

Soldadura por explosão de alumínio a aço inoxidável – efeito da placa intermédia

Ricardo Lopes Mendes¹, João Rosa Pimenta², Ivan Garcia Galvão^{3,6}, Gustavo Senna Carvalho^{4,6}, Rui Manuel Leal^{5,6}

¹ Universidade Coimbra, ADAI, LEDAP, Dep. Engenharia Mecânica, Portugal. Email: ricardo.mendes@dem.uc.pt

² Universidade Coimbra, ADAI, LEDAP, Dep. Engenharia Mecânica, Portugal. Email: joao.pimenta@adai.pt

³ Instituto Politécnico de Lisboa, ISEL, Dep. Engenharia Mecânica, Portugal. Email: ivan.galvao@dem.uc.pt

⁴ Department of Industrial Engineering, University of Firenze, Via di Santa Marta 3, 50139 Firenze, Italy Email: gustavo.carvalho@dem.uc.pt

⁵ Instituto Politécnico de Leiria, LIDA-ESAD.CR, Portugal. Email: rui.leal@dem.uc.pt

⁶ Universidade Coimbra, CEMPRE, Dep. Engenharia Mecânica, Portugal.

Resumo

A ligação de alumínio-aço inoxidável é utilizada em várias áreas industriais, nomeadamente, na indústria naval e criogénica. A fabricação de materiais bi-metálicos, com propriedades físicas diferentes, é difícil de realizar através das técnicas de soldadura convencionais, senão mesmo impossível, pelo que a soldadura por explosão pode ser considerada. Neste estudo, foi realizada a ligação de alumínio AA6082 e aço inoxidável AISI 304 na configuração de juntas sobrepostas, utilizando uma composição explosiva baseada em nitrato de amónio. Devido à dificuldade de ligação direta do AA6082 a AISI 304, que apresenta a formação de compostos intermetálicos em extensões consideráveis e que só ocorre para velocidades do ponto de colisão inferior a 2300 m/s, foi considerado colocar uma placa intermédia, com 1 mm de espessura, entre a placa voadora e a placa base. Desta forma, foi possível reduzir a energia cinética da placa voadora e obter placas de alumínio-aço inoxidável ligadas e com boas propriedades mecânicas. Os materiais das placas intermédias testadas foram alumínio, titânio e aço carbono. A influência da colocação de uma placa intermédia nas propriedades da microestrutura da interface e nas propriedades mecânicas dos provetes foi avaliada e relacionada com o perfil de interface obtido. A força máxima de rotura do compósito com placa intermédia de alumínio foi 6.0 kN, com titânio foi 10.1 kN, e com aço carbono foi 11.4 kN. De acordo, com as condições dos ensaios experimentais, verificou-se que a melhor solução é a utilização do aço-carbono.

Palabras chave: soldadura por explosão; alumínio AA6082; aço inoxidável AISI 304; placa intermédia; explosivo.

Abstract

Aluminum alloys to stainless steel joints are widely used in several industries, namely in ship building and cryogenics industries. Composite clads with different physical properties produced by fusion welding techniques are difficultly achieved, often resulting in the formation of brittle Al/Fe intermetallic compounds. Composite clads of aluminum AA6082 and stainless steel AISI 304 were produced in full overlap configuration by explosion welding technique. Since the direct weld of aluminum to stainless steel faces problems like the formation of intermetallic compounds and it was successful only for cases where the collision point velocity is under 2330 m/s, an intermediate plate between the flyer and base plate was included. This solution allows to reduce the kinetic energy of the flyer plate and allows to obtain samples with good structural and mechanic properties. Intermediate plates of aluminum, titanium and carbon steel with 1 mm of thickness were tested. The composite with aluminum interlayer presents a maximum load of 6.0 kN, whereas the composite with titanium and carbon steel presents a maximum load of 10.1 kN and 11.4 kN, respectively. According to the experimental conditions, the best solution consists of using an intermediate plate of carbon steel.

Keywords: Explosion welding, aluminum AA6082, stainless steel AISI 304, interlayer, explosive

1. Introdução

As ligas de alumínio são largamente utilizadas na construção naval como material estrutural e juntas de ligação devido à sua elevada resistência específica, excelente resistência à corrosão, baixo custo e facilidade de maquinação. No entanto, no que diz respeito à resistência mecânica do produto, esta pode ser aumentada através do revestimento com outros metais ou ligas. Nas juntas de transição de alumínio-aço inoxidável, pode surgir corrosão galvânica, se estas não forem preparadas devidamente [1] [2]. Por outro lado, os materiais utilizados em compósitos metálicos têm tendência a formar compostos intermetálicos frágeis a alta temperatura, resultando na formação de fissuras e na redução das propriedades mecânicas das peças produzidas. Por exemplo, a produção de peças de alumínio-aço inoxidável por soldadura por fusão é difícil e origina a formação de compostos intermetálicos Al/Fe [3].

