



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Marco António Oliveira Henriques

**SOLDADURA POR EXPLOSÃO
ALUMÍNIO - AÇO INOXIDÁVEL
INFLUÊNCIA DE PLACAS INTERMÉDIAS NA
SOLDABILIDADE**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, do ramo de Produção e Projeto, orientada pelos Professores Doutores Altino de Jesus Roque Loureiro e Rui Manuel Ferreira Leal e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia.

setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

SOLDADURA POR EXPLOSÃO ALUMÍNIO - AÇO INOXIDÁVEL: INFLUÊNCIA DE PLACAS INTERMÉDIAS NA SOLDABILIDADE

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

Explosion Welding Aluminium - Stainless Steel: Influence of Interlayers Towards Weldability

Autor

Marco António Oliveira Henriques

Orientadores

Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro

Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal

Júri

Presidente **Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador **Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal**
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Vogais **Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão**
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2019

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

Walter S. Landor.

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto as cheias baixam-nas para a terra, sua mãe.”

Leonardo da Vinci.

Aos meus pais. Às minhas adoradas filhas Joana e Francisca, à Alda, minha mulher, meu porto seguro e amor da minha vida, e a Deus, por quem TUDO faz sentido.

Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de um trabalho que está longe de ser fruto apenas da minha vontade e dedicação. Para que ele tivesse sido possível, muitas pessoas e entidades contribuíram de diversas formas para que tal fosse possível.

Em primeiro lugar agradeço encarecidamente aos meus orientadores, o Professor Doutor Altino Loureiro, que já tinha sido meu professor em 1990/1991 e o Professor Doutor Rui Leal, com quem tinha já tido o prazer de partilhar a vida académica como colega de curso. A ambos agradeço sentidamente terem-me recebido e ajudado com seu conhecimento e paciência, para que este projeto pudesse chegar ao bom termo.

Um agradecimento especial aos excelentíssimos Professor Doutor Ivan Galvão, ao Professor Doutor Carlos Leitão e ao doutorando, Mestre Gustavo Carvalho, pela constante disponibilidade em ajudar-me com a sua experiência, conhecimento e conselho, interrompendo muitas vezes os seus trabalhos para meu benefício. Agradeço ainda ao Professor Doutor Ricardo Mendes, pela sua colaboração na realização dos ensaios de soldadura.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica da FCTUC, primeiramente na pessoa da Professora Doutora Ana Amaro pelo cuidado e atenção no meu encaminhamento como “regressado” à academia, aos meus colegas que partilharam comigo instalações, conhecimentos e a atenção que fui necessitando, para além de todos os funcionários, que com o seu trabalho foram, direta ou indiretamente, contribuindo para o desenrolar deste projeto. Gostaria também de mencionar nesta vertente o colega Guilherme Ferreira, mestrando que trabalhou em paralelo comigo na mesma linha de investigação e que nunca negou a sua paciente ajuda, mesmo na minha ausência por questões de vida profissional.

Devo também um agradecimento e menção especial à minha entidade patronal, o Grupo MARTIFER, em especial na pessoa do seu CEO – Sr. Eng. Pedro Duarte, minha chefia direta, que sempre me apoiou e manifestou total compreensão e disponibilidade para aceitar as minhas ausências e a divisão da minha capacidade de trabalho com este desígnio.

Por fim, mas sempre no lugar mais alto da minha consideração, devo agradecimento à minha esposa, Alda, e minhas filhas, Joana e Francisca. Deram-me sempre e incondicionalmente força e apoio que fui precisando.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da ligação, por soldadura, entre materiais dissimilares, nomeadamente entre uma liga de alumínio (EN 573-3 - EN AW 6082 T6) e um aço inoxidável (EN 10088-2 - X5CrNi 18-10), através do processo de soldadura por explosão. Mais especificamente foi estudada a influência da utilização de placas intermédias na soldabilidade das placas a unir.

Para isso foram realizados procedimentos experimentais em dois corpos de prova, tendo como elemento variável entre as experiências a utilização de dois materiais diferentes como placa intermédia, nomeadamente o aço ao carbono (EN10130 - DC05) e o chumbo, placas intermédias estas com espessura de 1 mm. Os restantes parâmetros do processo, bem como os materiais de base das placas estacionária e voadora, ambos com espessura de 3 mm, mantiveram-se para os dois procedimentos experimentais.

Por motivos desconhecidos, o explosivo apresentou um comportamento inesperado em ambos os procedimentos, o que influenciou os resultados. Para além disso, o corpo de prova com placa intermédia de chumbo não soldou.

O resultado destas experiências foi submetido a diversos ensaios, nomeadamente análise microestrutural ao microscópio ótico, SEM (microscopia eletrónica de varrimento), análise química por EDS (espectrometria de dispersão de energia), medição de microdurezas e ensaio de tração-corte complementada com análise de deformações pelo sistema ARAMIS® da GOM. As observações foram documentadas, sendo apresentadas e discutidas neste documento.

Observou-se a formação de compostos intermetálicos na ligação alumínio – aço carbono, cuja fragilidade potenciou a propagação de fissuras nessa interface.

Foi também evidenciado um aumento da dureza global nos materiais por comparação ao seu estado pré-soldadura, sendo essa variação mais significativa no aço inoxidável.

Palavras-chave: Soldadura por explosão, Placa Intermédia, Compostos Intermetálicos, Janela de soldabilidade, Velocidade de detonação, Interface de soldadura.

Abstract

The present work has as objective the study of the welding connection between dissimilar materials, namely between an aluminium alloy (EN 573-3 - EN AW 6082 T6) and a stainless steel (EN 10088-2 - X5CrNi 18-10), through the explosion welding process. More specifically, the influence of the use of interlayers on the weldability of the joining plates was studied.

For this purpose, experimental procedures were performed in two specimens, having as variable element between the experiments the use of two different materials as intermediate plate, namely carbon steel (EN10130 - DC05) and lead, intermediate plates with a thickness of 1 mm. The remaining process parameters as well as the 3 mm thick of base materials used for flyer and base plates were maintained for both experimental procedures.

Due to unknown reasons, the explosive had presented unexpected behaviour in the both procedures performed, which had influenced the results achieved. Beyond that, the test piece with lead interlayer did not become welded.

The results of these experiments were subjected to various tests, including microstructural analysis under optical microscope, SEM (scanning electron microscopy), chemical analysis by EDS (energy dispersion spectrometry), microhardness measurement and tensile testing complemented by strain analysis by the ARAMIS® - GOM system. Observations have been documented, presented and discussed in this document.

The formation of intermetallic compounds was observed in the aluminium - carbon steel bond, whose brittleness potentiated the crack propagation in this interface.

It was also evidenced an increase of the global hardness in the materials compared to their pre-welding state, this variation being more significant in stainless steel.

Keywords Explosion Welding, Interlayer, Intermetallic Compounds, Weldability Window, Detonation Speed, Welding Interface.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiv
1. Introdução.....	1
2. Caracterização do Estado da Arte.....	3
2.1. Um Pouco de História.....	3
2.2. Aplicações.....	3
2.3. O Processo de Soldadura por Explosão	5
2.3.1. Mecanismos de Ligação	6
2.3.2. Parâmetros do Processo	7
2.3.3. Possíveis Configurações.....	10
2.3.4. Particularidades da Soldadura Por Explosão Alumínio-Aço Inoxidável.....	11
2.3.5. Placa Intermédia	12
3. Fundamentação Teórica.....	15
3.1. Mecanismos de Formação do Jato	15
3.2. Mecanismos de Formação de Onda	18
3.2.1. Mecanismo de Indentação (ou Recuo)	19
3.2.2. Mecanismo de Instabilidade (ou Turbulência) do Fluxo.....	20
3.2.3. Mecanismo de Formação de Vórtices	20
3.2.4. Mecanismo de Ondas de Tensão	21
3.3. Janela de Soldabilidade.....	22
3.3.1. Limite Direito (da Formação do Jato)	23
3.3.2. Limite Esquerdo (da Formação de Ondas).....	24
3.3.3. Limite Inferior (da Cedência do Material)	24
3.3.4. Limite Superior (da Fusão do Material)	25
4. Procedimento Experimental	27
4.1. Materiais Utilizados	27
4.1.1. Placa Voadora – Alumínio	27
4.1.2. Placa Estacionária – Aço Inoxidável.....	28
4.1.3. Placa Intermédia I – Aço ao Carbono.....	29
4.1.4. Placa Intermédia II – Chumbo.....	30
4.2. Montagem Experimental.....	30
4.3. Parâmetros Utilizados	31
4.4. Rastreabilidade das Amostras	31
4.5. Medição da Velocidade de Detonação.....	32
4.6. Ensaios Realizados	32
4.6.1. Ensaios Metalográficos.....	33

4.6.2.	Ensaio Mecânico	35
5.	Apresentação e Discussão de Resultados	37
5.1.	Considerações Sobre a Construção da Janela de Soldabilidade	37
5.1.1.	Determinação dos Parâmetros Operacionais	38
5.1.2.	Enquadramento do Procedimento na Janela de Soldabilidade	40
5.2.	EW49 – Placa Intermédia de Aço Carbono	41
5.2.1.	Análise Macroscópica	41
5.2.2.	Análise Microscópica	42
5.2.3.	Análise do Comportamento Mecânico	48
5.3.	EW50 – Placa Intermédia de Chumbo	52
5.3.1.	Análise Macroscópica	52
5.3.2.	Análise Microscópica	53
5.3.3.	Análise do Comportamento Mecânico	56
6.	Conclusões	57
6.1.	Propostas de Continuidade de Investigação	58
	Referências Bibliográficas	59
	APÊNDICE A	65
	APÊNDICE B	67
	ANEXO A	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Exemplo de aplicação da soldadura por explosão, ramo naval (adaptado de [5])	4
Figura 2.2. Exemplo de aplicação de soldadura por explosão (retirado de [6]).....	4
Figura 2.3. Representação da soldadura por explosão entre duas chapas (adaptado de [7]).	5
Figura 2.4. Típica Zona de Ligação entre Titânio e Aço (adaptado de [4]).....	7
Figura 2.5. Representação esquemática de uma montagem oblíqua (adaptado de [22]).....	10
Figura 2.6. Representação esquemática de um exemplo de montagem cilíndrica (adaptado de [23]).....	11
Figura 2.7. Representação esquemática da soldadura por explosão utilizando uma placa intermédia (adaptado de [25], fig. 1, pág. 233).....	13
Figura 3.1. Distribuição de pressões a diferentes velocidades do ponto de colisão. a – baixa velocidade; b – abaixo do limiar supersónico; c – acima do limiar supersónico (retirado de [2], fig. 10, pág. 10).....	17
Figura 3.2. Esquema exemplificativo dos estágios do mecanismo de indentação (adaptado de [2], fig. 11, pág. 11).....	19
Figura 3.3. Analogia exemplificativa da formação de vias de vórtices de Von-Karman num fluido (retirado de [4], fig. 8, pág. 3150).....	21
Figura 3.4. Representação genérica de uma Janela de Soldabilidade (adaptado de [10], fig. 2, pág. 517).....	22
Figura 4.1. Fotografias dos corpos preparados para soldadura: a) – EW49; b) – EW50	30
Figura 4.2. Preparação do corpo de prova EW49 para os ensaios e identificação das respetivas amostras.....	31
Figura 4.3. Preparação do corpo de prova EW50 para os ensaios e identificação das respetivas amostras.....	32
Figura 4.4. Amostras para ensaio metalográfico. As setas indicam o sentido da detonação. a) EW49-L2 e EW49-L4; b) EW50-FL e EW50-BL.....	33
Figura 4.5. Provetes do corpo de prova EW49, maquinados para ensaio tração-corte	35
Figura 4.6. Pormenor da preparação dos provetes para ensaio tração-corte com o contraste para ARAMIS®	35
Figura 5.1. Posicionamento dos EW49 e EW50 na janela de soldabilidade.....	41
Figura 5.2. Fotografias do corpo de prova EW49 depois do procedimento.....	41
Figura 5.3. Micrografias da amostra EW49-L2: a) Interface com descontinuidade; b) Fissura na zona de intermetálicos; c) sem descontinuidade, com vórtice no aço e deformação do grão	43

Figura 5.4. Micrografia da amostra EW49-L4: Interface onde se evidencia achatamento do grão da placa voadora por deformação plástica	43
Figura 5.5. Micrografias da amostra EW49-L4: Interface onde se evidencia a formação de ondas e desprendimento de porções de aço	44
Figura 5.6. Micrografia da interface Aço Carbono/Inoxidável da amostra EW49-L2, onde se evidenciam a deformação dos grãos e os vórtices formados na placa estacionária.....	44
Figura 5.7. Micrografias da interface Aço Carbono/Inoxidável da amostra EW49-L4: a) com ataque eletrolítico ao aço inoxidável; b) com ataque NITAL ao aço carbono	45
Figura 5.8. Imagens SEM na interface alumínio – aço carbono: a) da amostra EW49-L2; b) da amostra EW49-L4	45
Figura 5.9. Investigação EDS na interface alumínio – aço carbono da amostra EW49-L4	46
Figura 5.10. Diagrama binário de equilíbrio Al-Fe (retirado de [49])	47
Figura 5.11. Perfil de microdurezas no EW49	48
Figura 5.12. Indentações específicas em HV _{0,025} no EW49	49
Figura 5.13. Representação gráfica Força vs Deslocamento no ensaio tração-corte do EW49	50
Figura 5.14. Foto da zona de fratura e representação das deformações locais de Von Mises para os provetes: a) EW49-T2; b) EW49-T3	50
Figura 5.15. SEM/EDS Fratura EW49-T2, lado alumínio	51
Figura 5.16. SEM/EDS Fratura EW49-T2, lado alumínio	51
Figura 5.17. SEM/EDS Fratura EW49-T2, lado aço inoxidável.....	52
Figura 5.18. Fotografias do corpo de prova EW50 depois do procedimento.....	53
Figura 5.19. Micrografias do EW50: a) EW50-FL; b) EW50-BL	53
Figura 5.20. Imagens SEM/EDS EW50 FL	54
Figura 5.21. Imagens SEM/EDS EW50 BL.....	55
Figura 5.22. Perfil de microdurezas no EW50	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição Química nominal (em %) da Liga de Alumínio (retirado de [41])	28
Tabela 4.2. Propriedades Mecânicas nominais da Liga de Alumínio (retirado de [43]).....	28
Tabela 4.3. Composição Química nominal (em %) da Liga de Aço Inoxidável (retirado de [45]).....	29
Tabela 4.4. Propriedades Mecânicas nominais da Liga de Aço Inoxidável (retirado de [45])	29
Tabela 4.5. Composição Química nominal (em%) do Aço Carbono (retirado de [46]).....	29
Tabela 4.6. Propriedades Mecânicas nominais do Aço Carbono (retirado de [46]).....	29
Tabela 5.1.Dados dos materiais para construção da Janela de Soldabilidade	38
Tabela 5.2.Determinação da Velocidade de Detonação	39

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$A_{50\text{mm}}$ – Alongamento à rotura, medido com provete de 50 mm

C_b – Velocidade de propagação do som no material

C_P - Calor específico a pressão constante para um material

E – Módulo de Elasticidade

$\sqrt{2E}$ – Velocidade característica do explosivo segundo Gurney

h – Espessura da placa

HV – Dureza Vickers do material (o número que eventualmente acompanha, significa a carga de indentação – ex: HV0,2, carga de indentação 0,2 kg=1,961 N)

HV_B – Dureza Vickers da placa de base ou estacionária

HV_F – Dureza Vickers da placa voadora

k – Condutividade térmica do material

k_1 – Constante da equação de Deribas e Zakharenko

N – Constante da equação de limite superior de Wittman

R – Rácio de Explosivo

Re – Número de Reynolds

Re_{cr} – Número de Reynolds crítico para a formação de ondas

R_m – Tensão de rotura à tração

$R_{p0,2}$ – Tensão de cedência, medida a 0,2% no domínio plástico

T_m – Temperatura de fusão do material

V_C – Velocidade do ponto de colisão, também designada por velocidade de colisão

$V_{C,min}$ – Velocidade de colisão mínima que gera pressão suficiente para a cedência do material

$V_{C,tr}$ – Velocidade de colisão, de transição para interface plana a ondulada

V_d – Velocidade de detonação do explosivo

V_P – Velocidade da placa voadora ao impactar na placa estacionária

β – Ângulo de colisão

ρ – Densidade do material, dada pela massa específica

ρ_B – Densidade do material da placa de base ou estacionária, dada pela massa específica

ρ_F – Densidade do material da placa voadora, dada pela massa específica

Siglas

ANFO – Sigla para designar um explosivo, à base de uma mistura de nitrato de amónia (AN) e óleo combustível (FO)

CEMMPRE - Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EDS – *Energy Dispersion Spectrometry* – Espectrometria de Dispersão de Energia

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPN – Instituto Pedro Nunes

LEDAP – Laboratório de Energética e Detónica (Condeixa-A-Nova)

MD – *Molecular Dynamics*, metodologia da dinâmica molecular de nanopartículas

MDF – *Medium Density Fiberboard* – material de média densidade, derivado da madeira, utilizado neste trabalho como material para a construção da cofragem do explosivo. Este material é perdido no procedimento da soldadura

RDX – acrónimo de **R**esearch **D**eartment **eX**plosive - Explosivo de alta sensibilidade, também chamado de cyclonita ou hexogénio. Formalmente é uma ciclotrimetilenoetrinitramina (C₃H₆N₆O₆). Muito sensível à percussão ou fricção [1]

SEM – *Scanning Electron Microscopy* – Microscopia Eletrónica de Varrimento

STD – *Stand-off Distance*. Distância de espaçamento entre placas

1. INTRODUÇÃO

Como trabalho desenvolvido pelo Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos (CEMMPRE), do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), encontra-se em curso a investigação sobre o processo de Soldadura por Explosão.

Este processo, se bem que seja conhecido desde cerca de meados do Século XX, não tem tido de facto o estudo e desenvolvimento que já mereceram outros processos de soldadura, mais correntes e comumente utilizados na indústria a nível global. Este aparente menor interesse advém principalmente do facto de utilizar como fonte de energia a explosão controlada de uma quantidade de substância explosiva, que exige condições e cuidados que não são facilmente massificados. Isso acabou por limitar também a produção de investigação.

Recentemente, com novas necessidades criadas por novos produtos e novos sectores, como a indústria aeroespacial, recipientes sob pressão para indústrias de processo e equipamentos de criogenia, a Soldadura por Explosão tem merecido um interesse crescente. De facto, além de ser relativamente económico, é um processo que permite bons resultados na ligação, por exemplo, de materiais dissimilares com propriedades físicas muito distintas, situação onde outros processos de soldadura não se apresentam eficazes.

Além disso, a opção pela ligação soldada de materiais dissimilares, resolve também problemas originados pelos processos de ligação tradicionalmente utilizados nestas situações, nomeadamente as ligações mecânicas. Realmente, quando as peças ligadas mecanicamente são submetidas a ambientes muito agressivos, existe uma elevada suscetibilidade de desenvolvimento de fenómenos de corrosão galvânica, o que diminui a vida útil dos sistemas. Com a ligação soldada, o risco de aparecimento desse problema poderá ser significativamente reduzido.

Outra vantagem importante na soldadura por explosão é o facto de ser um processo que permite ligação soldada de superfícies, algo que outros processos de soldadura, utilizados tradicionalmente, não permitem.

Tendo em conta a pertinência do tema e a relativa escassez de investigação desenvolvida, esta dissertação encontra-se inserida nesse processo, tendo-se debruçado sobre o estudo da ligação entre uma liga de alumínio e uma liga de aço inoxidável, materiais correntes no mercado, com o foco específico de estudar a influência da utilização de placas intermédias de outros metais na eficácia dessa ligação, nomeadamente neste caso o aço ao carbono e o chumbo. A expectativa é que a placa intermédia permita eliminar ou atenuar alguns problemas, principalmente aqueles que se relacionam com a formação de compostos intermetálicos indesejados, como é fácil que aconteça neste caso.

A estrutura deste documento expõe primeiramente uma caracterização do estado da arte, no capítulo 2, complementado no capítulo 3 por considerações teóricas resultantes da revisão bibliográfica realizada. Posteriormente apresenta-se, no capítulo 4, o procedimento experimental adotado. Os resultados dos ensaios realizados e a discussão desses mesmos resultados, são expostos no capítulo 5. Por fim propõe-se, no capítulo 6, um conjunto de conclusões e possíveis linhas de continuidade de investigação futura.

2. CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1. Um Pouco de História

Como acontece em numerosas situações ao longo da história da humanidade, a soldadura por explosão resultou não propriamente de um desenvolvimento intencional, mas da observação empírica.

Efetivamente, a primeira referência a uma ligação metálica resultante da força de uma explosão foi nos primeiros anos da Segunda Grande Guerra Mundial, quando Leroy Carl observou que os fragmentos expelidos pela explosão de bombas ficavam ligados a outras superfícies metálicas (tendo documentado essa observação numa publicação de 1944 intitulada “*Brass welds, made by detonation impulse*”), conforme mencionado nas publicações [2][3].

Posteriormente, é já na década de 1960 que a soldadura por explosão se foi estabelecendo como um processo por excelência na execução de revestimentos metálicos. No registo norte-americano de patentes encontram-se duas praticamente contemporâneas. A descrição dos mecanismos de ligação por explosão foi registada em 1964 (US Patent 3,137,937, por G. R. Cowan, J. J. Douglas, A. H. Holtzman – “*Explosive bonding*”), sendo o processo para utilização comercial patenteado pela E. I. du Pont de Nemours & Co (U.S. Patent 3,140,539 – “*Process for Bonding Metals by Explosive Means*”), como referido nos documentos [2][3][4].

2.2. Aplicações

A soldadura por explosão é um processo que deve ser realizado em locais preparados para o efeito e é utilizada principalmente para obter peças em bruto, tarugos ou lingotes, embora também possa ser utilizada para aplicações como a junção de tubos ou a fixação de tubos em flanges cegas ou tampas. Devido à sua natureza, é frequentemente utilizada para junção de materiais que, devido à diferença de propriedades físicas entre si, são difíceis de unir utilizando outros métodos de soldadura. Um exemplo de uma aplicação deste tipo de soldadura é a ligação entre secções de alumínio a peças de aço. Depois de

assegurada essa ligação dissimilar, facilmente se podem utilizar métodos de soldadura correntes para acrescentar outros componentes de alumínio, como por exemplo, a superestrutura de um navio, feita de alumínio, ligada ao respetivo casco de aço, conforme exemplificado na Figura 2.1.

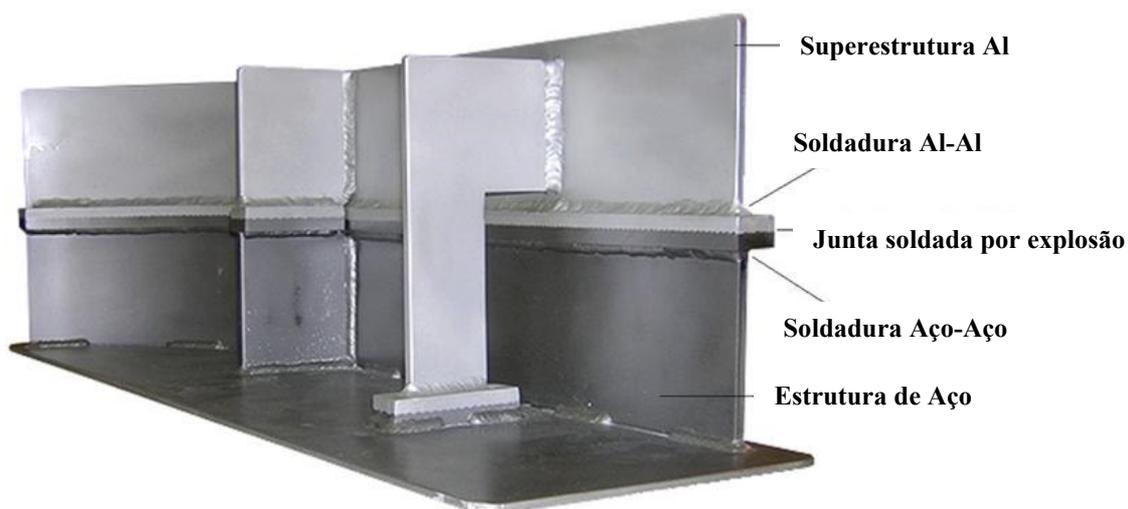


Figura 2.1. Exemplo de aplicação da soldadura por explosão, ramo naval (adaptado de [5])

Outra aplicação possível é o fabrico de placas mistas, onde uma placa de base é revestida com uma folha ou placa de outro metal, utilizado por exemplo em flanges de permutadores de calor, como mostrado na Figura 2.2., onde se reveste uma placa de aço ao carbono com uma folha de chapa de aço inoxidável.

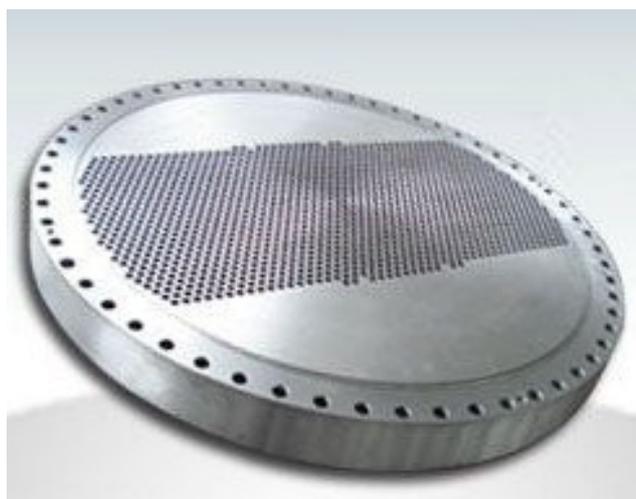


Figura 2.2. Exemplo de aplicação de soldadura por explosão (retirado de [6])

2.3. O Processo de Soldadura por Explosão

A soldadura por explosão é um processo de união entre superfícies que desenvolve uma pressão extremamente elevada durante um curto período de tempo. Essa pressão resulta da projeção de uma superfície, chamada placa voadora, contra outra, designada como placa de base ou estacionária, a velocidades muito elevadas. Tal pode ser visualizado no esquema da Figura 2.3, notando que, para que a explosão produza esse efeito é necessário que a placa voadora parta de uma determinada distância da placa estacionária, parâmetro denominado STD – Stand-off Distance (espaçamento entre placas).

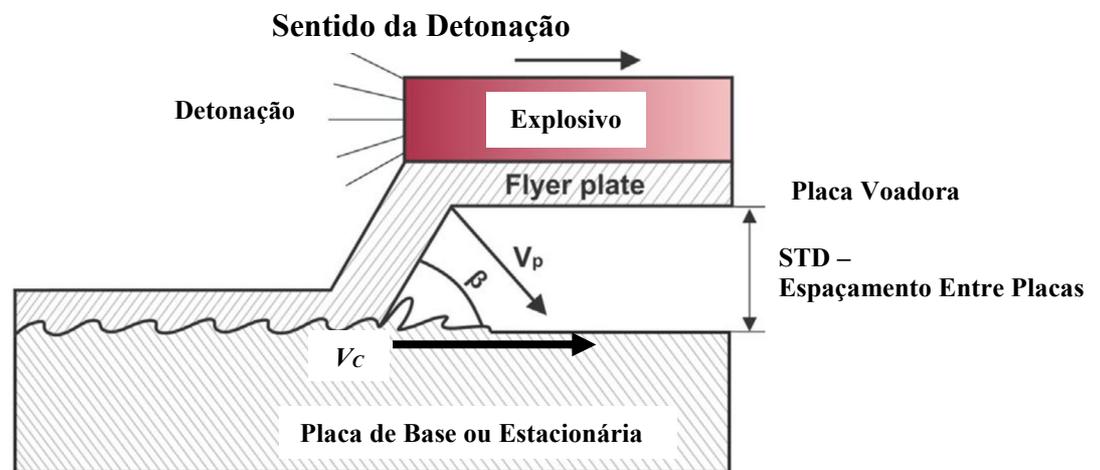


Figura 2.3. Representação da soldadura por explosão entre duas chapas (adaptado de [7]).

A detonação do explosivo origina a progressão da explosão a uma determinada velocidade, causando a projeção da placa voadora na placa de base segundo um ângulo de colisão (na Figura 2.3 designado por β), com o ponto de colisão progredindo também a uma velocidade do ponto de colisão V_C .

Na colisão a alta velocidade das chapas metálicas, caso o ângulo de colisão e a velocidade do ponto de colisão estejam na gama necessária para a ligação, há entre elas a formação de um jato que é projetado para frente, no sentido da progressão da explosão. O principal benefício desse jato é a eliminação por arrastamento das camadas superficiais que, no caso dos metais, contêm geralmente filmes não metálicos, tais como filmes de óxidos, que são prejudiciais para o estabelecimento de uma ligação metalúrgica. Assim, as chapas de metal, que pela ação desse jato são limpas de quaisquer impurezas à superfície, são unidas sob a influência da pressão muito alta que é obtida na região contígua à colisão. A elevada pressão desenvolvida causa igualmente uma significativa deformação plástica localizada na interface dos metais a unir, estabelecendo-se uma ligação de natureza

metalúrgica e geralmente tão ou mais forte que o metal base de menor resistência. Segundo Cowan, *et al.* [4], a existência factual deste jato na soldadura por explosão foi experimentalmente confirmada por métodos distintos.

Por outro lado, a quantidade de calor desenvolvida é relativamente baixa quando comparada com outros processos, como por exemplo os que envolvem a fusão dos materiais. Neste caso, segundo Weman [8], essa fusão não existe (ou se ocorrer será apenas em zonas muito limitadas, com fusão localizada), não permitindo, em teoria, que os materiais das duas peças possam ser misturados ou possam reagir quimicamente entre si.

2.3.1. Mecanismos de Ligação

2.3.1.1. Formação do Jato

Um dos pressupostos fundamentais para a ligação de materiais por colisão a alta velocidade é a existência de um jato à frente do ponto de colisão. Esse fenómeno condiciona, e na verdade possibilita a ligação eficaz e com qualidade na soldadura por explosão. O jato contém as substâncias existentes nas camadas superficiais das chapas em colisão, que normalmente são constituídas por óxidos e impurezas, e que impedem a formação de uma ligação efetiva [9]. Assim, como afirmado por Hoseini Athar, *et al.* [10], a formação do jato leva a que esses compostos sejam expelidos a alta pressão da zona de colisão, possibilitando o contacto entre superfícies completamente limpas. Segundo Deribas, como referido por [2] e [11], trata-se de um fenómeno de autolimpeza. Este tema será desenvolvido em mais detalhe no capítulo 3.1.

2.3.1.2. Formação de Ondas

A zona de ligação entre chapas metálicas soldadas por explosão evidencia muitas vezes uma ligação com uma morfologia ondulada na zona da interface. Além da relevância tecnológica que este aspeto possui, é também de assinalar o padrão periódico muito regular em que ocorre, o que pode ser surpreendente atendendo às condições violentas em que se forma a zona de ligação.

Como mencionado por Cowan, *et al.* [4], primeiro foram Cowan e Holtzman que sugeriram que a formação de ondas na zona de ligação de chapas soldadas por explosão é análoga ao escoamento de um fluido ao passar por um obstáculo, quando este é

caracterizado por um número de Reynolds – Re - superior a **50**, no qual se pode observar a formação regular de turbilhões (conforme Figura 2.4.).

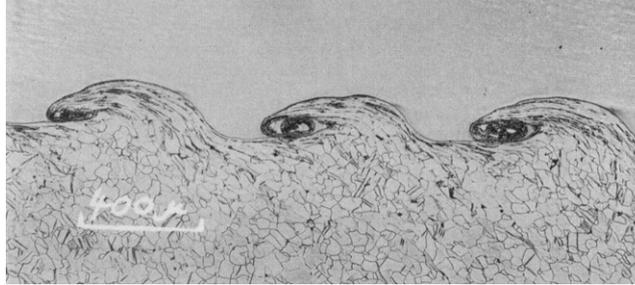


Figura 2.4. Típica Zona de Ligação entre Titânio e Aço (adaptado de [4])

Ainda segundo Cowan, *et al.* [4], Burkhardt, Hornbogen e Keller observaram também, em preparações angulares, que a transição da ocorrência de uma zona de ligação suave para uma zona ondulada, acima de uma velocidade do ponto de colisão crítica, pode ser caracterizada analiticamente. Este tema será detalhado no capítulo 3.2.

2.3.2. Parâmetros do Processo

A preparação mais tradicional para soldadura por explosão consiste em duas placas (placa de base ou também denominada de placa estacionária e a placa voadora), posicionadas uma sobre a outra, separadas por uma distância que segundo alguns autores, como Akbari-Mousavi, *et al.* [12], anda à volta de uma a duas vezes a espessura da placa voadora (sendo esta distância um dos parâmetros a considerar, o STD – Stand-Off Distance) como referido em [12][13]. Este parâmetro será desenvolvido no subcapítulo 2.3.2.3.

Como referido por Akbari-Mousavi, *et al.* [12], o explosivo é colocado sobre a placa voadora, no interior de uma moldura construída num material cuja influência no processo seja inócua, sendo muitas vezes utilizada a madeira ou sucedâneo desta.

A caracterização do tipo de explosivo, a quantidade de explosivo por área a soldar (espessura de camada de explosivo na preparação), e a composição do mesmo são definidos de modo a que seja libertada uma energia previamente determinada, a uma velocidade de detonação também previamente definida [12]. Assim, outros parâmetros relevantes a considerar são a definição do explosivo (desenvolvido em 2.3.2.1) e a determinação do rácio de explosivo (detalhado em 2.3.2.2). Como referido por Durgutlu, *et al.* [13], também se pode considerar, num sentido mais estrito, fatores como a velocidade de detonação do explosivo, a velocidade de colisão da placa voadora, a velocidade do

ponto de colisão ou a velocidade de soldadura como parâmetros relevantes para o processo. Embora, inegavelmente, sejam fatores de influência importante, eles são, na verdade, resultado da definição prévia, em função dos materiais a unir, dos parâmetros já referidos e relacionados com o explosivo [12][14].

Também é referido como fator com influência considerável, o tipo de “bigorna” ou piso da instalação utilizada no processo, já que poderá ter alguma influência na qualidade das soldaduras obtidas, como mencionado por Acarer, *et al.* [14]. No entanto este fator não foi considerado neste trabalho.

2.3.2.1. Escolha do Explosivo

O uso de explosivos é algo praticado pela humanidade desde tempos ancestrais. Embora não se conheça com exatidão quando foi descoberta, a pólvora foi, no entanto, o único explosivo utilizado entre os séculos IX a.C. e meados do século XVIII, sendo aplicado em armamento, exploração geológica ou mineira e engenharia civil. A revolução industrial trouxe a criação e desenvolvimento de novas substâncias explosivas, trazendo também com ela alguma especialização entre fins militares e industriais.

Em termos gerais conhecem-se explosivos denominados como de “Baixa Ordem” e de “Alta Ordem”, conforme as reações de explosão se caracterizem como de deflagração ou detonação respetivamente [15]. A diferença entre estas é a velocidade da progressão da reação explosiva. Enquanto na primeira categoria a velocidade é claramente subsônica, o que não gera ondas de choque, na segunda as velocidades atingidas poderão ultrapassar a velocidade do som, gerando ondas de choque, altas temperaturas e altas pressões, sendo ainda assim considerados explosivos mais seguros que os de “Baixa Ordem”[15].

Dentro dos explosivos de alta ordem, existem:

- Os **primários**, extremamente sensíveis ao calor, fricção, impacto e eletrostática, normalmente utilizados na indústria como constituintes de dispositivos detonadores;
- Os **secundários**, também sensíveis, especialmente ao calor, que tendencialmente detonam facilmente quando juntos em quantidades significativas (exemplo da dinamite);

- Os **terciários**, são os que necessitam de uma elevada energia inicial para detonar. O ANFO é um exemplo deste tipo de explosivo [15].

O ANFO é, portanto, um explosivo de alta ordem, de tipo terciário, muito utilizado na indústria mineira e geologia. Trata-se de uma mistura de Nitrato de Amónia com 6% Óleo Combustível (Fuel Oil), fornecida sob a forma de pó ou granulado, segundo [10][13] e que pode atingir velocidades de detonação entre 2000 m/s e 3000 m/s [16]. Trata-se de um explosivo com elevado poder de libertação de energia e com um custo bastante baixo o que potencia bastante o seu uso na atividade económica.

O ANFO foi o explosivo utilizado no procedimento experimental deste trabalho.

2.3.2.2. Definição do Rácio de Explosivo

Outro dos parâmetros importantes para prossecução de uma soldadura por explosão de qualidade é o chamado Rácio de Explosivo (R), que não é mais do que a relação entre a massa de explosivo utilizada no processo de soldadura e a massa da placa voadora [17][18].

Este parâmetro tem relevância porque está relacionado, quer com a velocidade de detonação, quer com o ângulo de colisão β , já que o aumento de R tem como consequência o aumento de ambos, influenciando assim a morfologia da zona de interface da soldadura, favorecendo o aparecimento de uma interface ondulada [18][19]. Isto provocará igualmente um aumento das durezas dos materiais, por via do aumento do nível das deformações plásticas verificadas na zona de interface [18].

Este parâmetro influencia a janela de soldabilidade, visto que para valores de R acima de um determinado patamar começa a haver uma fusão dos materiais e a consequente formação de compostos intermetálicos, normalmente indesejados pelas suas más propriedades mecânicas [17][19].

2.3.2.3. Definição da Distância de Espaçamento entre Placas (Stand-Off Distance – STD)

O terceiro parâmetro muito importante deste processo, e que está diretamente relacionado com os anteriores é a chamada Stand-Off Distance, ou seja, a distância que existe entre a placa voadora e a estacionária antes de iniciar o processo de soldadura. Esta STD, é determinada a partir do valor da espessura da placa voadora.

Tal como o rácio de explosivo, o aumento da STD implica igualmente com a velocidade de progressão do ponto de colisão, com o ângulo de colisão e por conseguinte com a morfologia ondulada da interface [18][19]. Para um mesmo valor de R, por exemplo, um maior valor de STD permitirá obter maiores velocidades de colisão, já que a placa voadora poderá atingir velocidades mais elevadas. Observam-se também efeitos semelhantes àqueles sentidos para o aumento do R, no que concerne ao endurecimento da interface devido a uma maior deformação plástica da mesma associado ao aumento do STD, conforme referido por diversas publicações [13][19][20][21].

Este parâmetro é igualmente considerado na avaliação da janela de soldabilidade.

2.3.3. Possíveis Configurações

No seu desenvolvimento, a soldadura por explosão foi assumindo diversas configurações distintas, como forma de melhorar a sua eficácia e propriedades da ligação e/ou possibilitar aplicações mais alargadas em função das necessidades de utilização.

2.3.3.1. Configuração Paralela

É configuração mais frequente e também a utilizada no procedimento experimental deste trabalho, estando esquematizada na Figura 2.3. Em termos industriais é utilizada para grandes áreas e espessuras elevadas.

2.3.3.2. Configuração Oblíqua

Utilizada com explosivos de velocidades de detonação mais elevadas e com maior densidade. É mais comum também em utilizações de pequenas áreas. Ver Figura 2.5.

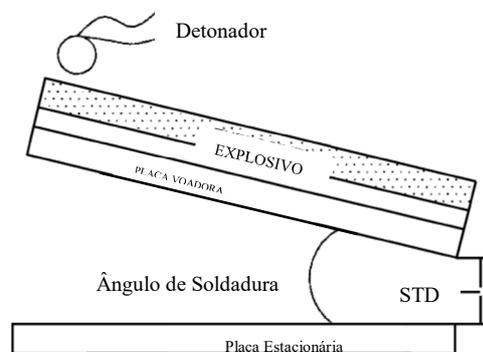


Figura 2.5. Representação esquemática de uma montagem oblíqua (adaptado de [22])

2.3.3.3. Configuração Cilíndrica

Normalmente utilizada na união de tubos ou revestimento metálico de estruturas tubulares. Neste caso, existem duas variantes cuja diferença é simplesmente no que toca à montagem do explosivo: numa possibilidade, o explosivo é colocado no interior do tubo de menor diâmetro e a explosão provoca a sua expansão e consequente colisão com a parede do tubo exterior; na outra possibilidade, o explosivo é colocado numa câmara com os tubos a unir no interior da câmara. A explosão provoca uma compressão do tubo exterior, que colidirá contra o tubo interior (exemplificada na Figura 2.6).

