



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Miguel Bárbara Santos

**SOLDADURA POR EXPLOSÃO ENTRE COBRE E
AÇO INOXIDÁVEL
INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção
e Projeto**

Outubro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Soldadura por explosão entre cobre e aço inoxidável: influência das propriedades físicas

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

Explosive welding between copper and stainless steel: physical properties influence

Autor

Miguel Bárbara Santos

Orientadores

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal

Júri

Presidente	Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Lisboa
Orientador	Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, outubro, 2020

Agradecimentos

O apoio e cooperação de certas pessoas e entidades foi fundamental para a realização deste trabalho. Assim sendo, gostaria de manifestar os meus imensos agradecimentos:

Ao professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal pela total disponibilidade, contagiante estado de espírito e críticas fundamentais ao progresso do trabalho.

Ao professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão pelo auxílio e apoio prestado, vital para a iniciação da investigação.

Ao professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes pela sua ajuda e disponibilidade na realização dos ensaios de soldadura, bem como todos os conhecimentos transmitidos.

Ao LEDAP, CEMMPRE e IPN pela disponibilização das infraestruturas essenciais à realização das soldaduras e análise das mesmas, respetivamente.

À professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira pela disponibilização do *template* que em muito facilitou a escrita deste documento e posterior ajuda na formatação do mesmo.

Aos meus fiéis amigos que me proporcionaram uma jornada indescritível ao longo do percurso académico.

Por último, um profundo e sentido agradecimento à minha família que garantiu todo o apoio e suporte necessário em todos estes anos.

Resumo

O foco primordial deste trabalho foi a análise da ligação entre o cobre e o aço inoxidável usando o método de soldadura por explosão. Com o propósito de entender melhor a influência das propriedades físicas, foram realizadas análises no âmbito macroscópico, microestrutural, químico e mecânico.

Foram elaborados dois ensaios com os mesmos parâmetros de soldadura. Um com a projeção do cobre no aço inoxidável e outro com a configuração inversa, ou seja, uma configuração com aço inoxidável como placa voadora e o cobre como placa estacionária. Com uma distância entre placas de 1,5 vezes a espessura da placa voadora, fazendo uso de uma configuração paralela e, tal como comprovaram as janelas de soldabilidade, os resultados experimentais foram claramente satisfatórios.

A análise das interfaces de impacto revelou ondas de soldadura consistentes e bem definidas nas amostras longitudinais, o que evidencia a qualidade das soldaduras. Do mesmo modo, os ensaios mecânicos validam a resistência das soldaduras revelando fraturas essencialmente dúcteis. Contrariamente ao que costuma ser verificado nas soldaduras de materiais dissimilares, nesta configuração não houve indícios da presença de compostos intermetálicos, apenas zonas pontuais cuja composição engloba os elementos constituintes de cada material base, conforme a análise efetuada por EDS. Por fim, o aço inoxidável exibiu um elevado aumento de dureza, confirmando assim o teórico mecanismo de endurecimento dos aços por deformação plástica, ao passo que no cobre a dureza manteve-se praticamente igual.

Palavras-chave: cobre, aço inoxidável, soldadura por explosão, janelas de soldabilidade, ondas de soldadura, fraturas dúcteis.

Abstract

The main focus of this work was the explosive welded copper-stainless steel bonding analysis. Macroscopic, microstructural, chemical and mechanical analysis were performed in order to understand better the physical properties influence.

Two tests were made with the same welding parameters. One with the copper projection on the stainless steel and the other one with the inverse configuration, the stainless steel as flyer and copper as base plate. The final results were really good, as shown by the weldability windows, using a parallel configuration and a stand-off distance established on 1.5 times flyer's thickness.

The impact surface's observation indicated consistent and well defined welding waves which testifies the bonding quality. Accordingly, mechanical tests authenticate the weld's resistance revealing ductile fractures. On the contrary to what is usual to see in this welding types, there was no evidence of intermetallic compounds, only specific melted regions whose composition includes base material's elements, as shown by EDS analysis. Lastly, the stainless steel showed a hardness increase, which proves the steel's characteristic hardening mechanism by plastic deformation, whilst copper remained pretty much the same.

Keywords Explosive welded, copper-stainless steel, welding waves, ductile fractures, melted regions.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xiv
Simbologia.....	xiv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DE ARTE.....	2
2.1. Enquadramento histórico	2
2.2. Noções do processo	3
2.2.1. Vantagens e desvantagens	5
2.2.2. Aplicações	6
2.2.3. Configurações de soldadura	6
2.3. Interface da soldadura	8
2.3.1. Mecanismos de formação de onda.....	9
2.4. Seleção dos parâmetros.....	13
2.4.1. Explosivo	13
2.4.2. Rácio de explosivo	13
2.4.3. <i>Stand-off distance</i>	15
2.5. Janela de soldabilidade	16
2.5.1. Limite esquerdo	16
2.5.2. Limite inferior	17
2.5.3. Limite superior	18
2.5.4. Limite direito	19
2.6. Soldadura por explosão entre cobre e aço inoxidável.....	19

2.6.1.	Morfologia da interface da ligação cobre-aço inoxidável	19
2.6.2.	Morfologia da interface da ligação cobre-aço	22
2.6.3.	Perfil de dureza da ligação cobre-aço inoxidável.....	25
2.6.4.	Perfil de dureza da ligação cobre-aço.....	26
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
3.1.	Materiais e equipamentos utilizados.....	28
3.2.	Nomenclatura dos ensaios	29
3.3.	Montagem experimental	29
3.4.	Cálculo da velocidade de detonação	30
3.5.	Cálculo da velocidade de projeção	31
3.6.	Parâmetros de soldadura	32
3.7.	Ensaio metalográficos	33
3.7.1.	Preparação das amostras	33
3.7.2.	Ataque químico	34
3.7.3.	Análise química	34
3.8.	Ensaio mecânicos	34
3.8.1.	Microdureza.....	34
3.8.2.	Ensaio de tração ao corte	35
4.	Resultados e discussão	36
4.1.	Análise dos materiais base	36
4.2.	Enquadramento dos ensaios e construção das janelas de soldabilidade	37
4.2.1.	Velocidade de detonação	37
4.2.2.	Velocidade de projeção	38
4.2.3.	Ângulo de colisão	38
4.2.4.	Janela de soldabilidade	39
4.3.	Análise macroscópica	40
4.4.	Análise das interfaces	41
4.4.1.	EW57.....	41
4.4.2.	EW58.....	45
4.5.	Perfis de microdureza	48

4.5.1. EW57	48
4.5.2. EW58	49
4.5.3. Discussão de resultados	50
4.6. Ensaio de tração/corte	51
5. Conclusões.....	54
5.1. Trabalhos futuros	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
Apêndice A	60
Apêndice B	61
Apêndice C	63
Apêndice D	64
Apêndice E	65
Apêndice F.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão, adaptada de Blazynsky [6].	4
Figura 2.2. Representação esquemática da deformação e impacto da placa voadora aquando da detonação, adaptada de [10].	5
Figura 2.3. Representação esquemática de uma configuração inclinada, adaptada de Carpenter [1].	7
Figura 2.4. Representação esquemática de uma configuração cilíndrica: a) explosivo interior, adaptada de Sun <i>et al.</i> [11]; b) explosivo exterior, adaptada de Mendes <i>et al.</i> [12].	7
Figura 2.5. Representação esquemática de uma configuração paralela com uso de placa intermédia, adaptada de Han <i>et al.</i> [14].	8
Figura 2.6. Morfologia da interface de uma soldadura Níquel-Níquel variando a velocidade de detonação: a) plana com $Vd = 1365m/s$; b) ondulada com $Vd = 1790m/s$, adaptada de Cowan <i>et al.</i> [16].	9
Figura 2.7. Mecanismo de formação de onda, adaptada de Bahrani <i>et al.</i> [20].	10
Figura 2.8. Mecanismo de fluxo instável: a) Interface de soldadura Cobre-Aço inoxidável; b) Instabilidade de Kelvin-Helmholtz num escoamento de água, adaptada de Carton [21].	11
Figura 2.9. Mecanismo de formação de vórtices: a) Interface de soldadura Cobre-Aço inoxidável; b) Vórtice de von Kármán, adaptada de Carton [21].	12
Figura 2.10. Mecanismo de rarefação de onda, adaptada de Carton [21].	12
Figura 2.11. Influência do rácio de explosivo na interface em soldaduras Cobre-Aço inoxidável: a) $R = 1,5$; b) $R = 2,5$; Adaptada de Durgutlu <i>et al.</i> [18]	14

Figura 2.12. Influência da STD na interface de soldadura Cobre-Aço inoxidável: a) STD=0,5h; b) STD=h; c) STD=2h; d) STD=3h; Adaptada de Durtuglu <i>et al.</i> [28]	15
Figura 2.13. Janela de soldabilidade e respetivos limites, adaptada de Blazynsky [6]	16
Figura 2.14. Interface da soldadura Cobre-Aço inoxidável, adaptada de Bina <i>et al.</i> [8]	20
Figura 2.15. Diagrama de fase Fe-Cu, adaptada de Lindqvist e Uhrenius [34]	21
Figura 2.16. Micrografia num plano longitudinal da interface Cu-SS, adaptada de [35]	21
Figura 2.17. Micrografia num plano transversal da interface CuA115-316L SS, adaptada de Leedy e Stubbins [36].....	22
Figura 2.18. Análise SEM da interface Cobre-Aço com diferentes escalas: a) 500 µm; b) 50 µm, adaptada de Zhang <i>et al.</i> [17].....	23
Figura 2.19. Zonas mistas com fragmentos de Fe na interface Cobre-Aço, adaptada de Gladkovsky <i>et al.</i> [26]	23
Figura 2.20. Análise SEM da interface Cu-Fe, adaptada de Zhang <i>et al.</i> [15].....	24
Figura 2.21. Micrografia ampliada da interface Cu-Fe com camada de transição, adaptada de Zhang <i>et al.</i> [15]	24
Figura 2.22. Valores de microdureza para diferentes STD, adaptada de Durtuglu <i>et al.</i> [28]	25
Figura 2.23. Valores de microdureza para diferentes STD, adaptada de Durtuglu <i>et al.</i> [28]	27
Figura 3.1. Montagem final para a soldadura EW58.....	30
Figura 3.2. Cronómetros para medição da velocidade de detonação.	31
Figura 4.1. Microestrutura dos materiais base: a) Cu-DHP adaptada de Loureiro <i>et al.</i> [39]; b) AISI 304. adaptada de Machado [40].....	36
Figura 4.2. Janela de Soldabilidade: a) EW57 (Cu-DHP placa voadora e AISI 304 placa estacionária); b) EW58 (AISI304 placa voadora e Cu-DHP placa estacionária)..	39

Figura 4.3. Ensaio EW57: a) Vista de topo; b) Vista frontal.	41
Figura 4.4. Ensaio EW58: a) Vista de topo; b) Vista frontal.	41
Figura 4.5. Microestrutura da amostra transversal do ensaio EW57: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.	42
Figura 4.6. Microestrutura da amostra longitudinal do ensaio EW57: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.	43
Figura 4.7. Microestrutura da amostra transversal do ensaio EW57 com uma escala de 3000 μm	43
Figura 4.8. Análise SEM e EDS da amostra EW57_L: a) Micografia da interface; b) Composição do espectro 27.	44
Figura 4.9. Análise SEM e EDS da amostra EW57_L: a) Micografia da interface; b) Composição do espectro 30 e 31.	44
Figura 4.10. Microestrutura da amostra transversal do ensaio EW58: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.	45
Figura 4.11. Microestrutura da amostra longitudinal do ensaio EW58: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.	46
Figura 4.12. Microestrutura da amostra longitudinal do ensaio EW58 com uma escala de 4000 μm	46
Figura 4.13. Análise SEM e EDS da amostra EW58_L: a) Micografia da interface; b) Composição do espectro 34.	47
Figura 4.14. Análise SEM e EDS da amostra EW58_L: a) Micografia da interface; b) Composição do espectro 38 e 39.	47
Figura 4.15. Perfis de microdureza de ambas as amostras do ensaio EW57.	48
Figura 4.16. Perfis de microdureza de ambas as amostras do ensaio EW58.	49
Figura 4.17. Curva força-alongamento dos provetes P2 do ensaio EW57 e EW58.	51
Figura 4.18. Mapa de deformações locais dos provetes P2 para: a) EW57; b) EW58.	52

Figura 4.19. Análise SEM à superfície de fratura do provete P2 do ensaio EW57: a)100 μm ; b)10 μm	52
Figura B.1 Caixa usada para ensaios.	61
Figura B.2.Barra de fixação de sondas.	61
Figura C.1 Vista de topo da soldadura EW57.	63
Figura C.2 Vista de topo da soldadura EW58.	63
Figura D.1 Posicionamento das indentações nas medições de microdureza.	64
Figura E.1 Formato dos provetes maquinados.	65
Figura E.2 Vista frontal dos provetes.	65
Figura E.3 Vista de topo dos provetes.	66
Figura F.1 Gráfico de medição da velocidade de detonação do ensaio EW57.	67
Figura F.2 Gráfico de medição da velocidade de detonação do ensaio EW58.	67
Figura F.3 Gráfico de medição da velocidade de detonação do ensaio EW58.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química (%) do aço inoxidável AISI 304 e da liga de cobre Cu-DHP.....	28
Tabela 3.2. Parâmetros usados nas soldaduras.....	33
Tabela 4.1. Cálculo das velocidades de detonação.....	37
Tabela 4.2. Resultados das velocidades de projeção.....	38
Tabela 4.3. Resultados obtidos para o ângulo de colisão.....	38
Tabela 4.4. Parâmetros concluídos das medições de microdureza.....	50
Tabela A.1 Equipamentos utilizados nas várias tarefas.....	60

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

C – Massa do explosivo

C_B – Velocidade do som na placa voadora

C_P – Calor específico

h - Espessura da placa voadora

$HV_{,e}$ – Dureza da placa estacionária

$HV_{,v}$ – Dureza da placa voadora

K – Condutividade térmica

k – Coeficiente adimensional para limpeza das superfícies

M – Massa da placa voadora

N – Constante empírica para o limite superior

R – Rácio de explosivo

Re_T – *Reynolds* de transição

T_M – Temperatura de fusão da placa voadora

V_c – Velocidade do ponto de colisão

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

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

V_d – Velocidade de detonação

V_p – Velocidade de projeção

β – Ângulo de colisão

ρ_e – Densidade da placa estacionária

ρ_v – Densidade da placa voadora

Siglas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ANFO – *Ammonium Nitrate Fuel Oil*

CEMMPRE – Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos

Cu-DHP – *Phosphorus-Deoxidised copper (High residual phosphorus)*

EDS – *Energy dispersive x-ray spectroscopy*

EW – *Explosive Welding*

IPN – Instituto Pedro Nunes

LEDAP – Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio

MDF – *Medium Density Fiberboard*

PETN – *Pentaerythritol tetranitrate*

SEM – *Scanning Electron Microscopy*

STD – *Stand-off Distance*

TNT – Trinitrolueno

1. INTRODUÇÃO

Com o contínuo aumento e progresso da indústria nos dias que correm, a procura de novas soluções e combinações de materiais é incessante. A ligação de materiais dissimilares é assim muito desejada dado que é possível combinar inúmeras propriedades físicas e um dos processos que permite fazê-lo é a soldadura por explosão. Este processo é muito vantajoso uma vez que a ligação dos materiais é executada no estado sólido.

Além da diferença de temperatura de fusão, o aço inoxidável e o cobre apresentam outra propriedade muito diferente, a condutividade térmica, e por isso a soldadura por explosão é um processo além de vantajoso, exequível. A excelente condutividade térmica e boa ductilidade do cobre aliada à elevada resistência à corrosão e mecânica do aço inoxidável, faz com que esta ligação seja muito solicitada na construção de, por exemplo, permutadores de calor.

O intuito deste trabalho incide na obtenção de soldaduras com qualidade a partir da definição prévia dos parâmetros de soldadura e na posterior análise microestrutural e mecânica a fim de confirmar, ou não, a qualidade das soldaduras obtidas.

Assim, o presente estudo encontra-se dividido em 5 segmentos. Primeiramente é feita uma abordagem relativa ao estado de arte, ou seja, de todo o desenvolvimento do processo até aos dias de hoje, dos parâmetros de soldadura e ainda referências de estudos realizados com estes mesmos materiais, aço inoxidável e cobre. No terceiro capítulo é descrito todo o processo experimental, bem como a formulação para a obtenção da velocidade de projeção da placa voadora. O quarto capítulo é reservado para a divulgação de todos os resultados obtidos e é feita uma discussão face aos fenómenos e critérios conhecidos previamente. Por último, o quinto capítulo destaca as principais conclusões retiradas deste trabalho e propõe medidas relativas ao presente tema para investigações futuras.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Enquadramento histórico

Ao invés do que se possa pensar, o processo de soldadura por explosão foi descoberto de maneira fortuita durante a 1ª guerra mundial quando se constatou a união de projeteis acelerados a superfícies metálicas.

Em 1944, num simples ensaio rotineiro de explosivos, L. R. Carl testemunhou a adesão de duas placas metálicas, sendo assim publicado um dos primeiros relatórios mais abrangentes referente ao tema por Carpenter e Wittman [1].

A metodologia da soldadura por explosão foi então patenteada, em primeira instância, por Philipchuck e Bois em 1965 [2], onde foi referenciado que superfícies metálicas podiam ser soldadas utilizando uma carga explosiva como fonte de energia.

Numa perspetiva empreendedora, Holtzman *et al.* [3] e Cowan e Holtzman [4] seguiram os mesmos passos registando, em 1964 e 1966, novas patentes para o processo e a forte produção de materiais com elevada resistência à corrosão sob estas condições começou de imediato, com destaque para a indústria química, tal como comprovado por McKenney e Banker em 1971 [5].

Não tardou muito até o interesse em componentes obtidos através de soldadura por explosão se propagar noutras indústrias. Isto porque eram conseguidas propriedades únicas com materiais bastante díspares ao nível da dureza, coeficiente de expansão térmica e ponto de fusão, algo que não seria alcançável por processos convencionais de fusão segundo Blazynsky em 1983 [6].

Pelas razões referidas acima, torna-se lógico o interesse contínuo de diversas indústrias neste processo sendo a química, naval e nuclear alguns dos exemplos. Nas últimas duas décadas, várias investigações e relatórios publicados têm sido levados a cabo para

inovar o processo de soldadura por explosão, com diferentes parâmetros e materiais a serem testados, afirmando cada vez mais a ampla diversidade e utilidade deste método.

2.2. Noções do processo

O processo de soldadura por explosão é reconhecido pela junção de, pelo menos, dois materiais no estado sólido, recorrendo a uma certa carga explosiva que conseqüentemente provoca o impacto a grande velocidade dos materiais. A ligação metálica obtida, consequência da deformação plástica superficial causada pela colisão, é de grandeza de milésimas de segundo podendo ser considerado quase instantâneo. Apesar das elevadas temperaturas geradas pela energia de colisão, a duração do processo não permite que haja transferência de calor considerável entre as placas, considerando-se um processo à temperatura ambiente, Findink em 2011 [7]. Segundo a investigação de Bina *et al.* em 2012, numa soldadura sem defeitos esta será isenta de material fundido [8].

