFO, uma mistura de nitrato de amónio com *fuel oil* em diferentes percentagens, um dos mais comuns. Para poder controlar a velocidade de detonação, é por vezes adicionado ao explosivo algum tipo de material inerte, como por exemplo areia ou perlite. Também tem interesse que o explosivo seja de fácil manuseamento, podendo ter granulometrias diferentes, mas que permitam uma disposição uniforme de maneira que não existam grandes variações de densidade. A espessura mínima de detonação deve ser tida em conta para que sejam verificadas as especificações da soldadura, e depende do tipo de explosivo utilizado. Na soldadura por detonação, como em todos os processos de soldadura, a zona mais crítica, e alvo de maior investigação, é a zona da interface. É aí que os materiais entram em contacto, e é onde se processam as maiores alterações. No caso da soldadura por detonação, a interface pode apresentar-se com um aspecto mais ou menos ondulado, mas nunca completamente plano. Foram sugeridos diferentes mecanismos para explicar o processo de soldadura por detonação. As primeiras teorias, apresentadas na infância desta tecnologia, consideravam a soldadura por detonação como sendo essencialmente um processo de fusão, em que a energia cinética dissipada na interface era convertida em calor que por sua vez fundiria os materiais na interface, provocando também difusão. Esta difusão no estado líquido levaria a uma transição gradual de um metal para o outro. No entanto, no processo de soldadura por detonação, verifica-se que esta transição é bastante brusca, mesmo nos casos em que bolsas de metal solidificado são observadas localmente, (H. El-Sobky, 1983; B. Crossland e J. Williams, 1970). Estas bolsas ou camadas são facilmente identificáveis, pois as suas fronteiras com

os metais base estão bem definidas. Outros investigadores olharam para a soldadura por detonação como sendo um processo de soldadura por pressão, proveniente da elevada deformação plástica que ocorre na interface, que permite a limpeza das superfícies e posterior formação de uma junta, considerando que a pressão se mantém por um período de tempo suficiente para que se dê a difusão no estado sólido. No entanto, isto não é o que acontece na soldadura por detonação, em que os níveis de pressão são mantidos unicamente por um período de poucos microssegundos, e os coeficientes de difusão são pequenos. Além disso, observa-se que o perfil ondulado da interface, os vórtices, e as bolsas de metal solidificado que estão presentes, não podem ser explicados, quer por um processo unicamente de fusão, quer por um processo unicamente de pressão. O melhoramento da técnica de preparação das amostras, em conjunto com a observação em TEM (*Transmission Electron Microscopy*), permitiu a Hammerschmidt e Kreye, (M. Hammerschmidt e H. Kreye, 1981), observar a zona de transição na interface, com uma resolução muito mais elevada do que era possível até então. Estas observações levaram à identificação de uma camada de material fundido, de espessura muito reduzida, em que a maior parte seria ejectado do sistema pelo jacto formado aquando da colisão oblíqua das placas. O material fundido restante está sujeito a uma taxa de arrefecimento da ordem de 10^5 K/s, devido ao contacto com a massa relativamente grande dos materiais soldados, (A. Mousavi e S. Al-Hassani, 2005). Uma taxa de arrefecimento desta magnitude conduz à formação de grãos ultra finos e de orientação aleatória, com um diâmetro de 1 a 2 μm .

2.5. Combinações de materiais realizadas em soldadura por detonação

A soldadura por detonação é um processo que permite a ligação de materiais com propriedades distintas, mantendo as características de base dos materiais unidos. É por isso que o objectivo dos investigadores é conseguir produzir soldaduras de qualidade num número cada vez maior de materiais. A Figura 2.7 apresenta algumas das combinações de materiais que é possível realizar hoje em dia.

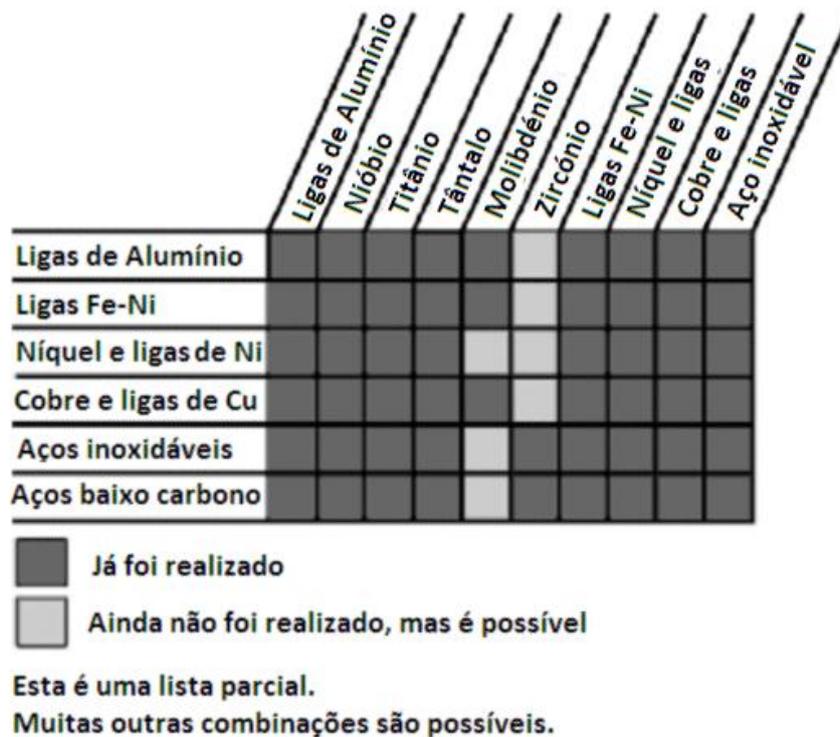


Figura 2.7. Algumas combinações de materiais possíveis de realizar hoje, (F. Findik, 2011)

2.6. Vantagens, limitações e aplicações do processo

2.6.1. Vantagens

As principais vantagens deste processo são a capacidade de união de materiais dissimilares que, pelos métodos de soldadura baseados na fusão dos materiais seriam difíceis, ou mesmo impossíveis de unir, devido à formação de compostos intermetálicos frágeis; a obtenção de juntas com elevados valores de resistência mecânica; a manutenção das propriedades base dos materiais; a obtenção de elevadas áreas de soldadura por cada realização do processo e também um investimento inicial relativamente baixo. Outras vantagens advêm da flexibilidade do processo, que permite, dada a sua simplicidade, uma realização eficaz mesmo em ambientes hostis, e como tal permite também que uma vasta gama de espessuras de materiais possa ser soldada. Finalmente, a utilização de quantidades de explosivo relativamente pequenas conduz a uma deformação pouco acentuada dos materiais base, (F. Findik, 2011).

2.6.2. Limitações

Como qualquer processo, também este tem algumas limitações que são referidas a seguir.

- 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 materiais utilizados tem que ser simples (plana, cilíndrica ou cónica).

2.6.3. Aplicações

As principais aplicações deste processo são:

- Reservatórios de pressão, reactores e tubagens, permutadores de calor para a indústria química
- Produção de alhetas de refrigeração
- Componentes para a indústria electrónica, espacial e nuclear
- Juntas de transição eléctricas e estruturais, (L. Tricarico *et al*, 2009)
- Indústria naval e petrolífera
- Produção de gás criogénico, (G. Young, 2004)
- Produção de materiais multicamadas para a indústria aeroespacial, (I. Bataev *et al*, 2011)

2.7. Segurança

De todos os intervenientes no processo, aqueles que lidam directamente com o explosivo devem respeitar e ter em atenção as normas e procedimentos inerentes ao manuseamento do mesmo. O ruído e vibração produzidos quando tem lugar a detonação podem atingir valores bastante elevados, o que pode levar à obrigação da utilização de

equipamentos de protecção, e/ou infra estruturas especiais localizadas no subsolo ou câmaras de vácuo. Se o processo tiver lugar numa câmara de explosões, deve-se esperar até que sejam extraídos todos os gases derivados da detonação.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais base

A realização das soldaduras teve lugar no LEDAP (Laboratório de Energética e Detónica, Associação de apoio), em Condeixa. Foram soldadas chapas de cobre desoxidado rico em fósforo (DHP), de espessuras 1 e 3 mm, designadas chapas voadoras, a chapas de alumínio 5083, com espessura de 30 mm. A composição química dos materiais base utilizados é a que se apresenta na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composição química dos metais.

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

A microestrutura dos materiais base é uma característica relevante pois permite observar, se existirem, alterações na microestrutura dos materiais depois de o processo ser executado. No presente trabalho foram utilizados dois tipos de material, cobre e alumínio, mas, no que diz respeito ao cobre, observaram-se diferenças microestruturais entre as chapas de 1 e 3 mm.

A Figura 3.1 mostra a microestrutura do alumínio antes de este ser sujeito ao processo de soldadura. Nesta figura pode ver-se que a forma dos grãos é bastante irregular e o seu tamanho também difere consideravelmente. O grão é aproximadamente equiaxial, sendo o seu tamanho médio de aproximadamente 33 μm , com um desvio padrão de 12 μm .

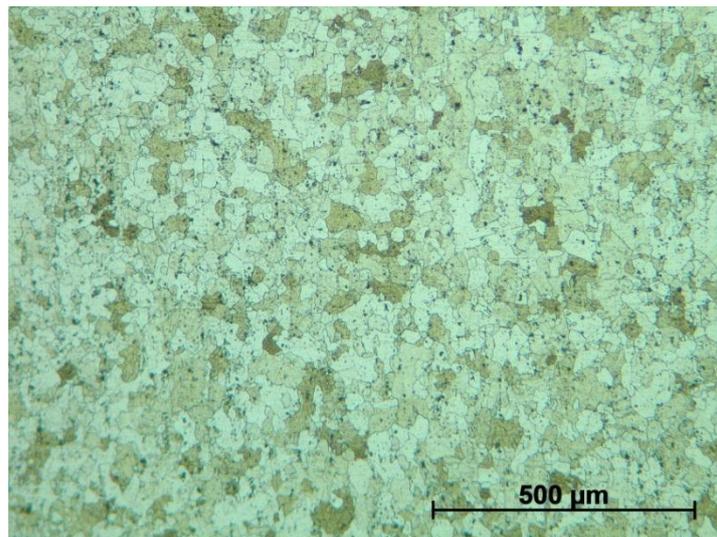


Figura 3.1. Microestrutura do alumínio. Ampliação: 100x.

Na Figura 3.2 é apresentada a microestrutura do cobre referente às chapas de a) 3mm e b) 1 mm.

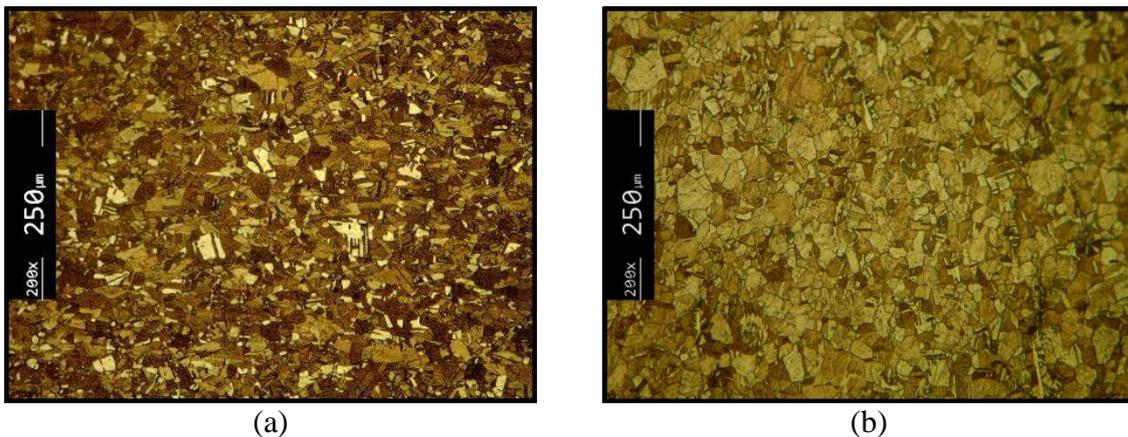


Figura 3.2. Microestrutura do cobre na chapa de: (a) 3 mm; (b) 1mm.

Como se pode observar, a chapa de 3 mm é constituída por grãos de forma mais alongada e irregular, e de dimensão bastante variável. O tamanho médio de grão é de aproximadamente 21 µm, com um desvio padrão de 9 µm. Já a chapa de 1 mm é constituída por grãos cuja forma e dimensão são mais uniformes e onde o tamanho médio de grão é de aproximadamente 27 µm com um desvio padrão de 12 µm.

3.2. Preparação do material para os ensaios

Da barra de alumínio, cuja secção transversal tinha dimensões de 70x30 mm, e inicialmente um comprimento de 1.5 m, foram cortadas duas peças com um comprimento de 220 mm cada. O cobre, cuja espessura era de 1 e 3 mm, foi cortado com uma guilhotina, em chapas com dimensões de 230x85 mm.

Em seguida, procedeu-se à montagem de uma caixa em cartão, que foi colocada em cima da placa voadora, e que serviu para albergar o explosivo, como se pode ver na Figura 3.3. O modo como foi construída a caixa, permite a utilização de duas espessuras de explosivo e, conseqüentemente, de dois factores de carga explosiva, em cada ensaio. Por fim, as faces a unir de cada uma das placas foram lixadas e limpas, de modo a eliminar quaisquer impurezas e gorduras que pudessem afectar a qualidade da ligação. Procedeu-se também à montagem de seis sondas de ionização para cada ensaio, que serviram para calcular as velocidades de detonação. Cada sonda era constituída por um tubo de aço com 0.8 mm de diâmetro, dois fios condutores, e um fio de cobre revestido. O fio de cobre revestido foi inserido no tubo de aço. Seguidamente, um dos fios condutores foi soldado ao exterior do tubo, e o outro foi colocado em contacto com a extremidade do fio de cobre e posteriormente fixado com resina epoxi. Aquando da detonação, os fios condutores encontram-se ligados a um osciloscópio digital, e quando a onda de detonação passa por uma sonda, ocorre um curto-circuito entre o tubo de aço e o fio de cobre revestido que permite enviar um sinal eléctrico para o osciloscópio digital. O conhecimento prévio da distância que separa cada sonda, associado aos intervalos de tempo entre cada sinal, permite o cálculo das velocidades de detonação, um parâmetro de grande importância neste estudo.

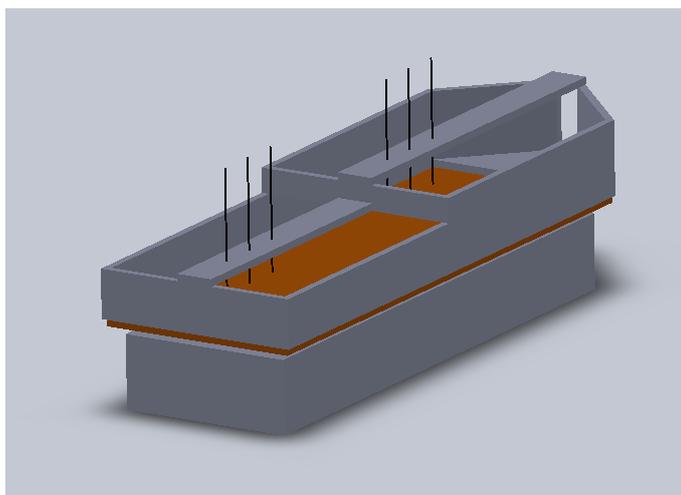


Figura 3.3. Ilustração da montagem experimental.