Portanto, as técnicas de soldadura no estado sólido devem ser consideradas para o processamento de estruturas híbridas. De entre as várias técnicas, a soldadura por explosão tem algumas vantagens, porque, como ocorre numa escala de tempo muito reduzida (μs), não existe tempo para que ocorram fenómenos de transferência de calor e, consequentemente, a zona termicamente afetada é muito reduzida, causando alterações microestruturais numa faixa de material muito estreita, na proximidade da interface.

A soldadura por explosão, conhecida como um processo de soldadura no estado sólido, consiste numa tecnologia onde a energia interna dos produtos da detonação, através da expansão dos mesmos, permite transferir a energia cinética para uma placa voadora (PV), levando a que esta atinja velocidades acima de 200 m/s num intervalo de tempo reduzido.

A colisão da PV contra uma placa base metálica (PB) gera uma elevada pressão na interface dos dois materiais, da ordem de GPa, sendo consideravelmente superior à tensão de cedência de qualquer material. Durante o processo de colisão, a elevada deformação plástica e as condições físicas observadas na interface permitem gerar uma interface plana ou ondulada entre os dois materiais. A Figura 1 mostra uma representação esquemática do processo de soldadura por explosão em configuração plana, com utilização de uma placa intermédia (PI). Inicialmente, a placa voadora acelera até colidir com a PI e, posteriormente, o conjunto PV e PI continuam a deslocar-se até atingir a PB. Ambas as placas estão separadas por uma distância inicial, para permitir a aceleração das placas.

As composições explosivas, como emulsões explosivas ou ANFO, baseadas em nitrato de amónio, utilizadas neste trabalho, apresentam uma variação da velocidade de detonação com a espessura ou o diâmetro da carga, para espessuras abaixo da espessura crítica [4].

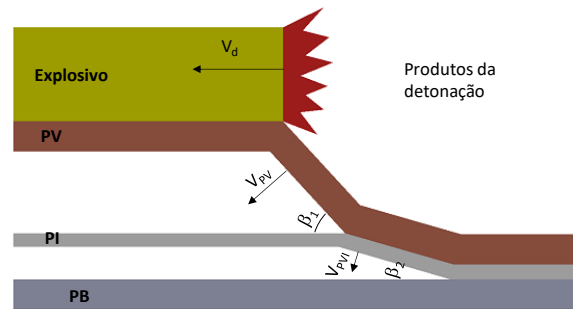


Figura 1. Representação esquemática do processo de soldadura por explosão, com placa intermédia, em configuração plana paralela.

Apesar de existirem poucos trabalhos publicados sobre a soldadura por explosão de alumínio a aço-inoxidável, Guo et al. realizaram com sucesso a ligação de alumínio a aço inoxidável [5]. Mais recentemente, Carvalho et al. [6] executaram uma caracterização mecânica e microestrutural de provetes soldados. No entanto, esta ligação é bastante complexa de realizar e apresenta vários desafios ao nível da formação excessiva de compostos intermetálicos Al/Fe e, consequentemente, da melhoria das propriedades mecânicas. Entretanto, verificou-se que a soldadura por explosão de compósitos de Al-SS é limitada pela colisão de um material de baixa impedância de choque num material de elevada impedância, pelo que é recomendada a utilização de baixas velocidades de detonação, inferiores a 2300m/s, e baixas velocidades de impacto [7]. Paralelamente, esta ligação também é condicionada pela grande diferença na condutividade térmica dos dois materiais Carvalho et al. [6].

Como diminuir a velocidade de detonação de um explosivo abaixo de 2000 m/s é bastante difícil, uma forma para reduzir a energia cinética da PV é utilizar uma placa intermédia. Nesse sentido e para ultrapassar algumas destas dificuldades, Hokamoto et al. [8] foram dos primeiros a utilizar uma placa intermédia de aço inoxidável entre a PV e a PB, para melhorar as propriedades mecânicas do compósito

Relativamente à soldadura por explosão de Al a aço inoxidável, Aceves et al. [9], utilizaram duas placas intermédias uma de alumínio e outra de cobre, titânio ou tântalo. A soldadura por explosão foi realizada em dois ensaios de detonação. De acordo com os autores, a ligação com maior resistência foi a que utilizou titânio, enquanto a soldadura que continha uma placa intermédia de tântalo apresentou a maior ductilidade e a soldadura que continha uma placa intermédia de cobre apresentou os piores resultados devido à formação de intermetálicos na interface. Carvalho et al. [10] [11] também estudaram a ligação alumínio-aço inoxidável, utilizando uma placa intermédia de alumínio, e estudou, mais tarde, a soldadura por explosão de alumínio-aço inoxidável utilizando uma placa intermédia de aço carbono ou de nióbio [12].

Neste trabalho, foi estudada e a influência da utilização de uma PI de titânio na redução da energia cinética da placa voadora no momento da colisão, e o efeito desta situação na microestrutura e no comportamento mecânico das peças produzidas por soldadura por explosão. O presente resultado foi comparado com os ensaios onde foi utilizada uma placa intermédia de alumínio ou aço carbono.