Na Figura 2.1 é possível observar uma típica configuração paralela duma soldadura por explosão. Existe sempre um detonador, acionado de forma remota e cuja função é iniciar o processo, uma carga explosiva, uma placa voadora, uma placa estacionária e ainda um suporte que serve como base de amortecimento e absorção do impacto causado pela explosão. O explosivo deverá ser distribuído de igual forma acima da placa voadora para que a detonação seja uniforme, provocando a aceleração da placa voadora contra a estacionária através da pressão e da expansão dos produtos gasosos da detonação gerados. Comprovado por Kahraman e Gülenç em 2005, o tipo e a quantidade de explosivo têm grande influência na força de colisão [9].

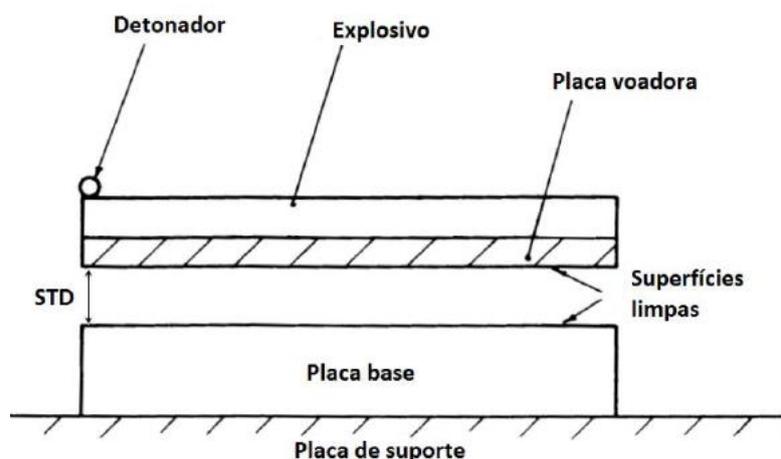


Figura 2.1. Configuração paralela do processo de soldadura por explosão, adaptada de Blazynsky [6].

Entre as duas placas usadas neste método existe uma pequena distância que as separa, designada por *Stand-off Distance* (STD). Ela é essencial no auxílio da aceleração da placa voadora e na expansão dos gases originados pela explosão. Existem também configurações que contemplam a utilização duma placa intermédia posicionada entre as duas placas já referidas.

De forma a alcançar sucesso numa soldadura por explosão, existe um fenómeno deveras consensual na comunidade científica designado por jato metálico. Este proporciona a eliminação de todos os óxidos e poluentes que possam existir nas superfícies das placas, promovendo assim as ligações interatómicas que se geram pela pressão existente [1]. Na Figura 2.2 está demonstrado o desempenho duma soldadura por explosão com configuração paralela e formação do jato metálico. O explosivo com uma velocidade de detonação (V_d) e conseqüente expansão dos produtos da detonação gera na placa voadora um certo grau de inclinação (β) e acelere-a até à velocidade de projeção (V_p), fazendo com que o ponto de colisão avance à velocidade do ponto de colisão (V_c) que deve ser uniforme. Todos os parâmetros interferem na qualidade da soldadura, pelo que devem ser bem estudados de modo a obtê-la consistente e sem defeitos.

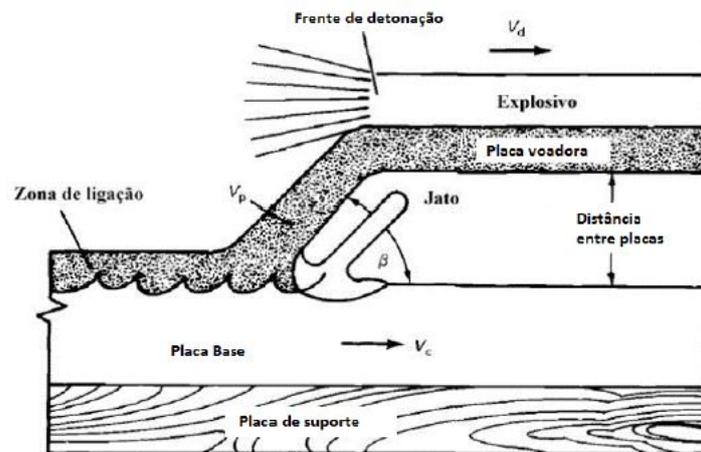


Figura 2.2. Representação esquemática da deformação e impacto da placa voadora aquando da detonação, adaptada de[10].

2.2.1. Vantagens e desvantagens

Ao longo destas últimas décadas, estudos e acima de tudo experiências permitiram concluir várias vantagens e desvantagens deste tipo de soldadura. De acordo com Carpenter e Wittman [1], Blazynsky [6] e Findik [7] as vantagens são:

- Baixo custo;
- Usual para a ligação de materiais dissimilares;
- Propriedades dos materiais base são preservadas;
- Soldadura não requer ambiente controlado;
- Permite a união de materiais com espessuras distintas;
- Realizada por controlo remoto;
- Não necessita de fusão dos materiais envolvidos;
- Soldaduras com boas propriedades de ligação, nomeadamente resistência mecânica.

Em concordância com os mesmos autores, as desvantagens assumidas são:

- Geometrias de soldadura não podem ser complexas, mantendo-se planas, cilíndricas ou cónicas;

- Obrigação de uso de materiais com elevada ductilidade e resistência mecânica;
- Elevado ruído produzido;
- A utilização de explosivos exige licença em conformidade.

2.2.2. Aplicações

As aplicações mais regulares que advêm deste processo estão focadas na indústria nuclear, naval e criogénica e são, em concordância com Blazynsky [6] e Findik [7], as seguintes:

- Fabrico de permutadores de calor;
- Conceção de reservatórios de alta pressão;
- Construção de alhetas de refrigeração;
- Revestimentos;
- Agregação de tubos e de materiais dissimilares.

2.2.3. Configurações de soldadura

A configuração visível na Figura 2.1, apelidada de configuração paralela, não é a única possibilidade para realizar uma soldadura por explosão. Existem outras configurações com provas de sucesso que permitem conferir diferentes propriedades à soldadura.

2.2.3.1. Configuração inclinada

Em tudo semelhante a uma configuração paralela com a diferença da introdução de um certo ângulo entre a placa voadora e a estacionária, tornando a energia de impacto entre estas inconstante no decurso da detonação. Segundo Carpenter e Wittman em 1975 [1], esta configuração é conveniente para a união de pequenas áreas e para o uso de explosivos com velocidade de detonação superior à velocidade do som nos materiais de junção. Na Figura 2.3 está retratada uma soldadura por explosão com configuração inclinada-

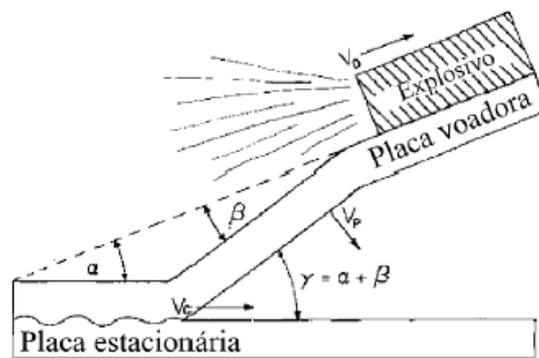


Figura 2.3. Representação esquemática de uma configuração inclinada, adaptada de Carpenter [1].

2.2.3.2. Configuração cilíndrica

Numa configuração cilíndrica existem duas possibilidades para o posicionamento do explosivo. Este tanto pode ser colocado na parte interna e o tubo interior é dilatado até haver impacto com o tubo exterior através da detonação, Figura 2.4 a), como o contrário também pode acontecer, ou seja, o explosivo é colocado no exterior e ocorre a compressão que origina a união do tubo exterior a um varão, Figura 2.4 b).

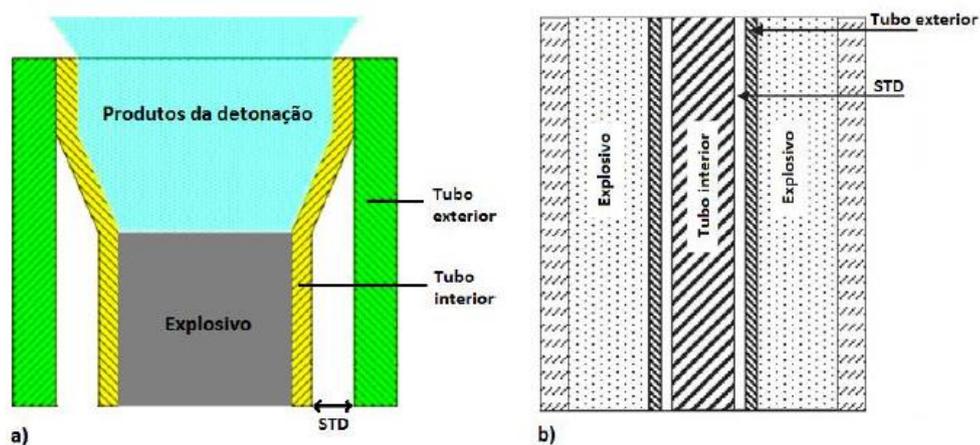


Figura 2.4. Representação esquemática de uma configuração cilíndrica: a) explosivo interior, adaptada de Sun *et al.* [11]; b) explosivo exterior, adaptada de Mendes *et al.* [12].

2.2.3.3. Placa intermédia

O grande propósito do uso duma placa intermédia é a diminuição da energia de impacto entre a placa voadora e a placa base e, por consequência, a diminuição da energia dissipada aquando da colisão de acordo com o trabalho de Hokamoto *et al.* em 1993 [13]. Como é notório na Figura 2.5, esta placa é posicionada entre a placa voadora e a estacionária e, como provado por Han *et al.* em 2003, a sua espessura é um parâmetro que se deve ter em consideração dado que tem grande influência nas propriedades da interface [14].

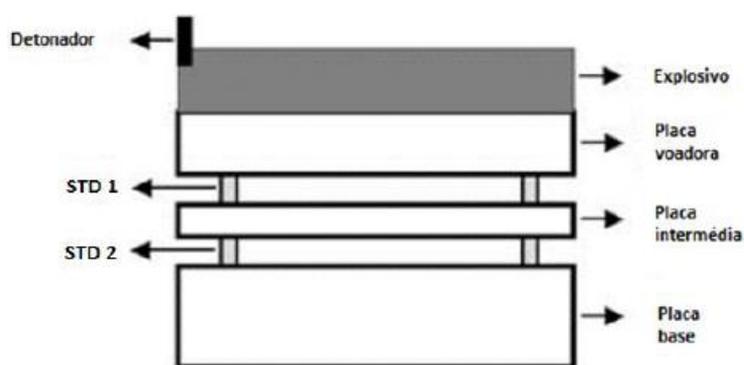


Figura 2.5. Representação esquemática de uma configuração paralela com uso de placa intermédia, adaptada de Han *et al.* [14].

2.3. Interface da soldadura

O reconhecimento da obtenção de uma soldadura com qualidade é feito através da observação da interface. Existem essencialmente dois tipos de interface que resultam da soldadura por explosão, plana (Figura 2.6 a)) e ondulada (Figura 2.6 b)) e, segundo apurou Zhang *et al.* em 2019 [15], esta última pode ramificada noutras duas categorias: região vórtex e camada de transição.

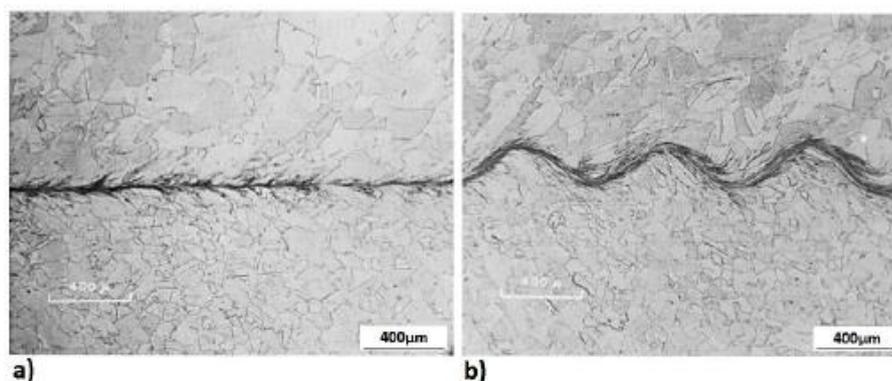


Figura 2.6. Morfologia da interface de uma soldadura Níquel-Níquel variando a velocidade de detonação: a) plana com $V_d = 1365\text{m/s}$; b) ondulada com $V_d = 1790\text{m/s}$, adaptada de Cowan *et al.* [16].

As características das ondas na interface da soldadura dependem das propriedades dos materiais em causa, da sua geometria e dos parâmetros utilizados no processo, sendo que o rácio de explosivo desempenha um forte papel no tipo de onda obtido, fenómeno testemunhado por Zhang *et al.* em 2018 [17].

Na generalidade da literatura disponível até então, é consensual a ideia de que uma interface ondulada promove uma maior força de ligação e maior resistência mecânica, Blazynsky em 1983 [6] e Durtuglu *et al.* em 2004 [18]. Apesar de uma interface plana significar, em certos casos, uma insuficiente velocidade do ponto de colisão, existem evidências de que uma interface plana é, em algumas conjunturas, igualmente viável e consistente tal como exposto por, entre outros, Carvalho *et al.* em 2017 [19].

2.3.1. Mecanismos de formação de onda

O mecanismo de formação de ondas na interface de soldadura é, muito provavelmente, a vertente mais ambígua da soldadura por explosão, com diversos autores a defenderem diferentes teorias. Entre elas, e segundo a investigação de Mendes *et al.* em 2013 [12], há quatro que se destacam:

- Mecanismo de indentação do jato;
- Mecanismo de fluxo instável;

- Mecanismo de formação de vórtices;
- Mecanismo de rarefação de onda

2.3.1.1. Mecanismo de indentação do jato

O mecanismo de indentação de jato foi uma teoria apresentada por Findik [10], exposto na Figura 2.2, onde argumentou que a indentação gerado pelo jato metálico na placa estacionária forma uma espécie de concavidade imediatamente à frente do ponto de colisão através do material removido pelo jato. Desta forma, o excesso de material removido ultrapassa continuamente a depressão criada, jato reentrante, tornando este fenómeno constante ao longo da soldadura.

Seguindo a mesma filosofia, Bahrani *et al.* em 1967 [20] defendeu que a indentação provém do jato reentrante e que a relação deste com a concavidade provoca a formação de vórtices, tal como se verifica na Figura 2.7.

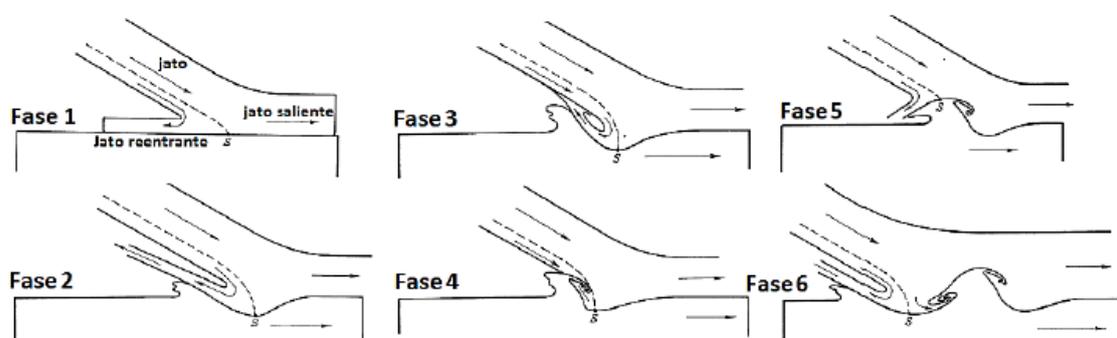


Figura 2.7. Mecanismo de formação de onda, adaptada de Bahrani *et al.* [20].

2.3.1.2. Mecanismo de fluxo instável

Este mecanismo possui como premissa um fenómeno verificado quando dois fluídos com velocidades horizontais distintas interagem, denominado instabilidade de Kelvin-Helmholtz. A partir das figuras Figura 2.8 a) e Figura 2.8 b), são notórias as semelhanças entre a interface de soldadura ondulada e o tipo de escoamento referido.

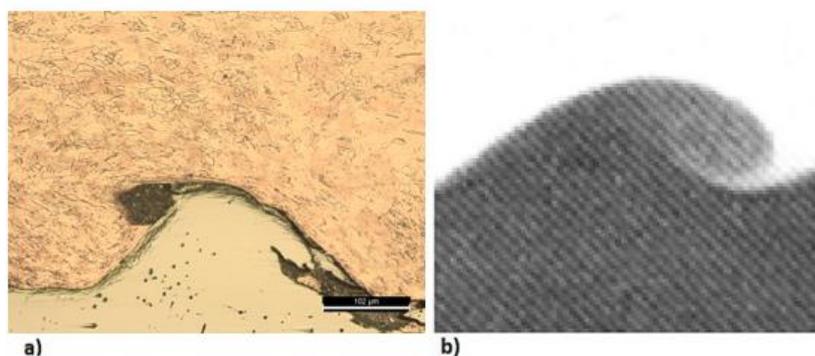


Figura 2.8. Mecanismo de fluxo instável: a) Interface de soldadura Cobre-Aço inoxidável; b) Instabilidade de Kelvin-Helmholtz num escoamento de água, adaptada de Carton [21].

Consoante sustentou Hunt em 1968 [22], para que ocorra a instabilidade de Helmholtz na soldadura é estritamente necessária a participação do jato reentrante em conjunto com a placa estacionária, uma vez que as pressões provenientes do jato metálico original não são suficientes para a ocorrência do fenómeno, teoria não corroborada por Robinson em 1975 [23]. Este defende que a interação entre o jato metálico e a concavidade criada é capaz de criar a diferença de velocidades necessária para haver a tal instabilidade.

2.3.1.3. Mecanismo da formação de vórtices

Trata-se de um mecanismo que tem na sua gênese a formação de vórtice de von Kármán, ou seja, a formação de ondas é fruto do escoamento em torno de um obstáculo que neste caso são pontos de estagnação, a partir dos quais se estabelecem vórtices na orientação do impacto, teoria postulada por Blazynsky [6]. Mais uma vez, são consideráveis as semelhanças entre uma interface de soldadura ondulada, Figura 2.9 a), e o desenvolvimento de vórtices de von Kármán, Figura 2.9 b).