3.3. Montagem Experimental

A montagem final teve lugar no LEDAP. Foram colados à placa base, oito espaçadores de cobre, com uma altura média de 3.65 mm (Cu-Al-1) e 1.42 mm (Cu-Al-2), correspondente à distância de separação entre as duas placas, *stand-off distance*. De seguida, a caixa que iria conter o explosivo foi colada à placa voadora e cheia com ANFO, colocando-se por fim as sondas, e fixando-as com resina epoxi. Finalmente, as montagens, visíveis nas Figura 3.4 e Figura 3.5, foram colocadas numa caixa contendo areia molhada, para servir de base, ligadas ao osciloscópio, e detonadas.

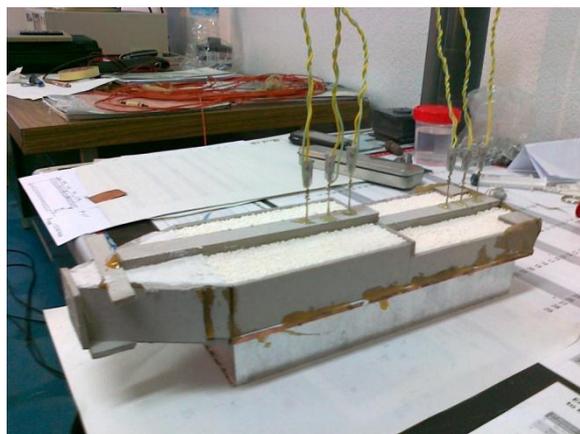


Figura 3.4. Fotografia da montagem completa, relativa ao 1º ensaio.

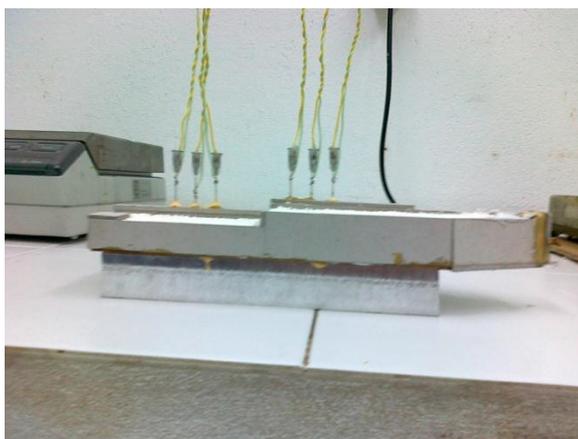


Figura 3.5. Fotografia da montagem completa, relativa ao 2º ensaio.

3.4. Ensaio e Nomenclatura dos provetes

Em ambos os ensaios, a quantidade e o tipo de explosivo utilizado foram os mesmos, variando unicamente o rácio de explosivo, devido à variação da massa da placa voadora. Para cada um dos ensaios utilizou-se uma espessura de explosivo de 30 mm, do lado da iniciação da detonação, lado direito na Figura 3.5, e 20 mm no restante espaço. A densidade do explosivo era de $0,8 \text{ g/cm}^3$ para ambos os ensaios. A Tabela 3.2 mostra os parâmetros de soldadura utilizados.

Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura.

| | SE3_30 | SE3_20 | SE1_30 | SE1_20 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Massa explosivo [g] | 230 | 155 | 230 | 155 |
| Massa do <i>flyer</i> [g] | 262 | 262 | 87 | 87 |
| Rácio do explosivo | 0,88 | 0,59 | 2,64 | 1,78 |
| Distância de separação das placas [mm] | 3,65 | 3,65 | 1,42 | 1,42 |
| Densidade do Cu [g/cm^3] | 8,924 | 8,924 | 8,924 | 8,924 |
| Densidade do explosivo [g/cm^3] | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Volume de explosivo [cm^3] | 288,2 | 193,8 | 288,2 | 193,8 |
| Volume do <i>flyer</i> [cm^3] | 29,33 | 29,33 | 9,78 | 9,78 |

O primeiro ensaio realizado deu origem a 5 amostras. O segundo ensaio deu também origem a 5 amostras. Para uma melhor compreensão e acompanhamento ao longo do texto, cada amostra de cada soldadura será denominada, consoante as condições de soldadura, conforme se apresenta na Tabela 3.3. A nomenclatura criada foi **SE_n_nn_n**, em que SE significa soldadura por explosivo; o número seguinte indica a espessura, em mm, do *flyer*; os dois algarismos seguintes representam a altura de explosivo utilizada e, por fim, o número da amostra. Para as zonas de transição, onde a amostra foi abrangida por duas alturas de explosivo, utiliza-se a denominação ZT (Zona de Transição) 1 ou 2, consoante se estejamos a referir ao primeiro ou ao segundo ensaio realizado.

Tabela 3.3. Nomenclaturas das soldaduras e amostras.

| Nº da amostra | SE3 <i>stand off distance</i> = 3,65 mm | | SE1 <i>stand off distance</i> = 1,42 mm | |
|---------------|--|-----------------|--|-----------------|
| | 1 | SE3_30_1 | Soldadura 1 | SE1_20_1 |
| 2 | SE3_30_2 | 30 mm explosivo | SE1_20_3 | 20 mm explosivo |
| 3 | SE3_ZT | | SE1_ZT | |
| 4 | SE3_20_4 | Soldadura 2 | SE1_30_4 | Soldadura 4 |
| 5 | SE3_20_5 | 20 mm explosivo | SE1_30_5 | 30 mm explosivo |

3.5. Preparação das amostras para a análise de resultados

3.5.1. Corte

Após a realização das soldaduras, as peças foram cortadas nas oficinas do DEM, retirando de cada uma, três amostras para posterior análise. As três amostras, números 1, 3, e 5, correspondiam, respectivamente, à zona com 30 mm de explosivo, à zona de transição entre 30 mm e 20 mm, e à zona de 20 mm de explosivo, conforme a Figura 3.6.

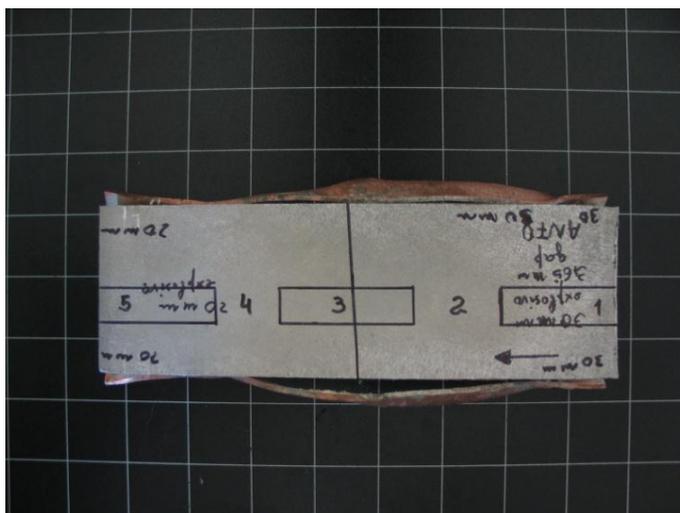


Figura 3.6. Vista da soldadura SE3, já efectuada, com identificação das amostras a analisar.

3.5.2. Polimento

Para proceder à análise metalográfica das amostras, foi necessário polir as mesmas. Este processo teve início com o polimento das amostras com lixas sucessivamente mais finas, começando com lixa de 240 grãos/cm², seguido de 320, 600 e, finalmente, 2500 grãos/cm². De seguida poliram-se as amostras em pano próprio, utilizando uma solução de pó de diamante com 3 μm de diâmetro, e um lubrificante para evitar o aquecimento e a aderência das amostras ao pano.

3.5.3. Ataque químico

Foi realizado um ataque químico diferencial com o objectivo de tornar visíveis as fronteiras de grão dos metais, atacando primeiro o cobre e depois o alumínio. Para o cobre, utilizou-se uma solução de peróxido de hidrogénio a 30% e amoníaco a 25%, numa proporção de um para dez. A superfície do cobre foi posta em contacto com a solução, através de algodão, durante cerca de 10s de cada vez, sendo o tempo total de exposição de cerca de 30s, sendo imediatamente colocada em água, e depois lavada com álcool, e seca com ar quente. Foram feitas várias tentativas de ataque diferencial ao alumínio, no entanto mostrou-se impossível vislumbrar qualquer tipo de microestrutura deste material devido à interacção do reagente do alumínio, com o cobre.

3.5.4. Micro durezas

As microdurezas de cada amostra foram medidas utilizando uma máquina denominada *Shimadzu Micro Hardness Tester-Type M*. Esta máquina tem uma capacidade de carga que varia entre 0.025 e 1000 gf. Foram feitas duas linhas de indentações na direcção transversal à interface, em todas as amostras, uma em cada extremidade, com uma força de 200gf e um tempo de indentação de 15s. Estas indentações abrangeram toda a espessura do cobre, e o alumínio até uma distância de 15 mm da interface. Foram também realizados testes em pontos específicos de cada amostra, particularmente, onde era visível a formação de compostos intermetálicos, até uma distância de 2 mm para cada lado, relativamente à interface da soldadura. Estes testes específicos foram realizados com uma força, no indentador, de 50gf, e 15s de tempo de indentação. Os valores do comprimento das diagonais de cada indentação foram registados numa folha de cálculo *Excel*, onde é calculada a dureza Vickers.

3.5.5. Microanálise

Das soldaduras SE3 retiraram-se duas amostras, uma da zona adjacente à amostra SE3_30_1 e outra da zona adjacente à amostra SE3_20_5, e reduziu-se o seu tamanho a dois cubos com 20 mm de aresta. De seguida as amostras foram polidas utilizando o mesmo procedimento das amostras anteriores, e procedeu-se à sua análise química na zona da interface.

3.5.6. Ensaio de tracção

Também das soldaduras SE3 foram retiradas duas amostras, a amostra SE3_30_2 e a amostra SE3_20_4. As faces exteriores, superior e inferior, foram polidas com lixa de 1000 grãos/cm², e depois maquinadas na forma de dois cilindros com 25,4 mm de diâmetro. As duas amostras já maquinadas foram levadas à empresa *TeandM* onde foram grenalhadas e depois as suas extremidades foram coladas com uma cola de alta resistência a duas peças roscadas para assim se poder proceder aos ensaios de tracção. Os ensaios tiveram também lugar na empresa *TeandM* utilizando uma máquina de ensaios de tracção com a designação *Zwick Roell – Z050*, sendo o avanço utilizado nos testes, de 1mm por minuto. A Figura 3.7 mostra um esquema do ensaio realizado.

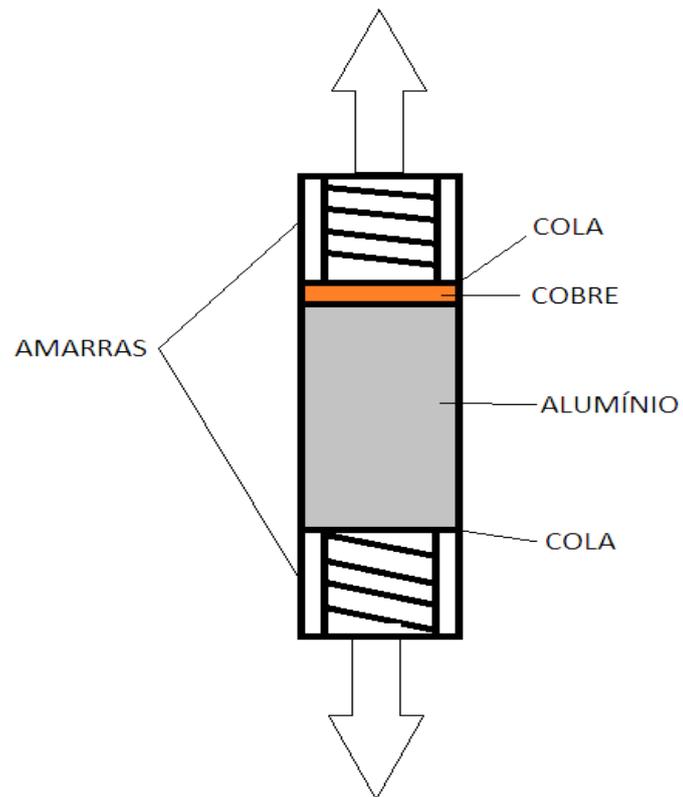


Figura 3.7. Esquema do ensaio de tracção.

4. RESULTADOS

4.1. Janela de soldabilidade

Através do sistema já descrito anteriormente, é possível calcular a velocidade média de detonação para cada uma das soldaduras efectuadas. Conhecendo a distância que separa cada uma das sondas, e utilizando os valores dos sinais eléctricos captados pelo osciloscópio, a velocidade média de detonação, V_d , é facilmente calculada através do declive da recta formada pelos pontos obtidos experimentalmente. Para as soldaduras SE3_30, SE3_20 e SE1_20 o coeficiente de determinação, R^2 , é igual a 1. Para a soldadura SE1_30 obteve-se um coeficiente de determinação de 0,9623. Os valores de V_d são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Dados para o cálculo da velocidade de detonação de cada soldadura

| | SE3_30 | | SE3_20 | | SE1_30 | | SE1_20 | |
|-------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|
| | pos sonda [mm] | tempo [μs] |
| | 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 | |

Depois de ter sido construída a janela de soldabilidade real para o par Al-Cu, procedeu-se ao enquadramento de cada uma das soldaduras realizadas, na referida janela. Para tal utilizou-se a equação (2.6), onde os valores de V_d são os apresentados na Tabela 4.1, e V_p foi estimado como seguidamente se exemplifica, seguindo a metodologia proposta por (R. Mendes *et al*, 2012). Através da equação (4.1), proposta por (Chou e Flis 1986), e sendo t a variável independente, construiu-se o gráfico da evolução de V_p com t .

$$V_p(t) = V_{p_Gurney} \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right] \quad (4.1)$$

Na equação (4.1), V_{p_Gurney} é o valor calculado através da equação (2.5), onde a energia de Gurney, $\sqrt{2E}$, é determinada através do calor de explosão, ΔH , do explosivo, e E é definido como sendo 60% do valor de ΔH , (D. Buczkowski e B. Zygmunt, 2011). Para o ANFO, que foi o explosivo utilizado nos ensaios, o calor de explosão tem o valor de 3890 kJ/kg, sendo que $\sqrt{2E}$ terá o valor de 1055 kcal/kg (D. Buczkowski e B. Zygmunt, 2011). Também para a equação (4.1), τ é o resultado da equação (4.2), sugerida por (P. Chou *et al*, 1983), onde 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 assume o valor de 1,5 GPa.