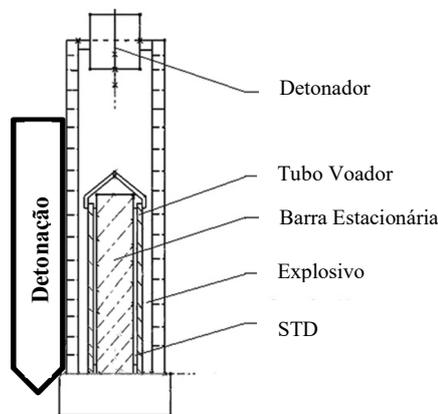


Figura 2.6. Representação esquemática de um exemplo de montagem cilíndrica (adaptado de [23])

2.3.4. Particularidades da Soldadura Por Explosão Alumínio-Aço Inoxidável

O desenvolvimento e industrialização de ligações entre alumínio e aço inoxidável representam um avanço técnico assinalável em engenharia, nomeadamente para a indústria dos meios de transporte, no fabrico de automóveis ou equipamento ferroviário. O desafio particular na soldadura destes materiais reside nas diferenças significativas entre as suas propriedades físicas, como referido por Carvalho, *et al.* [17]. No entanto, o interesse na sua aplicação tem merecido muita atenção quer da indústria, quer dos investigadores.

2.3.4.1. Morfologia Típica da Interface

Dependendo da escolha dos parâmetros a utilizar e das condições de realização do processo, a interface, que tipicamente se espera que ocorra nas ligações por soldadura explosiva destes materiais, é ondulada e sem evidência de anomalias, como fissuras ou

poços de fusão [9], embora sejam também reportadas situações de ligações consistentes, onde a morfologia da ligação é completamente plana, sem evidência de ondas, sejam elas bem definidas ou irregulares [24]. Ainda segundo esta mesma publicação, evidencia-se que ao nível da microestrutura, o grão na interface é alongado e achatado, o que é coerente com uma elevada deformação dos materiais nessa zona, embora possa haver ocasiões em que, devido às elevadas pressões e temperaturas envolvidas, haja o refinamento do grão por recristalização em finas regiões onde essas temperaturas e pressões atinjam valores mais altos (sendo no entanto áreas muito pequenas devido à velocidade em que ocorre o processo).

2.3.4.2. Suscetibilidade para a Formação de Compostos Intermetálicos

Na continuidade do ponto anterior, em situações de pressões e temperaturas extremas que se possam verificar na zona de interface, pode aí ocorrer o aparecimento de bolsas de fusão de pequenas porções de material. Devido à afinidade química entre os materiais em questão, caso se desenvolvam condições para essa fusão, ocorre a formação de compostos intermetálicos ricos em alumínio, do tipo Fe_xAl_y (por exemplo: FeAl, Fe_4Al_{13} ou Fe_2Al_5), cujo comportamento mecânico é assinalavelmente frágil, o que é inviável atendendo à sua suscetibilidade de criação e propagação de fissuras, como referido por Carvalho, *et al.* [24], originando ligações com propriedades indesejáveis.

2.3.5. Placa Intermédia

Como foi exposto anteriormente, o facto de o processo de soldadura por explosão ser considerado um processo de ligação “a frio”, possibilita a obtenção soldaduras com boa qualidade, utilizando uma grande variedade de ligas e materiais com grandes diferenças nas suas propriedades físicas. Essa diferença, à partida, dificultaria ligações metalúrgicas eficazes.

Ainda assim, segundo referido por Manikandan, *et al.* [25], sabe-se também que, em certos sistemas onde alguns dos materiais que se pretendem ligar possuem elevadas tensões de cedência ou altas taxas de endurecimento por deformação, é bastante difícil obter por este processo uma ligação por soldadura com a qualidade pretendida.

Por outro lado, em muitas utilizações, como por exemplo nos equipamentos criogénicos, é frequente a utilização do alumínio (de elevada condutividade térmica e de baixa resistência). A sua combinação com um aço inoxidável é altamente desejável, uma

vez que diminuirá tanto a espessura dos componentes como as trocas de calor nos reservatórios. Assim, é crucial que a ligação entre estes dois materiais confira bom comportamento estrutural e simultaneamente um bom isolamento térmico aos componentes dos equipamentos (que contempla resistência da ligação e tenacidade dos materiais) [26].

É assinalável, contudo, a dificuldade na obtenção de soldaduras de qualidade com esta combinação de materiais, porque, por um lado as diferenças de propriedades são de facto muito significativas, e por outro, a sua afinidade química torna a ligação muito suscetível de formar, caso haja fusão na interface, compostos intermetálicos com um comportamento muito frágil e por isso indesejável, como referido por Carvalho, *et al.* e Aceves, *et al.* [24][26].

A forma de se potenciar a obtenção de soldaduras de qualidade entre estes metais é a utilização de uma placa intermédia de um material distinto. A utilização de placas intermédias no processo de soldadura por explosão tem o objetivo principal de aumentar a dissipação de energia cinética (libertada pela detonação dos explosivos). Se essa dissipação de energia cinética não for controlada, a colisão origina, frequentemente, uma interface defeituosa, com a presença de uma camada fundida e frágil devido à presença de compostos intermetálicos. Segundo Saravanan, *et al.* [27], a introdução da placa intermédia aumenta significativamente a absorção da energia cinética gerada na explosão e minimiza ou mesmo suprime a formação de compostos intermetálicos fundidos na interface, o que aumenta a viabilidade de utilização de industrial deste processo. Essa preparação pode ser visualizada no esquema da Figura 2.7.

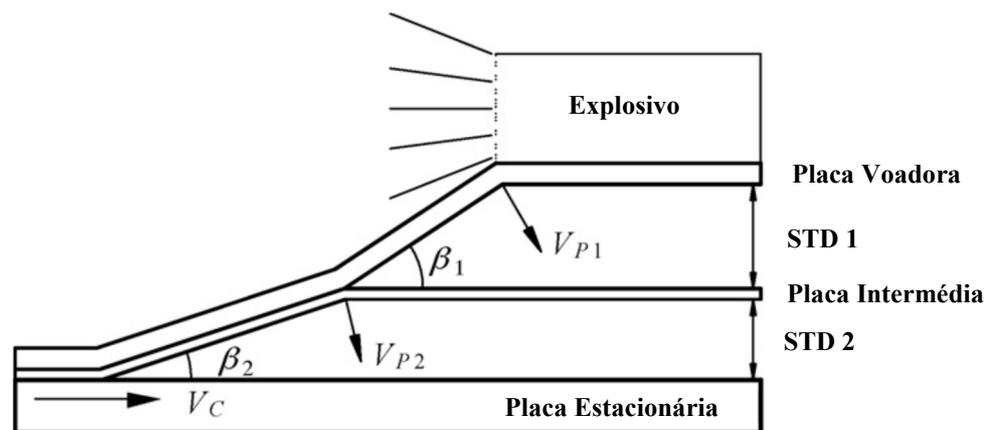


Figura 2.7. Representação esquemática da soldadura por explosão utilizando uma placa intermédia (adaptado de [25], fig. 1, pág. 233)

Não obstante a sua evidente relevância, a utilização dessas placas intermédias é ainda raramente discutida na literatura disponível. Existem alguns estudos que sugerem materiais “candidatos” a desempenhar o papel de placa intermédia, no entanto não existe ainda informação abundante sobre o desempenho desses materiais neste tipo de utilização, conforme referido por Aceves, *et al.* [26].

Segundo diversos estudos, nomeadamente as publicações [27][28], uma placa intermédia terá melhor eficácia se forem atendidos alguns pressupostos, como os seguintes:

- Devem ter espessuras relativamente baixas, o que permitirá um rebaixamento do limite inferior da janela de soldabilidade;
- A viabilidade da sua aplicação melhora com o uso de explosivos com velocidades de detonação elevadas;
- Dar preferência à utilização de materiais de maior densidade, já que terão maior poder de dissipar a energia cinética do processo;
- Será preferencial a utilização de materiais mais dúcteis.

É objeto desta dissertação desenvolver um estudo acerca do comportamento de alguns materiais quando utilizados como placas intermédias na soldadura por explosão de alumínio a aço inoxidável.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Mecanismos de Formação do Jato

Sabe-se que há formação de um jato quando ocorre um impacto oblíquo a alta velocidade entre duas placas de metal. Numa primeira abordagem para descrição deste fenômeno, como referido por Kiselev, *et al.* [29], Lavrent'ev e Birkhoff desenvolveram uma teoria que procura descrever o fluxo de metal no jato por associação a um modelo de fluido ideal, que postula que, para ângulos reduzidos de impacto (que é o caso nos impactos entre placas metálicas no processo de soldadura por explosão), a velocidade atingida pelo jato é o dobro da velocidade do ponto de colisão.

No entanto, investigações referidas nessa publicação [29], revelaram que o comportamento previsto por esta teoria nem sempre seria válido, existindo regimes de impacto onde a velocidade do jato é significativamente inferior ao previsto pela teoria da analogia hidrodinâmica. Verificou-se que o processo de formação de jato é afetado por outras propriedades dos materiais, tais como a compressibilidade, viscosidade e resistência dos mesmos [29]. Ainda segundo esta publicação, foram também considerados diversos outros modelos de mecânica de meios contínuos para descrever o comportamento do impacto entre placas, como por exemplo: modelos de fluido ideal e viscoso, modelo elástico, elastoplástico e viscoelástico.

Nas vizinhanças do ponto de impacto ocorrem elevadas tensões e temperaturas, além de taxas de deformação extremamente elevadas. Assim, como as propriedades físicas e mecânicas dos materiais se vão efetivamente alterando no decurso da deformação, o uso de reduzidos modelos teóricos, tais como os anteriormente mencionados podem induzir resultados incorretos.

Kiselev, *et al.* [29] propuseram utilizar uma abordagem de dinâmica molecular MD (na sigla inglesa referente a *Molecular Dynamics*), que consegue prever com boa exatidão o comportamento dos materiais durante o impacto, sem sofrer as condicionantes dos modelos anteriormente mencionados. Este método tem, no entanto, a limitação de se poder utilizar numa escala nanométrica, longe da ordem de grandeza das situações

macroscópicas reais, principalmente devido a limitações de capacidade computacional para lidar com tão grande número de átomos.

Para minimizar o efeito dessa limitação, foram feitos ensaios experimentais estabelecidos para comparar resultados entre o modelo MD, aplicável numa escala atômica e a observação macroscópica, tendo sido possível demonstrar que os valores dos parâmetros adimensionais relevantes obtidos pelo MD podem satisfazer a lei de similaridade necessária para que os resultados do modelo sejam consistentes com os obtidos pela observação experimental do impacto de placas macroscópicas.

Estudando-se o impacto a diversas velocidades diferentes, desde subsônicas até supersônicas, as principais conclusões publicadas [29] foram:

- Situações onde a velocidade do ponto de colisão é baixa, os metais exibem propriedades elásticas sem deformações plásticas residuais, não havendo formação de jato. É confirmado analítica e experimentalmente que há um valor para o número de Reynolds ($Re \approx 2$) que funciona como patamar crítico a partir do qual começa a formar-se o jato.
- Para valores elevados de Re , a velocidade de jato calculada pelo modelo MD é próxima da velocidade do jato determinada pelo modelo de fluido ideal.
- Em velocidades de impacto supersônicas, ocorre o desenvolvimento de ondas de choque que para ângulos de colisão baixos (da ordem dos 24°) não permitem a formação do jato. Segundo Akbari-Mousavi, *et al.* [12], existe um ângulo de impacto suficientemente elevado, acima do qual haverá formação de jato a velocidades supersônicas, mas ainda pela mesma publicação, refere-se que independentemente do ângulo de colisão, a formação do jato será sempre possível a velocidades de impacto subsônicas.

Por fim pode notar-se que, segundo Bataev, *et al.* [2], no processo de soldadura por explosão, formam-se ondas de compressão em torno do ponto de colisão. Em velocidades subsônicas do ponto de colisão (bem como nalguns casos muito ocasionais de velocidades supersônicas) essas mesmas ondas progridem à frente do ponto de colisão, ocasionando, por isso, uma determinada curvatura/ondulação na superfície da frente de progressão. Devido a essa morfologia da frente de progressão, o material das placas

começa a ser gradualmente empurrado para fora da superfície de contacto, mesmo antes de entrarem no ponto de colisão propriamente dito. Nas zonas de pressão mais elevada, localizadas diretamente no ponto de colisão, essa pressão faz com que o material nessas condições seja ejetado. Esta expulsão de material é também facilitada pelo facto das camadas superficiais serem aquecidas a altas temperaturas, muitas vezes acima do ponto de fusão.

Se a velocidade de impacto não for suficientemente alta, as pressões geradas nesse caso não são suficientes para a deformação significativa da superfície da placa (também afirmado por Kiselev, *et al.* [29] como já mencionado).

Na maioria dos modos de progressão supersónicos, as ondas de choque geradas estão diretamente ligadas ao ponto de colisão. Nesses casos é evidente que existe a formação de uma “*contra deformação*” superficial, não havendo a formação do jato à frente do ponto de contato. Assim, a formação do jato requer que a onda de compressão tenha uma frente significativamente convexa, e as pressões geradas excedam um patamar crítico para que haja a formação da perturbação à superfície (a Figura 3.1 permite visualizar esse efeito).

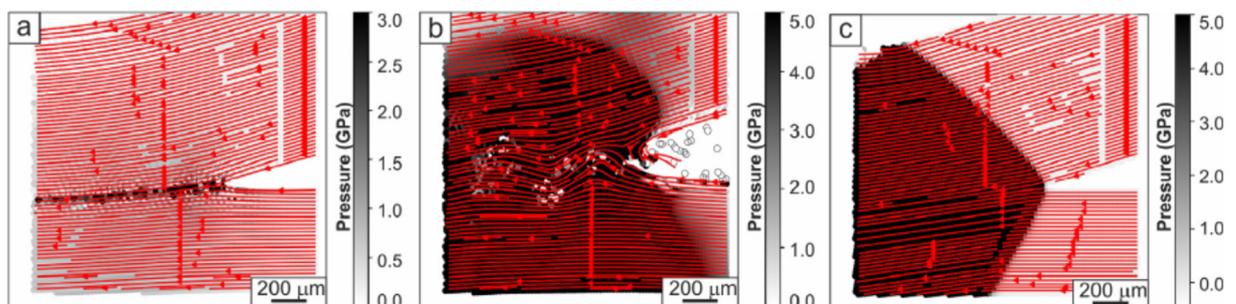


Figura 3.1. Distribuição de pressões a diferentes velocidades do ponto de colisão. a – baixa velocidade; b – abaixo do limiar supersónico; c – acima do limiar supersónico (retirado de [2], fig. 10, pág. 10)

Como será detalhado em 3.3, para análise das condições de soldabilidade de uma determinada preparação para soldadura por explosão, é considerado como limiar de formação do jato uma função do ângulo de colisão e da velocidade do ponto de colisão, baseados na velocidade de propagação do som para o material.

3.2. Mecanismos de Formação de Onda

Como já sugerido no capítulo anterior, e introduzido em 2.3.1.2, o impacto entre duas placas provocado pela projeção a alta velocidade de uma placa voadora sobre uma placa estacionária, para além da formação do jato desenvolve também significativas deformações na superfície dos materiais, observando-se que essas deformações assumem frequentemente uma morfologia ondulada, com uma determinada amplitude e frequência.

Através da pesquisa à investigação que tem vindo a ser publicada sobre o processo de soldadura por explosão, o conhecimento dos mecanismos e previsão do comportamento dos materiais no aparecimento desta ondulação na zona de interface é um dos assuntos que mais discussão suscita e onde o consenso ainda se apresenta menos evidente, como se pode constatar nas publicações [2][4][30][31].

Assim, alguns investigadores consideram o processo de soldadura por explosão um processo essencialmente de fusão, causada pelo aumento de temperatura resultante da dissipação de energia cinética fornecida pela explosão e que provoca a fusão entre as superfícies dos materiais colididos. Outra corrente de investigação (provavelmente a que conta com mais seguidores), considera-o como um processo no qual a soldadura se obtém pelo elevadíssimo grau de pressão entre as superfícies a unir.

No entanto as interfaces onduladas, vórtices e bolsas de metal fundido que frequentemente se observam, não podem ser unicamente atribuídas a soldadura resultante da elevada pressão ou a mecanismos de fusão. A deformação do grão na zona da interface, bem como a formação de ondas sugerem que a soldadura conterà igualmente um mecanismo de fluxo análogo a um fluido, como referido por Akbari Mousavi, *et al.* [31].

Embora a falta de consenso exista e muito provavelmente a formação de ondas se processe pela conjugação de todas as teorias formuladas, elas podem ser agrupadas essencialmente nas seguintes categorias [31]:

- 3.2.1 - Mecanismo de indentação (ou recuo);
- 3.2.2 - Mecanismo de instabilidade (ou turbulência) do fluxo;
- 3.2.3 - Mecanismo de formação de vórtices;
- 3.2.4 - Mecanismo de ondas de tensão.

3.2.1. Mecanismo de Indentação (ou Recuo)

Desde os primórdios do desenvolvimento da soldadura por explosão que se procura explicar o fenómeno da formação das ondas na zona de interface, sendo que dos primeiros estudos teóricos e experimentais sérios dedicados à sua solução, como referido por Bataev, *et al.* [2], foi o trabalho de Abrahamson, no qual foi proposto este mecanismo de indentação que posteriormente foi mais desenvolvido por Bahrani, Black e Crossland e é atualmente uma das abordagens mais utilizadas para explicar a mecânica de formação de ondas durante este processo de soldadura [2].

Na Figura 3.2, apresenta-se esquematicamente o funcionamento deste mecanismo, onde o jato criado pela projeção da placa voadora sobre a placa estacionária é dividido em dois, fluindo em direções opostas. Uma parte move-se para trás do ponto de colisão (jato reentrante) e o outro para a frente (jato saliente).

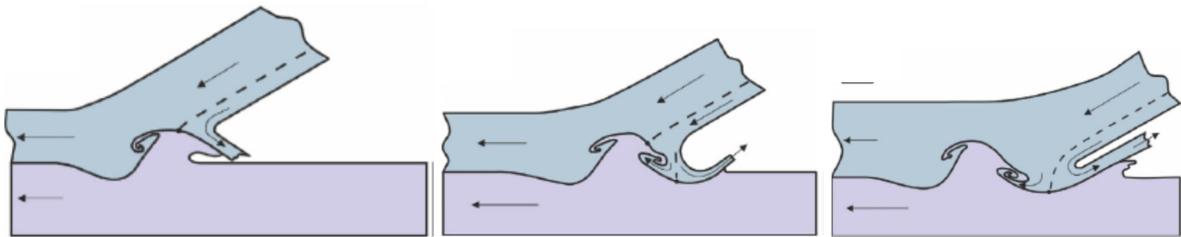


Figura 3.2. Esquema exemplificativo dos estágios do mecanismo de indentação (adaptado de [2], fig. 11, pág. 11)

O material da placa voadora interage com uma bossa já formada na placa estacionária numa fase anterior, de modo que o jato é desviado para baixo e deforma a superfície da placa estacionária, formando nela uma depressão e, conseqüentemente, uma nova convexidade, que aumenta rapidamente de tamanho no processo de interação entre as placas.

À medida que essa nova bossa cresce, um novo jato é formado a partir do material da placa estacionária, colidindo com a placa voadora, o que por sua vez leva à formação de bossa sobre ela. Assim, o mecanismo de formação de onda pode ser descrito como um processo de indentação sucessiva e alternada de protuberâncias formadas em lados opostos das placas em colisão [2].

3.2.2. Mecanismo de Instabilidade (ou Turbulência) do Fluxo

Como referido por Bataev, *et al.* [2], investigadores como Hunt, Cowan *et al* e Robinson, em certas situações onde foi evidenciada uma boa coerência entre dados experimentais e previsões analíticas, conclui-se que sob determinadas condições de impacto, o material assume o comportamento de um fluido.

Segundo a teoria proposta por Hunt e Robinson nas publicações acima referidas, a ocorrência de ondas na soldadura por explosão são um exemplo de instabilidade de Helmholtz, que ocorre no escoamento de fluidos, quando se verifica uma diferença de velocidade entre fluxos adjacentes. No mecanismo de instabilidade ou turbulência do fluxo descrito por Robinson, as ondas são criadas atrás do ponto de colisão como resultado de uma diferença de velocidade que se verifica na interface e que ocorre por virtude do jato reentrante. Contrariamente, na formulação de Hunt, as ondas são criadas à frente do ponto de colisão devido a uma diferença de velocidade na interface e do jato saliente, como referido por Akbari Mousavi, *et al.* [31].