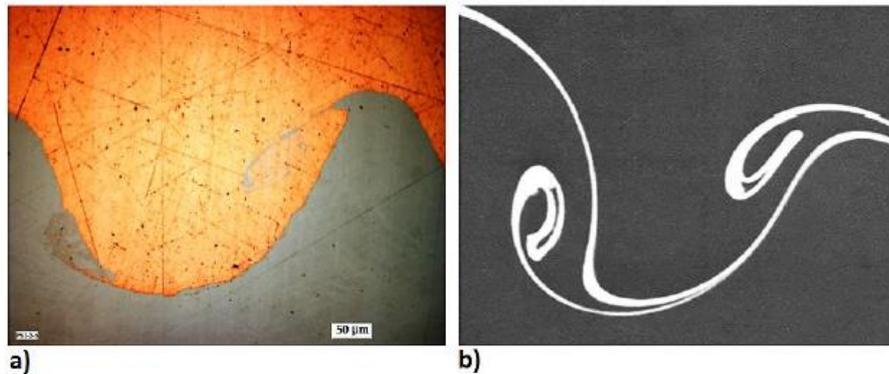


Figura 2.9. Mecanismo de formação de vórtices: a) Interface de soldadura Cobre-Aço inoxidável; b) Vórtice de von Kármán, adaptada de Carton [21].

2.3.1.4. Mecanismo de rarefação de onda

Este mecanismo, abraçado por Carton em 2004 [21] e representado na Figura 2.10, consiste basicamente na interação das ondas incidentes com as ondas refletidas provocadas pelo choque das placas, isto é, as ondas de choque de compressão no ponto de colisão são posteriormente refletidas originando novas ondas de choque. Esta consecutiva interação das ondas provoca uma deformação contínua que, por sua vez, origina a formação de ondas tal como se visualizam analisando a interface.

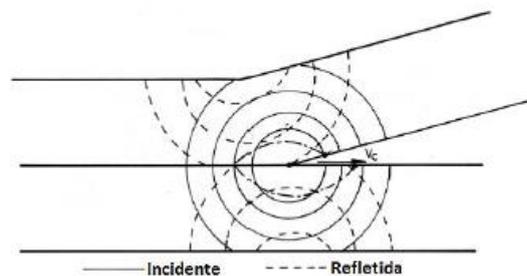


Figura 2.10. Mecanismo de rarefação de onda, adaptada de Carton [21].

2.4. Seleção dos parâmetros

A escolha dos parâmetros de soldadura é de uma importância vital para se conseguir uma soldadura com selo de qualidade. Toda a seleção é feita previamente uma vez que não se conseguem fazer quaisquer alterações após o arranque do processo. Os parâmetros que devem ser alvo de profunda averiguação são o tipo de explosivo, o rácio de explosivo e ainda a STD já que irão interferir na velocidade de detonação, projeção e do ponto de colisão, responsáveis pela qualidade da soldadura.

2.4.1. Explosivo

A matéria explosiva usada mais frequentemente neste tipo de soldadura pode ser classificada em dois grupos distintos, os explosivos primários e os secundários, menos sensíveis que os primeiros. Na esmagadora maioria das aplicações, são utilizados explosivos secundários como *Ammonium Nitrate/Fuel Oil (ANFO)*, Emulsões explosivas TNT-Nitrato de amónio, PETN-Nitrato de amónio e pó à base de glicerina, operados em grão ou pó de modo a uniformizar a sua distribuição, segundo Blazynsky [6].

É na velocidade de detonação do explosivo que reside o critério mais preponderante para alcançar uma soldadura de qualidade e, de acordo com Zhou *et al.* em 2019 [24], não deve exceder 1,2 vezes a velocidade mínima de propagação do som nos materiais a unir. Certos explosivos, como por exemplo as Emulsões Explosivas, apresentam uma reduzida capacidade de detonação, sendo necessário inserir algo que permita a detonação. Estes componentes são denominados como sensibilizantes, Mendes *et al.* em 2013 [12] e Mendes *et al.* [25].

2.4.2. Rácio de explosivo

A quantidade de explosivo a usar é também vital uma vez que interfere diretamente nas características da interface. Intitulado como rácio de explosivo (R), incógnita necessária para a obtenção da velocidade de projeção, é calculado pela razão entre

a massa de explosivo (C) e a massa da placa voadora (M), conforme apresentado na equação (2.1).

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

Conforme provado por Zhang *et al.* em 2019 Durgutlu *et al.* em 2005 e Gladkovsky *et al.* também em 2019 [15], [18], [26], respetivamente, o tipo de onda verificado na interface varia com o rácio de explosivo, sendo que um aumento deste promove a passagem de uma interface plana para ondulada, tornando a soldadura mais resistente, bem como um crescimento da amplitude e do comprimento de onda, evidenciado nas seguintes Figura 2.11 a) e b).

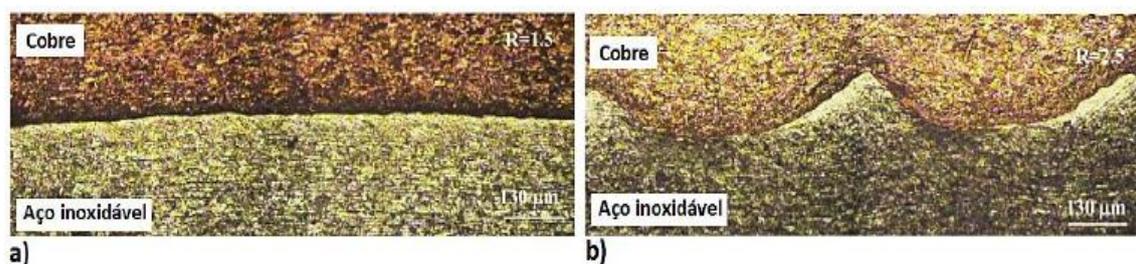


Figura 2.11. Influência do rácio de explosivo na interface em soldaduras Cobre-Aço inoxidável: a) $R = 1,5$; b) $R = 2,5$; Adaptada de Durgutlu *et al.* [18].

No caso concreto da análise de Durgutlu *et al.* em 2005 [18], cujos ensaios envolveram a união de cobre com aço inoxidável, foi observado que um aumento do rácio de explosivo origina não só um uma maior velocidade de projeção, mas também um aumento dos valores de dureza nas extremidades das placas e na interface de soldadura devido à deformação que existe pelo efeito do impacto e posterior deformação plástica.

Por outro lado, conforme Gulenc em 2008, um excessivo aumento de rácio de explosivo poderá induzir a formação de compostos intermetálicos [27], o que afeta negativamente a qualidade da soldadura, conforme provou Bina *et al.* em 2013 [8].

2.4.3. *Stand-off distance*

A STD é mais uma variável que intervém na morfologia da interface. Deverá ser suficiente para proporcionar a aceleração da placa voadora até à velocidade terminal após a detonação do explosivo e é dependente tanto da densidade de explosivo como da velocidade de detonação do mesmo. De acordo com Blazynsky [6], a distância entre placas deverá ser maior para menores valores de densidade e velocidade de detonação explosivo.

Na investigação levada a cabo por Durtuglu *et al.* em 2008 [28] sobre a influência da STD nas características da interface, foram realizados ensaios com uma STD desde um valor igual a metade da espessura (h) da placa voadora, grandeza mínima estabelecida para obter uma soldadura de qualidade, até três vezes essa mesma espessura, como mostram as interfaces da Figura 2.12.

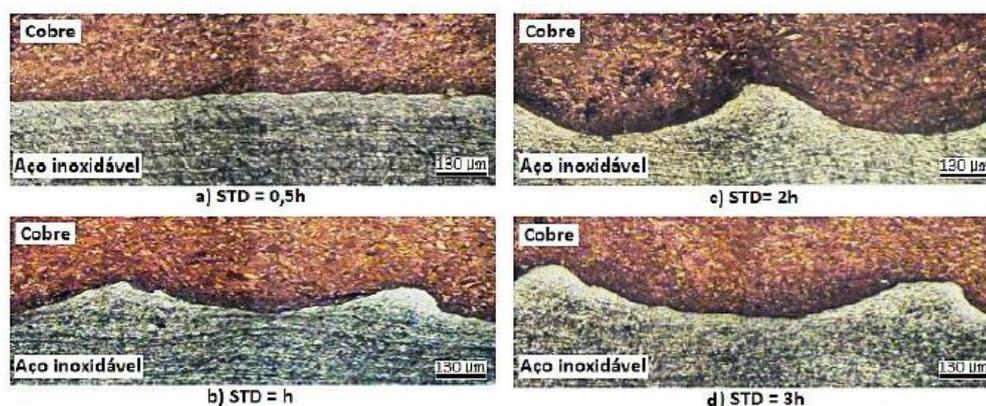


Figura 2.12. Influência da STD na interface de soldadura Cobre-Aço inoxidável: a) STD=0,5h; b) STD=h; c) STD=2h; d) STD=3h; Adaptada de Durtuglu *et al.* [28]

Como é possível constatar, a interface de soldadura tende a ser plana para pequenas STD e onduladas para maiores valores deste parâmetro. Como evidenciado por Durtuglu *et al.* em 2008, um aumento da STD provoca um aumento de comprimento de onda e da sua amplitude e ainda do tamanho de grão na direção de explosão [28]. Através da deformação plástica, consequência do impacto entre placas, também os valores de dureza tendem a sofrer um aumento significativo na interface de ligação com o acréscimo da STD.

2.5. Janela de soldabilidade

De maneira a viabilizar toda a seleção de parâmetros e respetivo grafismo, foi concebido no decorrer dos anos o conceito de janela de soldabilidade. Este é responsável por delimitar os requisitos necessários para aumentar a chance de alcançar uma soldadura de qualidade.

Tal como é possível aferir na Figura 2.13, a formulação da janela de soldabilidade consiste numa região restringida por quatro limites, onde é expectável que, além de ocorrer soldadura, se o consiga com boas propriedades. O gráfico relaciona duas grandezas, o ângulo de colisão β e a velocidade do ponto de colisão das placas V_c , onde é desejável que a sua conjugação se encontre dentro da área delimitada pelas fronteiras explicadas detalhadamente de seguida, Ribeiro *et al.* [29].

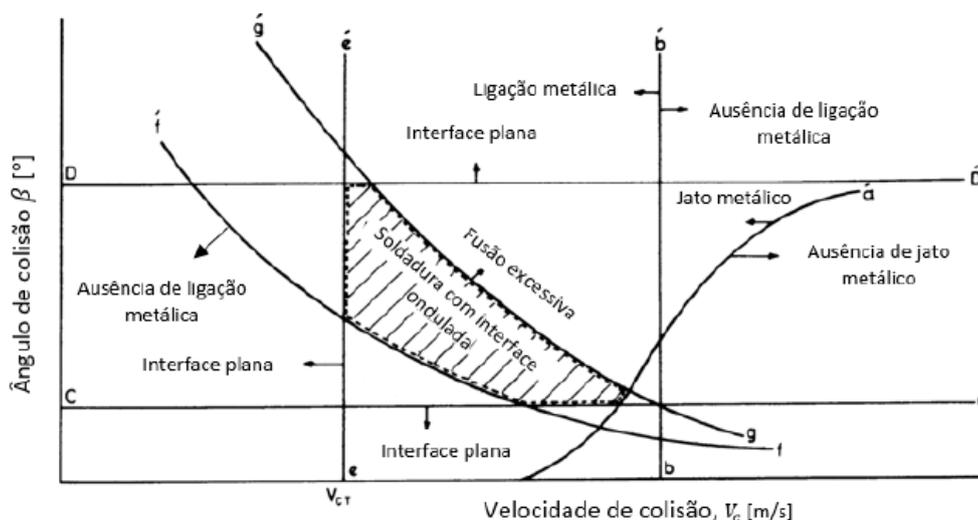


Figura 2.13. Janela de soldabilidade e respetivos limites, adaptada de Blazynsky [6]

2.5.1. Limite esquerdo

O limite situado mais à esquerda, simbolizado pela linha ee' na Figura 2.13, corresponde ao perfil de interface que será gerado na soldadura. Em teoria, valores da velocidade do ponto de colisão, grandeza exposta no eixo horizontal, inferiores ao limite

definido irão gerar interfaces planas, ao passo que valores superiores tornarão a interface ondulada, segundo Ribeiro *et al* [29].

Consoante ditou Cowan *et al.* em 1971 [16], a equação (2.2) que retrata este limite relaciona a grandeza adimensional de *Reynolds* de transição (Re_T) com a dureza (HV_e e HV_v), expressa em [HV], e com a densidade (ρ_e e ρ_v), expressa em [Kg/m^3], da placa estacionária e voadora e ainda com a velocidade do ponto de colisão de transição ($V_{c,tr}$) expressa em [m/s].

$$Re_T = \frac{(\rho_e + \rho_v)V_{c,tr}^2}{2(HV_e + HV_v)} \quad 2.2$$

$$V_{c,tr} = \left[\frac{2Re_T(HV_e + HV_v)}{(\rho_e + \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2.3$$

Após ensaios em soldaduras similares e dissimilares com materiais com propriedades físicas distintas, foi concluído um resultado normalizado para o número de Reynolds igual a 10,5 que representa o ponto de transição entre uma interface linear e ondulada.

2.5.2. Limite inferior

O limite inferior da janela de soldabilidade, representado pela linha ff' na Figura 2.13, assegura o ângulo de colisão das placas onde exista energia suficiente traduzida em velocidade de projeção para que ocorra deformação plástica e consequente união dos materiais.

Para tal, foi estabelecido em 1974 por Deribas e Zakharenko [30] a equação (2.4), onde o cálculo do ângulo de colisão β [°] é dependente do material que apresentar maior dureza (HV), da média das densidades dos materiais envolvidos, da velocidade mínima do ponto de colisão para que ocorra ligação ($V_{c,min}$) e ainda de um coeficiente k que adota o valor de 0,6 e 1,2 para superfícies limpas e incorretamente limpas, respetivamente.

$$\beta = k \sqrt{\frac{2HV}{(\rho_e + \rho_v)V_{c,min}^2}} \quad 2.4)$$

2.5.3. Limite superior

Serve este limite, descrito na Figura 2.13 pela linha gg', para restringir a energia dissipada durante o processo de soldadura dado que acima deste o valor de energia será demasiado elevado ao ponto de haver fusão excessiva entre os materiais, formando assim uma indesejável camada de material fundido na interface.

Assim, Carpenter e Wittman em 1975 [1] estipulou a equação (2.5), que relaciona a V_p com diversas propriedades físicas e térmicas do material da placa voadora. De forma a deduzir o ângulo de colisão das placas, associou a anterior fórmula à janela de soldabilidade através da equação (2.6), estipulando assim a equação corrente (2.7).

$$V_p = \frac{1}{N} \frac{(T_M C_B)^{\frac{1}{2}} (K C_P C_B)^{\frac{1}{4}}}{V_c (\rho_v h)^{\frac{1}{4}}} \quad 2.5)$$

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

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{1}{N} \frac{(T_M C_B)^{\frac{1}{2}} (K C_P C_B)^{\frac{1}{4}}}{2V_c^2 (\rho_v h)^{\frac{1}{4}}} \quad 2.7)$$

Nesta última equação, a temperatura de fusão do material projetado T_M é expressa em [°C], a velocidade do som neste propagado C_B em [m/s], a condutividade térmica K em [W/(m.K)], o calor específico a pressão constante C_P em [J/(kg.K)], a sua densidade ρ_v em [kg/cm³] e a sua espessura h em [m]. β e V_c são dados em [°] e [m/s], respetivamente, e N é uma constante empírica que pode apresentar diferentes valores, como 0,11 segundo Rosset em 2006 [31] ou 0,062 como usado por Ribeiro *et al.* em 2014 [29].

2.5.4. Limite direito

Por último, o limite direito representado pela linha aa' na Figura 2.13, assinala a benéfica formação do jato metálico aquando da colisão das placas. A equação (2.8) firmada por Walsh *et al.* em 1953 [32], argumenta que a velocidade no ponto de colisão deve ser inferior à velocidade de propagação do som no material da placa voadora para que ocorra a pretendida formação do jato metálico.

$$V_c < C_B \quad 2.8)$$

2.6. Soldadura por explosão entre cobre e aço inoxidável

Desde a implementação do processo de soldadura de explosão, variadíssimos materiais foram alvos de estudos e ensaios na ótica de obter soldaduras com qualidade, consistentes e com boas propriedades mecânicas. Todavia, no que diz respeito à união de cobre e aço inoxidável não existem artigos científicos em abundância, bem pelo contrário. Nesse sentido, este capítulo abordará, além do aço inoxidável, também as ligações de cobre com diferentes tipos de aço incluindo os aços carbono.

2.6.1. Morfologia da interface da ligação cobre-aço inoxidável

Na grande maioria da literatura disponível, a interface de ligação cobre – aço inoxidável revelou ser tipicamente ondulada mediante a correta seleção dos parâmetros de soldadura, como se pode constatar pelas Figura 2.11e Figura 2.12 anteriormente abordadas e pela seguinte Figura 2.14.

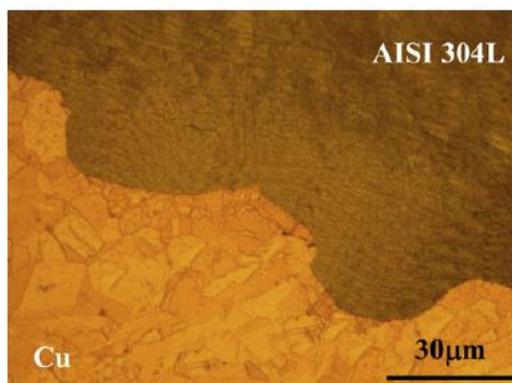


Figura 2.14. Interface da soldadura Cobre-Aço inoxidável, adaptada de Bina *et al.* [8]

De acordo com a investigação de Bina *et al.* em 2013 [8], que fez uso de uma configuração paralela com o aço inoxidável AISI 304L como placa estacionária e o cobre como placa voadora e usou uma mistura de explosivo constituído por 10% de TNT e 90% de nitrato de amónio, a interface obtida apresenta uma transição entre as duas matrizes bastante discreta, sem ocorrência de uma camada de difusão dos materiais, lacunas ou formação de precipitados. De igual modo, também Durtuglu *et al.* em 2005 e 2008 e Wang *et al.* em 2018 [18], [28], [33] obtiveram nos seus estudos uma interface com as mesmas características, com este último a apresentar ondas com comprimento de onda entre os 740-850 µm e amplitudes entre 240-300 µm. As razões mais prováveis apontadas por estes para que tal aconteça são a elevada condutibilidade térmica do cobre e o facto de, apesar da ocorrência de calor durante a explosão, não existir uma significativa transferência de calor de um material para o outro devido ao tempo reduzido. De referir a variedade de explosivos utilizados nestes trabalhos, com Durtuglu *et al.* a usar uma mistura composta por 92% de nitrato de amónio, 5% de óleo combustível e 3% de TNT [18] e ANFO [28], proporcionando velocidades de projecção na ordem dos 1120 m/s, enquanto que Wang *et al.* usou nitrato de amónio [33].