$$\tau = C_1 \frac{M V_{p_Gurney}}{P_{CJ}} + C_2 \quad (4.2)$$

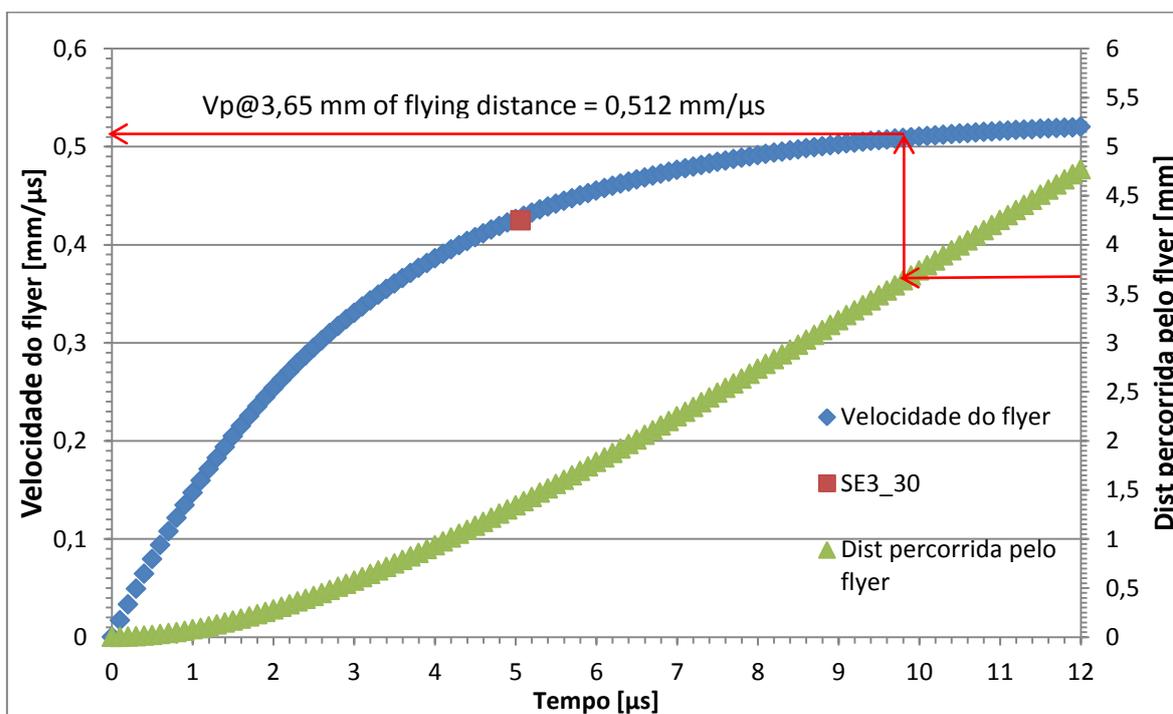
Como é típico para a aceleração de um *flyer* metálico através de uma detonação, após oito reflexões da onda de choque no *flyer*, a sua velocidade atinge o valor de 80 % de V_{p_Gurney} , (C. Tarver (a) *et al*, 1997; C. Tarver (b) *et al*, 1997; Tan *et al*, 2003). O tempo necessário para que o *flyer* atinja essa velocidade foi calculado considerando que a onda de choque se move no interior do *flyer* à velocidade do som no material, por uma distância equivalente a oito vezes a espessura do *flyer*. Como exemplo utiliza-se a soldadura SE3_30, em que $V_{p_Gurney} = 530,7$ m/s e $V_{p_cal} = 0,8 \times V_{p_Gurney} = 0,425$ mm/ μ s. O tempo necessário para que o *flyer* atinja essa velocidade é $t_{V_{p_cal}} = 5,063$ μ s, para uma velocidade do som no cobre de 4740 m/s. Na Figura 4.1 ilustra-se o processo de calibração das constantes C_1 e C_2 para que a velocidade do *flyer* iguale o valor de V_{p_cal} no tempo $t_{V_{p_cal}}$. Na Tabela 4.2 estão listados os valores das constantes utilizadas no cálculo das curvas que delimitam a janela de soldabilidade.

Tabela 4.2. Valores das constantes utilizadas na construção da janela de soldabilidade.

| Variável | Unidade | Equação | Valor para o flyer | Valor para a placa base |
|--|-------------------------|--------------|--------------------|-------------------------|
| R_{cr} ; Reynolds Crítico | [-] | (2.1) | 10,5 | 10,5 |
| $H_{V,f}$; $H_{V,p}$ – Dureza Vickers | [GPa] * | (2.1), (2.2) | 958,1 | 860,1 |
| ρ_f ; ρ_p – Densidade | [kg/m ³] ** | (2.1)-(2.4) | 8924 | 2700 |
| k_1 – Constante empírica | [-] | (2.2) | 0,6 | 0,6 |
| N – Constante empírica | [-] | (2.3), (2.4) | 0,11 | 0,11 |
| T_m – Temperatura de fusão | [°C] | (2.3), (2.4) | 1083 | - |
| C_0 – Velocidade do som | [cm/s] | (2.3), (2.4) | $4,74 \times 10^5$ | - |
| C_p – Calor específico | [erg/g.°C] | (2.3), (2.4) | $3,85 \times 10^6$ | - |
| k – Condutibilidade térmica @526,85 °C | [erg/cm.°C.s] | (2.3), (2.4) | $3,66 \times 10^7$ | - |
| h – Espessura do flyer | [cm] | (2.3), (2.4) | 0,3 | - |

*Na equação (2.2) o valor é expresso em [Pa] ou [N/m²]

**Na equação (2.3), ρ_f é expresso em [g/cm³]

**Figura 4.1.** Curva $V_p(t)$ calibrada para coincidir com $V_{p,cal}$ e $t_{Vp,cal}$.

Integrando a equação (4.1) obtém-se a expressão da distância percorrida pelo *flyer*, equação (4.3),

$$x_p(t) = V_{pG} \left[t - t_0 + \tau \left(\exp \left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) - 1 \right) \right], \quad (4.3)$$

e igualando esta à distância de separação das chapas, obtém-se a leitura da velocidade atingida pelo *flyer* aquando do impacto, V_p , que para o caso da soldadura SE3_30 é de 0,512 mm/ μ s. Depois da realização deste processo já dispomos dos valores de V_p e V_d que são necessários para substituir na equação (2.6) e assim obter o ângulo de impacto β que nos permite localizar cada uma das soldaduras na janela de soldabilidade, como se mostra na Figura 4.2. Os parâmetros de soldadura estão apresentados na Tabela 4.3.

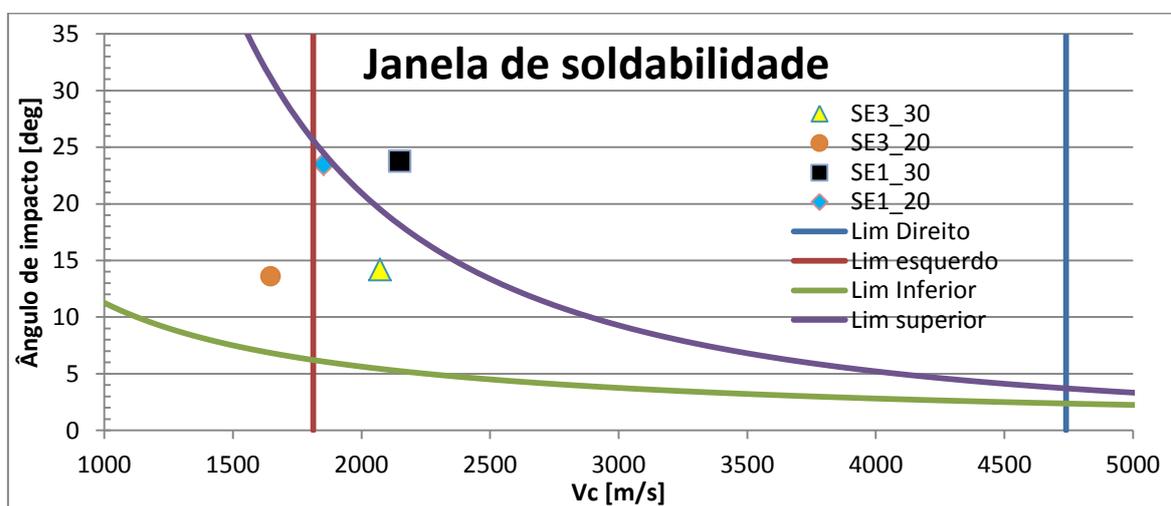


Figura 4.2. Janela de soldabilidade do par Al-Cu, com representação das soldaduras SE3_30, SE3_20, SE1_30 e SE1_20.

Tabela 4.3. Parâmetros de soldadura.

| | SE3_30 | SE3_20 | SE1_30 | SE1_20 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| V_p [m/s] | 512 | 390 | 885 | 755 |
| V_c [m/s] | 2072 | 1647 | 2149 | 1854 |
| β [deg] | 14,2 | 13,6 | 23,8 | 23,5 |
| $\rho_{\text{explosivo}}$ [g/cm ³] | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Espessura do flyer [mm] | 3 | 3 | 1 | 1 |

A soldadura SE3_30 encontra-se dentro da janela de soldabilidade, o que teoricamente dará origem a uma soldadura de qualidade. A soldadura SE3_20 encontra-se à esquerda do limite esquerdo da janela, que separa as zonas com ou sem ondulação na interface. A soldadura SE1_30 está localizada numa zona já acima do limite superior, o que poderá indiciar uma interface com zona fundida. Quanto à soldadura SE1_20, encontra-se no canto superior da janela onde convergem os limites esquerdo e superior, o que poderá dar origem a uma soldadura já com alguma fusão, possivelmente pontual, na interface, bem assim como pouca ondulação da interface.

4.2. Análise morfológica

Após a realização dos dois ensaios examinou-se macroscopicamente cada um dos provetes soldados. A observação do provete SE3 revela que existe alguma deformação e rugosidade moderada na superfície do *flyer*, que se encontrava em contacto com o explosivo, e que é devida à libertação da energia do explosivo aquando da detonação. Também se verifica que o *flyer* se encontra rasgado nas extremidades devido ao facto de as dimensões deste serem superiores às da placa base. É também visível uma deformação acentuada, quando se observa o provete pela vista de topo, tanto do *flyer* como da placa base, na direcção perpendicular à detonação, como se pode observar na Figura 4.3.

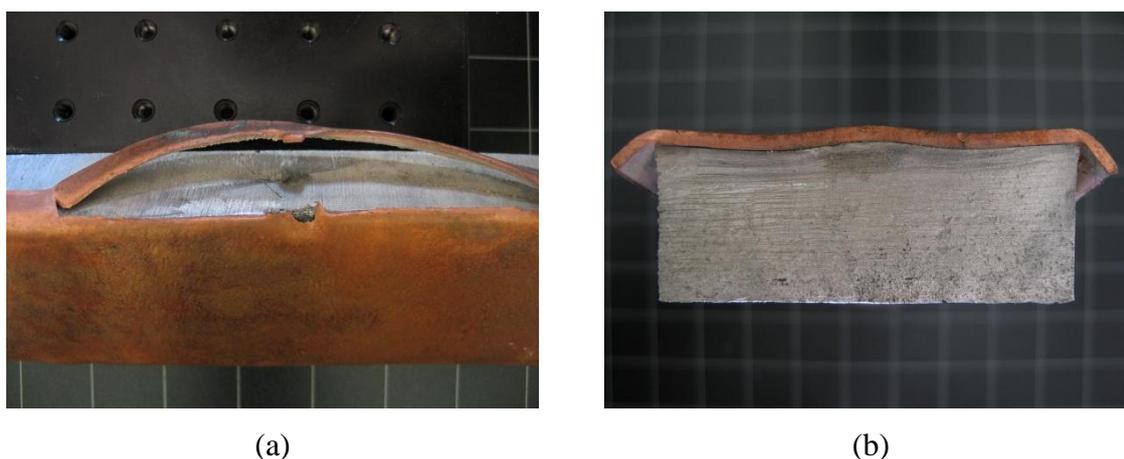


Figura 4.3. Observação macroscópica do provete SE3: (a) rasgamento da extremidade; (b) deformação transversal.

No que diz respeito ao provete SE1, observa-se uma deformação mais acentuada que no provete SE3, tanto no *flyer*, como na placa base. Este facto pode dever-se ao rácio superior de explosivo utilizado, que foi de 2,6 e 1,8 respectivamente para as

soldaduras SE1_30 e SE1_20, contra 0,88 e 0,59 relativamente às soldaduras SE3_30 e SE3_20. O superior rácio de explosivo é consequência da menor massa do *flyer*; devido a este ter uma espessura menor. A superfície do *flyer* encontra-se mais deteriorada, apresentando rugosidade acentuada, especialmente na parte inicial, relativamente à direcção da detonação. O fenómeno de rasgamento das extremidades do *flyer* não é tão evidente neste provete, uma vez que a diferença entre a área da face do *flyer* e da placa base é menor que em SE3. A Figura 4.5 apresenta uma vista geral do provete SE1.



Figura 4.4. Vista geral do provete SE1 com indicação da direcção da detonação.

Na Figura 4.5 pode ver-se em mais pormenor a deterioração da extremidade inicial do *flyer*, bem assim como a menor deformação transversal deste, comparativamente com o provete SE3.



(a)



(b)

Figura 4.5. Aspectos do provete SE1: (a) deterioração superficial no início do provete; (b) vista de topo do provete.

4.2. Soldaduras SE3 (*flyer* de 3 mm)

4.2.1. SE3_30 e SE3_20

Como já foi referido anteriormente, foram realizadas duas soldaduras por cada ensaio. As soldaduras SE3_30 e SE3_20 foram realizadas com um *flyer* de cobre de 3 mm e uma distância de separação entre as placas, de 3,65 mm. Para a soldadura SE3_30 foi utilizado um rácio de explosivo, R , de 0,88, enquanto para a soldadura SE3_20 o valor de R foi de 0,59. Na Figura 4.6 apresenta-se uma zona de interface das soldaduras SE3_30 e SE3_20.

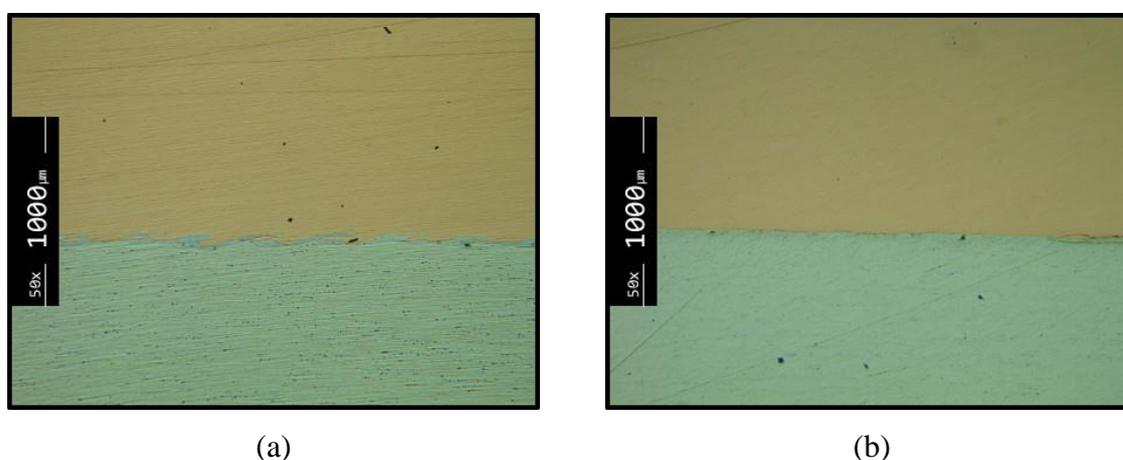


Figura 4.6. SE3, ampliação 50x: (a) SE3_30_1; (b) SE3_20_5.