De qualquer modo, este mecanismo de instabilidade ou turbulência do fluxo postula que as ondas são geradas devido a uma diferença de velocidade entre os materiais, já que se verifica uma tensão de corte na interface entre os mesmos [31].

A abordagem hidrodinâmica para descrever o comportamento de um material sob condições de colisão oblíqua a alta velocidade é frequentemente utilizada para tentar explicar o mecanismo de formação das ondas. No entanto, como referido por Hay [32], observou-se que uma descrição completa do processo de formação de ondas, a partir de abordagens baseadas na hidrodinâmica clássica, é bastante difícil devido à falta de modelos de formação de ondas para todos os valores de Re , para além da grande dificuldade em determinar a viscosidade dos metais numa gama significativa de taxas de deformação [2].

3.2.3. Mecanismo de Formação de Vórtices

Outro dos mecanismos propostos por investigadores para a formação de ondas na soldadura por explosão é a formação de vias de vórtices de Von-Karman, como referido por Akbari Mousavi, *et al.* [31].

Neste caso, a principal suposição é que a formação da onda depende da velocidade de colisão. À medida que a velocidade de colisão aumenta, ocorre uma

transição entre uma interface plana e uma interface ondulada, ainda que nessa fase as ondas se formem ainda sem vórtices.

Com o contínuo aumento da velocidade de colisão, subseqüentemente é induzida a formação dos vórtices, que inicialmente se projetam apenas para a frente do fluxo e que depois começam a ser frontais e à retaguarda (ver Figura 3.3). Considera-se também que a contribuição do ângulo de colisão seja, aparentemente, ainda mais importante do que apenas a velocidade de colisão.

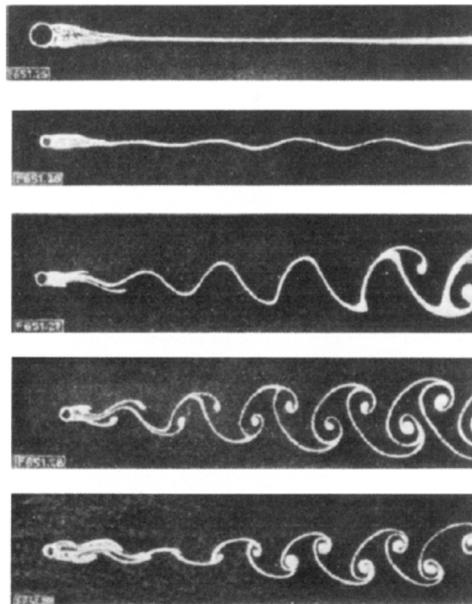


Figura 3.3. Analogia exemplificativa da formação de vórtices de Von-Karman num fluido (retirado de [4], fig. 8, pág. 3150)

3.2.4. Mecanismo de Ondas de Tensão

Como citado por Akbari Mousavi, *et al.* [31], El-Sobky e Blazynski propuseram um novo mecanismo de formação de ondas – o mecanismo de ondas de tensão. Estes autores observaram a existência da formação de ondas em superfícies de metais que tinham sido submetidas a uma colisão oblíqua, mas onde não tinha ocorrido, nem soldadura, nem a formação de jato.

Ainda segundo Akbari Mousavi, *et al.* [31], foi considerado por esses autores que o problema das perturbações na superfície frequentemente observadas, quer à frente quer atrás do ponto de colisão poderia ter como causa a interferência sucessiva da rarefação de ondas em ambas as placas, bem como pela soldadura em multicamadas. Neste

mecanismo, as ondas seriam geradas à frente do ponto de colisão, enquanto os vórtices seriam criados subsequentemente. Posteriormente, como referido por Akbari Mousavi, *et al.* [31], os autores Plaksin, Direito, Braga e Pruemmer, em 2003 atribuíram o mecanismo às instabilidades regularmente periódicas que foram induzidas por ondas de detonação oscilantes e que foram conseqüentemente transmitidas através da interface dos materiais submetidos a impacto.

3.3. Janela de Soldabilidade

No processo de soldadura por explosão, as condições para que se consigam soldaduras eficazes, com qualidade, dependem da conjugação correta de diversos parâmetros. Como referido por Ribeiro, *et al.* [33], ao conjunto dessas condições pode chamar-se Janela ou Critério de Soldabilidade, cuja representação esquemática pode ser visualizada na Figura 3.4, seguidamente.

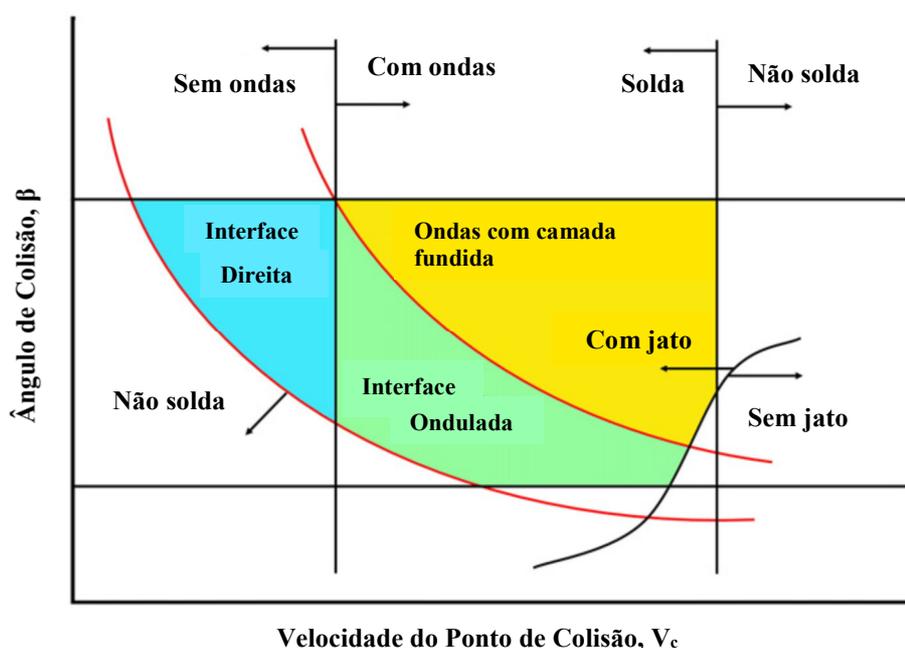


Figura 3.4. Representação genérica de uma Janela de Soldabilidade (adaptado de [10], fig. 2, pág. 517)

Como se pode ver na figura anterior, um dos critérios de soldabilidade mais utilizados é aquele que se baseia na relação entre a velocidade do ponto de colisão V_c e o ângulo de colisão, β , conforme já exposto no capítulo 2.3. (onde V_p a velocidade da placa voadora).

Neste espaço $\beta-V_C$, a janela de soldabilidade é definida por quatro linhas ou limites, que não obstante a sua larga utilização, quer os conceitos por trás desses limites quer mesmo as equações que os definem não são ainda suficientemente claros [33]. Ainda segundo o mesmo artigo, o critério baseado na velocidade e propriedades mecânicas da placa voadora, proposto por Cowan, *et al.* [4] considera-se dar resultados pouco fiáveis. Por outro lado, o critério baseado somente na velocidade do ponto de colisão, embora permita estabelecer expressões empíricas para estimar os limites, também não fornece a panorâmica geral do processo. Assim, no presente, este é o critério mais conhecido e utilizado para caracterizar a soldabilidade dos materiais no processo de soldadura por explosão.

Seguidamente serão apresentadas as definições desses limites na janela de soldabilidade.

3.3.1. Limite Direito (da Formação do Jato)

Segundo as publicações [10][33], há basicamente três expressões que foram propostas para caracterizar este limite (considerando C_b como a velocidade de propagação do som no material):

$$V_C < C_b \quad (3.1)$$

, proposta por Walsh, *et al.* [34];

$$V_C < 1,25 \times C_b \quad (3.2)$$

, proposta por Wylie, *et al.* [35]

Ou ainda segundo outros autores, como Abrahamson [36], que afirmam que esse limite é dado por uma função fraca entre a velocidade do ponto de colisão V_C [km/s] e o ângulo de colisão β [rad]:

$$V_C = \left(\frac{\beta}{10} + 5,5 \right) \quad (3.3)$$

Que assume a forma de uma linha vertical com uma leve concavidade à esquerda [33].

Se a pretensão for fazer uma análise restritiva, dever-se-á selecionar a expressão mais desfavorável em função das propriedades físicas dos materiais a unir.

3.3.2. Limite Esquerdo (da Formação de Ondas)

Continuando nas fontes mencionadas [10][33], o limite esquerdo da janela de soldabilidade pretende descrever a suscetibilidade da formação de ondas no processo de colisão. Segundo Kuzmin, *et al.* [37], essa linha define a velocidade do ponto de colisão onde se verifica a transição entre uma interface plana e uma interface ondulada, designada por $V_{C,tr}$, sendo função do ângulo de colisão β , não devendo ser uma linha vertical. No entanto, a maioria dos autores considera que esta linha é vertical, não dependendo de β , como referido por Ribeiro, *et al.* [33]. Segundo Cowan, *et al.* [4], propõe-se a equação (3.4), onde $V_{C,tr}$ expresso em [km/s] é função das densidades ρ_B e ρ_F , respetivamente do material da placa estacionária e da placa voadora, expressas em [kg/m³]; de HV_B e HV_F , as durezas Vickers, também respetivamente das placas estacionária e voadora, expressas em [MPa]; e Re_{cr} , o número de Reynolds crítico, que toma valores entre 8,0 e 13,0 para a configuração assimétrica de soldadura.

$$V_{C,tr} = \left[\frac{2Re_{cr} (HV_B + HV_F)}{\rho_B + \rho_F} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

3.3.3. Limite Inferior (da Cedência do Material)

Neste limite, segundo [10][33], procura-se relacionar a velocidade de impacto da placa voadora V_P de tal modo que, ao atingir-se um determinado valor mínimo, a pressão originada no ponto de colisão exceda o limite de cedência do material. Deribas e Zakharenko, segundo Ribeiro, *et al.* [33], desenvolveram uma equação (3.5) que caracteriza este limite que determina que a velocidade mínima do ponto de colisão $V_{C,min}$, expresso em [km/s] é uma função da dureza Vickers HV, expressa em [MPa] e da densidade ρ do material mais macio entre os materiais a unir (em kg/m³), sendo ainda função do ângulo de colisão β [rad] e de uma constante k_1 que toma valores entre 0,6 e 1,2 consoante as superfícies estejam perfeitamente limpas ou não.

$$V_{c,min} = \frac{k_1}{\beta} \left(\frac{HV}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

3.3.4. Limite Superior (da Fusão do Material)

Na definição deste limite, atendendo também a [10][33], pretende-se delinear a condição que permita que a velocidade de impacto atinja um valor baixo o suficiente, para que a energia cinética dissipada na colisão não produza uma película de material fundido entre os materiais a unir [33]. Nesse sentido foi desenvolvida por Wittman [38] uma expressão que define esse limite como sendo a velocidade de impacto máxima que impede a formação da referida película.

Por outro lado, Deribas e Zakharenko, segundo publicado por Zakharenko, *et al.* [39] propuseram uma outra expressão, cuja abordagem aceita que haja a formação de um filme de material fundido, desde que o tempo de solidificação seja inferior ao tempo que leva a que as ondas de tensão atinjam a zona da interface [10].

Ainda segundo Hoseini Athar, *et al.* [10], a curva resultante da equação proposta por Wittman [38], e que define este limite superior, fica abaixo da curva resultante da equação proposta por Deribas. Isto significa que, no intervalo entre essas curvas espera-se que haja soldadura, embora com fusão dos materiais. No entanto, Pelo que foi observado por Ribeiro, *et al.* [33], de todas as alternativas avaliadas, aparentemente as equações mais restritivas serão aquelas que apresentam melhores resultados na sua capacidade de previsão do comportamento do processo. Assim neste trabalho será utilizada a equação proposta por Wittman, na equação (3.6):

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{2N} \frac{(T_m C_b)^2}{V_c^2} \left(\frac{k C_p C_b}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.6)$$

Onde β [rad] é o ângulo de colisão, h [cm] a espessura da placa voadora, V_c é a velocidade do ponto de colisão, neste caso expressa em [cm/s], T_m a temperatura de fusão do material da placa voadora [°C], C_b a velocidade de propagação do som nesse mesmo material, expresso em [cm/s], k é a condutividade térmica do material da placa voadora [erg/s.cm.°C], C_p o calor específico a pressão constante, expresso em [erg/g.°C], ρ a densidade desse material [g/cm³] e uma constante N . Esta constante N é referida por [40],

embora sem verificação experimental, como assumindo um valor de $N = 0,11$, porém, na perspectiva de utilização da situação mais restritiva será utilizado o valor proposto por Ribeiro, *et al.* [33] com $N = 0,062$.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, pretende-se apresentar o procedimento, os meios e as condicionantes que impactaram a realização das experiências de soldadura por explosão do alumínio ao aço inoxidável, com utilização de placas intermédias.

As experiências realizadas inserem-se num programa mais vasto do CEMMPRE, sendo que as conclusões aqui colocadas serão cumulativamente consideradas na investigação.

Para a soldadura propriamente dita foram disponibilizadas as instalações do Laboratório de Energética e Detónica - LEDAP, em Condeixa-A-Nova. Para a realização dos Ensaiois recorreu-se ao laboratório de tecnologia do DEM - FCTUC, e ao Instituto Pedro Nunes em Coimbra.

4.1. Materiais Utilizados

Os materiais utilizados no procedimento experimental deste estudo são materiais correntes e normalizados, regularmente acessíveis no mercado.

Foram soldados dois conjuntos de placas. Os materiais de base a soldar foram sempre as mesmas ligas de alumínio e aço inoxidável, em ambos os casos com espessuras de 3 mm.

A variante entre estes foi, a utilização de placas intermédias de materiais diferentes em cada conjunto executado. Neste trabalho foram aplicadas como placas intermédias o aço ao carbono e o chumbo elementar, tendo elas uma espessura de 1 mm.

No procedimento experimental aqui apresentado, as placas de metal foram cortadas na forma retangular com 250 mm x 70 mm.

4.1.1. Placa Voadora – Alumínio

O alumínio utilizado no presente procedimento experimental é uma liga Al-Mn-Mg-Si, para utilização estrutural. A designação da liga em causa, segundo a normalização europeia em vigor, de acordo com a EN 573-1 é EN AW 6082. Em termos de composição química, esta liga é caracterizada tal como apresentado na Tabela 4.1:

Tabela 4.1. Composição Química nominal (em % peso) da Liga de Alumínio (retirado de [41])

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
EN AW-6082	0,7 – 1,3	≤ 0,50	≤ 0,10	0,40 - 1,0	0,6 - 1,2	≤ 0,25	≤ 0,20	≤ 0,10	≤ 0,15	Remanescente

As propriedades mecânicas são condicionadas pelo tratamento térmico aplicado à chapa antes do fornecimento. Neste caso, o tratamento fornecido é designado por T6, que conforme descrito na EN 515 [42], consiste num tratamento térmico de têmpera, originando uma solução sólida supersaturada, posteriormente submetida a um envelhecimento artificial, onde, a determinada temperatura é promovida a formação de precipitados na solução sólida, com a conseqüente alteração nas propriedades mecânicas da liga, obtendo-se as apresentadas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2. Propriedades Mecânicas nominais da Liga de Alumínio (retirado de [43])

Material	Tratamento	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{50mm} (%)
EN AW-6082	T6	≥ 310	≥ 260	≥ 10

A chapa utilizada no procedimento experimental possuía uma dureza inicial, medida em trabalhos anteriores como referido em [44], de uma média de 115 HV_{0,2}.

4.1.2. Placa Estacionária – Aço Inoxidável

O aço inoxidável utilizado neste procedimento é um aço inoxidável austenítico, resistente à corrosão (valores elevados do Cr na sua composição), com aplicação corrente na indústria. Segundo a norma europeia, designa-se por EN 10088-2 - X5CrNi18-10 (também identificado por 1.4301) [45]. Segundo essa norma, as propriedades químicas e mecânicas do material podem ser visualizadas nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, apresentadas seguidamente:

Tabela 4.3. Composição Química nominal (em % peso) da Liga de Aço Inoxidável (retirado de [45])

Material	C	Si	Mn	P (max)	S (max)	Cr	Ni	N	Fe
X5CrNi18-10	\leq 0,7	\leq 1,0	\leq 2,0	0,045	0,015	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5	\leq 0,11	Remanescente

Tabela 4.4. Propriedades Mecânicas nominais da Liga de Aço Inoxidável (retirado de [45])

Material	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{50mm} (%)
X5CrNi18-10	520 - 720	\geq 210	\geq 45

A dureza inicial da chapa utilizada no procedimento experimental, medida em trabalhos anteriores como [44], tem valores médios de 181 HV_{0,2}.

4.1.3. Placa Intermédia I – Aço ao Carbono

Uma das placas intermédias é um aço ao carbono, utilizado para estampagem, com a designação normativa DC05, de acordo com a norma europeia EN 10130 [46].

A referida norma define as gamas de composição química e propriedades mecânicas para este aço, segundo as tabelas seguintes, designadas como Tabela 4.5 e Tabela 4.6:

Tabela 4.5. Composição Química nominal (em% peso) do Aço Carbono (retirado de [46])

Material (máx.)	C	P	S	Mn	Fe
DC05	\leq 0,06	\leq 0,025	\leq 0,025	\leq 0,35	Remanescente

Tabela 4.6. Propriedades Mecânicas nominais do Aço Carbono (retirado de [46])

Material	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_{50mm} (%)
DC05	\leq 180.	270 – 330	\geq 40

As durezas antes da soldadura, foram medidas em média com 98 HV_{0,2}.

4.1.4. Placa Intermédia II – Chumbo

Outra placa intermédia é de chumbo elementar, considerado puro. Neste caso, a tensão de rotura é de 18 MPa, e a dureza considerada 5 HV [47].

4.2. Montagem Experimental

A montagem e preparação dos corpos de prova para os ensaios de soldadura foi iniciada no DEM, com o corte e preparação das placas, construção das cofragens em placas de MDF, para contenção do explosivo, bem como de espaçadores, também em MDF, para garantir a STD pretendida.

Posteriormente, já no LEDAP, em Condeixa-A-Nova, foi realizada a restante preparação dos corpos de prova para a soldadura. Neste caso, as superfícies a unir por explosão foram limpas mecanicamente com uma lixa, para eliminar sujidades e óxidos que iriam prejudicar o desempenho do processo. A cofragem foi colada aos bordos das placas voadoras (placas de alumínio) e foi também instalado o sistema de recolha de sinal para determinação da velocidade de detonação. As soldaduras foram realizadas numa base de aço colocada sobre banco de areia.

Estando inserido num programa de investigação existente, a identificação dos corpos de prova seguiu uma sequência pré-determinada, tendo sido designados por EW49 e EW50. O prefixo EW é um acrónimo do inglês “*Explosion Welding*” (EW), sendo a numeração a sequência pré-estabelecida. O corpo de prova EW49 contém a placa intermédia de aço ao carbono e o EW50 contém a placa intermédia de chumbo.

Na Figura 4.1 pode visualizar-se a preparação dos corpos EW49 e EW50.

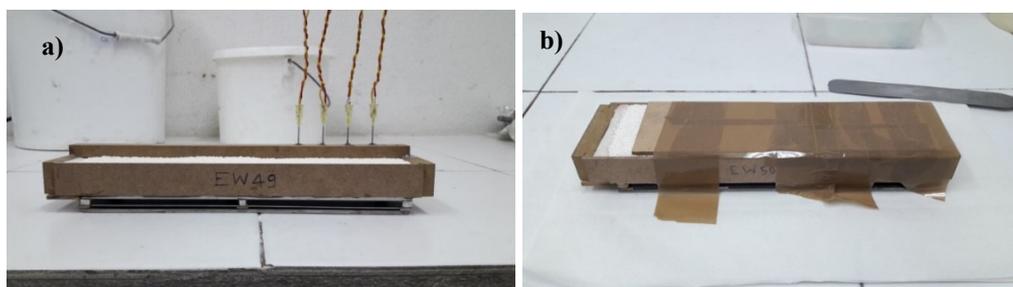


Figura 4.1. Fotografias dos corpos preparados para soldadura: a) – EW49; b) – EW50

É possível verificar nas imagens que, apenas o EW49 foi submetido a medição da velocidade de detonação. Devido ao comportamento inesperado do explosivo nesta, optou-se por não medir a velocidade de detonação na EW50, montando-se antes uma placa de MDF como tampa do ANFO como tentativa de constranger a explosão apenas na direção das placas (solução que não demonstrou ter tido qualquer influência).