Seguindo a mesma linha de raciocínio, e tal como corrobora a Figura 2.15, a análise do diagrama de fase Fe-Cu evidencia que não existe a formação de intermetálicos, como afirmou Bina *et al.* no sua pesquisa [8]. No entanto, em condições líquidas o ferro e cobre são miscíveis.

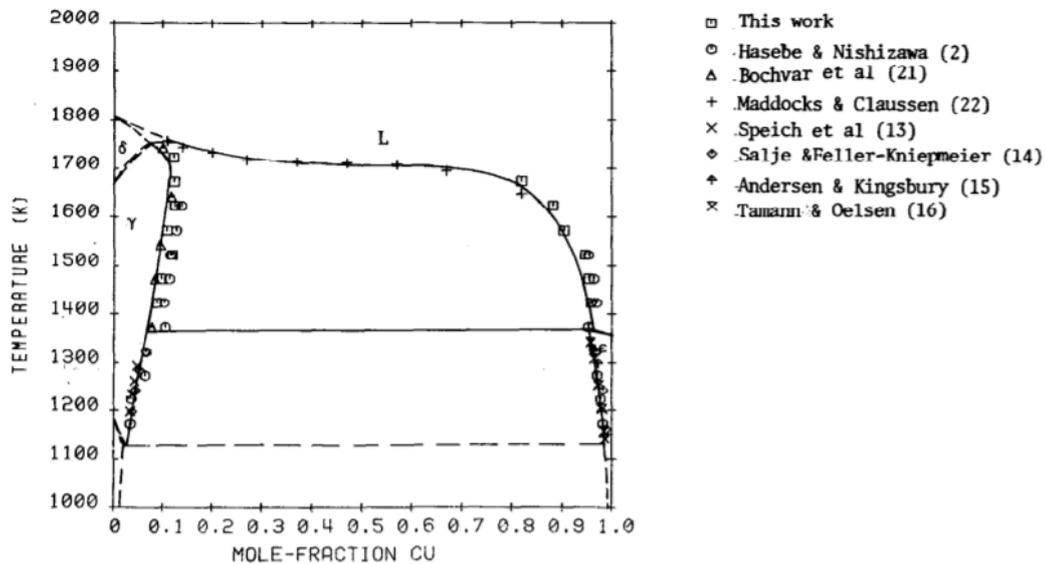


Figura 2.15. Diagrama de fase Fe-Cu, adaptada de Lindqvist e Uhrenius [34]

Em contrapartida, tanto Langeslag *et al.* em 2015 [35] como Leedy e Stubbins em 2001 [36], sob as mesmas condições de processo e utilizando o aço inoxidável AISI 316L, observaram nas suas interfaces onduladas a presença de algumas zonas com elementos mistos, longe de refletir uma camada uniforme de difusão. Na Figura 2.16 é possível observar esses elementos numa amostra de secção longitudinal com baixo rácio de onda, isto é, uma grande amplitude para um pequeno comprimento de onda. De modo idêntico, na Figura 2.17 é visível a fase mista numa amostra de secção transversal.



Figura 2.16. Micrografia num plano longitudinal da interface Cu-SS, adaptada de [35]

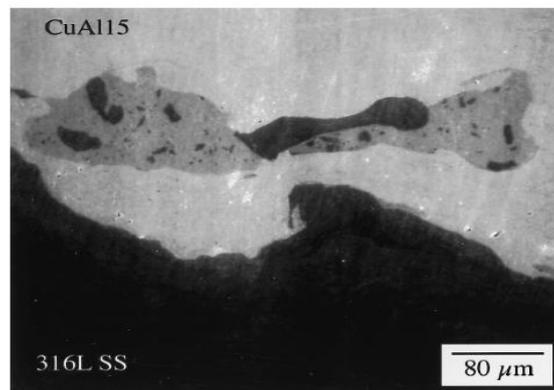


Figura 2.17. Micrografia num plano transversal da interface CuAl15-316L SS, adaptada de Leedy e Stubbins [36]

2.6.2. Morfologia da interface da ligação cobre-aço

Mesmo em ensaios com aços que não são inoxidáveis a interface é sempre do tipo ondulado, embora seja mais frequente o aparecimento de zonas de fusão. Nos ensaios de Zhou *et al* em 2019 [24] não foram encontrados intermetálicos, apenas soluções sólidas supersaturadas com elevadas taxas de ferro e cobre. No estudo de 2018, Zhang *et al.* [17] obteve uma interface ondulada com comprimento de onda na ordem dos 1-2 mm e uma amplitude no intervalo de 300-600 μm contendo regiões vórtex, visíveis na Figura 2.18, fenómeno também verificado noutro estudo do mesmo autor [37]. Num estudo ligeiramente diferente, onde Gladkovsky *et al.* em 2019 [26] utilizou três placas, com duas placas de cobre a envolver a placa de aço, a interface revelou-se ondulada intermitente e irregular com zonas mistas e micro poros presentes substancialmente nas matrizes de cobre devido à contração das partes fundidas durante a cristalização, como comprovam as duas imagens da Figura 2.19.

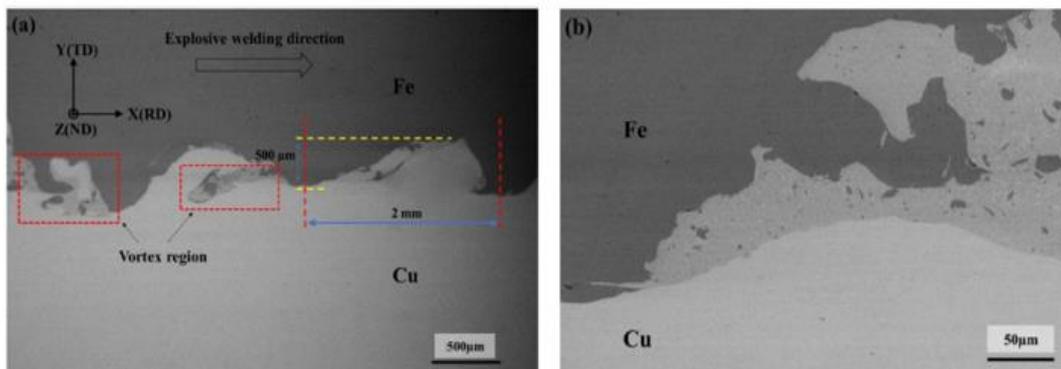


Figura 2.18. Análise SEM da interface Cobre-Aço com diferentes escalas: a) 500 µm; b) 50 µm, adaptada de Zhang *et al.* [17]

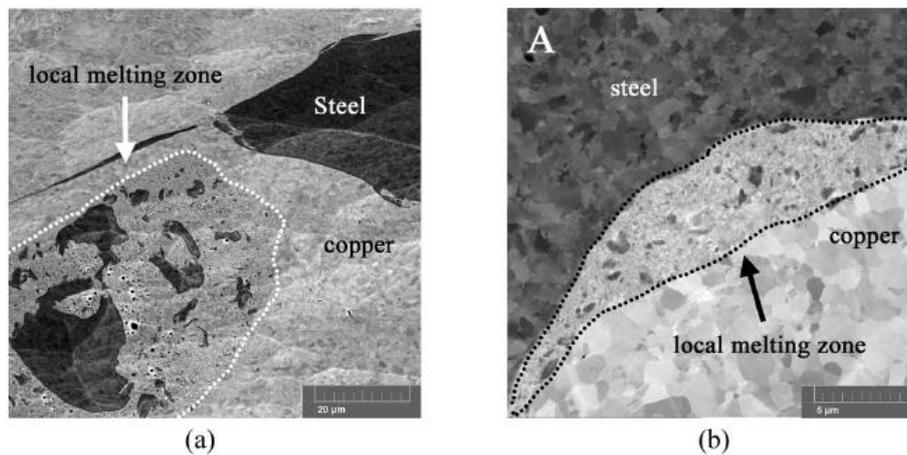


Figura 2.19. Zonas mistas com fragmentos de Fe na interface Cobre-Aço, adaptada de Gladkovsky *et al.* [26]

Por último, a fim de estudar melhor os tipos de interface possíveis da ligação cobre-aço através do processo de soldadura por explosão, Zhang *et al.* em 2019 [15], que utilizou o aço carbono Q345R e nitrato de amônio como explosivo, provou a existência de quatro tipos de interface ondulada, sendo que apenas duas delas são satisfatórias. A primeira, Figura 2.20, exhibe uma interface ondulada com regiões vórtex, delimitadas a vermelho, com um comprimento de onda de 1,35 mm e uma amplitude de 0,45 mm. Sendo a temperatura de fusão do cobre 1083 °C e a do aço 1500 °C, o vórtex é maioritariamente cobre em estado líquido. O segundo tipo de interface expõe uma camada de transição bem definida entre as matrizes em que na zona adjacente à sua fronteira existe um largo número de fases de cobre.

Na Figura 2.21 é observável esta camada amplamente distribuída atrás da onda com uma espessura de $4\ \mu\text{m}$. De notar que a camada de transição não se fundiu durante o processo, o que está relacionado com a interface ser ondulada. Isto porque na posição imediatamente à frente da onda a força de colisão não é tão elevada como na crista da mesma, logo a temperatura não se elevou tão rapidamente como nos vórtex, o que faz com que não se funda. Ainda assim, há sempre elementos de ferro e cobre que se difundem quase de forma instantânea.

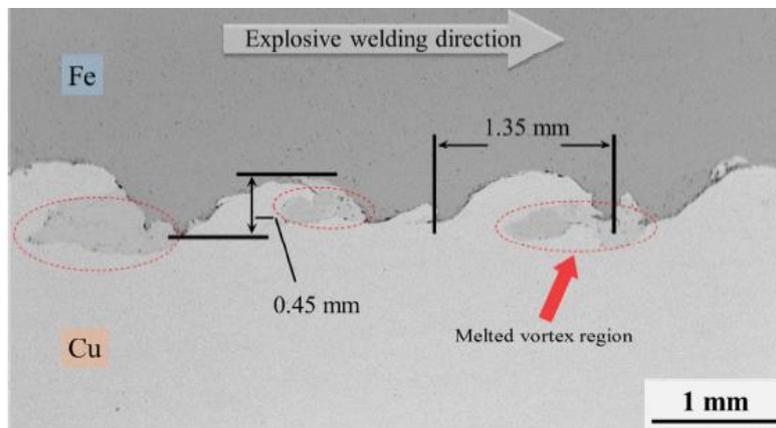


Figura 2.20.Análise SEM da interface Cu-Fe, adaptada de Zhang *et al.* [15]

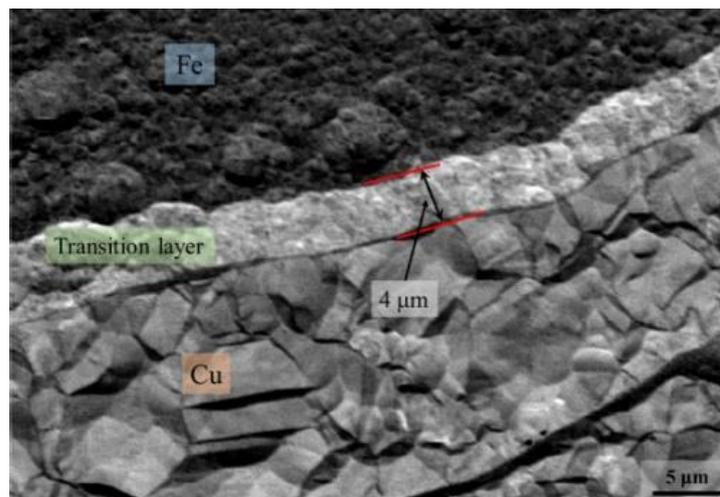


Figura 2.21.Micrografia ampliada da interface Cu-Fe com camada de transição, adaptada de Zhang *et al.* [15]

2.6.3. Perfil de dureza da ligação cobre-aço inoxidável

É consensual na literatura disponível a confirmação de não só aumento de dureza dos materiais após o processo de soldadura por explosão, mas também o aumento de dureza na direção da interface, ou seja, o composto soldado apresenta os seus valores máximos de dureza na interface, região com maior deformação devido à alta velocidade de choque das placas.

Em 2008, Durtuglu *et al.* [28], ao variar as STD para explorar as características na interface constatou que esse parâmetro não influencia significativamente a dureza do material, mostrando apenas um ligeiro aumento, como é possível averiguar na Figura 2.22 que apresenta uma tabela com os respetivos valores. Verifica-se um aumento de dureza na parte superior da placa voadora por efeito do súbito choque da explosão e na parte inferior da placa estacionária devido à sua colisão com o suporte usado nos ensaios, ainda que tenha sido usado uma camada de 5 mm de borracha para suavizar o impacto.

Hardness values of metal couples welded with different the stand-off distance

Sample	Materials	Plate hardness (HV)	Hardness of metal couple (HV)		
			Distance from interface (μm)		
			150	800	1350
$(s = 0.5t)$	Stainless steel	400	419	403	415
	Copper	113	129	113	127
$(s = t)$	Stainless steel	400	425	403	422
	Copper	113	134	114	130
$(s = 2t)$	Stainless steel	400	430	405	428
	Copper	113	142	114	139
$(s = 3t)$	Stainless steel	400	431	405	429
	Copper	113	143	115	139

Figura 2.22.Valores de microdureza para diferentes STD, adaptada de Durtuglu *et al.* [28]

Já Bina *et al.* em 2013 [8] fez uso de um tratamento térmico após a união do cobre ao aço inoxidável, fazendo um recozimento durante 32 horas a 300 °C, abaixo da temperatura de recristalização. Os valores máximos de dureza foram também obtidos perto da interface, atingindo o máximo de 68 HV e 344 HV para cobre e aço inoxidável, respetivamente. De referir que há um maior aumento na direção da interface no lado do aço

inoxidável do que no cobre. Durtuglu *et al.* [18], que também aplicou o mesmo tratamento térmico nas suas amostras, comprovou que a dureza é diretamente proporcional ao rácio de explosivo e STD.

Nas investigações de Wang *et al.* em 2018 [33], cujas amostras foram também alvo de três tratamentos térmicos em que a temperatura teve um decréscimo de 300 K para 77 K, a dureza na matriz do aço inoxidável manteve-se uniforme mesmo com o aumento da distância da interface, pelo que se conclui que o endurecimento provocado pela colisão tem maior impacto no cobre. O valor médio obtido na interface é de 185 HV.

2.6.4. Perfil de dureza da ligação cobre-aço

Nas investigações em que foi usado um aço com algum teor de carbono também é unânime o facto de a dureza ser maior para zonas próximas da interface do que nas restantes matrizes. Em ambas as investigações de Zhang *et al.* de 2018 [17] [37] submeteram as suas amostras soldadas a tratamento térmico, com um recozimento de 2 horas no forno a 550 °C, e foi notória a maior dureza para distâncias da interface inferior a 200 µm. Zhang *et al.* [17] obteve um valor máximo na interface de 330 HV, enquanto que as matrizes de aço e cobre apresentaram valores nos intervalos 185-330 HV e 80-100 HV, respetivamente.

De outro modo, Gladkovsky *et al.* em 2019 [26] optou por realizar uma laminagem a frio nas combinações em forma de sandwich obtidas, com uma redução total de 50% da espessura inicial. Ainda assim, a Figura 2.23 espelha a variação de dureza antes do tratamento realizado, e é possível constatar o aumento de dureza do compósito comparativamente aos materiais originais.

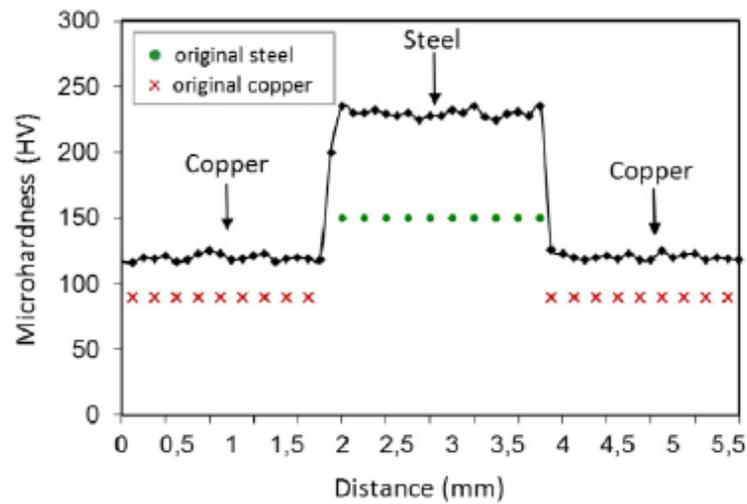


Figura 2.23. Valores de microdureza para diferentes STD, adaptada de Durtuglu *et al.* [28]

Em última análise, Zhang *et al.* em 2019 [15] no seu estudo dos tipos de interface entre cobre e aço testemunhou que nas regiões vórtex existem pontos que apresentam maior e menor dureza que as respectivas matrizes. Assegurou também que nas interfaces que contêm uma camada de transição bem definida, a dureza nela é máxima e a sua distribuição é mais uniforme que nos vórtex, o que se deve à pequena variação no tamanho de grão.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais e equipamentos utilizados

Para a realização dos ensaios foram utilizados dois materiais dissimilares, o aço inoxidável AISI 304 e o cobre Cu-DHP, desoxidado com alto teor de fósforo. É possível observar a composição química, percentagem em peso, destes dois materiais na Tabela 3.1. O cobre praticamente puro é muito recomendável para efeitos de soldadura. Apresenta uma excelente condutividade térmica e elétrica, elevadíssima resistência à corrosão e é ótima para ser deformada tanto a quente como a frio.

Tabela 3.1. Composição química (% em peso) do aço inoxidável AISI 304 e da liga de cobre Cu-DHP.

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Fe
AISI 304	0 – 0,08	0 – 2,0	0 – 1,0	0 – 0,045	0 – 0,03	18,0 – 20,0	8,0 – 12,0	0,2 – 0,6	-	Rem
Cu-DHP				0,015 – 0,040					99,90	

Já o aço inoxidável tem como elemento de liga mais preponderante o cromo, responsável pela elevada resistência à corrosão do material e também o níquel. É um aço qualificado por uma estrutura austenítica e como tal o principal mecanismo de endurecimento é a deformação a frio.

Relativamente aos equipamentos necessários à execução do presente trabalho estão todos descritos na tabela descrita no Apêndice A.

3.2. Nomenclatura dos ensaios

A nomenclatura adotada para os ensaios de soldadura por explosão permanece, em concordância com o que tem vindo a ser feito nos últimos anos pelos alunos da Universidade de Coimbra, com a configuração EWXX, onde “EW” deriva do inglês *Explosive Welding* e “XX” representa o número sequencial identificativo da soldadura. Na presente dissertação, foram realizadas duas soldaduras, EW57 e EW58.

Para fins de análise metalográfica, é empregue o sufixo “L” para uma amostra cuja componente alvo de observação é a longitudinal e “T” para a transversal. Já para os provetes utilizados nos ensaios de tração ao corte são identificados pela configuração usada para a soldadura seguida da terminação “PX”, em que “X” representa o número do provete utilizado.