É visível, mesmo a baixa ampliação, que existem diferenças ao nível da interface, entre as soldaduras apresentadas. A soldadura SE3_30 apresenta uma interface algo ondulada e onde é possível identificar compostos que, devido à sua diferente coloração, se julga serem intermetálicos. Na soldadura SE3_20 a interface tem um aspecto plano e não é possível identificar, com esta ampliação, a formação de nenhum tipo de compostos. A Figura 4.7 mostra, em ampliação maior, duas zonas da interface correspondentes à soldadura SE3.

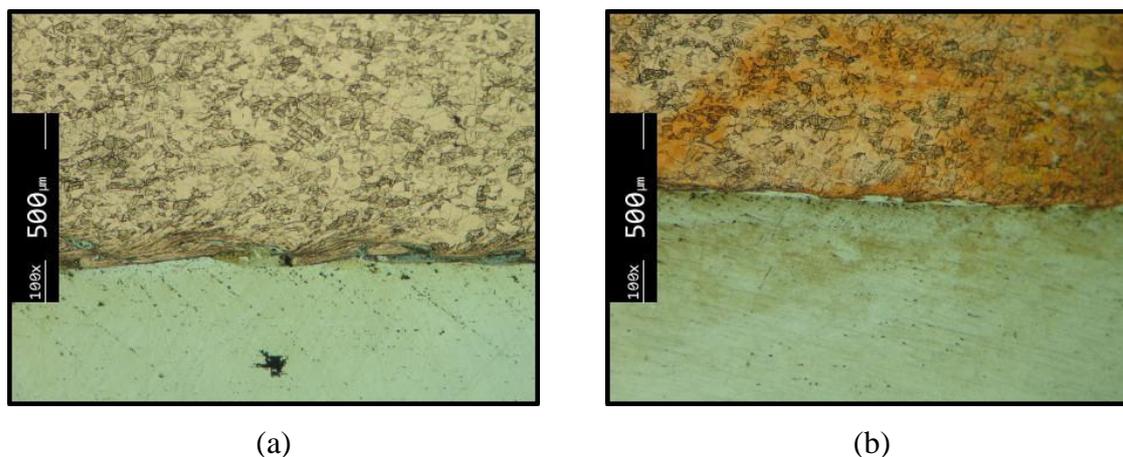


Figura 4.7. SE3 ampliada 100 x: (a) SE3_30_1; (b) SE3_20_5.

O facto de a soldadura SE3_20 apresentar uma interface quase plana é apoiado pela localização da mesma na janela de soldabilidade, uma vez que se encontra à esquerda da linha que representa a velocidade crítica de transição, abaixo da qual a interface não apresenta um aspecto ondulado. Quanto à soldadura SE3_30, encontra-se no limite da janela de soldabilidade acima do qual existe a formação de uma camada fundida contínua, o que pode justificar o material visível na interface da mesma, e que não é nenhum dos materiais base. A ondulação da interface é uma característica da soldadura por explosivo e, como tal, tentou-se avaliar o grau de ondulação da interface de cada uma das soldaduras efectuadas, medindo as ondas. O que se verificou aquando destas tentativas foi que, para a soldadura SE3_30, existe alguma ondulação na interface, mas esta é pouco significativa na medida em que a periodicidade das ondas é muito baixa, ou seja, existem poucas ondas e encontram-se dispersas pela interface. Das poucas estruturas com forma de onda identificadas na soldadura SE3_30, a média das medições de amplitude efectuadas foi de cerca de 44,4 μm com um desvio padrão de 5,3 μm . Quanto ao comprimento de onda, e uma vez que as ondas aparecem numa distribuição muito dispersa, não foi possível medir. Relativamente à soldadura SE3_20, considera-se que a sua interface se apresenta sem ondas.

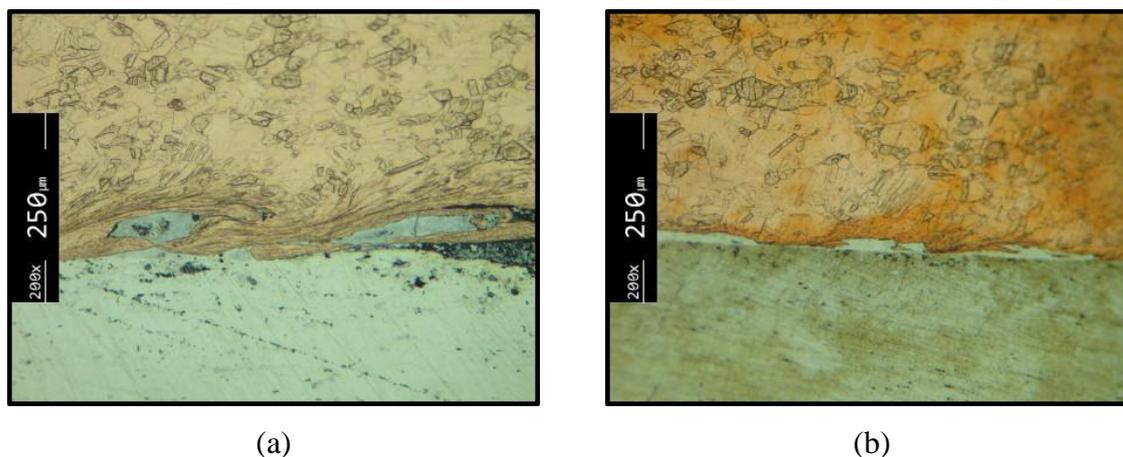


Figura 4.8. SE3, ampliação 200x: (a) SE3_30_1; (b) SE3_20_5.

Na Figura 4.8 é já possível identificar outras diferenças na interface das soldaduras SE3_30 e SE3_20, nomeadamente a existência, na soldadura SE3_20, de algum outro material que, pela sua coloração, se conclui não ser nenhum dos materiais base. É também observável que a interface da soldadura SE3_30 sofre uma deformação maior que a mesma região da soldadura SE3_20, sendo que os grãos da chapa de cobre que se encontram na interface da soldadura SE3_30 adquiriram uma forma mais alongada e orientada na direcção da detonação. A deformação da microestrutura da placa de cobre observada na interface da soldadura SE3_20, utilizando a ampliação de 200x, é pouco significativa.

São também observáveis defeitos na soldadura SE3_30, fendas e cavidades, como se pode ver na Figura 4.9, embora se encontrem em número reduzido. Já a soldadura SE3_20 não apresenta o tipo de defeitos referido anteriormente. Foi também medida a espessura final da chapa voadora em ambas as soldaduras e verificou-se uma redução de espessura da mesma, devido à colisão a alta velocidade a que foi sujeita. O valor médio da espessura da placa de cobre referente à soldadura SE3_30 depois do processo foi de 2,798 mm, ao passo que na soldadura SE3_20 esse valor foi de 2,842 mm. A redução de espessura superior na placa de cobre referente à soldadura SE3_30 era espectável devido à maior quantidade de explosivo utilizado nesta soldadura.

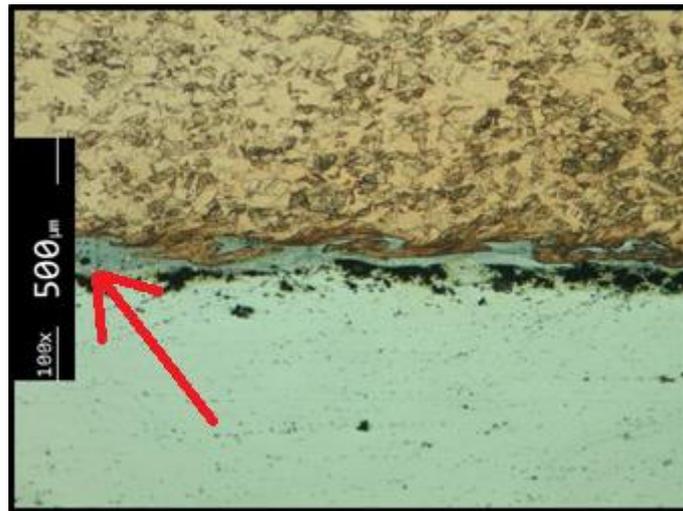


Figura 4.9. Cavidade e fenda na soldadura SE3_30.

Já foi referida por diversas vezes a existência de material na interface que não é cobre nem alumínio, e como tal, julga-se serem compostos intermetálicos. Duas amostras referentes às soldaduras SE3_30 e SE3_20 foram analisadas através de difração de Raios X mas não foi possível identificar nenhum tipo de composto intermetálico em nenhuma delas, devido à reduzida espessura de material presente nas mesmas. Assim, utilizando a microsonda analisaram-se as mesmas amostras numa zona onde se observa a existência de material diferente do material base e obteve-se a composição química ponderal dessas zonas. A análise foi realizada numa extensão de 100 μm , em intervalos de 5 μm . A Figura 4.10 mostra os resultados obtidos para a soldadura SE3_30. Na Figura 4.11 pode ver-se também uma imagem das zonas analisadas, que dizem respeito à zona adjacente à amostra SE3_30_1 e SE3_20_5.

| FILE INFORMATION | | | | | |
|---------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|
| User Name CAMECA SX50 | | | | | |
| Company ICEMS-DEM-Univ. Coimbra | | | | | |
| Title | | | | | |
| File teste.ana | | | | | |
| L | | | | | |
| Comments | | | | | |
| SORT RESULTS | | | | | |
| Label | Al w% | Cu w% | Sum w% | Al A% | Cu A% |
| Am1_1 | 0.07 | 102.66 | 102.74 | 0.17 | 99.83 |
| Am1_2 | 0.07 | 102.60 | 102.67 | 0.15 | 99.85 |
| Am1_3 | 0.08 | 102.49 | 102.57 | 0.18 | 99.82 |
| Am1_4 | 0.09 | 102.21 | 102.30 | 0.21 | 99.79 |
| Am1_5 | 0.08 | 102.93 | 103.01 | 0.17 | 99.83 |
| Am1_6 | 9.18 | 96.87 | 106.05 | 18.25 | 81.75 |
| Am1_7 | 64.19 | 39.25 | 103.43 | 79.39 | 20.61 |
| Am1_8 | 0.15 | 102.27 | 102.42 | 0.34 | 99.66 |
| Am1_9 | 8.65 | 93.72 | 102.37 | 17.85 | 82.15 |
| Am1_10 | 46.97 | 49.29 | 96.26 | 69.17 | 30.83 |
| Am1_11 | 56.15 | 40.73 | 96.88 | 76.45 | 23.55 |
| Am1_12 | 55.45 | 40.92 | 96.37 | 76.14 | 23.86 |
| Am1_13 | 56.79 | 40.24 | 97.03 | 76.87 | 23.13 |
| Am1_14 | 55.54 | 40.59 | 96.14 | 76.32 | 23.68 |
| Am1_15 | 62.71 | 32.91 | 95.62 | 81.77 | 18.23 |
| Am1_16 | 93.15 | 1.19 | 94.34 | 99.46 | 0.54 |
| Am1_17 | 93.20 | 0.70 | 93.90 | 99.68 | 0.32 |
| Am1_18 | 93.39 | 0.66 | 94.05 | 99.70 | 0.30 |
| Am1_19 | 93.60 | 0.57 | 94.17 | 99.74 | 0.26 |
| Am1_20 | 93.48 | 0.45 | 93.94 | 99.79 | 0.21 |
| STATISTICS | | | | | |
| Sigma # : 2,0 | | | | | |
| | Al w% | Cu w% | Sum w% | Al A% | Cu A% |
| Mean : | 44.15 | 54.66 | 98.81 | 53.59 | 46.41 |
| Std Dev : | 38.08 | 41.76 | 4.12 | 42.33 | 42.33 |

Figura 4.10. Resultados, em percentagem ponderal, da análise com microsonda da soldadura SE3_30.

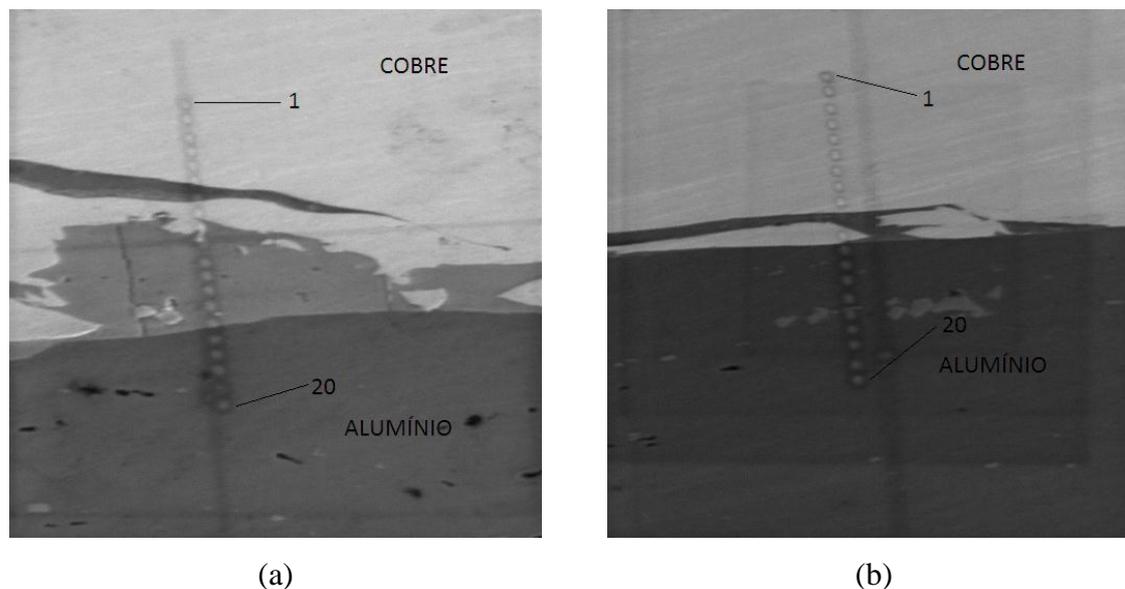


Figura 4.11. Imagem das zonas analisadas na soldadura SE3: (a) SE3_30; (b) SE3_20.

De acordo com (M. Aravind *et al*, 2004), que refere que uma composição do material analisado, com 54% Al e 46% Cu corresponde à fase AlCu, e tendo em conta os resultados obtidos, de cerca de 55% Al e 40% Cu, pensa-se que os compostos existentes naquela zona da interface da soldadura SE3_30 são efectivamente compostos intermetálicos, nomeadamente AlCu.