Foram realizadas diferentes séries de soldaduras com e sem placa intermédia e testando diferentes parâmetros de soldadura. As propriedades mecânicas e microestruturais foram avaliadas através de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varrimento (MEV), espectroscopia por dispersão de energia (EDE), microdureza e ensaios de tração-corte com análise por correlação digital de imagem.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais metálicos e métodos

As soldaduras por explosão de uma PV de alumínio AA6082-T6 a uma PB de aço inoxidável AISI 304, ambas com 3 mm de espessura, utilizando uma PI, com 1 mm de espessura, de alumínio, aço carbono, ou nióbio foram realizadas com os materiais apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Densidade e dureza dos materiais utilizados.

Material	Densidade (kg/m ³)	Dureza HV0.2
AA6082-T6 Alumínio	2710	114
AA1050 Alumínio	2700	38
Ti6Al4V - Titânio	4420	376
DC05 - Aço baixo carbono	7870	87
AISI 304 - Aço inoxidável	7930	180

Fonte: elaboração própria

As soldaduras de revestimento da placa base com a placa voadora foram realizadas numa configuração plana e paralela, com as dimensões de 70 x 250 mm, conforme é apresentado esquematicamente na figura 1. As soldaduras foram realizadas com os mesmos parâmetros. O explosivos utilizados foram o ANFO e a emulsão explosiva.

A identificação das amostras é feita de acordo com os materiais utilizados na placa voadora-intermédia-base. Por exemplo, Al-DC05-AISI304 significa placa voadora: alumínio; placa intermédia: aço carbono; placa base: aço inoxidável. As condições dos ensaios são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições dos ensaios realizados.

	Al-Al-AISI304	Al-Ti-AISI304	Al-DC05-AISI304
PV	AA6082	AA6082	AA6082
PI	AA1050	Ti6Al4V	DC05
PB	AISI 304	AISI 304	AISI 304
Distância PV-PI (mm)	4.5	4.5	4.5
Distância PI-PB (mm)	1.5	1.5	1.5

Fonte: elaboração própria

Os provetes para análise foram retirados na direção de propagação da velocidade de detonação. A análise microscópica foi realizada com o microscópio ótico Leica DM4000M LED. As análises por MEV e EDE foram realizadas com o microscópio eletrônico de varrimento Zeiss Merlin VP *compact field emission*.

A caracterização mecânica das ligações foi realizada através de ensaios de tração-corte em condições quase-estáticas (1mm/min), utilizando a máquina universal 100 kN Shimadzu AGS-X; a geometria dos provetes foi idêntica às do trabalho de Athar and Tolaminejad's [13] e foram testados três provetes para cada soldadura. A determinação dos mapas de deformação local dos provetes foi realizada por correlação digital de imagem com o sistema GOM Aramis 5M.

Os ensaios de microdureza foram realizados com o equipamento HVM-G Shimadzu tester.

2.2. Composição do explosivo

O explosivo utilizado nos ensaios realizados foi baseado em nitrato de amônio. Tratando-se de um explosivo fortemente não ideal, a sua velocidade de detonação, V_d , é função da espessura da carga de explosivo. Por este motivo, a medida da velocidade de detonação, que é igual à velocidade do ponto de colisão, foi realizada em todos os ensaios, de acordo com a metodologia apresentada por [14], [15].

3. Resultados

3.1. Parâmetros de colisão

Um parâmetro importante na análise do tipo de interface obtida é a velocidade de impacto. Nas soldaduras com uma placa intermédia, devem ser calculados dois valores de velocidade - V_{PV} e V_{PVI} . A velocidade de impacto da placa voadora - V_{PV} - na placa intermédia foi determinada pela equação de Gurney (eq. 1) [16]. Esta equação apenas indica o valor da velocidade terminal da PV, pelo que a aproximação do valor real ao valor determinado com a eq. 1 depende da distância entre PV e PI.

$$V_{PV} = \sqrt{2E} \cdot \left(\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{eq.1})$$

R é a razão de explosivo e $\sqrt{2E}$ é a velocidade característica de Gurney. De acordo com os cálculos

realizados, com base nos ensaios apresentados no trabalho [17], propõe-se $\sqrt{2E} = D/2.78 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ para explosivos não ideais baseados em nitrato de amônio. A velocidade de impacto V_{PVI} do conjunto PV e PI na placa base é determinada através da conservação de momento e um choque perfeitamente inelástico (eq. 2), onde m_{PV} e m_{PI} são respetivamente a massa da PV e a massa da PI (kg).

$$V_{PVI} = \frac{m_{PV} \cdot V_{PV}}{m_{PV} + m_{PI}} \quad (\text{eq. 2})$$

A Tabela 3 mostra a velocidade de detonação em cada ensaio medida de acordo com o método apresentado por Mendes et al. [15], as velocidades de impacto da PV e do conjunto PV e PI e o resultado das soldaduras obtidas. Em todos os ensaios onde foi usada uma placa intermédia o resultado da soldadura foi consistente.