No apêndice B encontram-se as fichas técnicas com os dados do procedimento.

4.3. Parâmetros Utilizados

O detalhe dos parâmetros utilizados no procedimento pode ser consultado na ficha técnica dos ensaios, apêndice B.

Os parâmetros chave do processo, são sintetizados da seguinte forma:

- STD = 4,5 mm entre a placa voadora e as placas intermédias e um STD = 1,5 mm entre estas e a placa estacionária;
- Explosivo utilizado - ANFO, fornecido sob a forma de granulado. Como iniciador - 25g de explosivo RDX;
- O rácio de explosivo, $R = 2,65$, com uma altura de explosivo de 25 mm.

4.4. Rastreabilidade das Amostras

Do EW49, como se pode ver na Figura 4.2, foram retirados 3 provetes para o ensaio de tração-corte, identificados como EW49-T1, EW49-T2 e EW49-T3. Para a análise metalográfica e química, as amostras EW49-L2 e EW49-L4, retiradas respetivamente de uma zona mais próxima do início da detonação e num estágio mais avançado desta. A letra L designa os cortes longitudinais, paralelos à direção da progressão da soldadura.



Figura 4.2. Preparação do corpo de prova EW49 para os ensaios e identificação das respetivas amostras

Relativamente ao EW50, não ocorreu ligação entre as placas, tendo-se retirado uma amostra, tomada da região evidenciada na Figura 4.3, para análise metalográfica e de caracterização química. Dado serem separadas fisicamente, foram identificadas dessa porção duas amostras distintas, a EW50-FL – referente à placa voadora, e a EW50-BL – referente à placa estacionária (com a placa intermédia ligada a esta, embora com vestígios de chumbo na interface com o alumínio, na placa voadora). Aqui também a letra L designa o corte longitudinal da amostra, paralelo à direção da progressão da soldadura.



Figura 4.3. Preparação do corpo de prova EW50 para os ensaios e identificação das respetivas amostras

4.5. Medição da Velocidade de Detonação

A medição da velocidade de detonação foi realizada no corpo de prova EW49, seguindo o método cronográfico, correntemente utilizado no LEDAP nos procedimentos realizados. Resumidamente, o método consiste na implantação de sondas de ionização na camada de explosivo, a distâncias pré-definidas. Com o avanço da explosão, as sondas vão enviando sinais sucessivos ao osciloscópio, permitindo o tratamento em intervalos de tempo, possibilitando a determinação da velocidade de detonação do explosivo. Na dissertação de 2017 referenciada em [44], está bem detalhado o princípio do método e a montagem técnica que lhe está associada. Na Figura 4.1a), é possível visualizar as sondas montadas na preparação antes da soldadura.

4.6. Ensaios Realizados

Para prossecução do estudo, diversos ensaios laboratoriais foram realizados, de modo a compreender e interpretar os fenómenos ocorridos na soldadura. Em termos gerais eles foram classificados como:

- **Ensaio Metalográfico** - onde se pretende estudar e caracterizar a microestrutura, através de microscopia ótica, microscopia eletrónica de varrimento - SEM (quer à interface quer à região da fratura), e ainda a caracterização química dos fenómenos na interface, pelo ensaio de Espectrometria de Dispersão de Energia - EDS;
- **Ensaio Mecânicos** – para caracterizar mecanicamente a soldadura e a respetiva interface, por intermédio de ensaios mecânicos de tração-corte e de caracterização do perfil de microdurezas.

4.6.1. Ensaio Metalográfico

4.6.1.1. Preparação de Amostras

Para os ensaios de metalografia, em microscopia ótica, as amostras foram inseridas num suporte de resina epóxi, depois regularizadas mecanicamente com abrasivo e posteriormente polidas até atingir-se um acabamento perfeitamente espelhado e sem riscos (confirmado ao microscópio ótico). Esta preparação é meticulosa, utilizando lixas com granulometrias sucessivamente mais finas (de P180 a P2500) e depois feltros de polimento, embebidos com pasta de diamante de granulometrias de 6 μm e 3 μm até ao polimento desejado.

Na Figura 4.4, podem visualizar-se as amostras EW49-L2 e EW49-L4 (a), e as amostras EW50-BL e EW50-FL (b), preparadas para os ensaios.

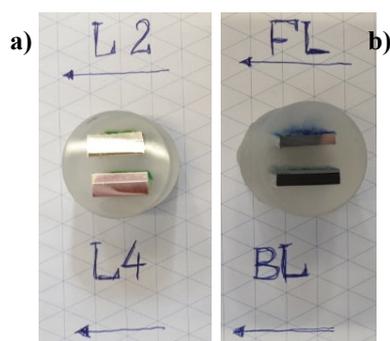


Figura 4.4. Amostras para ensaio metalográfico. As setas indicam o sentido da detonação. a) EW49-L2 e EW49-L4; b) EW50-FL e EW50-BL

4.6.1.2. Ataque Químico

O acabamento polido não permite tirar toda a informação necessária. Para obter o contraste que permita, ao microscópio ótico, identificar as estruturas metalográficas e o

comportamento da interface, é necessário proceder ao ataque dessas superfícies, de modo a evidenciar contornos de grão e a formação de precipitados. Tendo em conta que estas amostras possuem três materiais distintos na peça, com propriedades físicas e reatividades químicas muito distintas, foi necessário proceder ao ataque e documentação fotográfica para cada material em separado, visto que, como se veio a verificar, o ataque indicado para uns materiais poderia influenciar outros, de uma forma indesejável.

Assim, procurando minimizar os efeitos indesejados, foram seguidas as seguintes sequências: no EW49 - 1 – ataque químico ao alumínio; 2 – ataque eletrolítico ao aço inoxidável; 3 – ataque químico ao aço carbono; no EW50 - 1 – ataque químico ao alumínio; 2 – ataque eletrolítico ao aço inoxidável; 3 – ataque químico ao chumbo.

Os ataques foram baseados em [48], sendo os seguintes:

- **Ataque químico ao alumínio** – solução *Weck's*, onde 4 g de KMnO_4 (permanganato de potássio) e 1 g de NaOH (hidróxido de sódio) são diluídos em 100 ml de H_2O (água, destilada). A amostra está cerca de 30 segundos em contato com a solução, sendo depois lavada;
- **Ataque eletrolítico ao aço inoxidável** – solução de 10% de $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (ácido oxálico) em 90% de H_2O (água, destilada). A amostra é o ânodo (polo positivo), a solução é o cátodo (polo negativo). Imersão por 25 segundos com uma tensão de 6 V a 8 V;
- **Ataque químico ao aço carbono** – imersão da amostra numa solução de 2% de HNO_3 (ácido nítrico) e 98% de $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (álcool etílico), vulgarmente conhecida por NITAL. Imersão por cerca de 20 segundos;
- **Ataque químico ao chumbo** – imersão numa solução de 20 ml de CH_3COOH (ácido acético) em 80 ml de H_2O_2 (peróxido de hidrogénio). Imersão por cerca de 10 segundos.

4.6.1.3. Microscopia Ótica

Os ensaios de metalografia em microscopia ótica foram realizados no laboratório do Grupo de Tecnologia do CEMMPRE, utilizando o microscópio ótico LEICA DM 4000 MLED, câmara fotográfica incorporada LEICA MC 120 HD, e respetivo software de tratamento, próprio do equipamento.

4.6.1.4. SEM/EDS

Para os ensaios de microscopia eletrónica de varrimento e de espectrometria de dispersão de energia, foi utilizado o microscópio eletrónico de varrimento ZEISS – GEMINI 2 e software de análise EDS da OXFORD Instruments, ambos do IPN.

4.6.2. Ensaios Mecânicos

Seguidamente apresentam-se os ensaios realizados para caracterização mecânica das soldaduras obtidas.

4.6.2.1. Preparação de Provetes

Para o ensaio de tração-corte, os provetes EW49-T1, EW49-T2 e EW49-T3 foram maquinados, como se apresenta na Figura 4.5. Com 15 mm de profundidade, zona de útil do ensaio com cerca de 5 mm de largura e entalhes, um de cada lado (da placa voadora e placa estacionária), com largura aproximada de 7 mm. Estes entalhes devem ser maquinados de tal modo que não fiquem remanescentes da placa intermédia.

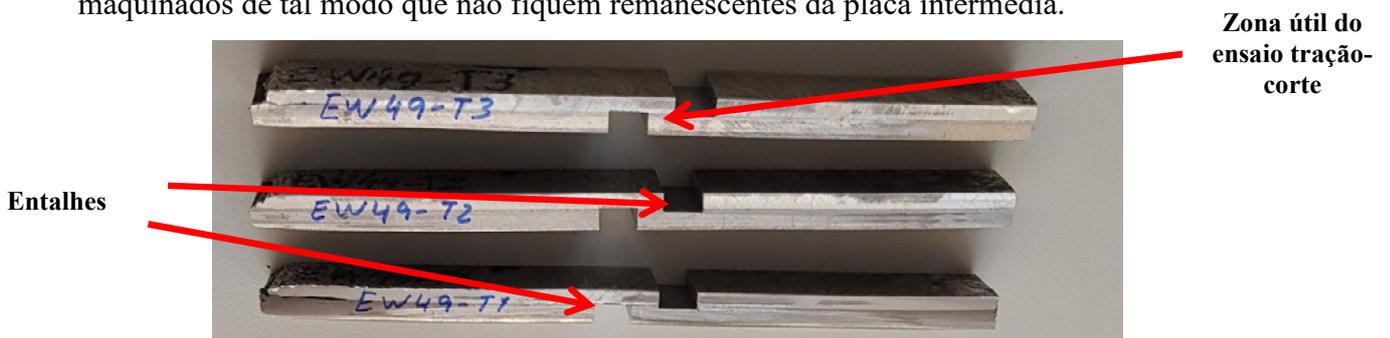


Figura 4.5. Provetes do corpo de prova EW49, maquinados para ensaio tração-corte

Antes dos ensaios de tração-corte, os provetes foram pintados com uma tinta branca e depois fumeados com tinta preta, conforme Figura 4.6. Isto permite criar um contraste cromático para que o *software* de análise das deformações locais ARAMIS®, possa estabelecer uma malha.

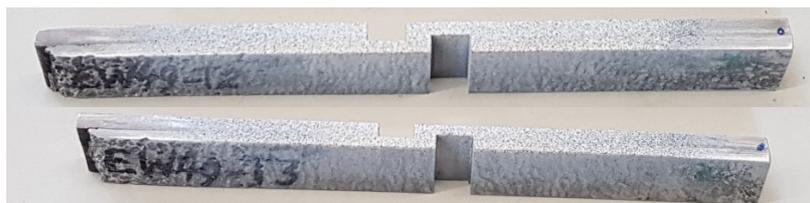


Figura 4.6. Pormenor da preparação dos provetes para ensaio tração-corte com o contraste para ARAMIS®

Assim, o ensaio de tração-corte, que relaciona a carga com o deslocamento no provete, é complementado com uma análise imagiológica, onde se pode obter imagens do estado de deformação do mesmo.

4.6.2.2. Ensaio de Tração - Corte

Os ensaios de tração-corte foram realizados na máquina universal SHIMADZU AGS-X de 100 kN, do laboratório do DEM, a uma velocidade de 1 mm/min. Já a análise imagiológica das deformações, efetuou-se com o sistema ótico ARAMIS®, da empresa alemã GOM, especialista em metrologia 3D industrial.

4.6.2.2.1. Análise da Fratura

Além do tratamento de dados relacionado com o ensaio de tração-corte e ARAMIS®, foi utilizado também a tecnologia SEM/EDS para análise das zonas de fratura.

4.6.2.3. Determinação do Perfil de Microdurezas

A determinação do perfil de microdurezas realizou-se no laboratório do DEM, nas amostras EW49-L2, EW49-L4, EW50-BL e EW50-FL, depois de realizado o polimento. Para o efeito foi utilizado o durómetro SHIMADZU HMV-G e respetivo software de análise incorporado.

As indentações, em dureza Vickers $HV_{0,2}$ com 15 s de indentação, foram realizadas perpendicularmente à espessura das placas, numa zona da amostra que corresponde a um estágio mais avançado da progressão da explosão.

De forma a não comprometer os resultados, as medições nas extremidades foram feitas a pelo menos 0,5 mm das superfícies das placas. As seguintes foram sucessivamente espaçadas de 0,25 mm, nos materiais de base, e em 0,1 mm nas zonas de interface.

Foram adicionalmente realizadas medições de dureza em regiões de intermetálicos, que pelas suas reduzidas dimensões foram indetadas com $HV_{0,025}$, igualmente com 15 s de indentação.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se e discutem os resultados dos ensaios realizados.

A abordagem utilizada na apresentação dos resultados nesta dissertação é de expor o conjunto de ensaios para cada corpo de prova em separado. Assim, apresenta-se primeiramente um subcapítulo com considerações sobre a construção da janela de soldabilidade e, nos subsequentes, um subcapítulo para cada corpo de prova, com o conjunto de todos os ensaios realizados para cada peça em questão.

5.1. Considerações Sobre a Construção da Janela de Soldabilidade

No seguimento do apresentado em capítulos anteriores, podem ser determinados os limites expectáveis para enquadrar o procedimento realizado, de modo a interpretar se o comportamento dos corpos de prova correspondeu ao que seria esperado na construção das janelas de soldabilidade.

A introdução da placa intermédia induz, certamente, alterações na janela de soldabilidade, que segundo Saravanan, *et al.* [27], só muito recentemente tem sido investigada. Por conseguinte, o aprofundamento do estudo desta ferramenta, contemplando a placa intermédia, será certamente uma linha de investigação com interesse relevante. Ainda segundo o mesmo artigo, espera-se que a presença da placa intermédia provoque um rebaixamento do limite inferior da janela, aumentando a flexibilidade de parâmetros para que se consiga uma boa soldadura.

Na presente dissertação será construída a janela para a ligação direta alumínio – aço inoxidável, procurando-se enquadrar posteriormente as soldaduras realizadas, tendo em linha de conta a presença do elemento – placa intermédia.

Assim, na Tabela 5.1 constam os valores de referência dos materiais, para os cálculos das diversas curvas com vista à construção da janela de soldabilidade:

Tabela 5.1. Dados dos materiais para construção da Janela de Soldabilidade

Material (máx.)	HV	ρ kg/m ³	T_m °C	k W/m°C	C_b m/s	C_p J/kg°C
EN AW 6082 T6	115	2700	555	180	5092	900
X5CrNi18-10	181	7900	1450	15	5800	500

Foram ainda considerados alguns pressupostos, nomeadamente:

- Relativamente à equação (3.4), que define o limite esquerdo, foi considerado o $Re_{cr} = 8$;
- Quanto à expressão que caracteriza o limite inferior, segundo a equação (3.5), o valor do parâmetro k_1 foi considerado como 0,7, já que as placas apresentavam um bom grau de limpeza, com uma quantidade mínima de contaminantes;
- Para a expressão que define o limite superior, apresentada na equação (3.6), foi considerado $N=0,062$, como já referido em 3.3.4. Segundo publicado por Ribeiro, *et al.* [33], o modelo de Wittman é o que melhor define este limite, desde que o valor de N sofra uma ligeira alteração dos 0,11 propostos por de Rosset [40], para 0,062.

5.1.1. Determinação dos Parâmetros Operacionais

Como se pode confirmar nas fichas de ensaio no apêndice B, e como já referido anteriormente, a cronometragem da progressão da explosão foi realizada apenas no corpo de prova EW49, considerando-se a medição válida para ambas as peças ensaiadas.

De realçar que, por razões desconhecidas e provavelmente imputáveis ao explosivo, a detonação interrompeu-se a cerca de metade das placas, ficando a restante porção de explosivo por detonar.

Assim, a velocidade de detonação determinada para este ensaio pode ser atípica face ao habitual. Ainda assim, será esse o valor analisado.

A altura de explosivo utilizado para a realização dos EW49 e EW50 foi de 25 mm de ANFO, num valor de $R = 2,56$.

Na Tabela 5.2, podem visualizar-se os valores determinados para a velocidade de detonação V_d em função do registo cronográfico realizado no procedimento, como explicado em 4.5.

Tabela 5.2. Determinação da Velocidade de Detonação

Parâmetro	1ª medição	2ª medição	3ª medição
Velocidades individuais (m/s)	1652	1099	1236
Médias das velocidades individuais (m/s)	1329		
Velocidade Média (m/s)	1291		

Denota-se uma irregularidade na progressão da explosão, com um decaimento abrupto que confirma a anomalia no comportamento do ANFO, como já exposto. Utilizar-se-á a velocidade média apurada, de $V_d = 1291$ m/s. Ainda segundo [4], numa configuração paralela, como a que foi aplicada neste procedimento experimental, $V_d = V_C$.

5.1.1.1. Determinação da Velocidade de Impacto

Segundo Carvalho, *et al.* [24], a velocidade de impacto pode ser determinada pela Equação de Gurney (5.1):

$$V_P = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{3R^2}{(R^2 + 5R + 4)}} \quad (5.1)$$

Onde V_P é a velocidade de impacto da placa voadora [m/s], R é o rácio de explosivo e $\sqrt{2E}$ é a velocidade característica do explosivo por Gurney. Esta velocidade característica foi ainda segundo [24] obtida empiricamente por Cooper, para explosivos ideais com a expressão (5.2):

$$\sqrt{2E} = \frac{V_d}{2,97} \quad (5.2)$$

Assim, a velocidade de impacto considerada é de $V_P = 399$ m/s.

5.1.1.2. Determinação do Ângulo de Colisão

Continuando na mesma publicação [24], propõe-se a determinação do ângulo de colisão β através da expressão constante na equação (5.3):

$$\beta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{V_P}{2V_d} \right) \quad (5.3)$$

Sendo o resultado expresso em [rad], o valor calculado em [°] é $\beta = 18^\circ$.

5.1.2. Enquadramento do Procedimento na Janela de Soldabilidade

Construída a janela de soldabilidade, e determinados os valores dos parâmetros para os corpos de prova EW49 e EW50, é possível sobrepor-se ambos no gráfico $V_C - \beta$.

De facto, na Figura 5.1, pode ser visualizada graficamente a janela de soldabilidade e o ponto determinado para o procedimento, onde se depreende que, tendo em conta unicamente a janela de soldabilidade entre o alumínio e o aço inoxidável, não seria expectável ligação. Realmente, o comportamento do explosivo levou a uma velocidade de detonação mais baixa do que o esperado.

Como se confirmará adiante, embora não tenha havido ligação efetiva com a placa intermédia de chumbo, no caso da placa intermédia de aço carbono houve porções com ligação bem-sucedida. Na linha de tudo quanto foi apresentado, mesmo tendo havido anomalias na detonação do explosivo que podem ter prejudicado o procedimento, a comparação dos parâmetros calculados com a janela de soldabilidade construída, permite verificar que estes estiveram próximos de atingir o limite inferior da janela, o que faz supor uma potencial influência da placa intermédia de aço carbono no seu abaixamento, tal como admitido por Saravanan, *et al.* em [27], cujo estudo sugere-se aprofundar.

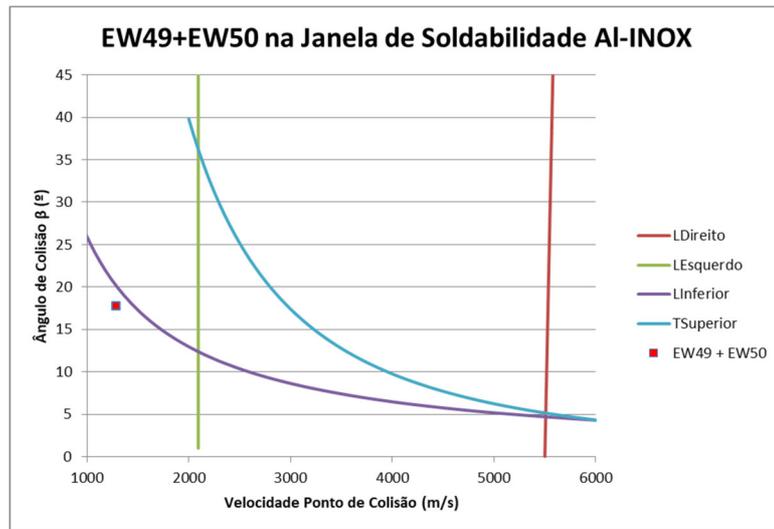


Figura 5.1. Posicionamento dos EW49 e EW50 na janela de soldabilidade

5.2. EW49 – Placa Intermédia de Aço Carbono

5.2.1. Análise Macroscópica

Nas fotografias da Figura 5.2, pode confirmar-se a interrupção da explosão sensivelmente a meio do processo. É possível ainda verificar que, no início da explosão, provavelmente por ação do RDX, há sinais de maior agressividade da colisão, que provoca maior deformação bem como alguns danos nas placas. É também visível a deformação sofrida pelo corpo de prova como resultado da explosão.