Na amostra referente à soldadura SE3_20, a camada de material diferente do material base tinha uma espessura mais reduzida, pelo que apenas uma das análises coincidiu com a referida camada, como se pode visualizar na Figura 4.11 b). A Figura 4.12 mostra os resultados obtidos na análise da soldadura SE3_20.

| FILE INFORMATION | | | | | |
|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|
| User Name CAMECA SX50 | | | | | |
| Company ICEMS-DEM-Univ.Coimbra | | | | | |
| Title | | | | | |
| File teste.ana | | | | | |
| L | | | | | |
| Comments | | | | | |
| SORT RESULTS | | | | | |
| Label | Al w% | Cu w% | Sum w% | Al A% | Cu A% |
| AM6_1 | 0.09 | 101.30 | 101.39 | 0.22 | 99.78 |
| AM6_2 | 0.08 | 101.31 | 101.39 | 0.18 | 99.82 |
| AM6_3 | 0.06 | 101.03 | 101.09 | 0.15 | 99.85 |
| AM6_4 | 0.08 | 100.98 | 101.06 | 0.19 | 99.81 |
| AM6_5 | 0.12 | 100.47 | 100.59 | 0.28 | 99.72 |
| AM6_6 | 0.10 | 101.31 | 101.40 | 0.23 | 99.77 |
| AM6_7 | 0.10 | 100.95 | 101.05 | 0.22 | 99.78 |
| AM6_8 | 0.11 | 101.31 | 101.42 | 0.25 | 99.75 |
| AM6_9 | 0.09 | 100.76 | 100.86 | 0.22 | 99.78 |
| AM6_10 | 73.71 | 25.16 | 98.86 | 87.34 | 12.66 |
| AM6_11 | 0.22 | 100.14 | 100.35 | 0.50 | 99.50 |
| AM6_12 | 94.09 | 1.38 | 95.48 | 99.38 | 0.62 |
| AM6_13 | 94.60 | 1.01 | 95.61 | 99.55 | 0.45 |
| AM6_14 | 95.08 | 0.70 | 95.79 | 99.69 | 0.31 |
| AM6_15 | 94.67 | 0.70 | 95.37 | 99.69 | 0.31 |
| AM6_16 | 93.41 | 0.52 | 93.93 | 99.77 | 0.23 |
| AM6_17 | 94.99 | 0.42 | 95.41 | 99.81 | 0.19 |
| AM6_18 | 94.91 | 0.52 | 95.43 | 99.77 | 0.23 |
| AM6_19 | 94.88 | 0.32 | 95.20 | 99.86 | 0.14 |
| AM6_20 | 94.78 | 0.33 | 95.10 | 99.85 | 0.15 |
| STATISTICS | | | | | |
| Sigma # : 2.0 | | | | | |
| Mean | Al w% | Cu w% | Sum w% | Al A% | Cu A% |
| Std Dev | 46.31 | 52.03 | 98.34 | 49.36 | 50.64 |
| | 47.62 | 50.48 | 2.93 | 50.46 | 50.46 |

Figura 4.12. Resultados, em percentagem ponderal, da análise com microsonda da soldadura SE3_20.

Também de acordo com (M. Aravind *et al*, 2004), o intermetálico presente na soldadura SE3_20 parece ser Al_2Cu , uma vez que este refere que percentagens da ordem de 73% Al e 27% Cu compõem o intermetálico referido. Tendo os resultados obtidos para a soldadura SE3_20 sido de 73% Al e 25%, é legítimo considerar a fase como sendo Al_2Cu . A assunção de que se trata de compostos intermetálicos é também apoiada pelo facto de as durezas nas zonas estudadas ser bastante superior às durezas do material base, como se mostra mais à frente. A espessura média desta camada de intermetálicos foi medida para ambas as soldaduras sendo que, para a soldadura SE3_30, a espessura média medida foi de cerca de 47 μm com um desvio padrão de 14,5 μm , enquanto para a soldadura SE3_20 a espessura média de intermetálicos foi de 17 μm com um desvio padrão de 2,8 μm .

4.2.2. Zona de transição SE3

Do provete SE3 foram retiradas três amostras. Uma correspondente à soldadura SE3_30, outra correspondente à soldadura SE3_20, e outra correspondente à zona de transição entre as duas soldaduras, e denominado SE3_ZT. Esta amostra foi analisada da mesma forma que as anteriores com o intuito de detectar diferenças na sua estrutura, derivadas das diferentes alturas de explosivo utilizadas no ensaio, e tentar identificar com precisão o local onde ocorreu a transição. A Figura 4.13 mostra uma imagem de cada uma das extremidades da amostra SE3_ZT.

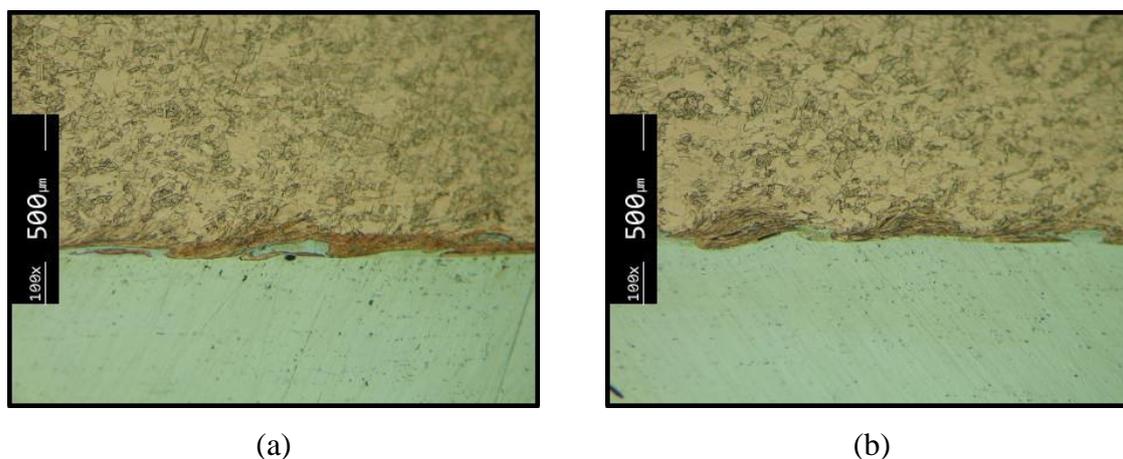


Figura 4.13. SE3_ZT, ampliação 100x: (a) extremidade referente à soldadura SE3_30; (b) extremidade referente à soldadura SE3_20.

Na Figura 4.13 a) observa-se a existência de uma cavidade, ao passo que em b) não está presente nenhum tipo de defeito visível. Ao observar as fotografias da amostra SE3_ZT verifica-se que, do lado correspondente à soldadura SE3_30, o número de cavidades existente é muito superior ao lado referente à soldadura SE3_20. Na Figura 4.14 apresentam-se duas imagens que ilustram alguns defeitos presentes na zona da amostra SE3_ZT referente à soldadura SE3_30.

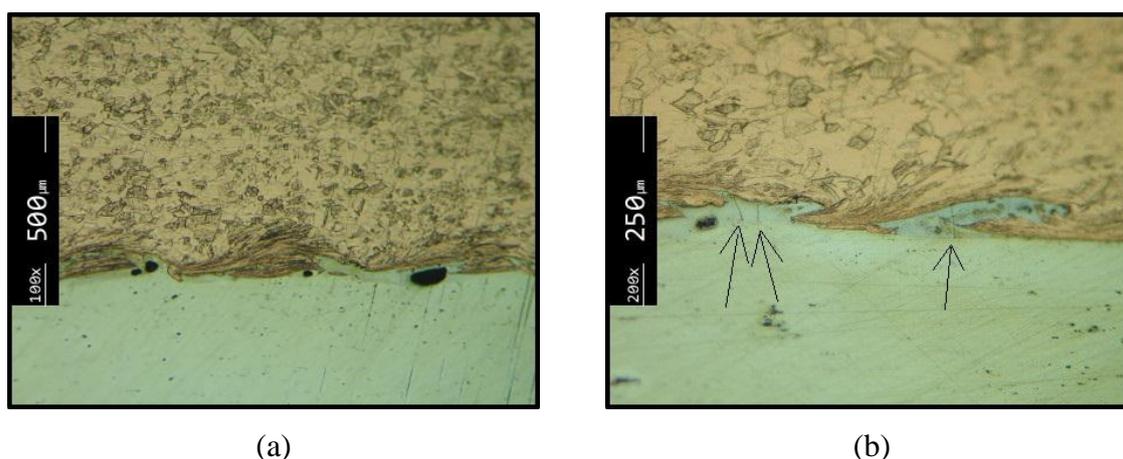


Figura 4.14. SE3_ZT: (a) cavidades; ampliação 100x; (b) fissuras; ampliação 200x.

Os defeitos atrás referidos são formados durante o arrefecimento dos metais que, devido à dissipação da energia cinética do *flyer*, fundem, ainda que durante um intervalo de tempo muito curto. O arrefecimento ocorre da periferia para o interior do metal fundido e, uma vez que o metal solidificado ocupa um volume inferior ao metal líquido, quando todo o material solidifica, formam-se as cavidades. Já as fissuras ocorrem devido às elevadas tensões residuais provocadas pelo rápido arrefecimento do material fundido, conjugado com uma elevada fragilidade das estruturas formadas durante o arrefecimento.

4.3. Soldaduras SE1 (*flyer* de 1 mm)

4.3.1. SE1_30 e SE1_20

As soldaduras SE1_30 e SE1_20 foram realizadas utilizando como *flyer* uma chapa de cobre com 1 mm de espessura, e a distância de separação entre as chapas foi de 1,42 mm. O rácio de explosivo para a soldadura SE1_30 foi de 2,64 enquanto para a

soldadura SE1_20 foi de 1,78. A Figura 4.15 mostra as soldaduras SE1_20 e SE1_30 com uma ampliação de 50x.

Em ambas as soldaduras é visível a presença de material que não é cobre nem alumínio. Na soldadura SE1_30 é também visível a presença de cavidades na interface. Pode afirmar-se que existe ondulação na interface de ambas as soldaduras. Na soldadura SE1_20 o tamanho médio das ondas é de aproximadamente $43\ \mu\text{m}$, com um desvio padrão de $11,8\ \mu\text{m}$, ao passo que na soldadura SE1_30 o tamanho médio das ondas é de aproximadamente $44\ \mu\text{m}$ com um desvio padrão de $9\ \mu\text{m}$.

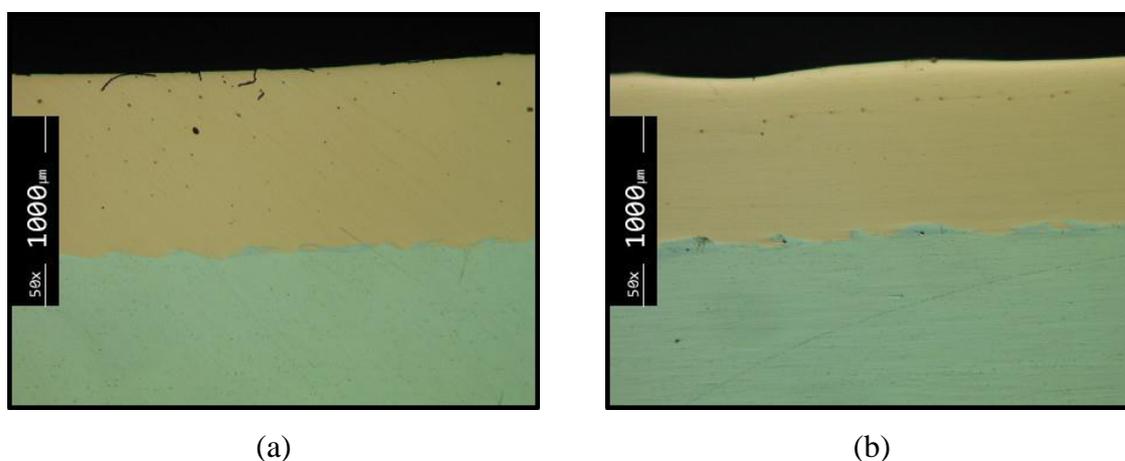


Figura 4.15. SE1, ampliação 50x: (a) SE1_20_1; (b) SE1_30_5.

Na Figura 4.16 mostra-se, numa ampliação maior, alguns pormenores da interface das soldaduras SE1_30 e SE1_20.

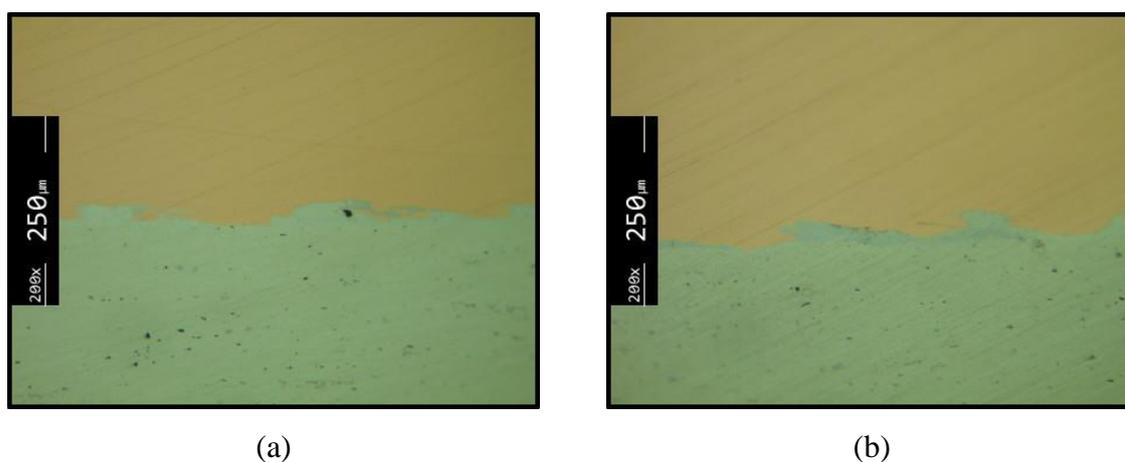


Figura 4.16. SE1, ampliação 200x: (a) SE1_20_1; (b) SE1_30_5.

Na Figura 4.16 é já visível em mais pormenor a existência de material presente na interface de ambas as soldaduras que não é cobre nem alumínio. Procedeu-se também à

medição da espessura deste material em ambas as soldaduras e, para a soldadura SE1_20 obteve-se um valor médio de cerca de 35 μm com um desvio padrão de 8,3 μm . No que diz respeito à soldadura SE1_30, o valor médio obtido foi de cerca de 59 μm com um desvio padrão de 19 μm . Na Figura 4.16 a) observa-se a presença de uma cavidade que é também a única presente na amostra SE1_20_1. Quanto à soldadura SE1_30, a amostra SE1_30_5 apresenta um número bastante elevado de defeitos, nomeadamente cavidades e fissuras, como se ilustra na Figura 4.17.