Tabela 3. Velocidades de detonação, velocidades de impacto e resultado da soldadura.

Soldadura	D (m/s)	V_{PV} (m/s)	V_{PVI} (m/s)	Resultado
Al-Al-AISI304	2055	357	268	consistente
Al-Ti- AISI304	2240	749	481	consistente
Al-DC05- AISI304	1860	606	311	consistente

Fonte: elaboração própria

A energia cinética da PV por unidade de área Ke_{PV} (MJ/m²) é determinada pela eq.3

$$Ke_{PV} = (e_{PV} \cdot \rho_{PV}) V_{PV}^2 \quad (\text{eq. 3})$$

Tabela 4. Energia cinética na PI, na PB e resultado da soldadura.

Soldadura	Ke_{PV} (MJ/m ²)	Ke_{PVI} (MJ/m ²)	Resultado
Al-Al-AISI304	2.55	1.92	consistente
Al-Ti- AISI304	4.40	2.85	consistente
Al-DC05- AISI304	2.59	1.31	consistente

Fonte: elaboração própria

A energia cinética do conjunto formado pela placa voadora e intermédia Ke_{PVI} é determinada pela eq.4.

$$Ke_{PVI} = [(e_{PV} \cdot \rho_{PV}) + (e_{PI} \cdot \rho_{PI})] V_{PVI}^2 \quad (\text{eq. 4})$$

onde e_{PV} e e_{PVI} são a espessura da placa voadora e da placa intermédia. A Tabela 4 mostra a energia cinética durante o processo de impacto da PV e do conjunto PV e PI, determinada com as eqs. 3 e 4, respetivamente.

3.2. Comportamento mecânico das soldaduras

A Figura 2 a) apresenta o mapa de deformação local de um provete Al-Ti-AISI304, obtido por correlação digital de imagem, e uma fotografia da localização da rotura do provete após o ensaio de tração-corte. Um resultado tipo do ensaio de tração-corte é apresentado para a soldadura Al-Ti-AISI304 na Figura 2 b).

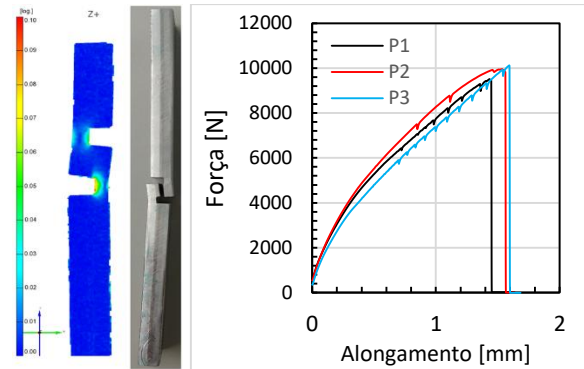


Figura 2. a) Mapa de deformação e rotura de um provete Al-Ti-AISI304. b) Curvas força-alongamento obtidas para os provetes Al-Ti-AISI304.

Os resultados dos ensaios de tração-corte para os provetes utilizando várias PI estão representados na Tabela 5. Como foram testados três provetes para cada série, a Tabela 5. mostra o valor mínimo e o máximo, a zona onde ocorreu a fratura e o tipo de fratura.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de tração-corte.

Soldadura	Força máxima [kN]	Região de fratura	Fratura
Al-AISI304	0	*	*
Al-Al-AISI304	5.8 - 6.0	através da interface	dúctil
Al-Ti-AISI304	9.6 - 10.1	interface Al-Ti	frágil
Al-DC05- AISI304	11.4	fora da interface, Al	dúctil

*separação dos materiais durante a preparação dos provetes [10].

Fonte: elaboração própria

A soldadura direta Al-AISI304, produzida com ANFO [10], apresentou consistência após o ensaio de soldadura, no entanto, durante a preparação dos provetes para os ensaios de tração-corte, o desenvolvimento e propagação de uma fenda ao longo da interface levou à separação dos materiais. Observando a Tabela 5, verifica-se que a utilização de uma placa intermédia tem um efeito positivo no comportamento mecânico da soldadura Al-AISI304. A placa intermédia que apresentou melhor desempenho foi o aço DC05, com a fratura a ocorrer fora da interface, concretamente, no alumínio 6082, apresentando morfologia indicativa de fratura dúctil.

Este resultado mostrou que a ligação apresentou uma resistência superior à do material da placa voadora. O provete com a placa intermédia de titânio apresentou um resultado de carga máxima ligeiramente inferior à da placa de DC05. A fratura ocorreu na interface AA6082-Ti e apresentou morfologia indicativa de fratura frágil. A placa intermédia que apresentou pior resultado foi a de AA1050. A carga máxima suportada pelo provete AA6082-AA1050-AISI304 foi aproximadamente 50% inferior à da placa de aço DC05. Neste caso, a fratura ocorreu na placa intermédia AA1050 após uma deformação elevada, que é devida à baixa resistência e elevada ductilidade do AA1050, quando comparado com o material das outras placas intermédias.