3.3. Montagem experimental

Toda a preparação e montagem inerente à realização das soldaduras foi feita, em primeiro lugar, no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra, onde foram preparadas as placas metálicas e as caixas necessárias para a execução dos ensaios, enquanto que os preparativos finais e respetivas soldaduras foram feitas no Laboratório de Energética e Detónica – Associação de Apoio (LEDAP) situado em Condeixa, Coimbra.

As placas usadas, com as dimensões 250x70x3 mm, foram previamente desgastadas com lixa de maneira a remover quaisquer óxidos ou impurezas existentes. As dimensões das caixas que envolvem o explosivo, cujo material é o *Medium Density Fiberboard* (MDF), são especificadas no Apêndice B, onde se encontra também as medidas da barra de fixação das sondas essenciais à medição da velocidade de detonação.

Posteriormente, a placa voadora é fixada na base inferior da caixa com recurso a cola *epoxy* e nesta são colocados quatro espaçadores, um em cada vértice da placa voadora, responsáveis por impor a STD desejada, que neste caso foi 1,5 vezes a espessura da placa voadora, ou seja, 4,5 mm. Tratando-se duma configuração paralela sobreposta, a placa

estacionária é então colada à parte inferior dos quatro espaçadores existentes e é efetuada uma pesagem do conjunto.

De seguida, é aplicado um explosivo iniciador para auxiliar a homogeneidade da iniciação e nova pesagem é realizada a fim de saber a massa deste. A caixa é de seguida preenchida até ao topo com o explosivo selecionado, ANFO, e uma última pesagem é exercida para que se possa estimar a densidade e rácio de explosivo. Depois é colocada uma placa de alumínio no topo da caixa, com o propósito de, tal como o iniciador, fazer com que a detonação seja o mais homogénea possível. Por último, é finalmente colada a barra de fixação com as respetivas sondas em cima da placa de alumínio, como mostra a Figura 3.1.

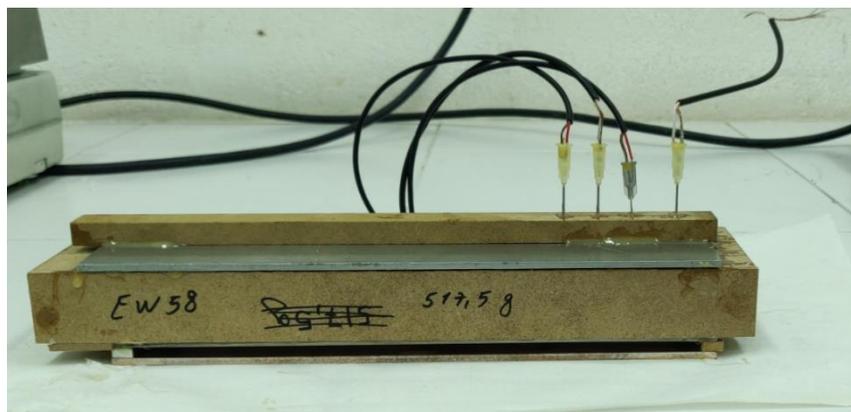


Figura 3.1. Montagem final para a soldadura EW58.

O conjunto é seguidamente mobilizado para o interior da câmara de explosão, onde fica sobre um suporte de aço de modo a absorver o impacto da explosão. As sondas são ligadas à fonte de tensão com ligação aos cronómetros digitais, é colocado também o detonador e a soldadura está pronta para ser realizada.

3.4. Cálculo da velocidade de detonação

O cálculo da velocidade de detonação é obtido através das sondas que são colocadas na barra que fica no topo do conjunto, também ela feita em MDF. As sondas são construídas a partir de tubos de aço com um diâmetro exterior de 1 mm. Um fio de cobre

dobrado a meio é colocado no interior do tubo com as duas pontas situadas na parte superior. Estas são devidamente escarnadas e soldadas, com uma liga de estanho, aos dois fios condutores de um cabo elétrico garantindo sempre que não existe passagem de corrente nesta conexão.

O conjunto de sondas, quatro para cada ensaio, são então colocadas paralelamente na barra previamente furada com o auxílio de cola de modo a confirmar a sua fixação, conseguindo-se a configuração exibida na Figura 3.1. Posteriormente, já dentro da câmara de explosão, os dois fios condutores, também eles escarnados, são conectados aos terminais dos cronómetros digitais. O sinal emitido pela primeira sonda marca o arranque do tempo e as restantes registam o tempo em cada cronómetro como é visível na Figura 3.2. De acordo com os tempos registados e as distâncias definidas na barra é possível calcular a velocidade de detonação.



Figura 3.2. Cronómetros para medição da velocidade de detonação.

3.5. Cálculo da velocidade de projecção

Através da análise da aceleração de projéteis com explosivos em variadas investigações com diferentes configurações, Gurney divulgou a definição de velocidade característica de Gurney $\sqrt{2E}$. Mais tarde em 1996, Cooper [38] estudou a velocidade de

Gurney e elaborou uma equação que é aplicável na grande maioria das aplicações dado que só apresenta uma incógnita, a velocidade de detonação V_d .

$$\sqrt{2E} = \frac{V_d}{2,97} \quad 3.1)$$

Mais tarde, com o contributo de outros estudos, Blazynsky [6] deduziu a equação (3.2), aplicável a configurações paralelas e que parte do pressuposto que a placa voadora atinge a velocidade de Gurney, tal como no presente trabalho, que relaciona então o conceito de Gurney com o rácio de explosivo (R).

$$V_{p,Gurney} = \sqrt{2E} \left(\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.2)$$

3.6. Parâmetros de soldadura

Os parâmetros referentes às duas soldaduras realizadas estão descritos na seguinte Tabela 3.2. De salientar que os parâmetros foram os mesmo para ambos os ensaios, apenas se inverteram a posição das placas de um ensaio para o outro.

Tabela 3.2. Parâmetros usados nas soldaduras.

Soldadura	EW57	EW58
Placa voadora	Cu-DHP	AISI 304
Placa estacionária	AISI 304	Cu-DHP
Espessura placa voadora[mm]	3	3
Espessura placa estacionária[mm]	3	3
Explosivo	ANFO	ANFO
Densidade do explosivo [kg/m^3]	863,7	873,02
Altura de explosivo[mm]	30	30
Rácio de explosivo	0,949	1,094
STD [mm]	4,5	4,5

3.7. Ensaio metalográficos

3.7.1. Preparação das amostras

Com o intuito de examinar a interface de ligação e o modo como os parâmetros a influenciam, foram efetuadas análises microestruturais em ambos os ensaios. Foram obtidas duas amostras para cada soldadura, uma no sentido longitudinal e outra transversal em relação à direção de explosão. De modo a tornar mais perceptível a identificação das amostras foi imposto o sufixo “L” ou “T” à nomenclatura acima referida, para amostra longitudinal e transversal, respetivamente. No Apêndice C está especificado o local de onde foram retiradas as amostras das placas soldadas.

Seguidamente ao corte das amostras, estas foram acomodadas com resina *epoxy* e posteriormente alvo de lixação. O desgaste foi feito de forma sequencial com as lixas P320,

P600, P1000 e P2500. De seguida, o polimento final foi executado, também sequencialmente, com o auxílio de uma solução com partículas de diamante de 6 μm e 1 μm .

3.7.2. Ataque químico

De modo a transparecer a microestrutura dos materiais, tornando visível os grãos e as suas fronteiras, foram levados a cabo dois ataques químicos. Primeiramente, para o aço inoxidável, as amostras foram imersas durante 40 segundos numa solução composta por 10 g de $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (ácido oxálico) e 100 ml de água. Trata-se de um ataque eletrolítico, com a solução ligada ao polo negativo a uma fonte de tensão de 6 V com uma corrente de 1 A e a amostra ao polo positivo.

Para o cobre foi utilizada uma solução líquida composta por 10 ml de água, 10 ml de HNO_3 (ácido nítrico) e 0,2 ml de HF (ácido fluorídrico) e a superfície polida das amostras foi imersa num espaço de tempo reduzido, cerca de dois segundos.

3.7.3. Análise química

Após novo e breve polimento das amostras de modo a retirar quaisquer óxidos e impurezas presentes, foi efetuada a análise química das duas amostras longitudinais através de *Scanning Electron Microscopy* (SEM) e *Energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDS) na ótica de melhor compreender a composição química das zonas mistas presentes na interface.

Parte de um provete tracionado, detalhado no seguinte capítulo, foi também alvo de análise SEM para se perceber qual o tipo de fratura.

3.8. Ensaios mecânicos

3.8.1. Microdureza

Medições de microdureza foram realizadas nas quatro amostras disponíveis, traçando três perfis perpendiculares à interface em cada amostra, um no meio e os outros dois nas duas extremidades. As indentações foram feitas com uma carga de 200 g durante

15 segundos ao longo de toda a amostra, excepto para zonas próximas da interface, em que foi utilizada uma carga de 25 g durante 15 segundos. Conforme evidenciado pelo esquema presente no Apêndice D, nos pontos de maior carga o espaçamento entre eles foi de 0,5 mm e perto da interface diminuiu para metade, 0,25 mm.

Posteriormente, foram efetuadas várias indentações, de 25 g durante 15 segundos, em todas as zonas mistas presentes na vizinhança da interface de ligação.

3.8.2. Ensaios de tração ao corte

Numa última etapa, o comportamento mecânico das soldaduras foi investigado a partir de ensaios à tração/corte. Para tal, foram maquinados três provetes em cada soldadura de iguais dimensões, explícitas no Apêndice E. Após a obtenção da geometria final desejada para os provetes, estes foram pintados com tinta branca e, mais tarde, borrifados com tinta preta. Este contraste é fulcral para a criação de malha representativa no software de análise ARAMIS, que funciona também como um extensómetro ótico. Por fim, os dados recolhidos proporcionam o gráfico força-alongamento de cada provete e ainda as restantes propriedades que classificam a sua resistência mecânica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise dos materiais base

A recolha de informação fornecida pelas características dos materiais base, nomeadamente a sua microestrutura, é fulcral uma vez que só assim é possível destacar as possíveis transformações que possam ocorrer fruto da soldadura e, conseqüentemente, avaliar o seu comportamento.

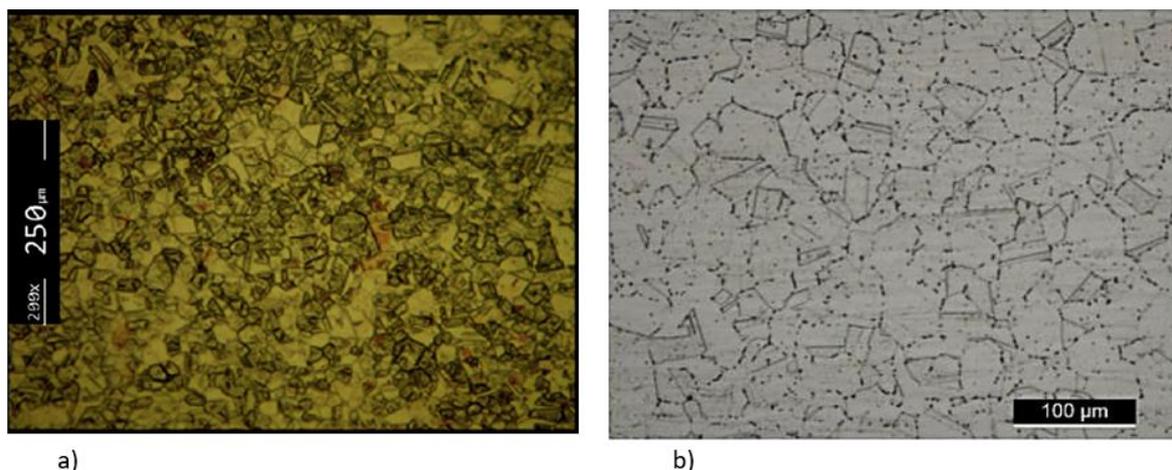


Figura 4.1. Microestrutura dos materiais base: a) Cu-DHP adaptada de Loureiro et al [39]; b) AISI 304. adaptada de Machado [40]

Dado que os materiais em questão já tinham sido alvos de estudo, as microestruturas foram retiradas das investigações de Loureiro *et al.*[39] e Machado [40] para o cobre e o aço inoxidável, respetivamente. Na Figura 4.1 a) encontra-se a microestrutura do cobre. Este revela uma estrutura definida por grãos irregulares, com o seu crescimento em diferentes direções, mas com as suas fronteiras bem visíveis. Apresenta uma dureza média de 94 HV e uma resistência à tração de 265 MPa. A microestrutura do aço inoxidável,

representada na Figura 4.1 b), é também composta por grãos com dimensões irregulares e fronteiras de grão bem definidas com a presença de precipitados. Este exibe uma dureza média de 188 HV.

4.2. Enquadramento dos ensaios e construção das janelas de soldabilidade

4.2.1. Velocidade de detonação

Em ambos os ensaios foram utilizados as mesmas quantidades e a mesma mistura explosiva, pelo que seria de esperar uma grande semelhança entre as duas velocidades de detonação obtidas. O processo de registo temporal através das sondas e cronómetros, anteriormente explicado, permitiu registar os tempos apresentados na Tabela 4.1, permitiu elaborar os gráficos da distância em função do tempo cujo declive da reta obtida representa a velocidade de detonação. Os gráficos estão disponíveis no Apêndice F e, como se pode constatar, obteve-se uma velocidade de detonação de 2420 m/s e 2186 m/s para as soldaduras EW57 e EW58, respetivamente.

Tabela 4.1. Cálculo das velocidades de detonação.

	EW57		EW58	
	Distância [mm]	Tempo [μ s]	Distância [mm]	Tempo [μ s]
Sonda 1	0	0	0	0
Sonda 2	14,54	6,419	14,42	6,596
Sonda 3	29,32	12,20	29,96	13,755
Sonda 4	46,68	19,392	48,14	22,005
V_d [m/s]	2420		2186	

4.2.2. Velocidade de projeção

Os valores da velocidade de projeção foram adquiridos através das fórmulas (3.1) e (3.2) anteriormente referidas. Apesar de esta não ser a única forma de calcular a velocidade de projeção, na literatura disponível este método é deveras consensual e garante resultados fidedignos. O valor de rácio de explosivo necessário na fórmula (3.2) está exposta na Tabela 3.2 e, obviamente, já contempla a massa da placa voadora. Assim, e como é possível reconhecer na Tabela 4.2, o ensaio EW57 teve uma velocidade de projeção de 431 m/s enquanto que o EW58 registou uma velocidade de 427 m/s.

Tabela 4.2. Resultados das velocidades de projeção.

	EW57	EW58
V_p [m/s]	431	427

4.2.3. Ângulo de colisão

A fim de enquadrar os ensaios nas respetivas janelas de soldabilidade foram finalmente calculados os ângulos de colisão entre a placa voadora e a placa estacionária. Sabendo que numa configuração paralela, usada nos presentes ensaios, a velocidade de detonação é considerada igual à velocidade do ponto de colisão, empregando a fórmula (2.6) foram concluídos os valores descritos na Tabela 4.3 para as soldaduras realizadas.

Tabela 4.3. Resultados obtidos para o ângulo de colisão.

	EW57	EW58
β [°]	10,2	11,2

4.2.4. Janela de soldabilidade

Foram elaboradas duas janelas de soldabilidade para os ensaios em causa. Uma para o ensaio EW57, Figura 4.2 a), no qual o cobre foi usado como placa voadora e o aço inoxidável como placa estacionária, e outra para a configuração inversa correspondente ao ensaio EW58, delineada na Figura 4.2 b).

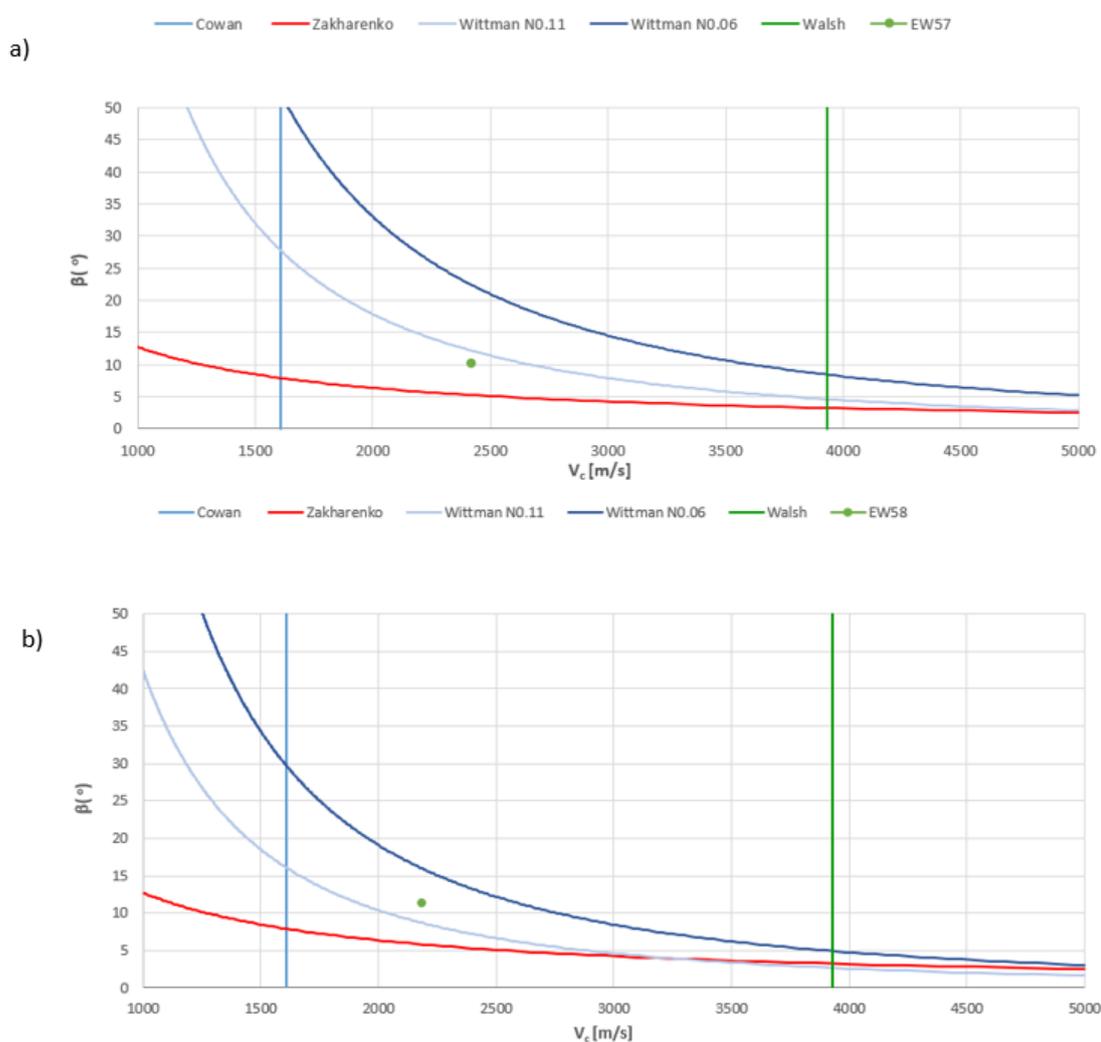


Figura 4.2.Janela de Soldabilidade: a) EW57 (Cu-DHP placa voadora e AISI 304 placa estacionária); b) EW58 (AISI304 placa voadora e Cu-DHP placa estacionária).