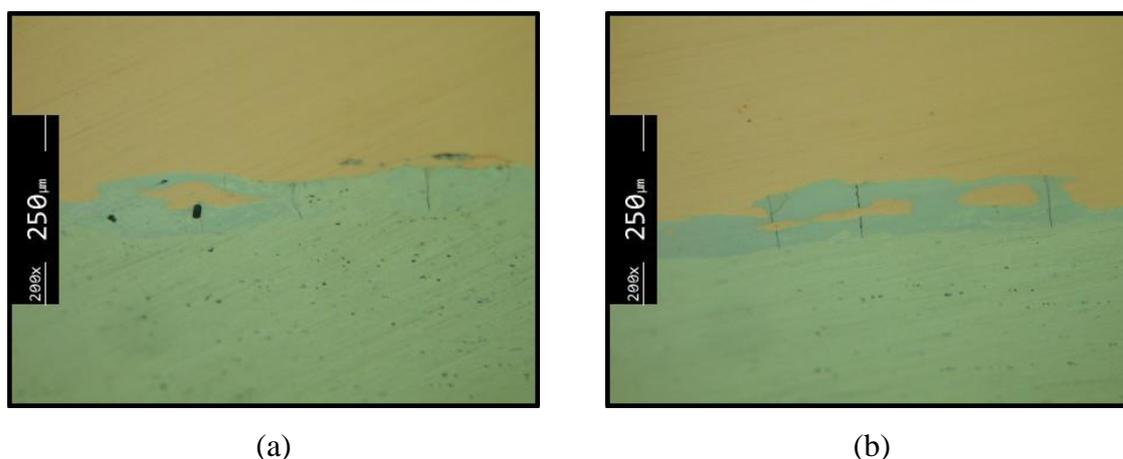


Figura 4.17. Soldadura SE1_30, ampliação 200x: (a) cavidades e fissuras; (b) fissuras e ilhas de cobre.

Na Figura 4.17 mostram-se alguns defeitos presentes na soldadura SE1_30 que, como foi referido anteriormente, são originados aquando da rápida solidificação do material fundido. Esta afirmação implica, desde logo, que tenha havido fusão dos metais durante a realização do processo. São também visíveis em ambas as imagens da Figura 4.17 ilhas de cobre que terão sido formadas durante o processo. Estas ilhas poderão ser pedaços da fina camada de metal que é arrancada da superfície dos metais base aquando da formação do jacto. Ambas as soldaduras se encontram numa zona onde, segundo a janela de soldabilidade, tem lugar a formação de uma interface ondulada, bem assim como a formação de uma camada fundida contínua, factos que são apoiados pelas imagens obtidas através do microscópio óptico. Foi também efectuada uma medição da espessura do *flyer* para as soldaduras SE1_30 e SE1_20, onde se verificou ter existido uma redução de espessura das mesmas. Para a soldadura SE1_20 a espessura média final do *flyer* foi de 0,943 mm, ao passo que para a soldadura SE1_30 a espessura média final do *flyer* foi de 0,907 mm.

Ao nível microestrutural só se conseguiu qualificar a deformação na interface relativamente à placa de cobre, uma vez que não foram obtidos resultados satisfatórios no ataque à chapa de alumínio, devido à reacção do cobre com o reagente. A Figura 4.18 mostra a interface das soldaduras SE1_30 e SE1_20, onde é visível alguma deformação dos grãos da placa de cobre, que ainda assim é inferior à deformação sofrida na interface das soldaduras SE3. Este facto pode dever-se à espessura inferior da chapa da soldadura SE1 que assim possui menor margem de deformação. Em termos qualitativos a interface de ambas as soldaduras aparenta uma deformação semelhante.

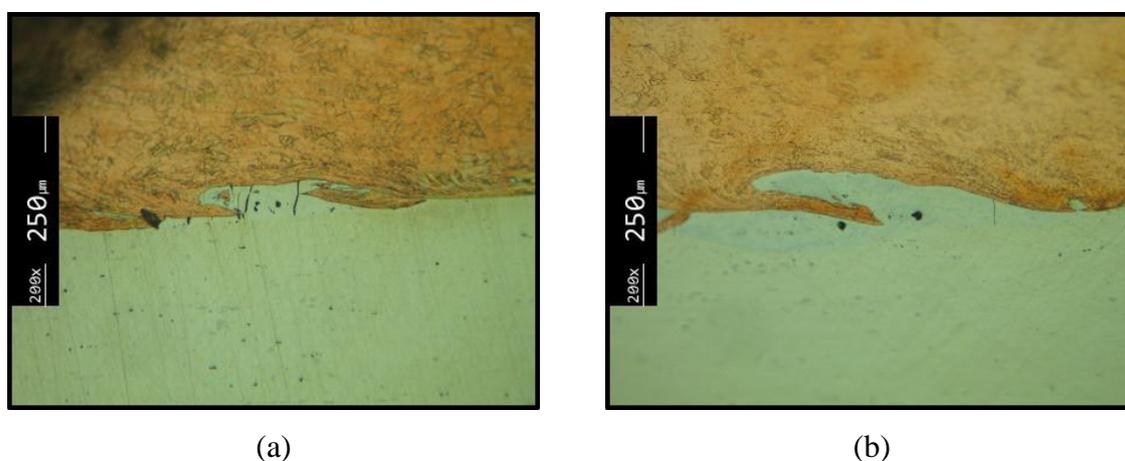


Figura 4.18. Deformação da chapa de cobre na soldadura SE1: (a) SE1_20; (b) SE1_30.

4.3.2. Zona de transição SE1

Tal como no ensaio SE3, do provete do ensaio SE1 foi também retirada uma amostra da zona que engloba ambas as alturas de explosivo utilizadas. Na Figura 4.19 apresentam-se duas imagens, cada uma correspondente à zona de 30 mm e 20 mm de explosivo.

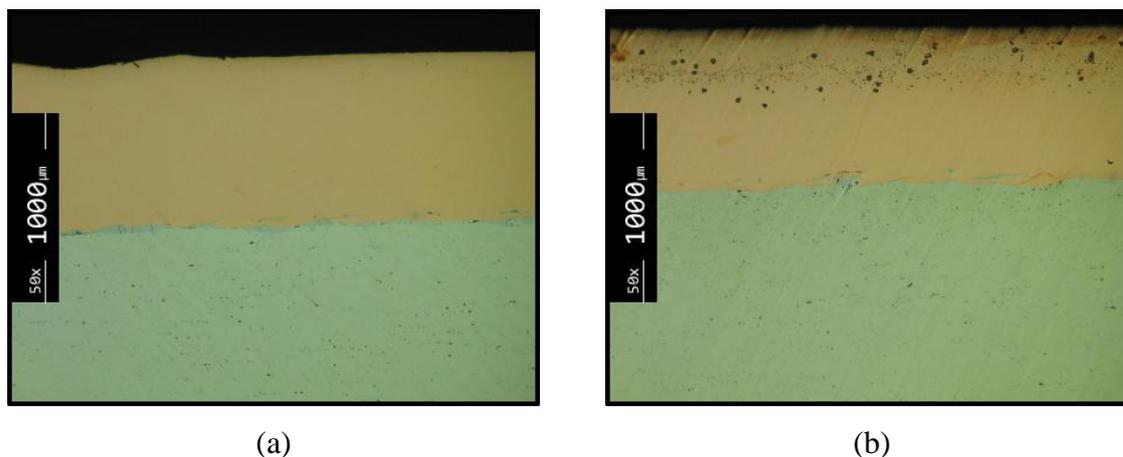


Figura 4.19. SE1_ZT, ampliação 50x: (a) extremidade referente à soldadura SE1_20; (b) extremidade referente à soldadura SE1_30.

Tal como nas amostras referentes exclusivamente a uma altura de explosivo, na amostra de transição encontram-se defeitos de soldadura, fendas e cavidades, e também compostos diferentes dos metais base. No entanto, as diferenças observáveis entre as extremidades da amostra de transição, SE1_ZT, não são significativas e, como tal, não permitem a identificação precisa do local onde ocorre a transição entre 30 mm e 20 mm de explosivo. Ao longo de toda a amostra encontram-se fissuras, cavidades e material diferente dos de base, como se ilustra na Figura 4.20.

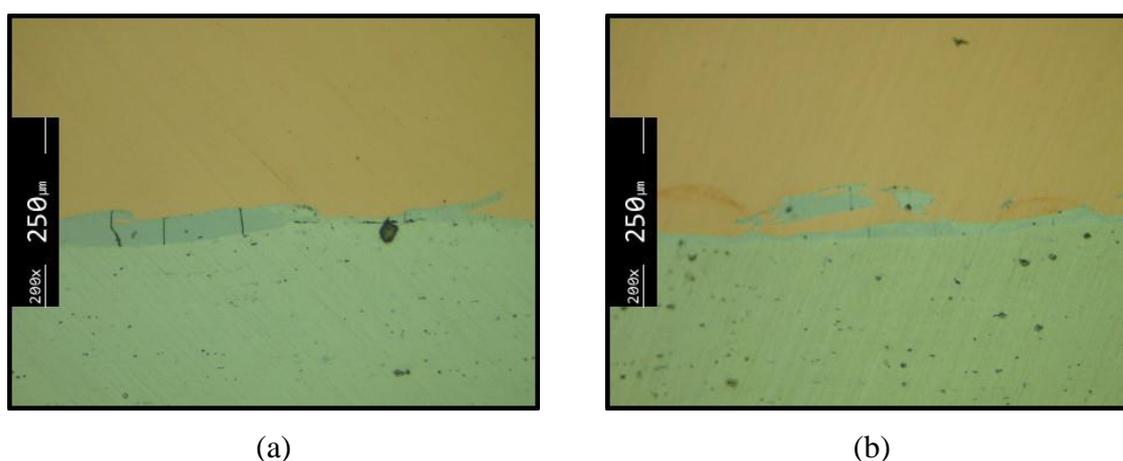


Figura 4.20. Defeitos na amostra SE1_ZT: (a) zona de 20 mm de explosivo; (b) zona de 30 mm de explosivo.

Aparentemente, o material diferente dos materiais base que é visível na Figura 4.20 poderá ser material resultante da fusão, seguida de rápido arrefecimento, dos materiais base aquando da dissipação da energia cinética do *flyer*, originária da detonação do explosivo. Se observarmos a localização das soldaduras SE1_30 e SE1_20 na janela de

soldabilidade verificamos que estas se encontram numa zona onde, teoricamente, poderá ocorrer fusão. Também se observa que o ângulo dinâmico de colisão obtido para estas soldaduras é cerca de 23° , sendo que o intervalo de valores recomendado por autores como (H. El-Sobky e T. Blazynski, 1975), é um intervalo compreendido entre 5° e 25° .

Ao comparar as soldaduras SE1 com SE3, observa-se que para a soldaduras SE1_30 e SE1_20 estão presentes compostos intermetálicos e estruturas onduladas em ambas, ao passo que na soldadura SE3_20 não existem ondas. A espessura dos compostos intermetálicos varia entre cada uma das quatro soldaduras tendo a camada mais espessa, na soldadura SE1_30, cerca de $60\ \mu\text{m}$, enquanto a camada menos espessa diz respeito à soldadura SE3_20, com cerca de $17\ \mu\text{m}$.

4.4. Análise das propriedades mecânicas

4.4.1. Resultados de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados na secção transversal das soldaduras, na direcção perpendicular à interface das soldaduras. Os ensaios foram realizados a partir da face exterior da placa de cobre, com incrementos de $250\ \mu\text{m}$, até ser obtida uma estabilização nos resultados, já na placa de alumínio.

4.4.1.1. Soldaduras SE3

Para as soldaduras SE3_30 e SE3_20, os valores médios do alumínio e do cobre são, respectivamente, $87,7\ \text{HV}$ e $97,7\ \text{HV}$. Conforme se pode observar na Figura 4.21, os valores de dureza aumentam das faces exteriores das placas para a interface. Na realização do ensaio de dureza referente à soldadura SE3_30, não houve uma indentação que coincidissem exactamente com a interface, mas é facilmente observável que os valores mais elevados têm lugar na zona da junta. No que diz respeito à soldadura SE3_20, houve uma indentação que coincidiu com a interface da soldadura e da qual se obteve o valor de $164\ \text{HV}$, como se pode ver na Figura 4.24.

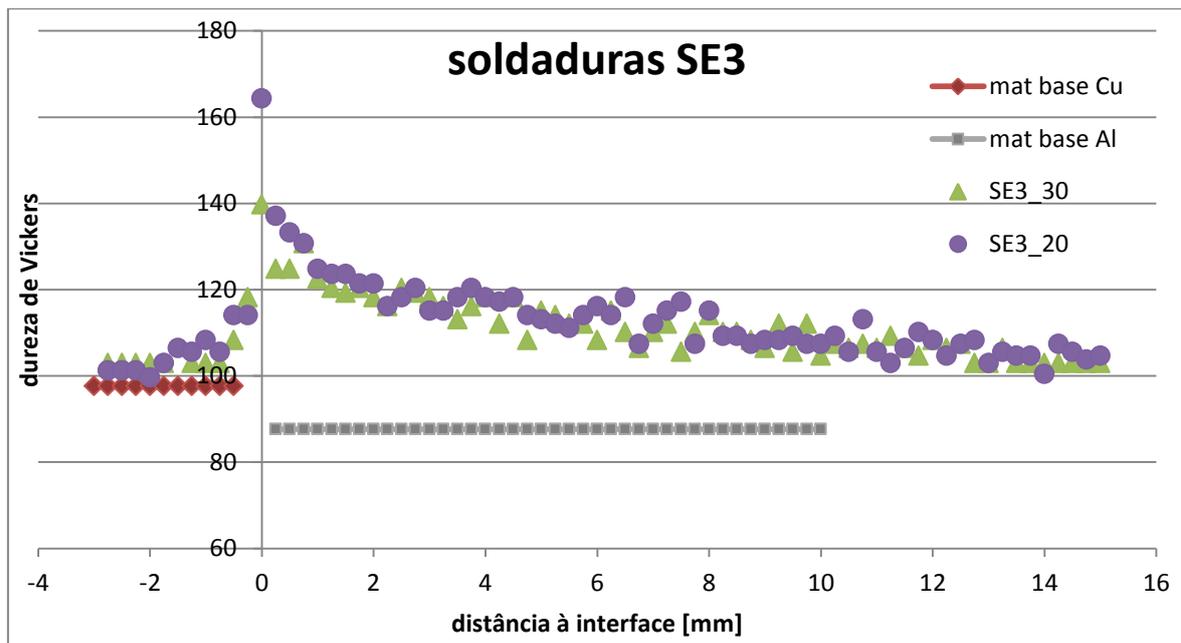


Figura 4.21. Perfis de dureza das soldaduras SE3_30 e SE3_20.