3.3. Análise microscópica da interface da soldadura

Após determinação da carga máxima e do comportamento mecânico dos provetes é essencial observar algumas características microestruturais que podem ser responsáveis pelos resultados obtidos. Apesar de ter sido possível ligar diretamente AA6082-AISI304, esta ligação não permitiu transferência de carga [6]. Nos diversos ensaios, mantendo a velocidade do ponto de colisão similar, a introdução da placa intermédia de AA1050, permitiu reduzir a velocidade da placa voadora em cerca de 25% e obter uma soldadura com capacidade de transferência de carga. Na Figura 3, é apresentada a macrografia relativa à soldadura Al-Al-AISI304. Na parte superior desta figura e na Figura 4a), é visível a interface Al-Al, onde surgem ondas bem definidas com um comprimento de onda médio de 285 μm e uma amplitude média de 104 μm , sem a formação de vórtices. Na parte inferior da Figura 3 e na Figura 4 b), é visível a interface Al-AISI304 sem a formação de qualquer onda. Esta interface é plana e, em determinadas zonas, apresenta a formação de compostos intermetálicos.

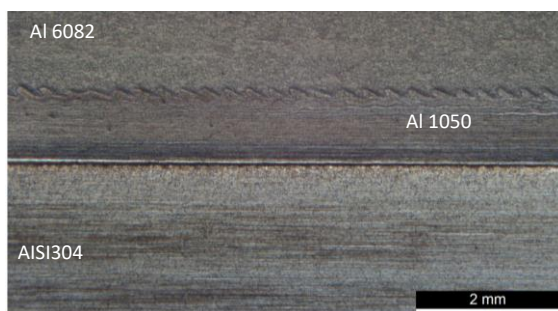


Figura 3. Macrografia das interfaces da soldadura Al-Al-AISI304.

As diversas morfologias da interface entre os materiais têm sido avaliadas de diversos pontos de vista, uma vez que estas podem ser relacionadas com a velocidade do ponto de colisão, razão de explosivo, propriedades da placa voadora, placa intermédia e placa base.

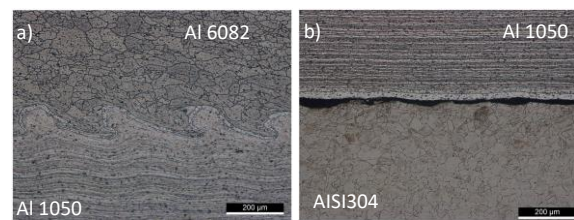


Figura 4. Micrografias das interfaces: a) Al-Al e b) Al-AISI304.

A Figura 6 apresenta a morfologia das interfaces do provete Al-Ti-AISI304 cortado no sentido da propagação da onda de detonação. Na Figura 6 a) está representada a interface da ligação Al-Ti e na Figura 6 b) está representada a interface da ligação Ti-AISI304.

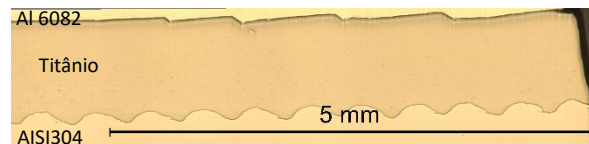


Figura 5. Macrografia das interfaces da soldadura Al-Ti-AISI304.

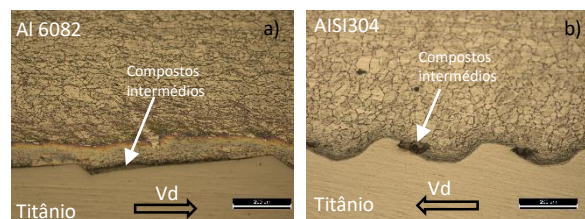


Figura 6. Micrografias das interfaces: a) Al-Ti, b) Ti-AISI304.

A interface de Al-Ti não tem uma onda bem definida e apresenta uma interface triangular cujo comprimento de onda não é bem definido e uma amplitude de 65 μm . A interface titânio-AISI 304 apresenta a formação de ondas convencionais bastante definidas com um comprimento de onda médio de 378 μm e uma amplitude de 84.7 μm .

Na interface Al-Ti da amostra da Figura 6 a), existe uma banda não contínua de compostos intermetálicos, enquanto, na interface da ligação Ti-AISI304, Figura 6 b), os compostos intermetálicos formados concentram-se em bolsas. A formação mais acentuada de compostos intermetálicos nas interfaces entre o alumínio e o titânio está relacionada com o facto de o ponto de fusão do alumínio ser o mais baixo dos três materiais utilizados e ser a interface sujeita a maior energia cinética. Pontos de fusão mais baixos facilitam o surgimento de maiores volumes de material fundido na interface. A Figura 7 apresenta duas micrografias MEV relativas à secção longitudinal das interfaces Ti-AISI 304 e Al-Ti.