Figura 5.2. Fotografias do corpo de prova EW49 depois do procedimento

5.2.2. Análise Microscópica

5.2.2.1. Micrografias

As imagens ao microscópio ótico foram tiradas separadamente entre cada ataque, pelas razões já explicadas em 4.6.1.2. Serão analisadas as interfaces entre a placa voadora e a placa intermédia por um lado e entre a placa intermédia e a placa estacionária por outro, nas duas amostras: EW49-L2 e EW49-L4.

5.2.2.1.1. Interface Placa Voadora – Placa Intermédia

Na Figura 5.3, relativa à amostra EW49-L2, retirada num local mais próximo ao início da detonação, constam 3 fotografias da interface alumínio – aço carbono, onde em a) evidencia-se a descontinuidade da ligação. É também possível verificar a formação de compostos intermetálicos na interface, sendo que numa fase inicial pode observar-se a propagação de uma fissura, nomeadamente na Figura 5.3 b), que acompanha o contorno desses compostos. É ainda possível observar na Figura 5.3 c), a formação de vórtices e até algum aparente desprendimento de material da placa intermédia, bem como deformações do grão indicativas de deformação plástica dos materiais nesta interface. Ainda na Figura 5.3 c), num estágio mais avançado do processo, não se evidencia descontinuidade embora seja igualmente evidente a presença de compostos intermetálicos.

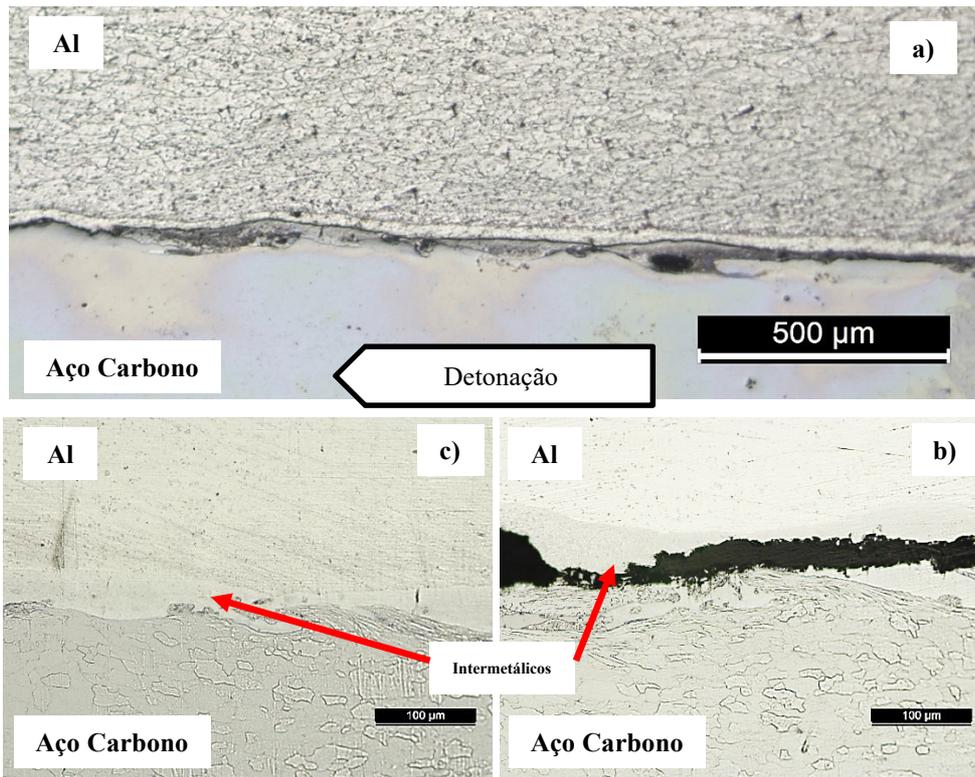


Figura 5.3. Micrografias da amostra EW49-L2: a) Interface com descontinuidade; b) Fissura na zona de intermetálicos; c) sem descontinuidade, com vórtice no aço e deformação do grão

Na Figura 5.4, na EW49-L4, vê-se igualmente uma deformação dos grãos do alumínio nas proximidades da interface.

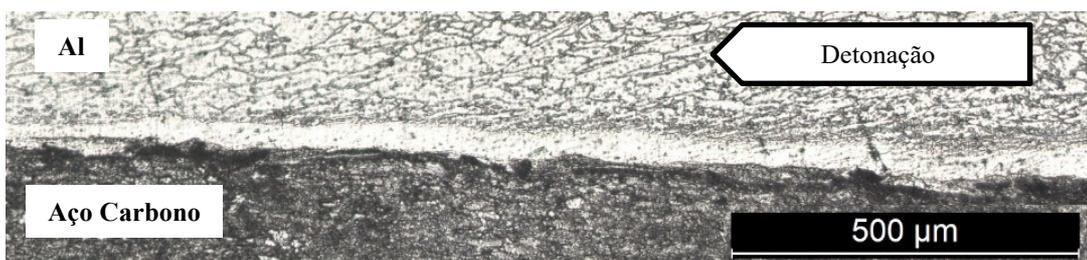


Figura 5.4. Micrografia da amostra EW49-L4: Interface onde se evidencia achatamento do grão da placa voadora por deformação plástica

É possível também verificar na Figura 5.5, a deformação dos grãos no material da placa intermédia de aço carbono. Nestas, observam-se quer vórtices, quer fragmentos de material do aço carbono que aparentemente se desprendem e ficam embebidos no alumínio.

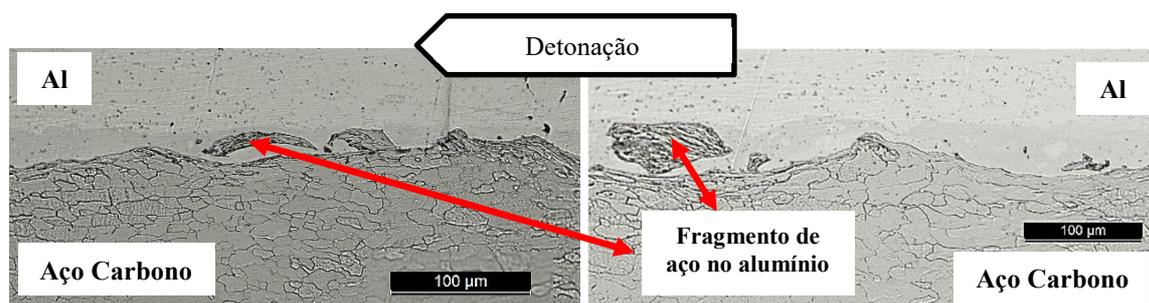


Figura 5.5. Micrografias da amostra EW49-L4: Interface onde se evidencia a formação de ondas e desprendimento de porções de aço

5.2.2.1.2. Interface Placa Intermédia – Placa Estacionária

Nas Figura 5.6, é possível observar uma interface ondulada na amostra EW49-L2, sem evidências de outros compostos, mas com a formação de vórtices e a deformação plástica nos grãos próximos à interface Aço carbono – Aço Inoxidável.

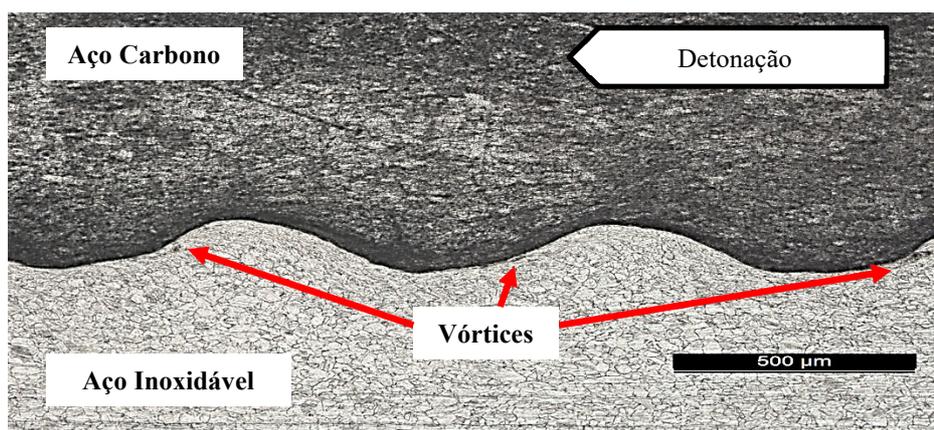


Figura 5.6. Micrografia da interface Aço Carbono/Inoxidável da amostra EW49-L2, onde se evidenciam a deformação dos grãos e os vórtices formados na placa estacionária

Já na amostra EW49-L4, num estágio mais avançado da detonação, onde ocorreu um decréscimo da sua velocidade, a interface Aço carbono – Aço Inoxidável deixou de ser regularmente ondulada, embora seja ainda assim observável a deformação dos grãos na interface. A Figura 5.7 a) foi obtida com ataque eletrolítico ao aço inoxidável, e a fotografia Figura 5.7 b) foi obtida com o ataque químico ao aço carbono).

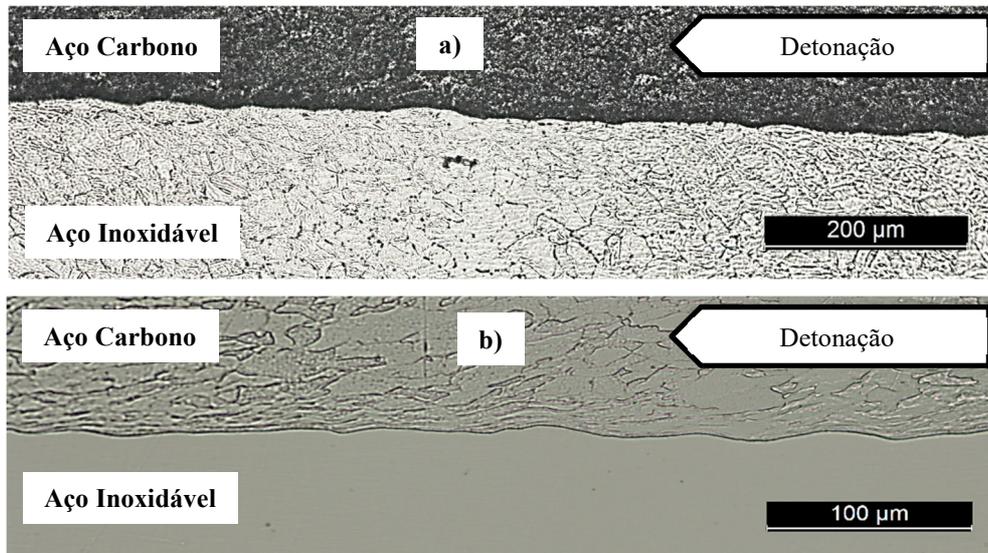


Figura 5.7. Micrografias da interface Aço Carbono/Inoxidável da amostra EW49-L4: a) com ataque eletrolítico ao aço inoxidável; b) com ataque NITAL ao aço carbono

5.2.2.2. SEM

Nas imagens SEM à interface alumínio – aço carbono, na Figura 5.8, confirma-se o observado nas micrografias, nomeadamente a fissuração que acompanha o contorno da camada de intermetálicos formada na interface na EW49-L2, bem como a interface irregular e com fragmentos de material da placa voadora, embebidos na camada de intermetálicos, observado na EW49-L4.

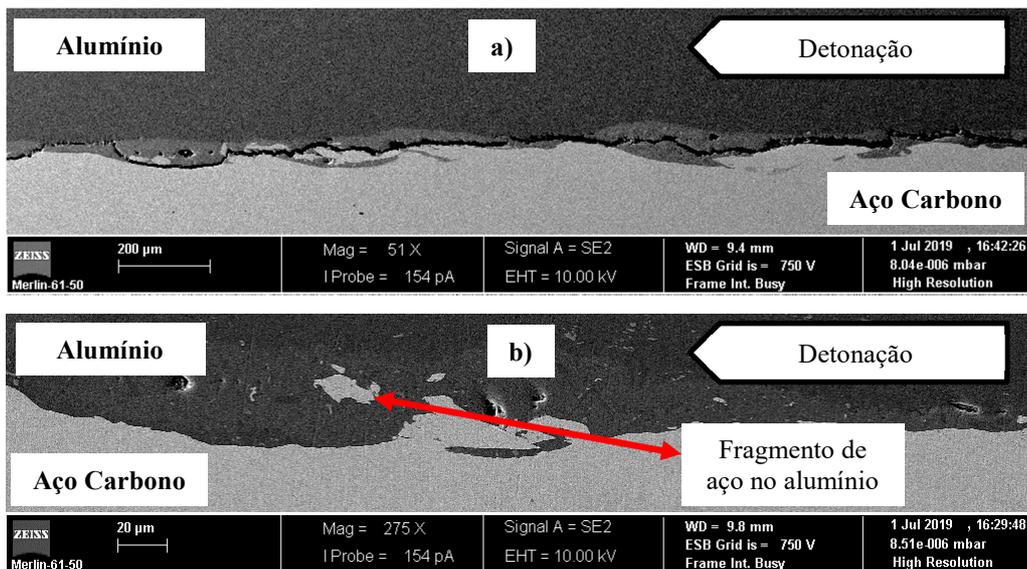


Figura 5.8. Imagens SEM na interface alumínio – aço carbono: a) da amostra EW49-L2; b) da amostra EW49-L4

5.2.2.3. EDS

Na aplicação da técnica EDS, as amostras foram mantidas na resina, tendo-se assegurado a ligação elétrica entre o material e o equipamento através de uma banda adesiva rica em carbono. Dado que a amostra EW49-L2 apresentava descontinuidade na ligação, optou-se por não se proceder à ligação dessa amostra para realização do EDS.

Assim, na Figura 5.9, é possível ver a análise química da amostra EW49-L4, para a região evidenciada na Figura 5.8 b).

Nessa Figura 5.9, nos espectros 152 e 154 confirmam-se respetivamente os materiais de base de alumínio e aço carbono em cada uma das placas.

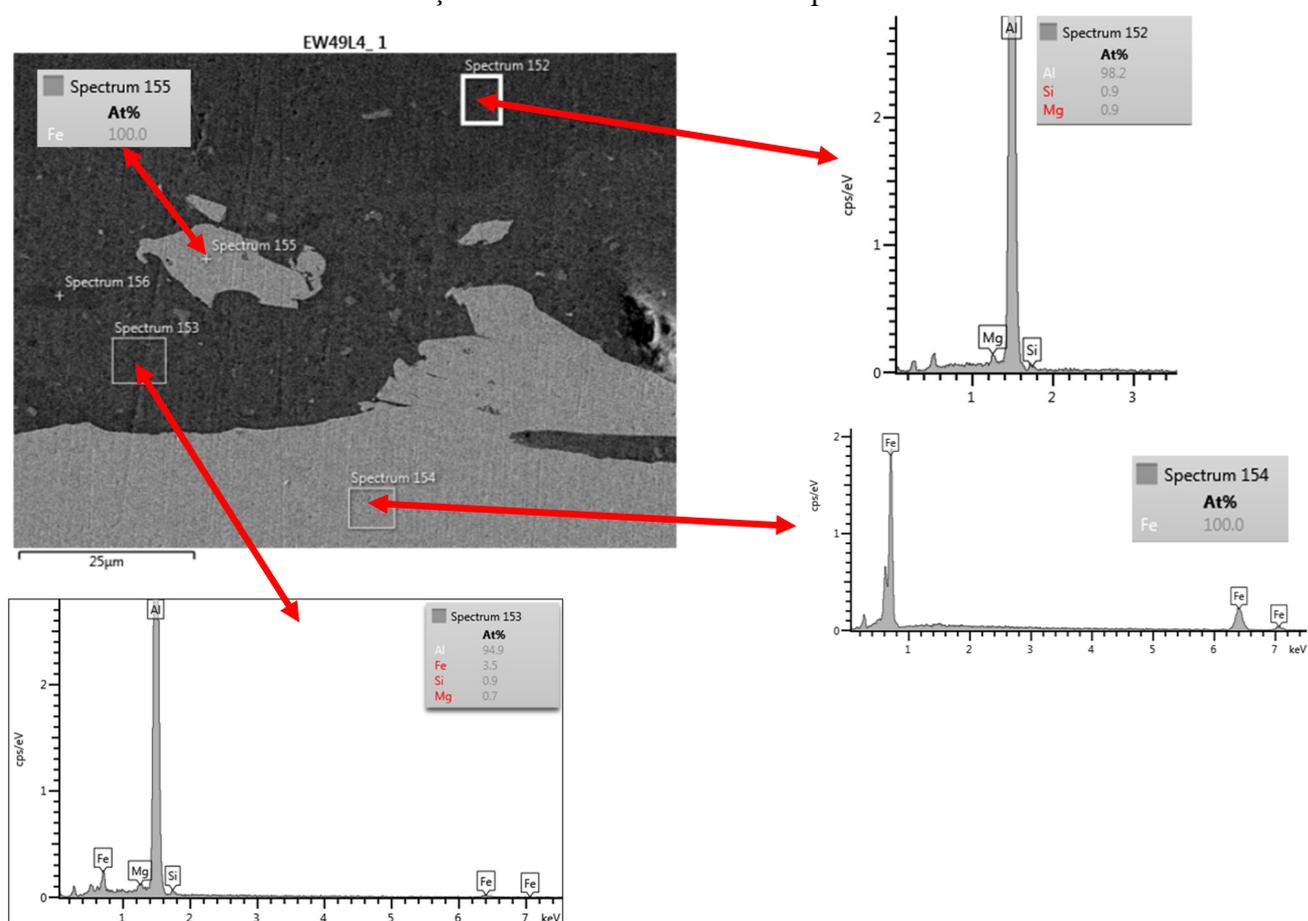


Figura 5.9. Investigação EDS na interface alumínio – aço carbono da amostra EW49-L4

Nos restantes espectros, nomeadamente nos pontuais 155 e 156, verifica-se apenas a presença dos materiais de base. Em destaque o espectro 155, que ao demonstrar ser aço, confirma o desprendimento de fragmentos da placa intermédia que se embebem no alumínio.

O espectro 153, foi retirado de uma zona constituída pela presença quer de Fe quer de Al, indiciando a estarmos na presença de uma mistura de compostos intermetálicos do tipo Fe_xAl_y dispersos numa matriz de alumínio.

Procurando identificar quais os compostos intermetálicos que estamos em presença, foi consultado o diagrama binário de equilíbrio Al-Fe resultante da investigação publicada por Li, *et al.* [49], na Figura 5.10:

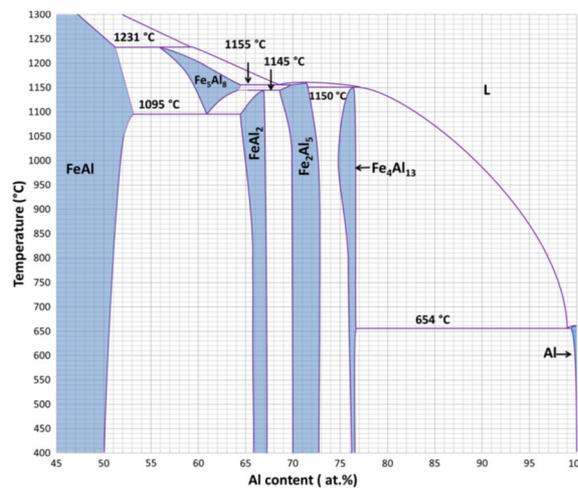


Figura 5.10. Diagrama binário de equilíbrio Al-Fe (retirado de [49])

Tendo em conta a leitura do diagrama e a análise de EDS realizada para o espectro 153, para uma proporção de Al \approx 95 At% e de Fe = 3,5 At% a informação disponível não permite uma identificação inequívoca dos compostos que estão presentes. Atendendo à grande quantidade de alumínio, poderá existir uma matriz de alumínio puro com alguns compostos intermetálicos do tipo Fe_xAl_y (possivelmente Fe_4Al_{13}) dispersos no seu seio. A existência desses compostos pode conferir alguma fragilidade, como referido por Carvalho, *et al.* em [24].