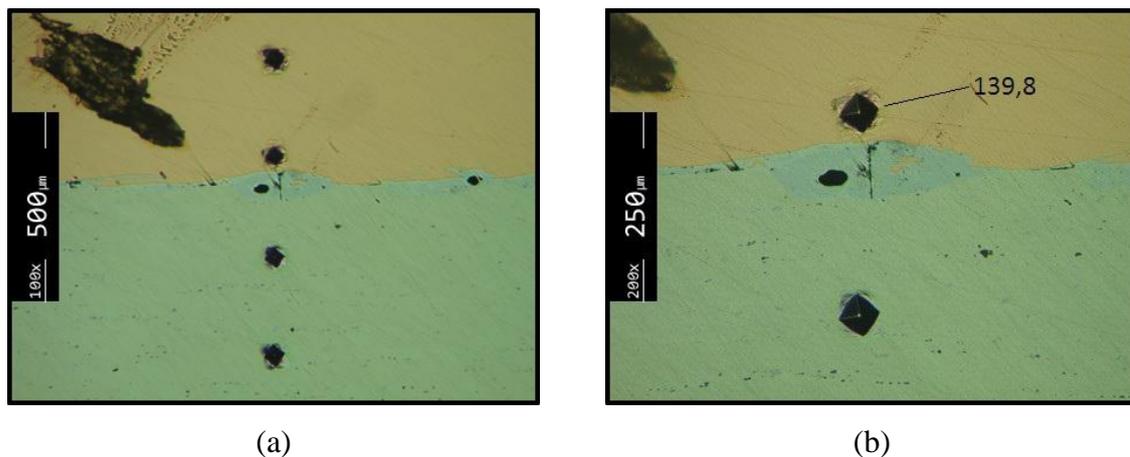


Figura 4.22. Indentações na soldadura SE3_30: (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x.

A Figura 4.22 mostra as indentações realizadas para a obtenção do perfil de durezas da soldadura SE3_30, onde se pode observar, como já foi referido, que não existe nenhuma indentação que coincida precisamente com a interface, sendo o valor mais elevado obtido, como se mostra na Figura 4.22 b), de 139,8 HV. No entanto foram realizados testes na interface que coincidiram com esta e onde se obteve como valor mais elevado de dureza 593 HV, como se pode ver na Figura 4.23, e que serve de apoio ao facto de se encontrarem compostos intermetálicos na interface da soldadura SE3_30. Este aumento de dureza na zona da interface pode ser devido à deformação plástica sofrida pelas chapas aquando do impacto, ou ainda devido à mudança de fase dos materiais na

interface, provocada pela fusão localizada dos mesmos. Os valores de dureza derivados de cada um dos motivos atrás referidos são de grandezas diferentes, sendo a dureza do material intermetálico superior à dureza provocada pela deformação plástica das chapas. Relativamente ao material base, houve um incremento de dureza maior na placa de alumínio que na placa de cobre, uma vez que esta possuía já uma deformação prévia, derivada do tratamento R240, e que consiste na deformação a frio do material conferindo-lhe um nível de dureza, neste caso, correspondente um valor intermédio da deformação total que o material pode suportar.

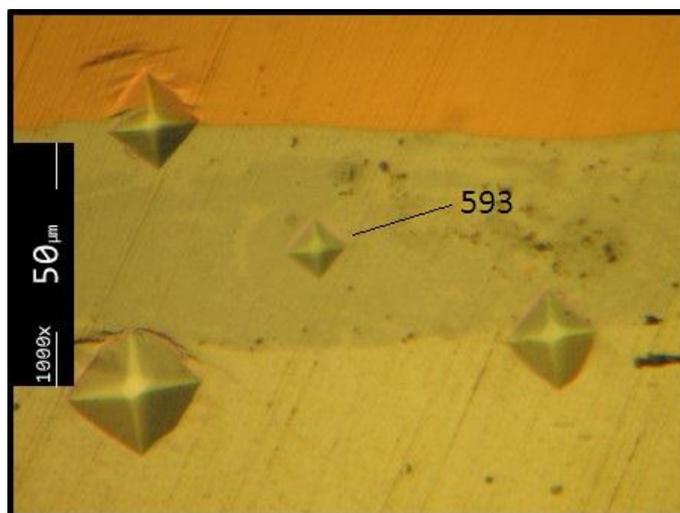


Figura 4.23. Indentações na zona da interface da soldadura SE3_30.

Na soldadura SE3_20 a tendência é igual à da soldadura SE3_30, uma vez que os valores de dureza atingem o seu máximo na interface e nas zonas adjacentes. Neste teste o valor máximo de dureza obtido foi de 164 HV. Nos outros testes realizados na mesma amostra, na zona da interface, não foi obtido nenhum valor superior a este, sendo até a maioria, de valor inferior. Este facto pode dever-se ao inferior rácio de explosivo utilizado, o que não significa que a dureza da interface da soldadura SE3_20 seja superior à da soldadura SE3_30, mas sim que no teste de dureza a indentação coincidiu com a interface na soldadura SE3_20 e não coincidiu na soldadura SE3_30. A dureza do material base era a mesma do ensaio anterior, e verificou-se também um aumento de dureza maior no alumínio que no cobre devido ao tratamento R240 da placa de cobre, que limita o endurecimento que esta pode sofrer.

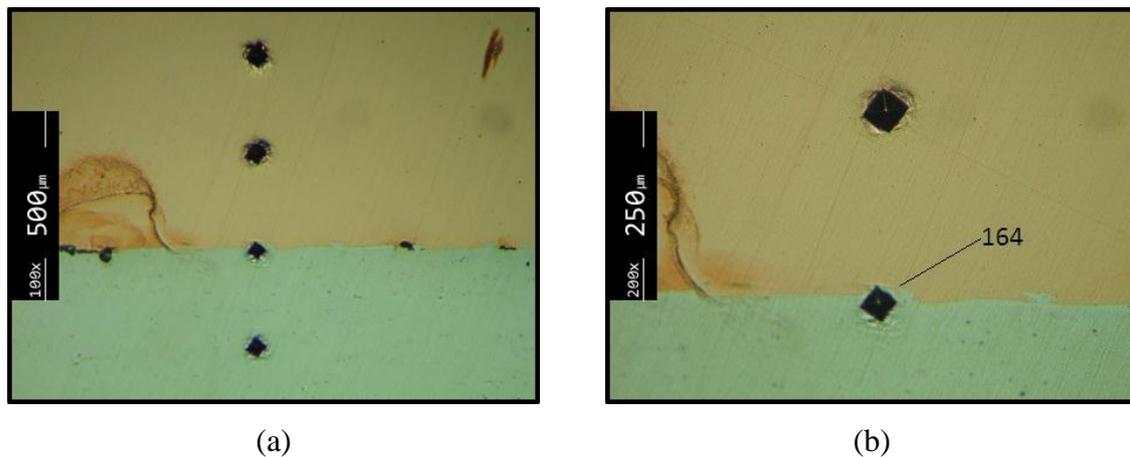


Figura 4.24. Indentações na soldadura SE3_20: (a) ampliação 100x; (b) ampliação 200x.

4.4.1.2. Soldaduras SE1

Para as soldaduras SE1, a dureza média do alumínio e do cobre é, respectivamente, de 87,7 HV e 91,1 HV. Nestas soldaduras verifica-se que o perfil de durezas é similar ao das soldaduras SE3, como mostra a Figura 4.25. O valor máximo medido durante a construção do perfil de durezas da soldadura SE1_20 foi de 144 HV e, como nas soldaduras anteriores, foram feitos testes complementares de dureza na zona da interface, sendo que o valor máximo de dureza obtido foi de 312 HV, como se pode ver na Figura 4.26 a).

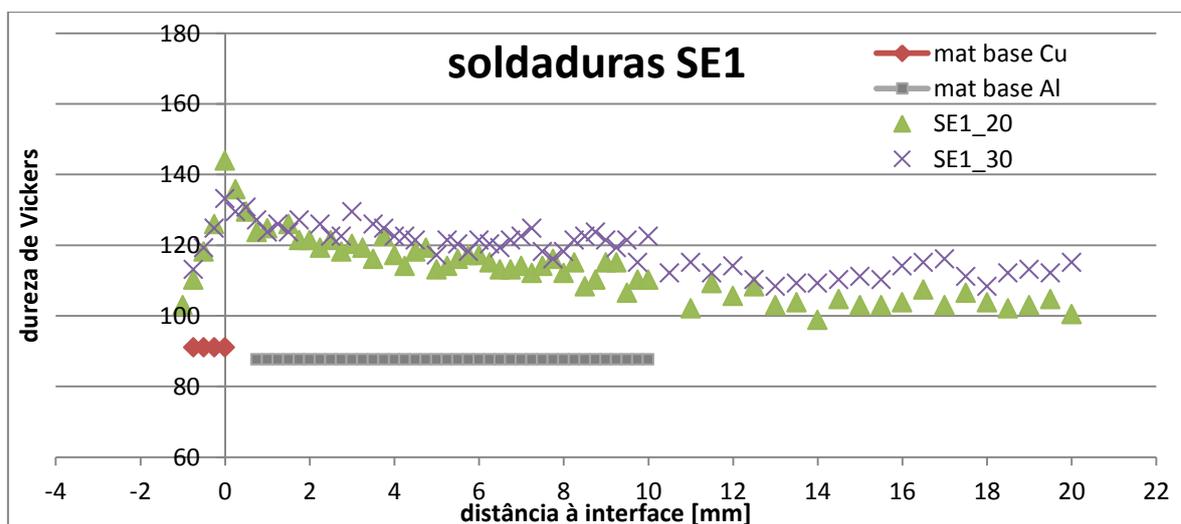


Figura 4.25. Perfis de dureza das soldaduras SE1.

Para o perfil de dureza da soldadura SE1_30, o valor máximo obtido foi de 133 HV, no entanto, nos testes de dureza complementares realizados na zona da interface, obteve-se um valor máximo de 618 HV, como se mostra na Figura 4.26 b).

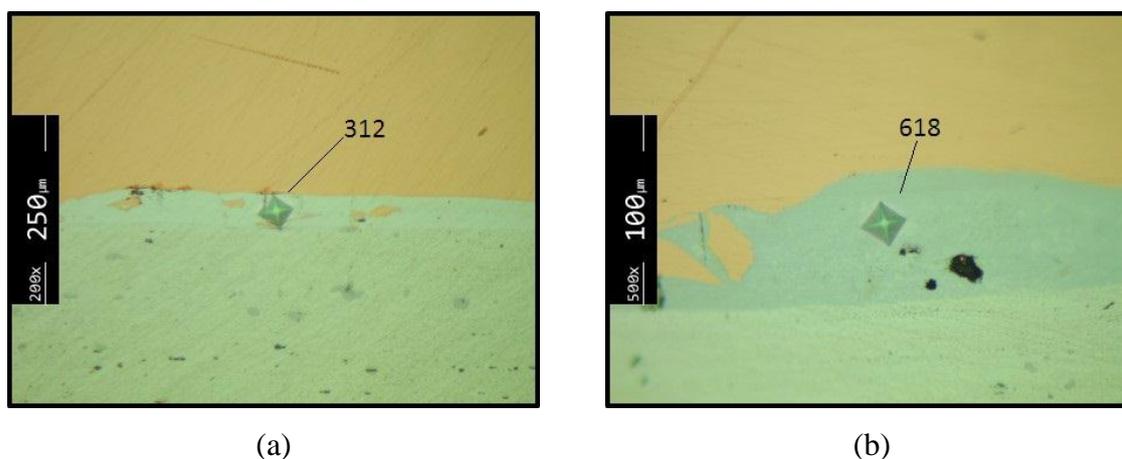


Figura 4.26. Valores máximos de dureza no material intermetálico: (a) soldadura SE1_20, 200x; (b) soldadura SE1_30, 500x.

Nas soldaduras SE1, a soldadura SE1_20, apresenta menor valor de dureza na interface e menor espessura da camada de intermetálicos devido ao menor rácio de explosivo, menor velocidade de detonação e menor velocidade de colisão, quando comparada com a soldadura SE1_30.

4.4.2. Ensaio de tracção

O ensaio de tracção é utilizado para medir a resistência mecânica à adesão da ligação. Neste trabalho foram efectuados dois ensaios de tracção nas amostras SE3_30_2 e SE3_20_4. As amostras foram maquinadas na forma de um cilindro com 25,4 mm de diâmetro, posteriormente foram coladas com uma cola de alta resistência a duas amarras roscadas, uma do lado do cobre e outra do lado do alumínio, que serviram como ligação à máquina de tracção, e por fim foram traccionadas. A Figura 4.27 mostra as amostras já depois do ensaio, mas na sua configuração inicial. Está também indicado com uma seta, em cada uma das imagens da Figura 4.27, a zona por onde se deu a rotura no ensaio. A Figura 4.27 mostra também que em ambos os ensaios a rotura se deu na ligação da amostra à amarra, num caso do lado do cobre, e no outro do lado do alumínio.

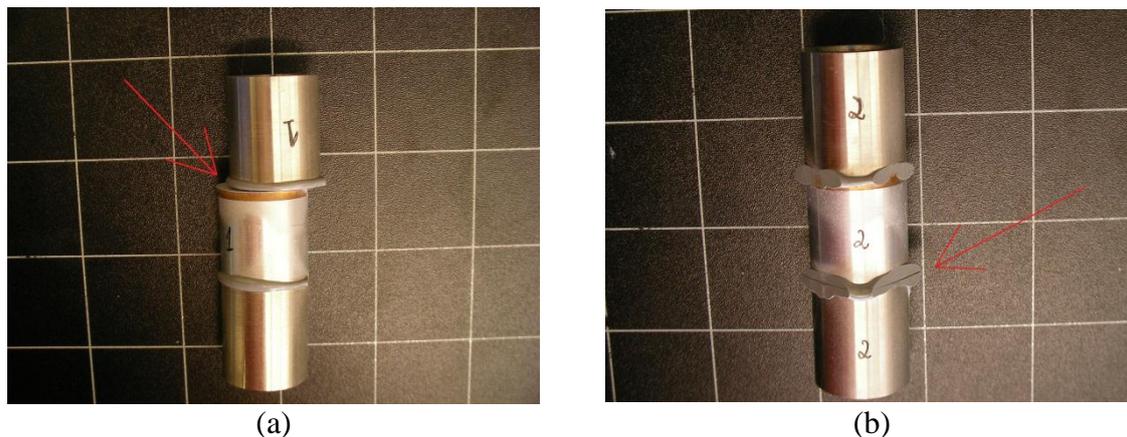


Figura 4.27. Amostras depois de traccionadas: (a) SE3_30_2; (b) SE3_20_4.

Como se pode ver pela Figura 4.27 ambas as amostras cederam pela cola, daí os valores de tensão serem tão similares em ambos os ensaios. Na Figura 4.28 apresenta-se a curva tensão/deformação obtida para cada um dos ensaios de tracção.