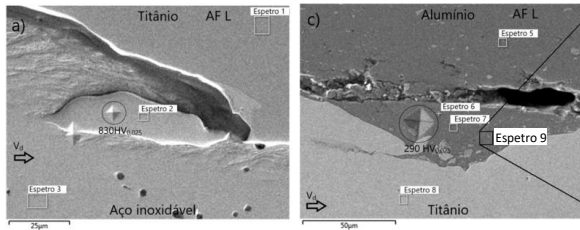


Figura 7. Micrografias MEV das interfaces Al-Ti e Ti-AISI304.

Nas micrografias são observados compostos intermetálicos onde se encontram poros e fissuras. Na Figura 7, também está indicada a dureza em dois pontos. Notoriamente, na interface Ti-AISI304, surge uma zona com uma dureza muito elevada (830 HV_{0,025}) relativamente à dureza dos materiais base.

Através de análise EDE feita em zonas das interfaces das soldaduras com formação de fases intermetálicas, foi observado que, na interface Al-Ti (espectro 9), estas regiões são constituídas principalmente por 74,5 At% de alumínio e 25,5 At% de titânio. Segundo o diagrama de fases, estas percentagens correspondem a uma área do diagrama onde existem as fases TiAl, TiAl₂ e TiAl₃, ou seja, pontualmente, pode ter havido a formação de fases intermetálicas numa matriz de alumínio. A dureza correspondente à indentação realizada na interface Al-Ti apresenta um valor de 290 HV_{0,025}, mas como a indentação foi feita num material constituído maioritariamente por alumínio, este valor de dureza pode não corresponder à dureza dos intermetálicos. No que diz respeito à interface Ti-AISI304, a análise EDE indica que o material intermédio presente tem 58,7 At% de ferro e 12,3 At% de Ti, e segundo o diagrama de fases estas percentagens correspondem a uma área do diagrama com as fases TiFe e TiFe₂ e que, de acordo com Zhang Yan et al. [18], apresentam durezas de 1000HV e 600HV respetivamente. A dureza medida na zona do espectro 2 foi de 830 HV_{0,025}, a qual está entre os dois valores. No processo de soldadura por explosão a temperatura local diminui com uma taxa muito elevada, pelo que é possível que se formem compostos metaestáveis.

Na Figura 8, é apresentada a macrografia para a soldadura Al-DC05-AISI304. Na parte superior, é visível a interface Al-DC05 onde surgem ondas de pequena amplitude e com formação de vórtices. No interior dos vórtices, observa-se a formação de compostos intermetálicos com algumas fissuras e poros, os quais são bem visíveis na Figura 9. A ocorrência de fissuras neste compostos indica que se está na presença de compostos frágeis. Na parte inferior da Figura 8, é visível a formação de ondas convencionais na interface DC05-AISI304.

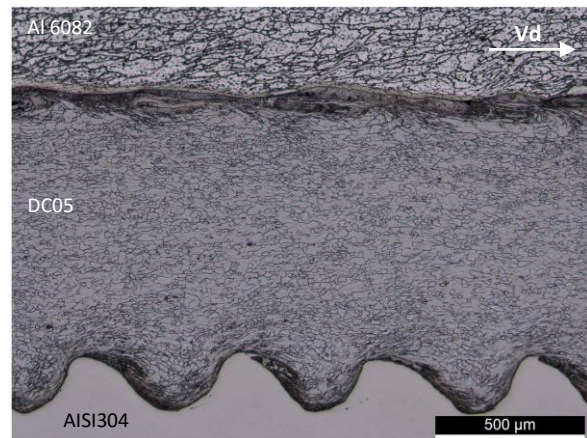


Figura 8. Macrografia da interface da soldadura Al-DC05-AISI304.

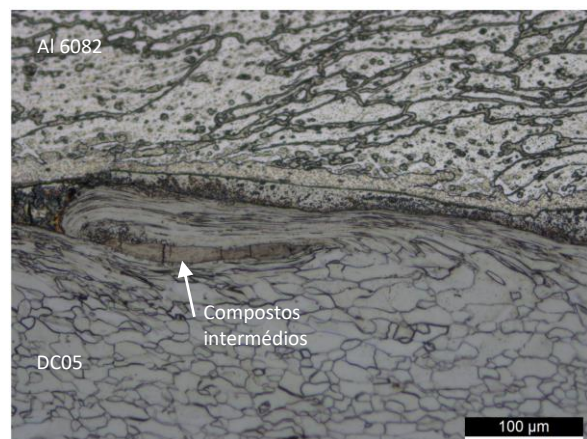


Figura 9. Micrografia da interface Al-DC05.

Os resultados EDE das bolsas de material (vd. Figura 9) comprovam que estas são compostas por fases intermetálicas do tipo Al_xFe_y, conforme foi apresentado e discutido por Carvalho et. al. [10][11].