Embora não ligada por fita de carbono ao equipamento de EDS, procurou-se realizar uma análise qualitativa à amostra EW49-L2. Neste caso a informação é apenas indicativa, não se devendo levar em linha de conta os valores apresentados. Todavia pode ser referido que também se confirma desprendimento de fragmentos da placa intermédia no seio da interface, observando-se também que a zona de passagem da fissura tem uma composição tipicamente constituída por compostos intermetálicos Fe_xAl_y .

5.2.3. Análise do Comportamento Mecânico

No corpo de prova EW49 foram medidas microdurezas, quer na amostra EW49-L2 quer na amostra EW49-L4, tendo sido ainda realizados ensaios de tração-corte aos provetes EW49-T2 e EW49-T3, complementados com análise das deformações pelo sistema ARAMIS®, bem como análise SEM/EDS da fratura do EW49-T2.

5.2.3.1. Microdurezas

Na Figura 5.11, encontra-se a representação gráfica das microdurezas medidas nas amostras EW49-L2 e EW49-L4:

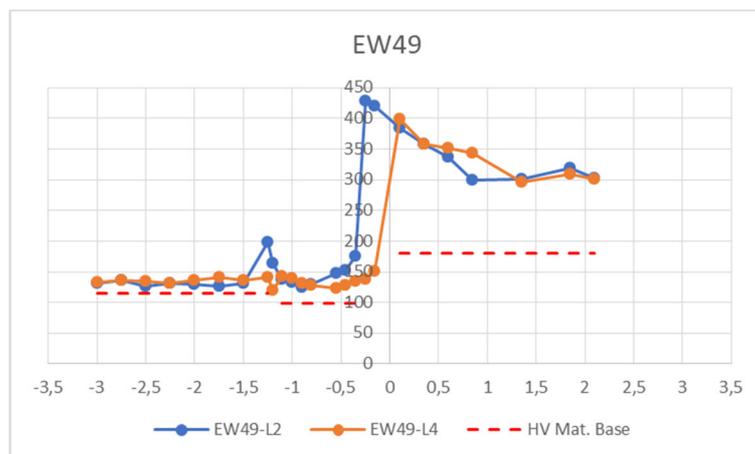


Figura 5.11. Perfil de microdurezas no EW49

Pelas linhas tracejadas a vermelho, é possível identificar os materiais em causa: sendo o ponto 0 mm a interface aço carbono – aço inoxidável, temos à esquerda, até à distância de -1 mm, o Al; entre -1 mm e 0 a placa intermédia em DC05 e a parte à direita do gráfico descreve o aço inoxidável.

Em termos médios, a placa voadora ficou com uma dureza de 135 HV_{0,2}, que comparando com a inicial de 115 HV_{0,2} demonstra ter havido um ligeiro endurecimento do material. Já na parte da placa estacionária, o perfil denota um endurecimento significativo do aço inoxidável, mais pronunciado (> 400 HV_{0,2}) na interface com a placa intermédia, e que vai decrescendo ligeiramente à medida que as indentações se afastam desta, ficando ainda assim com um valor médio de aproximadamente 320 HV_{0,2}, que comparando com os 181 HV_{0,2} do material de base, indicia um endurecimento por deformação plástica do aço inoxidável. A placa intermédia de aço carbono, como seria de esperar, devido ao

encruamento resultante da elevada deformação sofrida, teve um aumento de 45 HV_{0,2} face aos 98 HV_{0,2} iniciais (cerca de 46%).

Foram ainda avaliadas microdurezas HV_{0,025} em alguns pontos da interface alumínio – aço carbono, onde aparentemente teria havido formação de compostos intermetálicos, que se poderão ver na Figura 5.12. Como se pode verificar, estes pontos, bastantes mais duros que o restante material circundante, são locais de fragilização da ligação.

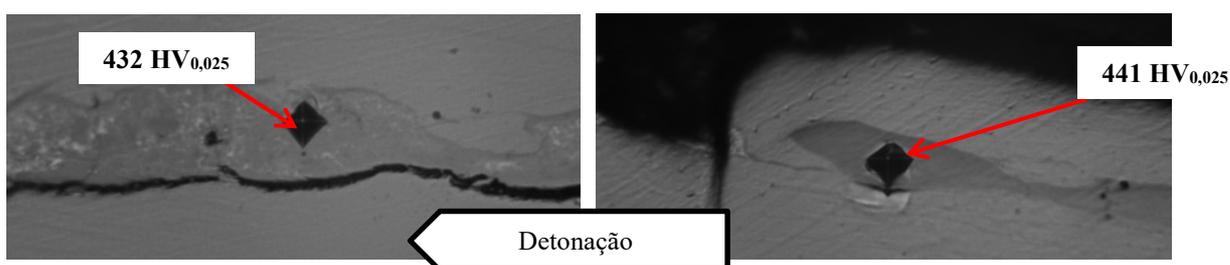


Figura 5.12. Indentações específicas em HV_{0,025} no EW49

Cruzando com os dados obtidos no EDS, a presença de compostos intermetálicos ricos em Al, do tipo Fe_xAl_y, tal como mencionado por Carvalho, *et al.* [24], é coerente com este comportamento frágil e estas durezas são enquadráveis nesse tipo de compostos, como referido por Rathod, *et al.* [50]. Ainda segundo Matysik, *et al.* [51], estes valores de durezas são consentâneos com a presença de compostos FeAl.

5.2.3.2. Comportamento à Tração-Corte

O ensaio de tração-corte foi realizado nos provetes EW49-T2 e EW49-T3.

Na Figura 5.13, pode visualizar-se a curva, Força (N) vs Deslocamento (mm), traçada para os provetes ensaiados, que tiveram respostas muito similares, denotando-se que ambos demonstraram um comportamento que pode ser caracterizado como elasto-plástico, com uma fase de evolução linear da curva, em regime elástico, entrando no domínio plástico, tendo atingido uma carga máxima claramente definida, seguida de imediato decréscimo da carga até atingir-se a rotura.

As cargas máximas atingidas foram de 11,1 kN no EW49-T2 e 11,4 kN no EW49-T3, o que permitem estimar uma tensão de corte máxima aproximada de 166 MPa e 169 MPa respectivamente.

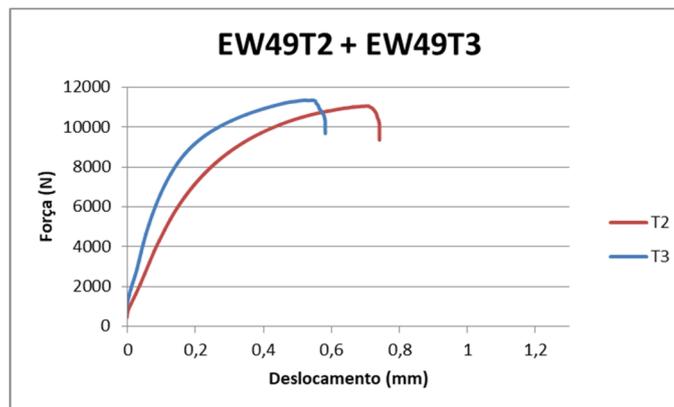


Figura 5.13. Representação gráfica Força vs Deslocamento no ensaio tração-corte do EW49

Na Figura 5.14, é possível comparar uma macrografia da rotura dos provetes com a representação das deformações locais de Von Mises, no ensaio ARAMIS®, retiradas no instante imediatamente anterior à rotura. A rotura ocorre na interface da placa voadora com a placa intermédia, sendo igualmente possível confirmar as deformações predominantes na parte do alumínio, que entraram no domínio plástico.

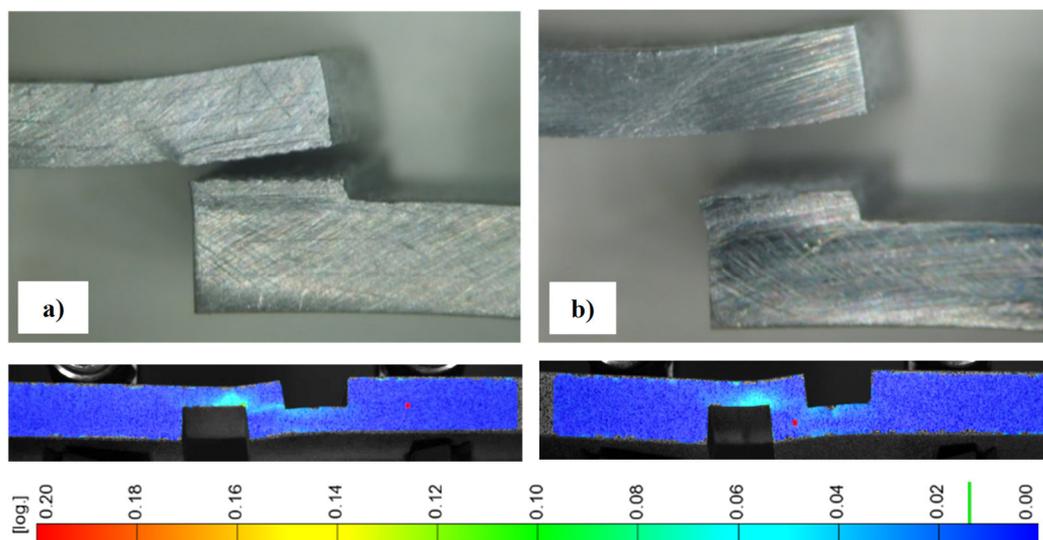


Figura 5.14. Foto da zona de fratura e representação das deformações locais de Von Mises para os provetes: a) EW49-T2; b) EW49-T3

5.2.3.3. Análise das Fraturas

O provete EW49-T2 foi cortado pela zona da fratura e foi analisado por SEM/EDS.

Pela análise da Figura 5.15, é possível, do lado do alumínio, verificar alguns pontos com a fratura tipicamente dúctil (com as características microcavidades nas zonas

envolvidas a branco), mas a maior parte da fratura caracteriza-se por uma rotura frágil, cujas zonas, com recurso ao EDS, permite saber-se conter compostos intermetálicos. Novamente recorrendo ao diagrama de equilíbrio Al-Fe, na Figura 5.10, e seguindo ainda a investigação publicada por Li, *et al.* [49], estamos igualmente em presença de uma mistura de alumínio puro com compostos intermetálicos dispersos no seu seio, do tipo Fe_xAl_y (provavelmente Fe_4Al_{13}) o que corrobora o comportamento frágil demonstrado na fratura.

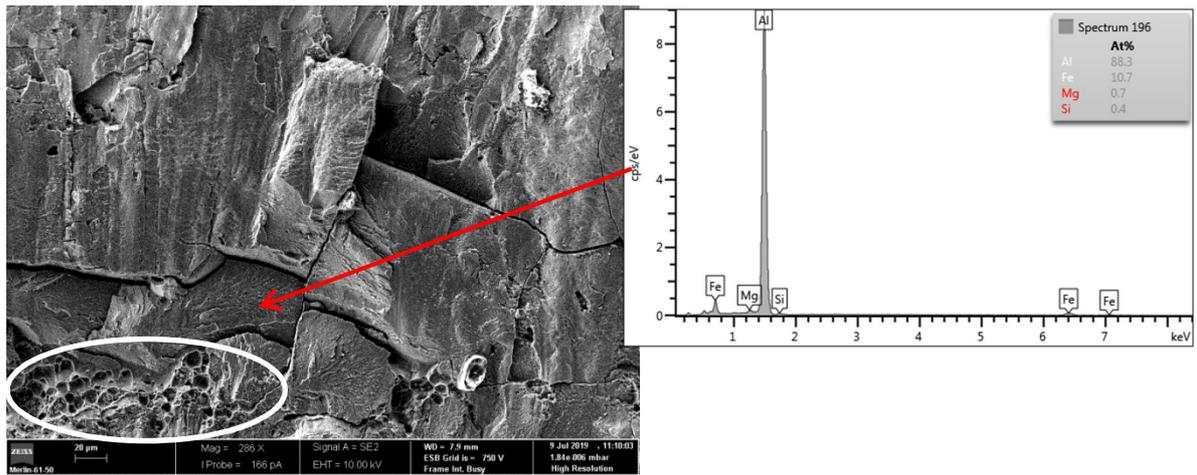


Figura 5.15. SEM/EDS Fratura EW49-T2, lado alumínio

Já na Figura 5.16, fratura no lado do alumínio, no espectro 194 evidencia-se uma composição com cerca de 51% de Fe e 48% de Al. Neste caso, o diagrama de equilíbrio Al-Fe, na Figura 5.10, permite concluir que temos claramente o composto FeAl.

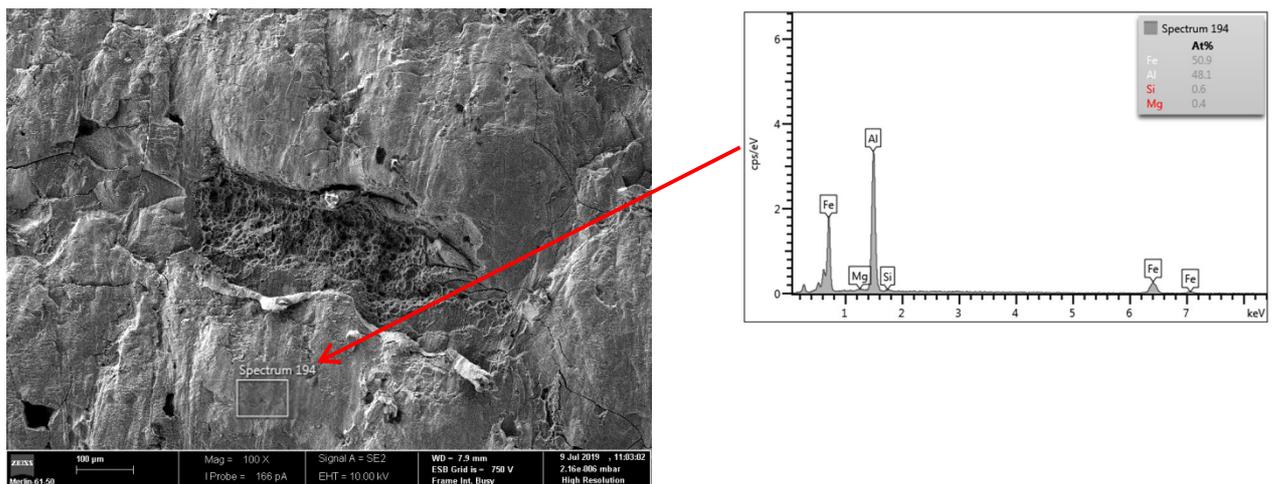


Figura 5.16. SEM/EDS Fratura EW49-T2, lado alumínio

No lado contrário, o mesmo se observa, como se pode ver na Figura 5.17, também no que toca à caracterização dos compostos intermetálicos na superfície de fratura.

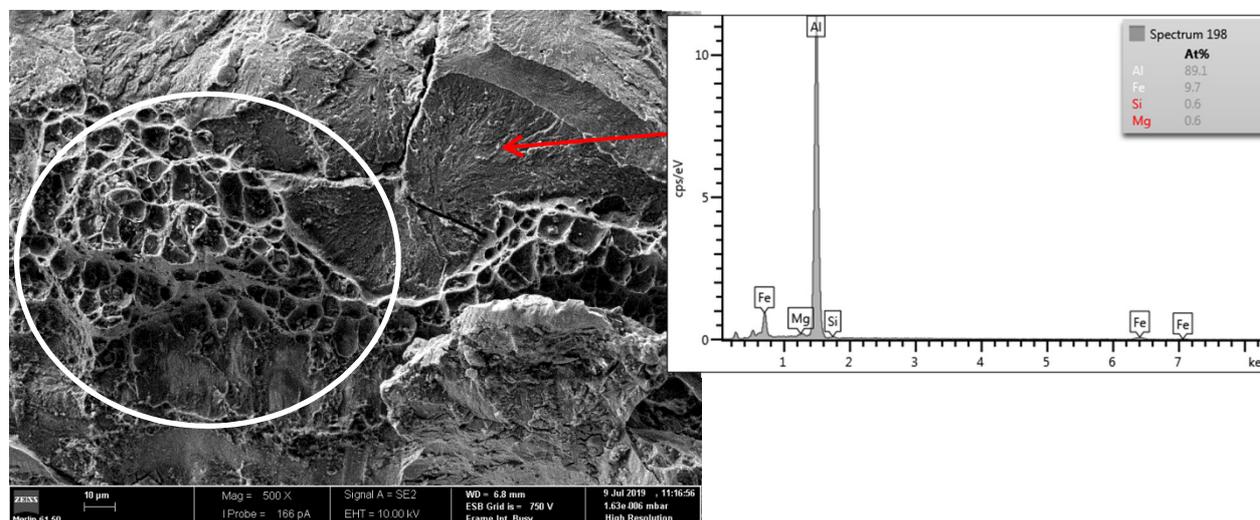


Figura 5.17. SEM/EDS Fratura EW49-T2, lado aço inoxidável

No EDS realizado do lado do aço inoxidável, especificamente na superfície da zona entalhada do provete, verificou-se que, ao contrário do esperado, apenas foi encontrado aço carbono. Esta observação impõe a necessidade de, na futura maquinação de provetes para o ensaio de tração-corte, e sempre que se utilizem placas intermédias, se tenha em atenção para que o desbaste seja feito por completo, evitando deixar vestígios do material da placa intermédia nas partes entalhadas dos provetes.

5.3. EW50 – Placa Intermédia de Chumbo

Neste corpo de prova, do ponto de vista do comportamento mecânico, apenas foi possível analisar microdurezas, devido à ausência de ligação efetiva entre as placas.

5.3.1. Análise Macroscópica

Na Figura 5.18, a ligação entre o alumínio e o aço não foi bem-sucedida, tendo havido apenas ligação aparente entre a placa intermédia de chumbo e a placa estacionária de aço inoxidável. É ainda visível que a detonação foi igualmente interrompida a cerca de 2/3 do seu percurso, sendo também visíveis os danos sofridos pela placa voadora no início da detonação, provavelmente também por efeito da violência da iniciação da explosão.



Figura 5.18. Fotografias do corpo de prova EW50 depois do procedimento

5.3.2. Análise Microscópica

5.3.2.1. Micrografias

Nas micrografias da Figura 5.19, observa-se a formação de ondas, em ambas as interfaces de ligação. Embora aparentemente a placa intermédia de chumbo tenha ligado à placa estacionária, pode observar-se a presença de chumbo ligado à placa voadora, o que indicia que foi o próprio material da placa intermédia a ceder. É possível observar também a deformação do grão nas interfaces, quer no alumínio, quer no aço inoxidável.

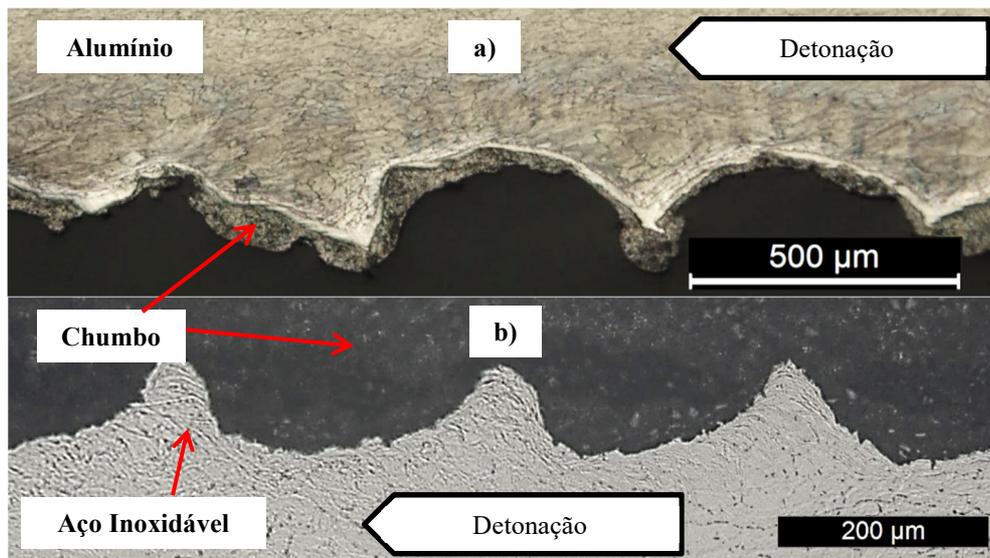


Figura 5.19. Micrografias do EW50: a) EW50-FL; b) EW50-BL

5.3.2.2. SEM/EDS

Na análise SEM/EDS das amostras do EW50, em termos gerais o que há a referir é que, como seria de esperar, não há formação de outros compostos, continuando a haver em separado alumínio, chumbo e aço inoxidável.