Comparando as duas janelas, é possível constatar que a utilizada para o ensaio EW57 apresenta uma área, onde é expectável que se obtenha uma soldadura com qualidade, ligeiramente maior que na janela definida para o ensaio EW58. Após a construção dos limites de soldadura procedeu-se ao enquadramento dos ensaios nas respetivas janelas através do ângulo de colisão e velocidade de detonação.

Através da análise da Figura 4.2 a), é possível reconhecer o resultado satisfatório, isto porque a localização do ensaio respeita todos os limites impostos, o que vai de encontro ao estado final da soldadura, a qual apresentou uma união consistente dos materiais. Já para o segundo ensaio, onde se fez uso do aço inoxidável como placa voadora, seria, teoricamente, mais difícil de obter um bom resultado dada a maior restrição do limite superior. Pela observação da Figura 4.2 b), é constatável que o ensaio EW58 não respeita o limite superior de Wittman para a constante N igual a 0,11. Ainda assim, a localização do ensaio está abrangida pelo outro limite superior, N igual a 0,06, e não ocorreu fusão excessiva entre os materiais como se veio a comprovar pela análise da interface. Portanto, ambas as soldaduras apresentaram excelentes resultados, com ligações consistentes, como era esperado em teoria.

4.3. Análise macroscópica

As soldaduras obtidas corroboram os resultados transmitidos pelas janelas de soldabilidade. Tanto o ensaio EW57 como o EW58 correspondeu às expectativas, com a ligação de materiais a revelar-se consistente e sólida mesmo após as operações de corte e polimento.

Na Figura 4.3 a), está representada a vista de topo do ensaio EW57 com a direção de detonação identificada através da seta. As zonas mais escuras e rugosas presentes ao longo da placa voadora são resultado da explosão e mais concretamente da geometria granular do explosivo (ANFO). De igual modo, a zona mais escurecida no início da detonação, à esquerda, é causada pelo explosivo de iniciação utilizado. No entanto, estas zonas referidas, que estão também presentes na Figura 4.4 a) referente ao ensaio EW58 embora sejam menos visíveis, em nada prejudicam a qualidade da soldadura.

As figuras Figura 4.3 b) e Figura 4.4 b), captadas numa vista frontal, são bastante reveladoras da boa consistência das soldaduras. Ambas exibem um ligeiro empeno das placas, mais acentuado no ensaio com o aço inoxidável como placa voadora, que foi posteriormente corrigido com o auxílio de um martelo de nylon.



Figura 4.3. Ensaio EW57: a) Vista de topo; b) Vista frontal.

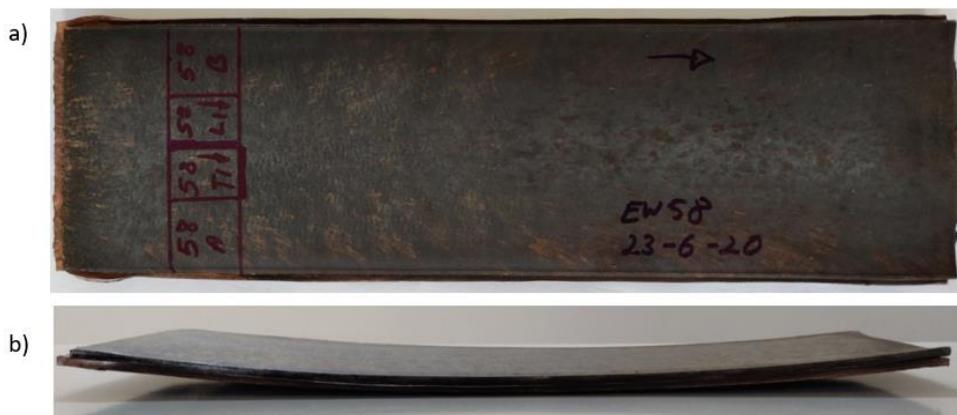


Figura 4.4. Ensaio EW58: a) Vista de topo; b) Vista frontal.

4.4. Análise das interfaces

4.4.1. EW57

Nas Figura 4.5 Figura 4.6 estão expressas as estruturas das interfaces de impacto relativas ao ensaio EW57. Na amostra de secção transversal à direção de detonação, Figura

4.5 a), observa-se uma interface que não pode ser considerada plana nem ondulada, apenas um meio termo entre estes. Relativamente ao grão da placa voadora, cobre, não é possível retirar grandes conclusões uma vez que o ataque químico, sem razão aparente, não fez o devido efeito na zona próxima da interface ao contrário do que aconteceu no resto da sua matriz. Já o grão da placa estacionária, aço inoxidável, não apresenta uma deformação assinalável. De referir, por último, a existência pontual de zonas mais escurecidas ao longo da interface, classificadas como zonas mistas.

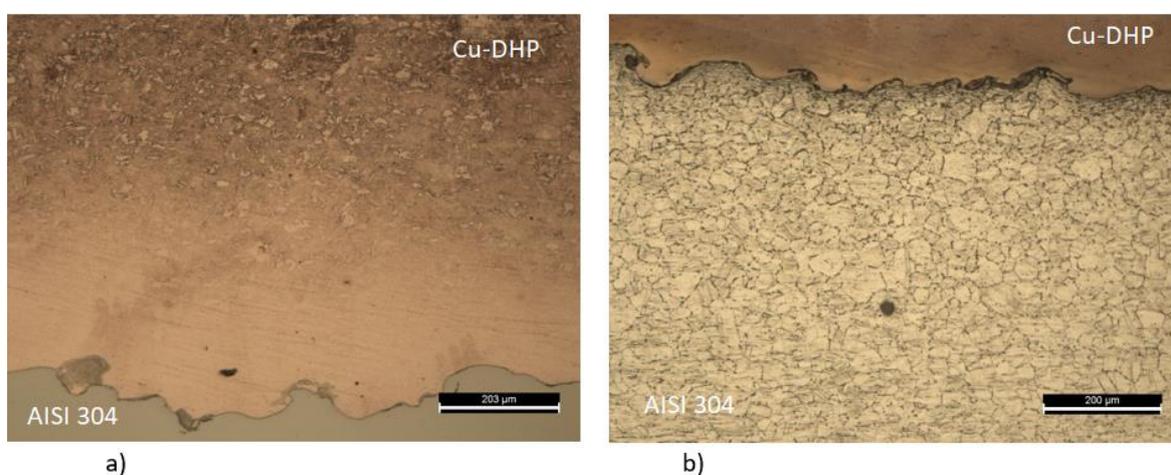


Figura 4.5. Microestrutura da amostra transversal do ensaio EW57: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.

A interface da amostra longitudinal, Figura 4.6, é claramente do tipo ondulado, com ondas constantes e bem definidas, facto que apoia e confirma a localização na janela de soldabilidade e o estudo de Carvalho *et al.*[19]. Tanto para a placa voadora como para a placa estacionária, Figura 4.6 a) e b), respetivamente, verifica-se uma deformação do grão na vizinhança da interface. Enquanto que essa deformação é, no caso do aço inoxidável, claramente no sentido da detonação, no cobre os grãos deformados estão englobados no fenómeno que já foi referido, denominado por vórtex. Ao contrário da amostra transversal, aqui existe a presença quase sistemática de zonas mistas de fusão de ambos os materiais ao longo das ondas de soldadura. Estas zonas, que não são abordadas e discutidas devidamente na literatura, apresentam dimensões bastante variadas, uma dureza que varia entre 179 HV

e 277 HV e foram alvos de análise SEM e EDS para melhor compreensão da sua composição química. Na Figura 4.7 é possível comprovar o tipo de interface acima referido.

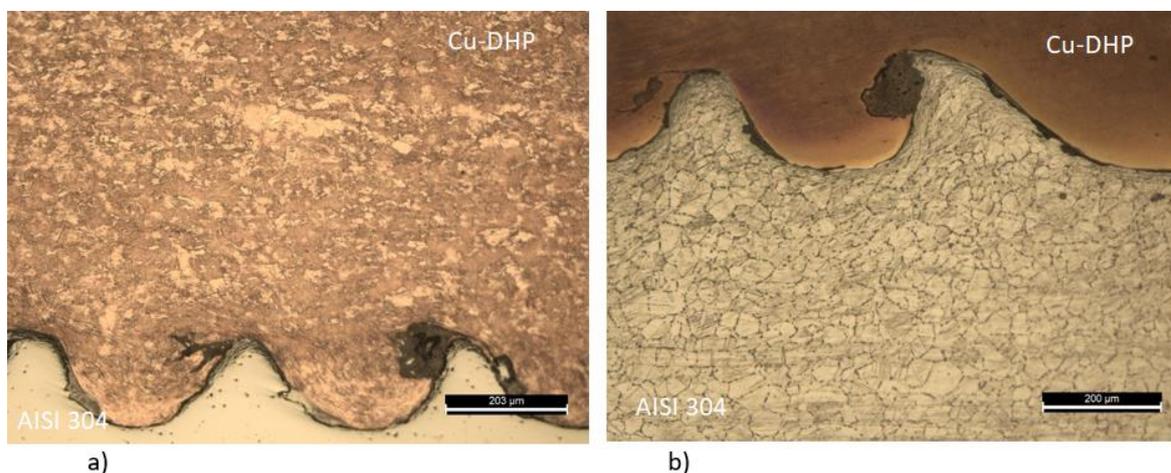


Figura 4.6. Microestrutura da amostra longitudinal do ensaio EW57: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.

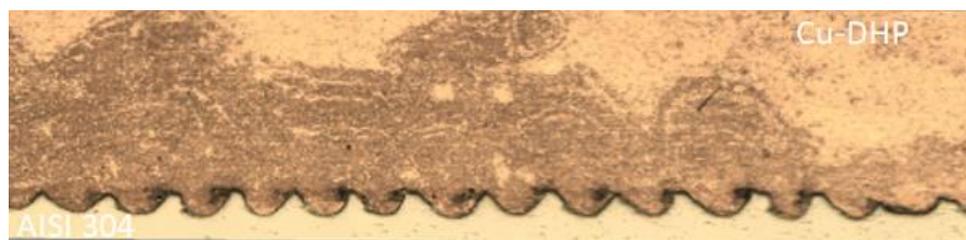


Figura 4.7. Microestrutura da amostra longitudinal do ensaio EW57 com uma escala de 3000 µm.

Como é perceptível pela Figura 4.8 a), a zona identificada com o número 27 próxima da marca da indentação apresenta uma composição revelada na Figura 4.8 b), onde predomina o cobre e o ferro com uma percentagem em peso de 42,1 e 39,7 respetivamente. Em menor escala estão ainda presentes os elementos crómio e silício que provêm do aço inoxidável. Os espectros 28 e 29 manifestam a composição esperada do cobre e aço inoxidável, respetivamente.

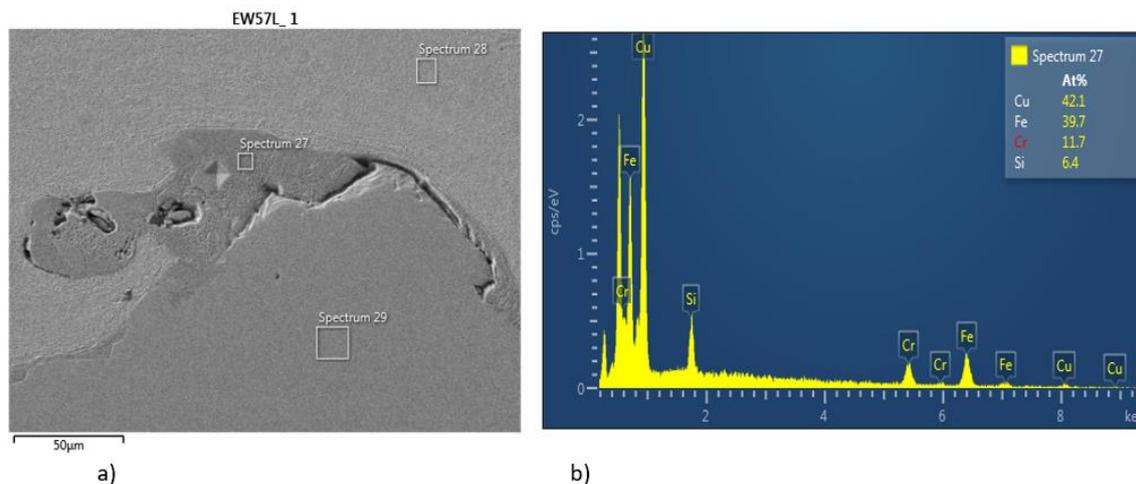


Figura 4.8. Análise SEM e EDS da amostra EW57_L: a) Micrografia da interface; b) Composição do espectro 27.

Com o intuito de uma análise mais detalhada, foi feita uma aproximação na mesma zona, Figura 4.9 a), onde foram analisadas duas zonas com morfologias distintas. Através da Figura 4.9 b), o espectro 30 identifica-se com a composição normal do aço inoxidável, com 69,3% em peso de ferro, 20,1% em peso de crómio, 10,1% em peso de níquel e ainda uma porção diminuta de silício. Por outro lado, na zona identificada pelo número 31, o componente principal é o cobre, com 43,7% em peso, seguido de 36,8% de ferro, registando-se ainda a presença quase nivelada de crómio, silício e níquel.

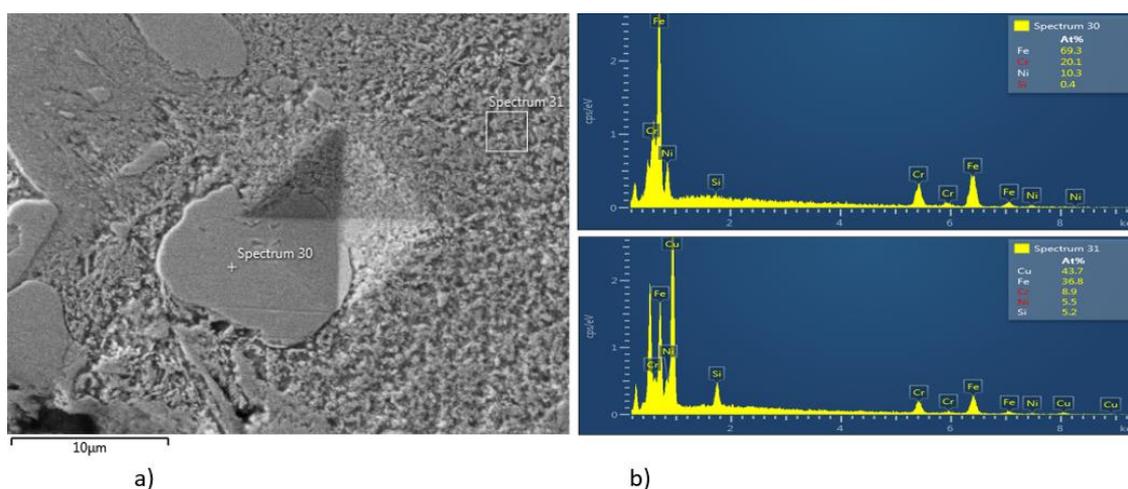


Figura 4.9. Análise SEM e EDS da amostra EW57_L: a) Micrografia da interface; b) Composição do espectro 30 e 31.

4.4.2. EW58

As estruturas das interfaces de impacto alusivas ao ensaio EW58 estão expostas nas Figura 4.10 e Figura 4.11. À semelhança do que se verificou para a amostra transversal do ensaio anterior, também neste o tipo de interface não é ondulado nem plano. É visível que tanto o grão do aço inoxidável como o do cobre da amostra transversal, Figura 4.10 a) e b), respetivamente, sofreu deformação considerável nas regiões vizinhas da interface. Mais uma vez, é de sublinhar a presença de zonas de fusão dos materiais na interface, cujas formas geométricas são totalmente irregulares e heterógenas.

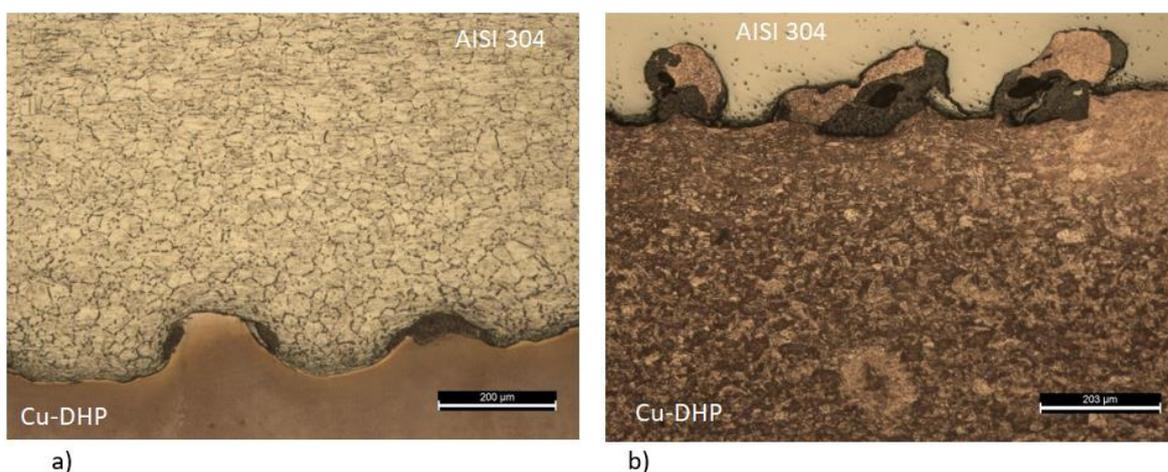


Figura 4.10. Microestrutura da amostra transversal do ensaio EW58: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.

De igual forma, o grão da placa voadora e estacionária da amostra longitudinal, Figura 4.11 a) e b), denota também deformação e alongamento nas proximidades da interface. Esta é ondulada com ondas bem definidas. Embora o ensaio não respeitasse um dos limites superiores da janela de soldabilidade (para N igual a 0,11), as zonas mistas de fusão constatadas não são superiores nem em número nem em tamanho ao ensaio EW57, que por sua vez respeitou na íntegra os limites da janela de soldabilidade. Foi novamente efetuada uma medição de dureza nestas zonas e os resultados variam entre 151 HV e 213 HV. A respetiva análise SEM e EDS está descrita nas Figura 4.13 e Figura 4.14. Na Figura 4.12 conseguimos ver claramente o tipo de interface da amostra longitudinal da amostra

EW58. É possível concluir que o posicionamento das placas não revelou ser um fator determinante.