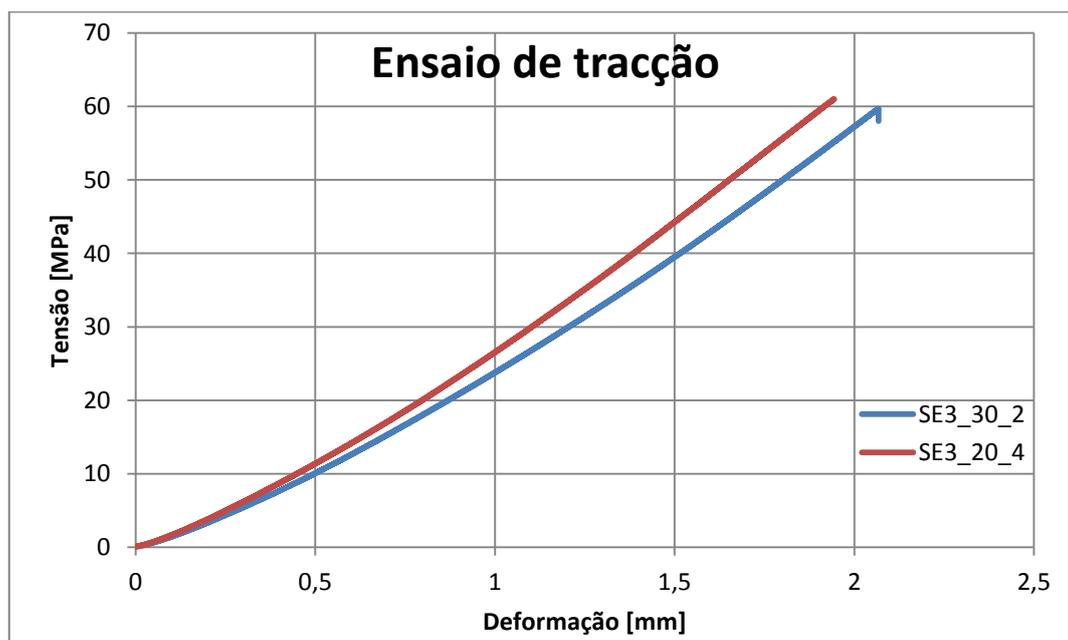


Figura 4.28. Curvas tensão/deformação de cada uma das amostras.

Para a amostra SE3_30_2 o valor máximo de tensão foi de 59,692 MPa, correspondente a uma deformação de 2,067 mm. No caso da amostra SE3_20_4 o valor máximo de tensão atingido foi de 61,012 MPa correspondente a uma deformação de 1,944 mm. Na Figura 4.29 mostra-se em pormenor a zona onde se deu a falha de cada uma das amostras.



Figura 4.29. Zona de cedência: (a) SE3_30_2; (b) SE3_20_4.

Como se pode ver na Figura 4.29, em ambas as amostras a falha teve lugar na cola, sendo que na amostra SE3_30_2 a falha ocorreu do lado do cobre, podendo considerar-se uma rotura, na generalidade, por coesão mas também um pouco por adesão. Na amostra SE3_20_4 a falha teve lugar do lado do alumínio, sendo o tipo de rotura considerado totalmente por coesão. Os resultados obtidos apenas nos permitem concluir que a resistência à tracção das soldaduras SE3 é, no mínimo, 60 MPa.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A execução deste trabalho girou em torno, na sua maior parte, da análise das soldaduras efectuadas, mais do que da qualificação das ditas soldaduras. Foi possível construir uma janela de soldabilidade real para o par Al-Cu e localizar cada uma das soldaduras efectuadas, nessa janela. A soldadura SE3_30 apresentou propriedades que são compatíveis com a sua localização na janela de soldabilidade, uma vez que a sua interface apresentava algumas ondas, o que é coerente com o facto de esta se encontrar à direita do limite a partir do qual a interface apresenta ondas. Foi também detectado aquilo que se pensa ser material intermetálico, o que indica ter havido fusão, ainda que pontual, dos materiais. O facto de se pensar que existem intermetálicos nesta soldadura é também apoiado pela análise feita na microssonda e pela dureza medida na interface, de 593 HV. A soldadura SE3_20 também apresentou características na interface que estão de acordo com a sua localização na janela de soldabilidade. Uma interface sem ondas e uma camada de material intermetálico bastante fina, cerca de $17\mu\text{m}$, vão de encontro ao facto de esta soldadura se localizar à esquerda do limite a partir do qual ocorre formação de interface ondulada, e abaixo do limite a partir do qual existe fusão. A soldadura SE1_30 foi a soldadura efectuada com maior rácio de explosivo, 2,6, maior velocidade de detonação, 2149 m/s, maior velocidade de impacto, 1230 m/s, e maior ângulo de colisão, 23° . As características observadas na interface desta soldadura estão também de acordo com a sua localização na janela de soldabilidade, uma vez que apresenta ondulação da interface e presença de material fundido, sendo o valor máximo de dureza que foi medido no material intermetálico, de 618 HV. Também de acordo com os parâmetros de soldadura está a espessura de material intermetálico medida na amostra SE1_30_5, que é cerca de $60\mu\text{m}$, ou seja, a mais espessa camada das quatro soldaduras efectuadas. Quanto à soldadura SE1_20, as suas características estão de acordo com a sua localização na janela de soldabilidade, uma vez que se encontra muito próxima da zona onde existe fusão dos metais e ondulação da interface. Estes aspectos foram verificados aquando da análise da amostra SE1_20_1, onde a amplitude das ondas tem valores de cerca de $43\mu\text{m}$ e a espessura da camada de material intermetálico é de aproximadamente $35\mu\text{m}$.

Na Tabela 5.1 apresentam-se as características de cada soldadura em função dos parâmetros das mesmas.

Tabela 5.1. Características e parâmetros das soldaduras.

| Parâmetros | SE3_30 | SE3_20 | SE1_30 | SE1_20 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| V_p [m/s] | 512 | 390 | 885 | 755 |
| V_c [m/s] | 2072 | 1647 | 2149 | 1854 |
| β [graus] | 14,2 | 13,6 | 23,8 | 23,5 |
| R | 0,9 | 0,6 | 2,6 | 1,8 |
| Características | | | | |
| Amplitude das ondas [μm] | 44,4 | - | 43,6 | 42,9 |
| Espessura de intermetálicos [μm] | 47,3 | 17,4 | 59,4 | 34,9 |
| Redução de espessura do <i>flyer</i> | 6,7 % | 5,3 % | 9,3 % | 5,7 % |
| Dureza máxima [HV] | 593 | 164 | 618 | 312 |

Em suma, para a chapa voadora de 3 mm, a soldadura realizada com um valor de $V_p=512$ m/s, $V_c=2072$ m/s, e $R=0,9$ deu origem a uma interface ondulada, com maiores valores de espessura de intermetálicos, maior dureza de intermetálicos e sofreu uma maior redução de espessura da chapa voadora que a soldadura realizada com valores de $V_p=390$ m/s, $V_c=1647$ m/s, e $R=0,6$. Os valores de dureza das soldaduras realizadas com chapa voadora de 3 mm, e relativos à deformação plástica dos materiais foram muito similares, o que significa que a deformação plástica sofrida pelas chapas em ambas as soldaduras foi similar. Os valores obtidos para o ângulo de colisão, $\beta=14,2^\circ$ e $\beta=13,6^\circ$, estão dentro do intervalo recomendado na literatura.

No que diz respeito às soldaduras realizadas com chapa voadora de 1 mm, a soldadura realizada com valores de $V_p=885$ m/s, $V_c=2149$ m/s, e $R=2,6$, produziu uma soldadura que, quando comparada com a outra soldadura com chapa voadora de 1 mm, apresenta maior valor de dureza na camada de intermetálicos, maior espessura da camada de intermetálicos e maior redução de espessura da chapa voadora. Esta soldadura foi a que teve mais energia adicionada devido ao seu rácio de explosivo. Este facto é também

apoiado pela constatação de que esta é a única das quatro soldaduras realizadas, que apresenta uma camada contínua de material fundido na sua interface. Tal como nas soldaduras com chapa voadora de 3 mm, as soldaduras com chapa voadora de 1 mm registaram valores de dureza devidos à deformação plástica da mesma ordem de grandeza. Os valores obtidos para os ângulos de colisão de cada uma das soldaduras com *flyer* de 1mm foram mais elevados que os valores de β para as soldaduras realizadas com *flyer* de 3 mm, sendo para a soldadura com 30 mm de espessura de explosivo, $\beta=23,8^\circ$, e para a soldadura com 20 mm de espessura de explosivo, $\beta=23,5^\circ$. Todos os valores obtidos para o ângulo de colisão de cada uma das quatro soldaduras efectuadas, se encontram dentro do intervalo recomendado na literatura, que diz que o ângulo de colisão se deve situar entre os 5° e os 25° . Como se sabe, o ângulo de colisão depende directamente do valor de V_p , equação (2.6), o que faz com que as soldaduras que tiveram maiores valores de velocidade de impacto, tenham tido também maiores valores do ângulo de colisão.

6. CONCLUSÃO

Dos trabalhos realizados foram extraídas as seguintes conclusões:

- Com o aumento do rácio de explosivo, as velocidades de impacto, V_p , aumentaram também, em todas as soldaduras;
- Na chapa de 1 mm o ângulo de impacto teve valores próximos do valor máximo recomendado, consequência do aumento da velocidade de impacto;
- A chapa de cobre de 1 mm de espessura apresentou maior rugosidade superficial do que a de 3 mm, após soldadura;
- Todas as placas voadoras sofreram uma redução de espessura, sendo que a maior redução se registou na soldadura efectuada com maior rácio de explosivo;
- As soldaduras com maior rácio de explosivo apresentaram maior número de defeitos, como cavidades e fissuras;
- Para a mesma espessura da chapa voadora, rácios de explosivo superiores dão origem a espessuras de intermetálicos superiores.
- As durezas associadas à deformação plástica dos materiais são de valor inferior às durezas dos compostos intermetálicos.
- O valor médio da amplitude das ondas em todas as soldaduras que apresentaram uma interface ondulada foi de 44,4 μm para a soldadura realizada com chapa voadora de 3 mm e 30 mm de espessura de explosivo, 43,6 μm para a soldadura realizada com chapa voadora de 1 mm e 30 mm de espessura de explosivo, e 42,9 μm para a soldadura realizada com chapa voadora de 1 mm e 20 mm de espessura de explosivo;
- A resistência à tracção da ligação cobre/alumínio é, no mínimo, de 60 MPa para as soldaduras realizadas com a chapa de cobre de 3 mm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahamson G. R. J., (1961), Appl. Mech
- 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, Department of Physics, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, Hong Kong, China
- Bataev I.A. ^a, Bataev A.A. ^a, Mali V.I. ^b, Pavliukova D.V. ^a, (2011), Structural and mechanical properties of metallic–intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing, ^a Novosibirsk State Technical University, K. Marks 20, 630092 Novosibirsk, Russia, ^b Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15 Lavrentyev pr., 630090 Novosibirsk, Russia.
- Buczowski D., Zygmunt B. (2011), Detonation Properties of Mixtures of Ammonium Nitrate Based Fertilizers and Fuels, *Central European Journal of Energetic Materials*, 2011, 8(2), 99-106
- Chou P. C., and W. J. Flis, (1986). Recent Developments in Shaped Charge Technology. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 11 (4):99-114
- Chou P. C., J. Carleone, W. J. Flis, R. D. Ciccarelli, and E. Hirsch. 1983. Improved formulas for velocity, acceleration, and projection angle of explosively driven liners. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 8 (6):175-183
- Cowan G. R., O.R. Bergaman, and A. H. Holtzman. (1971). Mechanics of bond wave formation in explosive cladding of metals. *Metallurgical Transactions* 2:3145
- Crossland B., Williams J. D. (1970), Metallurgical Reviews
- Durgutlu A. (2003), Bonding of copper and stainless steel by using explosion welding and investigation of mechanical-microstructural properties of interface, Tese de Doutorado, Gazi University, Ankara, Turkey.
- Durgutlu A. ^a, Behçet Gulenc ^a, Fehim Findik ^b (2005), Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding, ^a Technical Education Faculty, Gazi University, Ankara, Turkey, ^b Department of Materials Technology, Technical Education Faculty, Sakarya University, Sakarya, Adapazari 54090, Turkey
- El-Sobky H. (1983), “Mechanics of explosive welding”, em Blazynski T. Z., (eds.), Explosive Welding, Forming and Compaction, Applied Sciences Publishers, 189-215
- El-Sobky H., Blazynski, T. Z (1975) *Experimental investigation of the mechanics of explosive welding by means of a liquid analogue..* Colorado : Fifth International Conference on High Energy Rate Fabrication, 1975. Vol. 4.
- Findik F. (2011), Recent Developments in Explosive Welding, Sakarya University, Faculty of Technology, Esentepe Campus, 54187 Adapazari, Turkey .
- Ghomi Mohammad (2009), Impact Wave Process Modeling and Optimization in High Energy Rate Explosive Welding, Malardalen University, Sweden

- Gulenc Behcet (2008), Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method, Gazi University, Technical Education Faculty, Besevler-Ankara, Turkey
- Hammerschmidt M., Kreye H. (1981), Proceedings 7th International Conference of the Center for High Energy Rate Forming, Universidade de Leeds
- Hunt J. N. (1968), *Phil. Mag.*, 17, 669-80.
- Kowalick J. F., Hay D. R. (1971), *Met. Trans.*, 2, 1953-58
- Mendes R.¹, Ribeiro J. B.¹, Loureiro A.² (2012), Effect of the explosive characteristics on explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration, a publicar. ¹ADAI - Assoc. for Dev. of Ind. Aerodynamics / LEDAP - Lab. Energetics and Detonics, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, R. Luis Reis Santos, Polo II, 3030-788 Coimbra, Portugal. ²CEMUC - Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Rua Luis Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal.
- Mousavi A.A. Akbari^a, S.T.S. Al-Hassani^b (2005), Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding, ^aDepartment of Metallurgy and Material Science Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, P.O. Box 11365-4563, Tehran, Iran, ^bSchool of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, P.O. Box 88, Manchester M60 1QD, UK
- Popoff Alexis A. and Hugh Casey (1977), Application of Explosion Welded Transition Joints, WESTEC '77 Conference, Los Angeles, California, March 14-17, 1977
- Robinson J. L. (1975), *Phil. Mag.*, 31, 587-97
- Sedighi M., M. Honarpisheh (2011), Experimental study of through-depth residual stress in explosive welded Al-Cu-Al multilayer, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
- Tan, Duowang, Chengwei Sun, and Yanping Wang. 2003. Acceleration and Viscoplastic Deformation of Spherical and Cylindrical Casings under Explosive Loading. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 28 (1):43-47.
- Tarver (a), C. M., R. D. Breithaupt, and J. W. Kury. 1997. Detonation waves in pentaerythritol tetranitrate. *Journal of Applied Physics* 81 (11):7193-7202.
- Tarver (b), C. M., J. W. Kury, and R. D. Breithaupt. 1997. Detonation waves in triaminotrinitrobenzene. *Journal of Applied Physics* 82 (8):3771-3782.
- Tricarico L.^a, R. Spina^a, D. Sorgente^a, M. Brandizzi^b (2009), Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints, ^aDept. of Mechanical and Management Engineering (DIMEG), Politecnico di Bari, Viale Japigia 182, 70126 Bari, Italy, ^bFIAT Research Center (CRF), Strada Provinciale per Casamassima Km 3, 70010 Valenzano, Italy
- 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
- Wronka Bogumil, (2010), Testing of explosive welding and welded joints. Wavy character of the process and joint quality, Institute of Mechanical Engineering,

Faculty of Civil Engineering, Mechanics and Petrochemistry, Warsaw University of Technology, 09-400 Płock, ul. Łukasiewicza 17, Poland

Young G. (2004), Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History, Dynamic Materials Corporation, U.S.A., Stainless Steel World 2004 © 2004 KCI Publishing BV

Zakharenko I. and B. Zlobin. (1983). Effect of the hardness of welded materials on the position of the lower limit of explosive welding. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 19 (5):689-692.