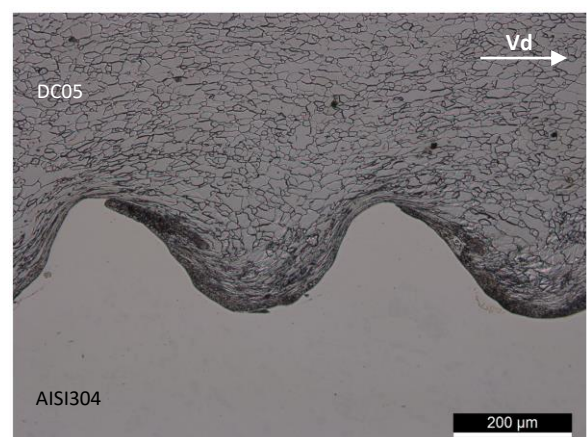


Figura 10. Micrografia da interface DC05-AISI304.

A Figura 10 ilustra a interface DC05/AISI 304, evidenciando a formação de ondas bem definidas com

um comprimento de onda médio de 490 μm e uma amplitude média de 190 μm . Esta morfologia de ondas é bem distinta da correspondente à interface superior desta soldadura, onde se observou uma morfologia "enrolada". A diferença na morfologia das ondas formadas em ambas as interfaces está relacionada com as propriedades físicas de cada par de materiais.

Na soldadura é importante levar as superfícies a um nível de interação atômica para unir os materiais, e essa interação na soldadura por explosão, é conseguida localmente através de geração pressão calor, e deformação plástica, o que está de acordo com Crossland (1982) [19] que afirmou que o impacto entre as placas origina a formação de um jato metálico entre as superfícies que limpa as superfícies a ligar promovendo uma ligação interatômica. Também El-Sobky (1983) [20] afirmou que a interação atômica durante o impacto resulta numa ligação interatômica/metalúrgica na interface. Por esta razão, verifica-se que o aparecimento de ondas nas duas interfaces melhora significativamente o comportamento mecânico em relação a soldaduras onde uma das interfaces apresenta um perfil plano ou praticamente plano.

3.4. Dureza na interface

A Figura 11 apresenta a microdureza local ($\text{HV}_{0.2}$) dos três ensaios medida ao longo da interface de ligação e é feita a comparação com dureza inicial dos materiais. Nesta figura, podemos observar que, após o processo de colisão, a dureza da placa voadora (AA6082) aumentou, ligeiramente. A placa intermédia apresenta uma dureza idêntica à do material base, com exceção da PI DC05 que apresentou um ligeiro endurecimento.

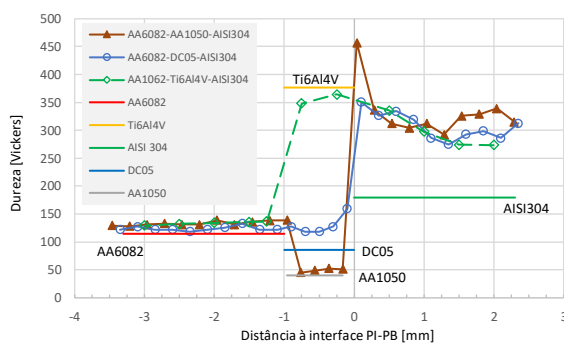


Figura 11. Perfis de microdureza ($\text{HV}_{0.2}$).

A grande alteração verificou-se no material da placa base que apesar de apresentar um comportamento idêntico nos três ensaios mostra uma dureza muito elevada, em relação à dureza inicial do AISI304. Estes resultados são típicos do processo de soldadura por explosão e são consequência da elevada deformação plástica gerada pelo processo de impacto. O maior aumento de dureza do AISI304 é atribuído ao endurecimento por deformação plástica, que é um

mecanismo de endurecimento efetivo para este tipo de aço.

Estes resultados evidenciam que, nas condições testadas, o impacto de uma placa de AA1068 num material de maior dureza não permite a obtenção de ondas convencionais ou com vórtices. Observa-se que só no caso da colisão da placa de alumínio numa placa de AA1050 ou numa placa de Aço DC05, materiais de menor dureza, é que surgiram ondas enroladas com vórtices ou convencionais, respetivamente. Portanto, para além de outros factores que condicionam a ligação de uma placa de alumínio com a placa de AISI 304, como por exemplo a relação de impedâncias de choque, ou a formação excessiva de intermetálicos, a dureza da placa base, também, deve ser um fator a considerar.

4. Conclusões

Neste trabalho foi estudada a influência da utilização de uma placa intermédia para ligar AA6082 a AISI304, por soldadura por explosão.

-A utilização de uma placa intermédia de AA1050 melhorou as propriedades mecânicas da soldadura de AA6082 a AISI304, no entanto, a resistência da soldadura está limitada pela resistência da placa intermédia.

- Na soldadura onde foi colocada uma PI de DC05 observou-se ondas em ambas as interfaces e apresentou o melhor comportamento mecânico. Nos ensaios de tração-deformação, a fratura ocorreu sempre fora da zona de interface, e no material mais fraco.