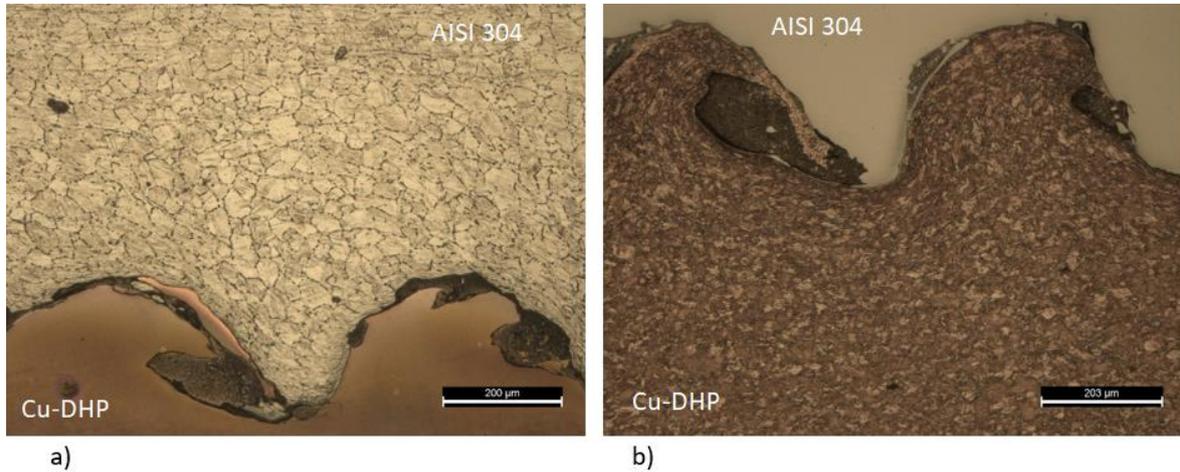


Figura 4.11. Microestrutura da amostra longitudinal do ensaio EW58: a) Placa voadora; b) Placa estacionária.



Figura 4.12. Microestrutura da amostra longitudinal do ensaio EW58.

Na Figura 4.13 a) vê-se a fronteira entre o aço inoxidável e a zona mista, onde se encontra a zona com o número 34 e 35. O espectro da zona 34, Figura 4.13 b), revela uma percentagem em peso de 55 de cobre e 30,2 de ferro, registando ainda percentagens menores de crómio e silício. A zona 36 e 35, que embora esteja na zona mista está claramente sobre uma região de igual cor e textura à da 36, revelam a composição típica do aço inoxidável.

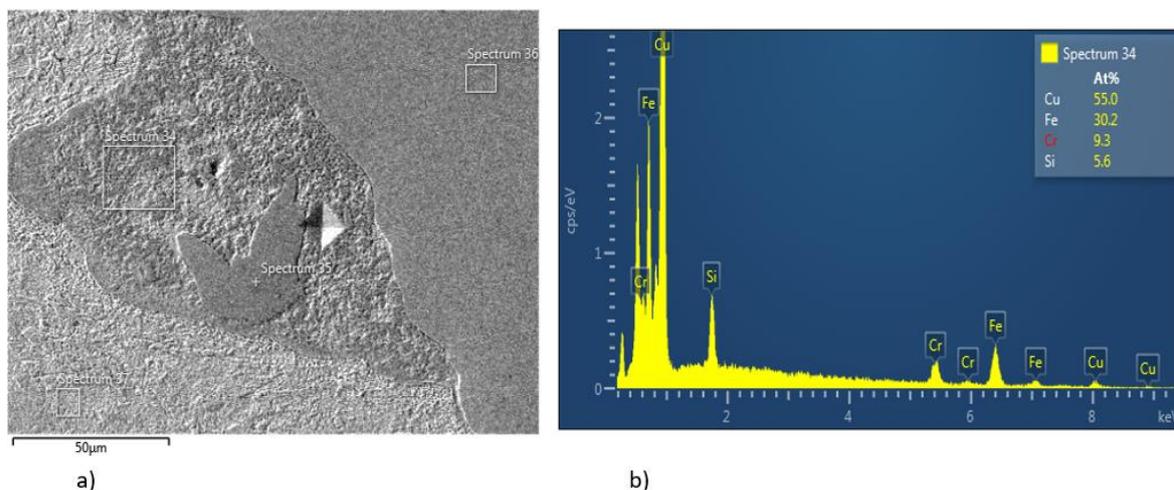


Figura 4.13. Análise SEM e EDS da amostra EW58_L: a) Micografia da interface; b) Composição do espectro 34.

Seguindo o mesmo procedimento do ensaio EW57, foi efetuada uma aproximação desta zona mista analisada onde é ainda mais perceptível a disparidade de morfologias existente, Figura 4.14 a). Os dois espectros averiguados, exibidos na Figura 4.14 b), mostram uma zona 38 composta por cobre excetuando 2,6% em peso de ferro, e um espectro 39 dominado pelos elementos constituintes do aço inoxidável, mas que engloba também 19% em peso de cobre.

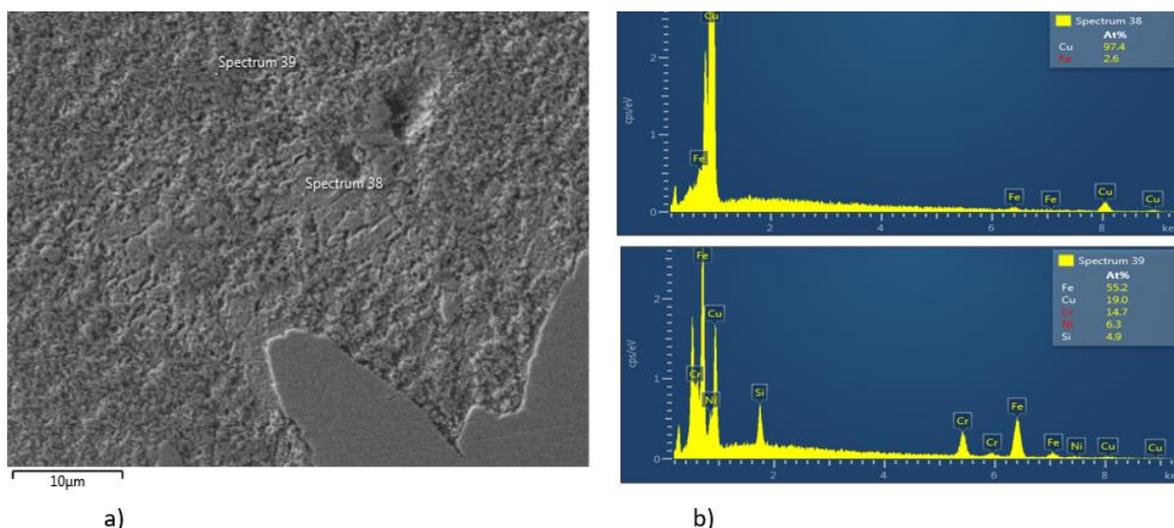


Figura 4.14. Análise SEM e EDS da amostra EW58_L: a) Micografia da interface; b) Composição do espectro 38 e 39.

4.5. Perfis de microdureza

4.5.1. EW57

Como mencionado anteriormente, foram executados três perfis verticais de microdureza para cada amostra. Uma vez que os resultados dos perfis para a mesma amostra não manifestavam uma grande diferença entre eles, foi efetuada uma média dos valores obtidos para a placa voadora e estacionária de cada amostra. Na Figura 4.15 está representado o gráfico que contém então os resultados da microdureza do ensaio EW57, incluindo a amostra transversal e longitudinal e ainda os valores de dureza dos materiais base de modo a existir um termo de comparação.

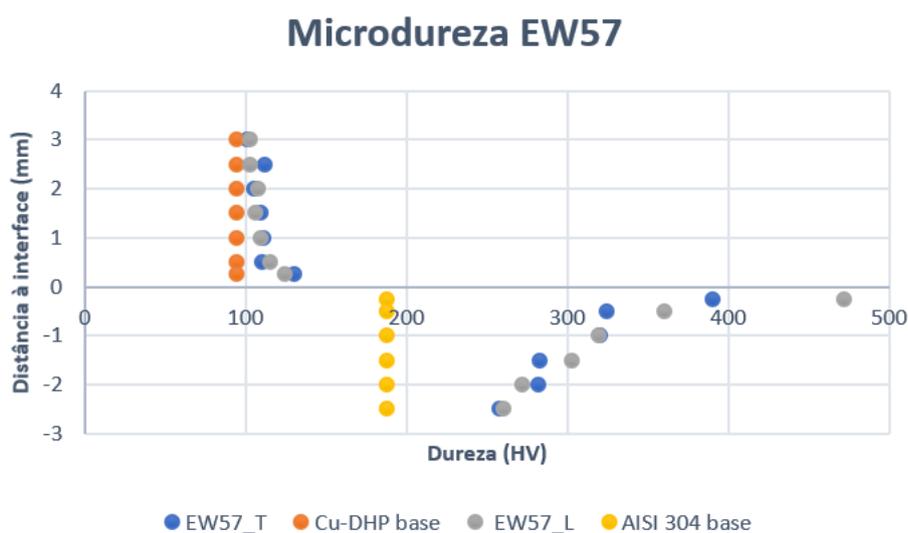


Figura 4.15. Perfis de microdureza de ambas as amostras do ensaio EW57.

Pode-se concluir que na placa voadora, valores positivos da distância à interface, não existe um aumento de dureza assinalável por parte das amostras soldadas, estando os valores muito próximos do valor base do cobre. Apenas já muito próximo da interface se regista um ligeiro aumento de dureza em ambas as amostras. Aliás, de maneira a intensificar esta teoria, a maioria dos pontos relativos à amostra transversal, a azul no gráfico, estão sobrepostos pelos pontos da amostra longitudinal e até mesmo do material base. Em

contrapartida, na placa estacionária verifica-se um aumento significativo e gradual na direção da interface. O aço inoxidável, depois de soldado, chega a apresentar valores de dureza com mais de o dobro do valor base, o que corrobora a deformação plástica como um dos principais mecanismos de endurecimentos dos aços. De realçar ainda a homogeneidade dos resultados da amostra transversal e longitudinal, apesar de nesta serem ligeiramente mais elevados.

4.5.2. EW58

O gráfico com os resultados das medições de microdureza do ensaio onde o aço inoxidável foi projetado no cobre, EW58, está expresso na Figura 4.16.

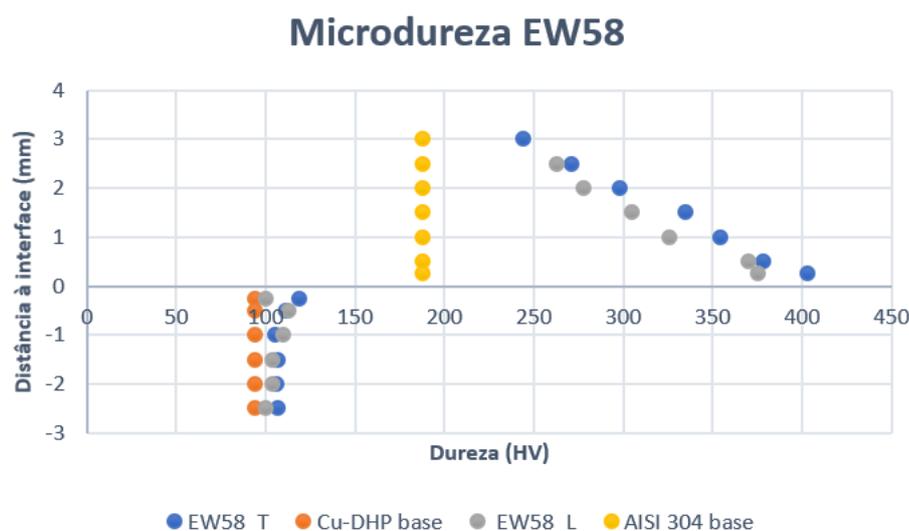


Figura 4.16. Perfis de microdureza de ambas as amostras do ensaio EW58.

À semelhança do ensaio anterior, e sabendo que aqui o cobre funcionou como placa estacionária, não se verificou um aumento relevante no cobre soldado. Tanto os valores do cobre base, da amostra transversal e da longitudinal estão bastante próximos chegando mesmo a haver sobreposição de pontos, como é perceptível no gráfico. Também neste ensaio, como tinha sido provado no anterior, o aço inoxidável indica um aumento expressivo de forma progressiva na direção da interface, provando mais uma vez o mecanismo de

endurecimento por deformação plástica característico dos aços. Aqui, ainda que sem grande expressão, é a amostra transversal que regista os maiores valores de dureza.

4.5.3. Discussão de resultados

De forma a facilitar a visualização dos resultados, a Tabela 4.4 indica parâmetros como a microdureza média de cada placa depois da soldadura e ainda o aumento, em percentagem, médio e máximo para cada placa nas quatro amostras testadas.

Tabela 4.4. Parâmetros concluídos das medições de microdureza.

		EW57_T	EW57_L	EW58_T	EW58_L
AISI 304	Microdureza média [HV]	309,5	330,9	326,1	319,5
	Aumento médio [%]	64,6	76	73,5	69,9
	Aumento máximo [%]	118	157,9	139,4	113,8
Cu-DHP	Microdureza média [HV]	111,3	109,6	109,2	105,2
	Aumento médio [%]	18,4	16,6	16,2	11,9
	Aumento máximo [%]	58,5	36,2	36,2	38,3

Em primeira instância, é possível concluir que a configuração do posicionamento das placas não desempenha um papel determinante nos valores de microdureza, quer o cobre seja usado como placa voadora e o aço inoxidável como placa estacionária ou vice-versa. O cobre não irá sofrer um aumento de dureza assinalável e os seus valores são constantes ao longo das amostras. A fugir a esta regra temos apenas a amostra transversal em que o cobre é a placa voadora, onde se registou um aumento máximo de 58,5% na vizinhança da interface. Já o aço inoxidável denota um aumento de dureza assinalável em relação ao material base, quer para as amostras transversais, quer para as

longitudinais. Apresenta um aumento médio na casa dos 70% e um aumento máximo, registado nas regiões adjacentes à interface, que ultrapassa sempre os 100%.

4.6. Ensaios de tração/corte

Foram efetuados ensaios de tração / corte aos seis provetes maquinados, três de cada ensaio. Todos eles apresentaram um comportamento muito semelhante e na Figura 4.17 é possível visualizar as curvas força-alongamento dos provetes P2 de ambos os ensaios. O mapeamento de deformações locais destes mesmos provetes alcançado através do software Aramis vem representado na Figura 4.18. No Apêndice F encontram-se as curvas força-alongamento dos restantes provetes de ambos os ensaios.

É de assinalar a paridade dos resultados obtidos não só nos valores de força máxima, mas também no local onde ocorre a fratura. O provete P2 referente ao ensaio EW57 atingiu uma força máxima de 12728 N com o correspondente alongamento de sensivelmente 1,93 mm e o provete do ensaio EW58 atingiu um máximo de força de 12270 N com um alongamento de 2,24 mm.

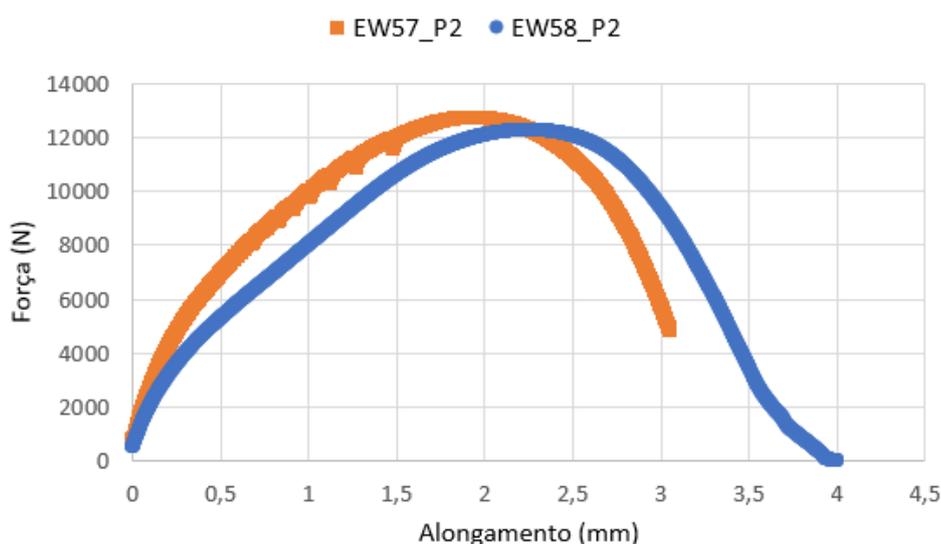


Figura 4.17. Curva força-alongamento dos provetes P2 do ensaio EW57 e EW58.

Pela interpretação da Figura 4.18 pode-se depreender que as roturas nunca aconteceram na região soldada, o que é revelador da qualidade de soldadura e excelente resistência mecânica. Em todos os provetes as fraturas ocorreram sempre no lado do cobre.

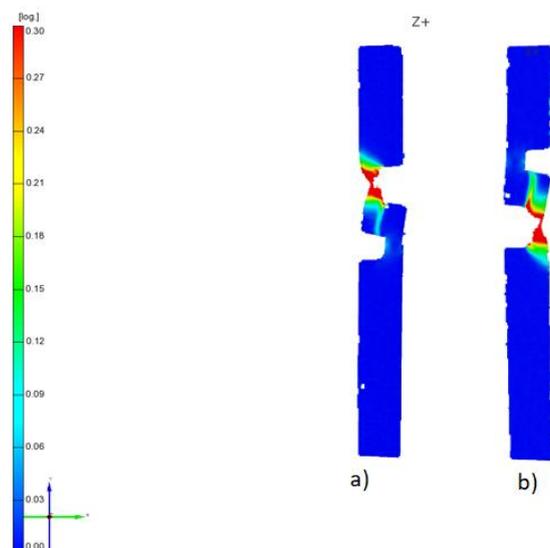


Figura 4.18. Mapa de deformações locais dos provetes P2 para: a) EW57; b) EW58.

Por último, a Figura 4.19 que mostra a análise SEM da superfície de fratura do provete P2 do ensaio EW57, permite concluir o tipo de fratura sucedido. Pela aproximação da Figura 4.19 b), são claramente visíveis os *dimples*, sinal inequívoco de uma fratura essencialmente dúctil.