- A utilização de uma PI de titânio conduziu à formação de ondas apenas numa interface e apresentou um comportamento mecânico ligeiramente inferior à da PI de DC05. Em virtude do custo elevado do titânio é conveniente utilizar uma placa de aço carbono para obter uma soldadura por explosão de AA6082 a AISI304 consistente.

A colisão da placa de alumínio AA6082 (placa voadora) na placa base ou na placa intermédia só gerou ondas enroladas com vórtices ou convencionais quando a sua dureza é superior à dureza da placa em repouso.

5. Agradecimentos

Esta investigação teve o apoio do FEDER pelo programa COMPETE - Programa Operacional Factores de Competitividade - e de fundos nacionais pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através o projeto UIDB/00285/2020 e do projecto UIDB/50022/2020. Os autores, também, agradecem o apoio do projecto de emprego altamente qualificado nas empresas ou em COLABS - Contratação de Recursos Humanos Altamente Qualificados (PME ou CoLAB) - RH - 2020: CENTRO-04-3559-FSE-000144.

6. Referências

- [1] Y. Kaya, “Microstructural, Mechanical and Corrosion Investigations of Ship Steel-Aluminum Bimetal Composites Produced by Explosive Welding,” *Met.* 2018, Vol. 8, Page 544, vol. 8, no. 7, p. 544, Jul. 2018.
- [2] L. Tricarico, R. Spina, D. Sorgente, and M. Brandizzi, “Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 7, pp. 2693–2700, Aug. 2009.
- [3] H. Aghajani Derazkola and F. Khodabakhshi, “Intermetallic compounds (IMCs) formation during dissimilar friction-stir welding of AA5005 aluminum alloy to St-52 steel: numerical modeling and experimental study,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018 1009, vol. 100, no. 9, pp. 2401–2422, Oct. 2018.
- [4] R. Mendes, J. Ribeiro, I. Plaksin, J. Campos, and B. Tavares, “Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric micro-balloons,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 500, no. 5, pp. 2–8, 2014.
- [5] X. Guo, M. Fan, L. Wang, and F. Ma, “Bonding Interface and Bending Deformation of Al/316LSS Clad Metal Prepared by Explosive Welding,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 25, no. 6, pp. 2157–2163, Jun. 2016.
- [6] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Explosive welding of aluminium to stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 262, pp. 340–349, Dec. 2018.
- [7] A. L. R. Mendes, G. Sena, J. Ribeiro, A. Campos, “Explosive welding of metal/Al and process limitations,” in *Explosive Production of new Materials: Science, Technology, Business, and Innovations*, 2018, pp. 140–143.
- [8] K. Hokamoto, T. Izuma, and M. Fujita, “New Explosive Welding Technique to Weld Aluminum Alloy and Stainless Steel Plates Using a Stainless Steel Intermediate Plate,” *Metall. Mater. Trans. A* 1993 2410, vol. 24, no. 10, pp. 2289–2297, Oct. 1993.
- [9] S. M. Aceves, F. Espinosa-Loza, J. W. Elmer, and R. Huber, “Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 1490–1503, Jan. 2015.
- [10] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Microstructure and mechanical behaviour of aluminium-carbon steel and aluminium-stainless steel clads produced with an aluminium interlayer,” *Mater. Charact.*, vol. 155, p. 109819, Sep. 2019.
- [11] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Aluminum-to-Steel Cladding by Explosive Welding,” *Met.* 2020, Vol. 10, Page 1062, vol. 10, no. 8, p. 1062, Aug. 2020.
- [12] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 283, p. 116707, Sep. 2020.
- [13] M. M. Hoseini Athar and B. Tolaminejad, “Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 516–525, Dec. 2015.
- [14] R. Mendes, J. B. Ribeiro, I. Plaksin, and J. Campos, “Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal particles,” in *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1426, no. 1, pp. 267–270.
- [15] R. Mendes, J. B. Ribeiro, and A. Loureiro, “Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration,” *Mater. Des.*, vol. 51, 2013.
- [16] J. E. Kennedy, “Gurney energy of explosives: estimation of the velocity and impulse imparted to driven metal,” 1970.
- [17] M. Kunzel, O. Nemec, and J. Pachman, “Terminal wall velocities of emulsion explosive charges,” in *39th International Pyrotechnics Seminar*, 2013, pp. 1–4.
- [18] Y. Zhang, D. Q. Sun, X. Y. Gu, and H. M. Li, “Microstructure and Mechanical Property Improvement in Laser-Welded TC4 Titanium Alloy and 301L Stainless Steel Joints Without Filler Metal,” *J. Mater. Eng. Perform.* 2018 281, vol. 28, no. 1, pp. 140–153, Nov. 2018.
- [19] B. Crossland, *Explosive Welding of Metals and its Application*, 1st ed. New York, USA: Oxford University Press, 1982.
- [20] H. El-Sobky, “Mechanics of Explosive Welding,” *Explos. Welding, Form. Compact.*, pp. 189–217, 1983.