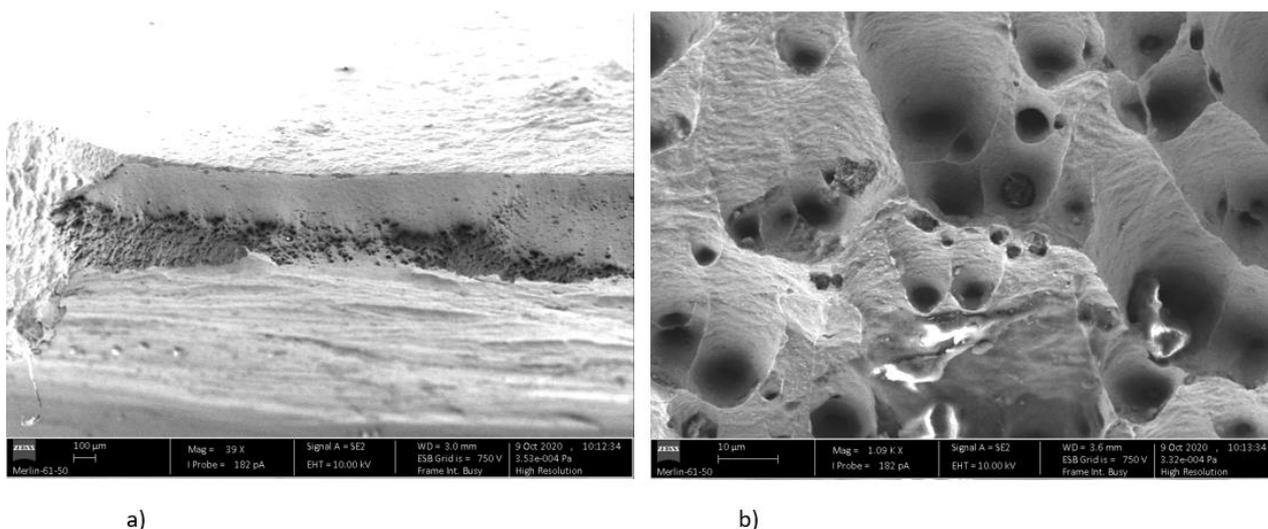


Figura 4.19. Análise SEM à superfície de fratura do provete P2 do ensaio EW57: a) 100 µm; b) 10 µm.

5. CONCLUSÕES

A investigação levada a cabo sobre soldadura por explosão entre cobre e aço inoxidável proporcionou as seguintes conclusões:

É indiferente se o cobre desempenha o papel de placa voadora e o aço inoxidável como placa estacionária ou o inverso.

Ambos os ensaios foram bem conseguidos, resultando em soldaduras com consistência e qualidade.

Os ensaios foram enquadrados dentro dos limites impostos pela janela de soldabilidade tirando um que não respeitou o limite superior para a constante $N=0,11$.

A análise das superfícies de impacto revelou interfaces longitudinais com ondas bem definidas e contínuas.

Não foram registados compostos intermetálicos, apenas em zonas pontuais mistas com composição de elementos pertencentes aos materiais base.

O aço inoxidável apresentou um elevado aumento de dureza ao contrário do cobre, que permaneceu praticamente igual.

As fraturas deste tipo de ligação são essencialmente dúcteis.

5.1. Trabalhos futuros

Tendo em conta os resultados positivos que advêm deste trabalho, no futuro pode ser feito:

Uma análise mais específica nos limites da janela de soldabilidade uma vez que, neste caso, não houve diferença entre o respeito ou não de um dos limites superiores;

Um maior estudo nos diagramas de fase que envolvam os elementos destes materiais para melhor compreensão das zonas mistas de fusão;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. H. Carpenter and R. H. Wittman, “Explosion Welding,” *Mech. Eng.*, vol. 100, no. 5, pp. 28–35, 1975.
- [2] V. Philipchuk and F. L. Bois, “Explosive Welding,” *United States Pat. Off.*, vol. 3,024,526, no. 4976, pp. 0–1, 1962.
- [3] A. H. Holtzman, G. R. Cowan, and J. J. Douglass, “Explosive Bonding,” *United States Pat. Off.*, vol. 3,137,937, 1964.
- [4] G. R. Cowan and A. H. Holtzman, “Explosively Bonded Product,” in *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, vol. 53, no. 9, Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1966, pp. 1–30.
- [5] C. R. McKenney and J. G. Banker, “Explosion- bonded metals for marine structural applications,” *Mar. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 285–292, 1971.
- [6] T. Z. Blazynski, *Explosive Welding , Forming and Compaction*. Applied Science, 1983.
- [7] F. Findik, “Recent developments in explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1081–1093, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.
- [8] M. H. Bina, F. Dehghani, and M. Salimi, “Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel,” *Mater. Des.*, vol. 45, pp. 504–509, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.037.
- [9] N. Kahraman and B. Gülenç, “Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 169, no. 1, pp. 67–71, 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.264.
- [10] A. Handbook, “Welding, Brazing and Soldering,” *Met. Park. Ohio*, vol. 6, 1993.
- [11] X. J. Sun, J. Tao, and X. Z. Guo, “Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 21, no. 10, pp. 2175–2180, 2011, doi: 10.1016/S1003-6326(11)60991-6.

-
- [12] 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, pp. 182–192, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.069.
- [13] K. Hokamoto, T. Izuma, and M. Fujita, “New explosive welding technique to weld,” *Metall. Trans. A*, vol. 24, no. 10, pp. 2289–2297, 1993, doi: 10.1007/BF02648602.
- [14] J. H. Han, J. P. Ahn, and M. C. Shin, “Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding,” *J. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 1, pp. 13–18, 2003, doi: 10.1023/A:1021197328946.
- [15] H. Zhang, K. X. Jiao, J. L. Zhang, and J. Liu, “Comparisons of the microstructures and micro-mechanical properties of copper/steel explosive-bonded wave interfaces,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 756, pp. 430–441, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.04.064.
- [16] G. R. Cowan, O. R. Bergmann, and A. H. Holtzman, “Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 2, no. 11, pp. 3145–3155, 1971, doi: 10.1007/BF02814967.
- [17] H. Zhang, K. X. Jiao, J. L. Zhang, and J. Liu, “Microstructure and mechanical properties investigations of copper-steel composite fabricated by explosive welding,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 731, no. April, pp. 278–287, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.06.051.
- [18] A. Durgutlu, B. Gülenç, and F. Findik, “Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 26, no. 6, pp. 497–507, 2005, doi: 10.1016/j.matdes.2004.07.021.
- [19] G. H. S. F. L. Carvalho, R. Mendes, R. M. Leal, I. Galvão, and A. Loureiro, “Effect of the flyer material on the interface phenomena in aluminium and copper explosive welds,” *Mater. Des.*, vol. 122, pp. 172–183, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.02.087.
- [20] A. S. Bahrani, T. J. Black, and B. Crossland, “The mechanics of wave formation in explosive welding,” *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 296, no. 1445, pp. 123–136, 1967, doi: 10.1098/rspa.1967.0010.
- [21] E. P. Carton, “Wave forming mechanisms in explosive welding,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 465–466, pp. 219–224, 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.465-466.219.
-

-
- [22] J. N. Hunt, “Wave formation in explosive welding,” *Philos. Mag.*, vol. 17, no. 148, pp. 669–680, 1968, doi: 10.1080/14786436808223020.
- [23] J. L. Robinson, “The mechanics of wave formation in impact welding,” *Philos. Mag.*, vol. 31, no. 3, pp. 587–597, 1975, doi: 10.1080/14786437508226540.
- [24] G. Zhou, J. Xu, Z. Shen, and H. Ma, “Microstructure and mechanical properties of simultaneously explosively-welded Steel/Cu pipes and Al/Cu pipe/rod,” *J. Manuf. Process.*, vol. 47, no. September, pp. 244–253, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.10.004.
- [25] 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, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/500/5/052030.
- [26] S. V. Gladkovsky, S. V. Kuteneva, and S. N. Sergeev, “Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding,” *Mater. Charact.*, vol. 154, no. May, pp. 294–303, 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.06.008.
- [27] B. Gulenc, “Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method,” *Mater. Des.*, vol. 29, no. 1, pp. 275–278, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2006.11.001.
- [28] A. Durgutlu, H. Okuyucu, and B. Gulenc, “Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel,” *Mater. Des.*, vol. 29, no. 7, pp. 1480–1484, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.07.012.
- [29] J. B. Ribeiro, R. Mendes, and A. Loureiro, “Review of the weldability window concept and equations for explosive welding,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 500, no. 5, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/500/5/052038.
- [30] A. A. Deribas and I. D. Zakharenko, “Surface effects with oblique collisions between metallic plates,” *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 10, no. 3, pp. 358–367, 1974, doi: 10.1007/BF01463767.
- [31] W. S. De Rosset, “Analysis of explosive bonding parameters,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 634–638, 2006, doi: 10.1080/10426910600611136.
-

-
- [32] J. M. Walsh, R. G. Shreffler, and F. J. Willig, “Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions,” *J. Appl. Phys.*, vol. 24, no. 3, pp. 349–359, 1953, doi: 10.1063/1.1721278.
- [33] Y. Wang, X. Li, X. Wang, and H. Yan, “Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding,” *Fusion Eng. Des.*, vol. 137, no. August, pp. 91–96, 2018, doi: 10.1016/j.fusengdes.2018.08.017.
- [34] P. Lindqvist and B. Uhrenius, “On the Fe-Cu Phase Diagram,” *Calphad*, vol. 4, no. 3, pp. 193–200, 1980.
- [35] S. A. E. Langeslag, S. Sgobba, P. Libeyre, and C. Y. Gung, “Extensive characterisation of copper-clad plates, bonded by the explosive technique, for ITER electrical joints,” *Phys. Procedia*, vol. 67, pp. 1036–1042, 2015, doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.197.
- [36] K. D. Leedy and J. F. Stubbins, “Copper alloy-stainless steel bonded laminates for fusion reactor applications: Tensile strength and microstructure,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 297, no. 1–2, pp. 10–18, 2001, doi: 10.1016/S0921-5093(00)01273-9.
- [37] H. Zhang, K. X. Jiao, J. L. Zhang, and J. Liu, “Experimental and numerical investigations of interface characteristics of copper/steel composite prepared by explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 154, pp. 140–152, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.05.027.
- [38] P.W.Cooper, *Explosives Engineering*. Wiley-VCH, 1996.
- [39] A. Loureiro, R. Mendes, J. B. Ribeiro, R. M. Leal, and I. Galvão, “Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminium,” *Mater. Des.*, vol. 95, pp. 256–267, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.116.
- [40] L. M. D. Machado, “Efeito da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável,” 2018.

APÊNDICE A

Tabela A.1 Equipamentos utilizados nas várias tarefas.

Tarefa	Equipamento
Realização das soldaduras	Câmara de detonação do LEDAP
Medição de velocidade de detonação	HP <i>universal counter</i> 5334B
Análise microestrutural	Microscópio ótico Leica DM 4000 MLED, com câmara incluída Leica MC 120HD. Resisto fotográfico é realizado no software Leica <i>Application suite</i>
Análise SEM/EDS	Microscópio eletrónico de varrimento <i>Zeiss-Gemini 2 (SEM-Scanning Electron Microscopy)</i>
Avaliação de microdureza	Shimadzu HMV-G 21 DT
Ensaio de tração/corte	SHIMADZU AGS-X 100kNXplus; Sistema ótico ARAMIS da GOM – <i>Optical measuring techniques</i>

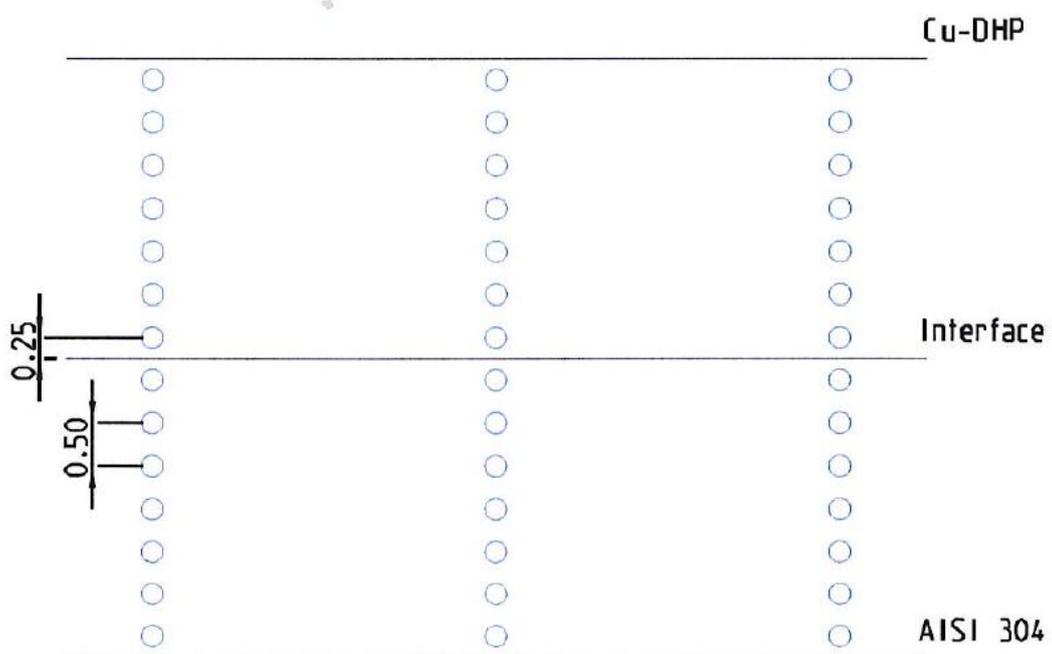
APÊNDICE C



Figura C.1 Vista de topo da soldadura EW57.



Figura C.2 Vista de topo da soldadura EW58.

APÊNDICE D**Figura D.1** Posicionamento das indentações nas medições de microdureza.

APÊNDICE E

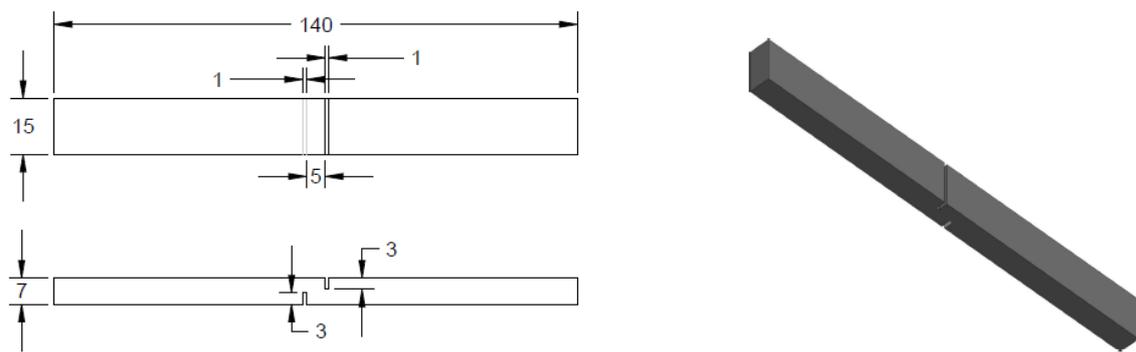


Figura E.1 Formato dos provetes maquinados.



Figura E.2 Vista frontal dos provetes.



Figura E.3 Vista de topo dos provetes.

APÊNDICE F

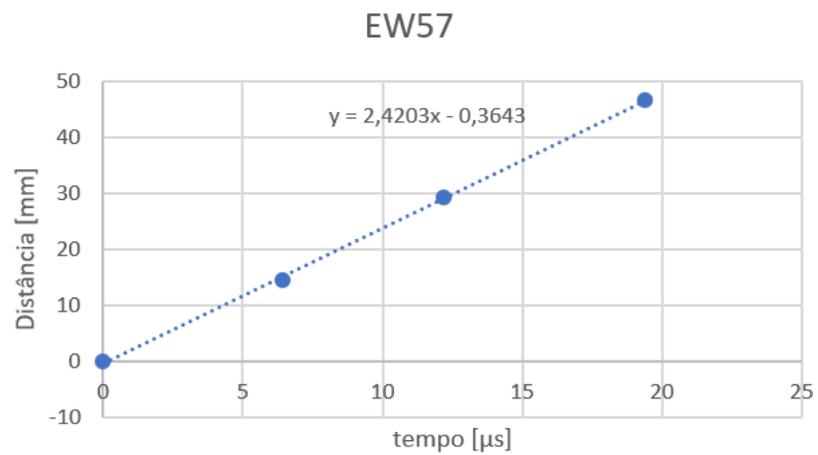


Figura F.1 Gráfico de medição da velocidade de detonação do ensaio EW57.

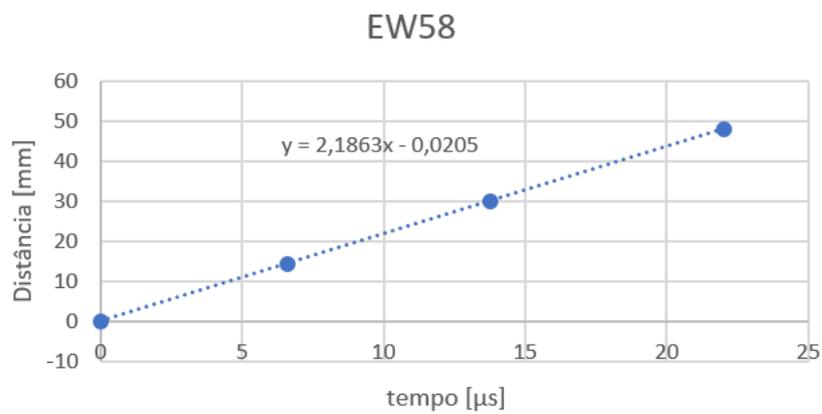


Figura F.2 Gráfico de medição da velocidade de detonação do ensaio EW58.

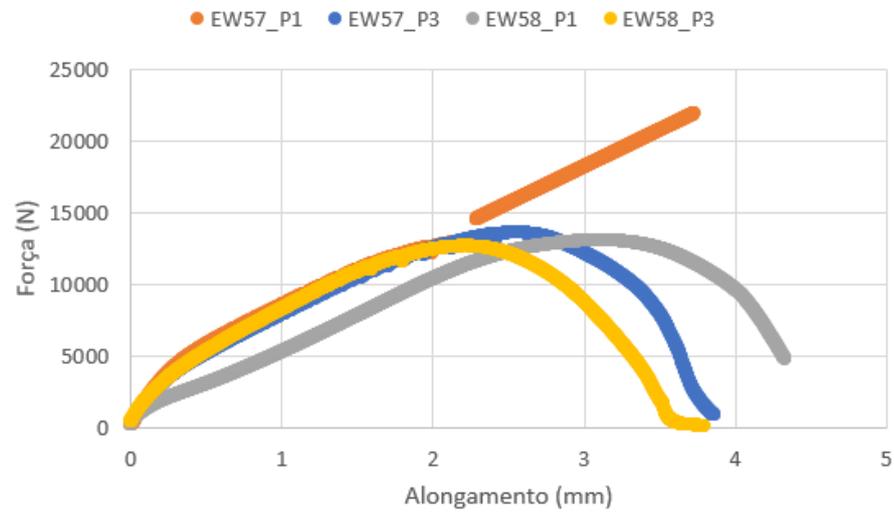


Figura F.3 Curva força-alongamento dos provetes P1 e P3 dos ensaios EW57 e EW58.