Confirmando o já afirmado, pela análise da amostra EW50-FL, existe chumbo agregado à interface da placa voadora. Na Figura 5.20, pode ver-se ainda uma particularidade, que é a dispersão de micropartículas de alumínio embebidas no seio do chumbo.

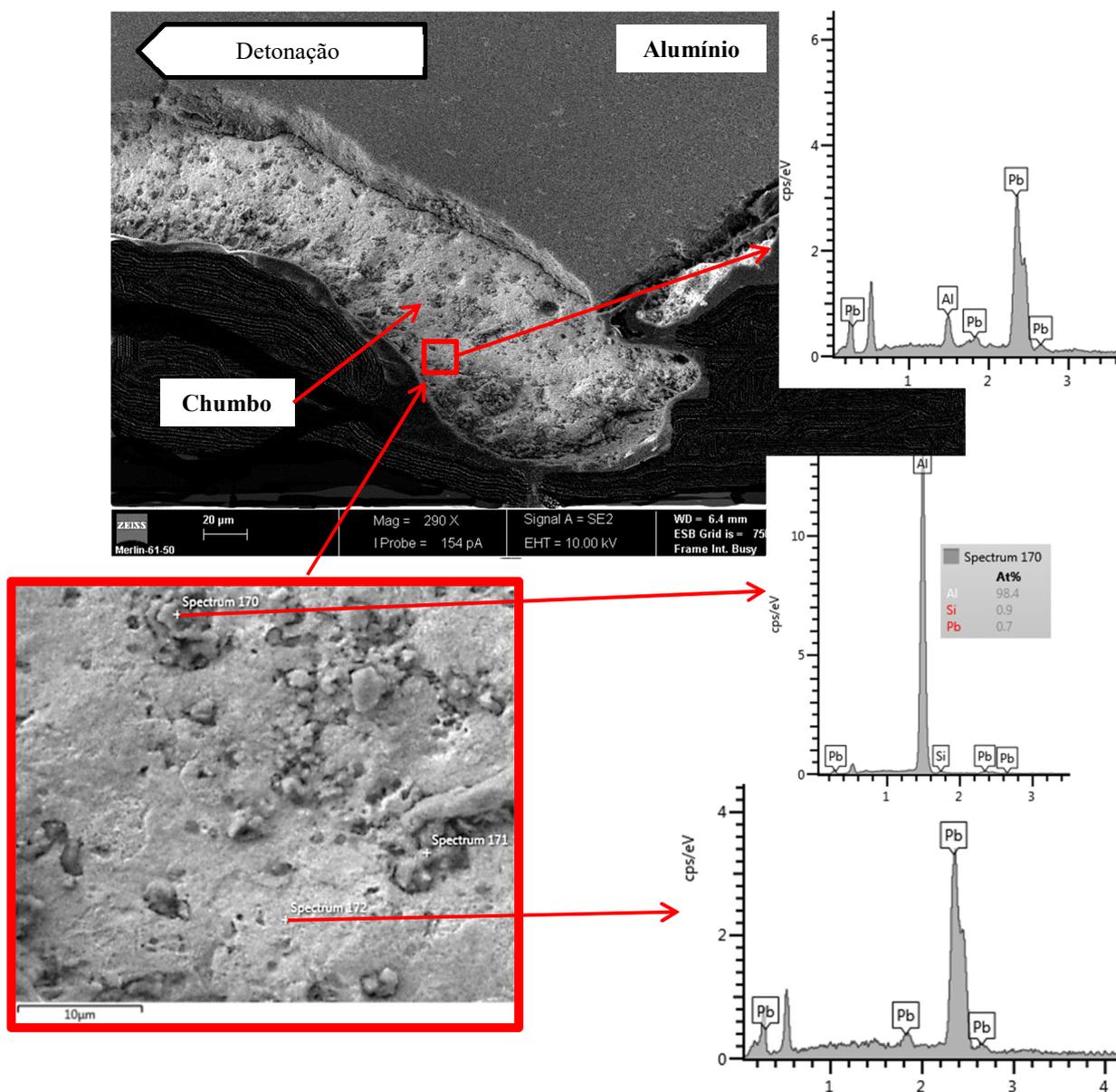


Figura 5.20. Imagens SEM/EDS EW50 FL

No espectro pontual 170 da imagem de pormenor, da Figura 5.20, confirma-se a dispersão de partículas ricas em alumínio no seio do chumbo. Segundo o EDS, esse alumínio é elementar, o que pode aparentemente significar a possibilidade de não terem sido fragmentos da liga que se embeberam no chumbo mas eventualmente alumínio elementar que se precipitou no meio do chumbo num possível processo de solidificação.

No SEM/EDS da amostra EW50-BL, o aspeto assinalável não é na interface com o aço, mas na superfície da rotura do chumbo. Como se constata na Figura 5.21, além de ocorrer o mesmo fenómeno de dispersão de alumínio do seio do chumbo, já antes reportado (agora neste caso, cerca de metade do material é alumínio), essa dispersão posiciona-se numa camada superficial regular, que foi medida com cerca de 70 μm , e que aparentemente pode ser resultante de um fenómeno de aprisionamento de partículas de alumínio numa eventual solidificação de uma fina camada de chumbo. Essa eventual solidificação teria sido posterior à instalação das ondas de tensão, o que segundo Carvalho, *et al.* [24] impediria a ligação efetiva, tal como se veio a verificar.

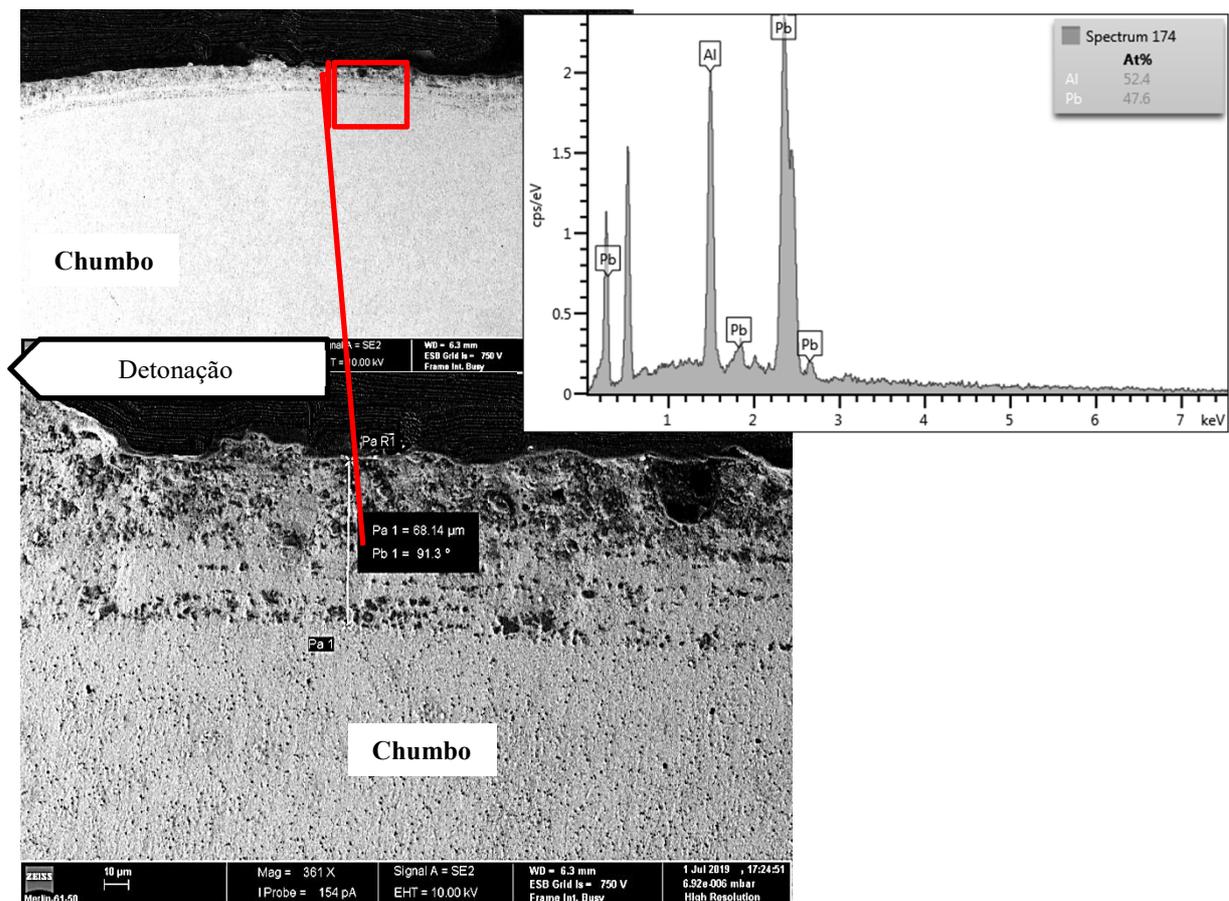


Figura 5.21. Imagens SEM/EDS EW50 BL

5.3.3. Análise do Comportamento Mecânico

Para o corpo de prova EW50, apenas foram realizadas medições de microdureza.

5.3.3.1. Microdurezas

Na Figura 5.22, encontra-se a representação gráfica das microdurezas medidas nas amostras EW50-FL e EW50-BL:

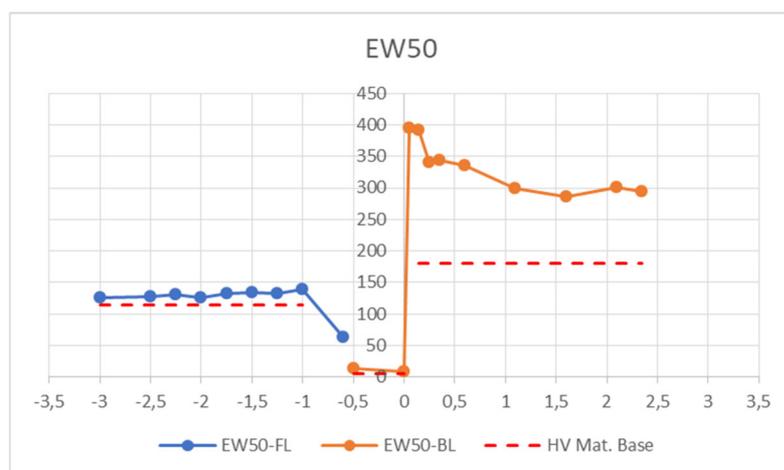


Figura 5.22. Perfil de microdurezas no EW50

No corpo de prova EW50, a avaliação é semelhante ao ocorrido com o EW49, no que toca aos materiais a ligar da placa voadora e estacionária. Em termos médios, a placa voadora ficou com uma dureza de 131 HV_{0,2}, que comparando com a inicial de 115 HV_{0,2} evidencia um ligeiro endurecimento por deformação plástica. Note-se neste caso a particularidade de, junto à interface, se ter verificado uma redução da dureza, que pode estar relacionada com a dissolução de precipitados endurecedores.

Na placa estacionária, o perfil também denota um endurecimento significativo do aço inoxidável, mais pronunciado (≈ 390 HV_{0,2}) na interface, e que vai decrescendo ligeiramente à medida que as indentações se afastam desta, ficando ainda assim com um valor médio de aproximadamente 330 HV_{0,2}, que comparando com os 181 HV_{0,2} de dureza inicial, indicia igualmente um endurecimento por deformação plástica do aço inoxidável. A placa intermédia de chumbo não sofreu um endurecimento significativo, com uma dureza média de 11 HV_{0,01}.

6. CONCLUSÕES

Com este trabalho, e apesar das vicissitudes ocorridas na parte experimental por causa de problemas na qualidade do explosivo, podem tirar-se as conclusões apresentadas seguidamente.

Mesmo com um mau comportamento do explosivo, a utilização da placa intermédia de aço carbono permitiu indicações promissoras, visto que a ligação foi efetiva em algumas porções do corpo de prova. A reforçar esta conclusão, noutra trabalho a decorrer em paralelo, a ligação utilizando o aço carbono foi efetiva. Aliado ao seu custo relativamente económico, a sua viabilidade técnica torna-o uma solução com elevado potencial industrial como placa intermédia na ligação dissimilar alumínio – aço inoxidável.

Na interface do alumínio com o aço carbono observou-se a formação de compostos intermetálicos em diversos pontos. Houve fissuração, cuja propagação percorreu os contornos definidos por esses compostos.

O ensaio com a placa intermédia de chumbo não apresentou ligação. O facto de o chumbo não ter afinidade química com os outros materiais acabou por não se revelar um fator com força suficiente, face à disparidade nas propriedades físicas e mecânicas. Aliado a isto, os problemas ambientais e de saúde que se colocam fazem com que este material aparentemente não seja uma solução viável.

Com a placa intermédia de chumbo, a rotura ocorreu nesta, tendo havido a formação de ondas quer no alumínio, quer no aço inoxidável, embora a linha de rotura no chumbo apresente uma configuração direita.

Foi possível observar a existência de núcleos de alumínio embebidos no chumbo.

Em ambos os procedimentos, evidencia-se um endurecimento por deformação plástica dos materiais após realização do procedimento, sendo mais pronunciada no aço inoxidável.

6.1. Propostas de Continuidade de Investigação

Embora o comportamento do explosivo possa pôr em causa algumas conclusões, é, todavia, evidente que a utilização da placa intermédia tem um contributo importante na possibilidade de ampliar a flexibilidade de parâmetros para que se consigam ligações de qualidade.

Nessa medida, sendo a janela de soldabilidade uma ferramenta que terá importância na previsibilidade do processo, e havendo pouco estudo desenvolvido especificamente a esse nível, será uma linha importante de trabalho, o desenvolvimento de modelos analíticos ou numéricos que possam prever o efeito efetivo da placa intermédia no processo de soldadura por explosão e que permita a construção de janelas de soldabilidade mais efetivas.

No seguimento de propostas já referidas anteriormente, seria desejável o estudo de formas de minimizar os danos provocados pela explosão na placa voadora.

Por fim referir, como chamada de atenção para futuros trabalhos, que nos procedimentos experimentais com placas intermédias, deve haver o cuidado de, quando se maquinam os provetes para ensaios de tração-corte, que seja removida a totalidade do material da placa intermédia em cada um dos entalhes, deixando apenas material da placa voadora e placa estacionária. A não ser assim, os resultados podem ser influenciados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Encyclopaedia Britannica, “RDX - Explosive,” *Encyclopaedia Britannica*, 2019. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/RDX>. [Accessed: 23-Jul-2019].
- [2] I. A. Bataev *et al.*, “Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study,” *Mater. Des.*, vol. 169, p. 107649, May 2019.
- [3] D. Cutter, “What You Can Do with Explosion Welding,” *Weld. Journal, Am. Weld. Soc.*, 2006.
- [4] 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, Nov. 1971.
- [5] P. Corigliano, V. Crupi, and E. Guglielmino, “Mechanical buckling analysis of explosive welded joints used in shipbuilding,” *Int. Shipbuild. Prog.*, vol. 66, no. 1, pp. 17–34, Mar. 2019.
- [6] L. Zhengzhou Yuguang Clad Metal Materials Co., “Explosive Welding Tubesheet,” *Corporate Web Site*, 2019. [Online]. Available: http://www.yuguangmetal.com/Product_5/2014811142096.html. [Accessed: 11-Jul-2019].
- [7] Q. Chu, M. Zhang, J. Li, and C. Yan, “Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 689, pp. 323–331, Mar. 2017.
- [8] K. Weman, “Pressure welding methods,” in *Welding Processes Handbook*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 119–132.
- [9] J. Kaur, V. Mangla, J. Singh, S. Kumar, and N. Srivastava, “Cladding of Stainless Steel (SS304) on Aluminium Alloy (AA1100) by Explosive Welding,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19136–19139, Jan. 2018.
- [10] M. M. M. Hoseini Athar and B. Tolaminejad, “Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated

- by explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 516–525, Dec. 2015.
- [11] K. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, and A. E. Tekkaya, “Joining by plastic deformation,” *CIRP Ann.*, vol. 62, no. 2, pp. 673–694, 2013.
- [12] S. A. A. Akbari-Mousavi, L. M. Barrett, and S. T. S. Al-Hassani, “Explosive welding of metal plates,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 202, no. 1, pp. 224–239, 2008.
- [13] 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.
- [14] M. Acarer, B. Gülenç, and F. Findik, “Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength,” *Mater. Des.*, vol. 24, no. 8, pp. 659–664, 2003.
- [15] P. Dozolme, “Balance - The Explosives Used in Mining,” *The Explosives Used in Mining*, 2019. [Online]. Available: <https://www.thebalance.com/explosives-used-in-mining-an-overview-2367467>. [Accessed: 27-Jun-2019].
- [16] S. A. A. Akbari Mousavi and P. Farhadi Sartangi, “Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 3, pp. 459–468, 2009.
- [17] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Explosive welding of aluminium to stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 262, pp. 340–349, Dec. 2018.
- [18] 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, Apr. 2016.
- [19] F. Findik, “Recent developments in explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1081–1093, Mar. 2011.
- [20] P. M., M. Prazmowski, P. M., M. Prazmowski, and P. M., “Mechanical Properties of Zirconium/Steel Bimetal Fabricated by Means of Explosive Welding at Varied Detonation Velocities,” *Arch. Metall. Mater. Vol 59, Iss 3, Pp 1137-1142*, vol. 59, no. 3, pp. 1137–1142, 2014.
- [21] 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.

-
- [22] K. Raghukandan, “Analysis of the explosive cladding of cu–low carbon steel plates,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 139, no. 1, pp. 573–577, 2003.
- [23] B. Wang, W. Chen, J. Li, Z. Liu, and X. Zhu, “Microstructure and formation of melting zone in the interface of Ti/NiCr explosive cladding bar,” *Mater. Des.*, vol. 47, pp. 74–79, 2013.
- [24] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, and A. Loureiro, “Formation of intermetallic structures at the interface of steel-to-aluminium explosive welds,” *Mater. Charact.*, vol. 142, pp. 432–442, 2018.
- [25] P. Manikandan, K. Hokamoto, M. Fujita, K. Raghukandan, and R. Tomoshige, “Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium/304 stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 195, no. 1, pp. 232–240, 2008.
- [26] S. M. Aceves, F. Espinosa-Loza, J. W. Elmer, and R. Huber, “Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 1490–1503, 2015.
- [27] S. Saravanan and K. Raghukandan, “Influence of interlayer in explosive cladding of dissimilar metals,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 28, no. 5, pp. 589–594, 2013.
- [28] S. Saravanan, K. Raghukandan, and K. Hokamoto, “Improved microstructure and mechanical properties of dissimilar explosive cladding by means of interlayer technique,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 563–568, 2016.
- [29] S. P. Kiselev and V. I. Mali, “Numerical and experimental modeling of jet formation during a high-velocity oblique impact of metal plates,” *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 48, no. 2, pp. 214–225, Mar. 2012.
- [30] V. G. Petushkov, V. F. Nesterenko, and G. V. Stepanov, “Behavior of metals at high-rate strains and wave generation in explosion welding,” *Strength Mater.*, vol. 44, no. 4, pp. 456–464, 2012.
- [31] A. A. Akbari Mousavi and S. T. S. Al-Hassani, “Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 53, no. 11, pp. 2501–2528, 2005.
- [32] D. R. Hay, “Explosive Welding: Applications and Techniques,” in *High-Pressure Science and Technology*, Boston, MA: Springer US, 1979, pp. 1813–1836.
-

- [33] 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, p. 052038, May 2014.
- [34] 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, Mar. 1953.
- [35] H. K. Wylie, P. E. G. Williams, and B. Crossland, “Proc. of the 3rd Int. Conf. of the Center for High Energy Rate Forming,” in *3rd Int. Conf. of the Center for High Energy Rate Forming*, 1971, pp. 1.3.1-1.3.43.
- [36] G. R. Abrahamson, “Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet,” *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, vol. 28, no. 4, pp. 519–528, 1960.
- [37] S. V. Kuzmin and V. I. Lysak, “Inter-Departmental Transaction Explosive Welding and Properties of Welded Joints,” pp. 29–38, 1991.
- [38] R. H. Wittman, “Proc. of the 2nd Int. Symp. on the Use of Explosive Energy in Manufacturing,” in *2nd Int. Symp. on the Use of Explosive Energy in Manufacturing*, 1973, pp. 153–168.
- [39] I. Zakharenko and B. Zlobin, “Effect of the hardness of welded materials on the position of the lower limit of explosive welding,” *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 19, pp. 689–692, 1983.
- [40] W. S. de Rosset, “Analysis of Explosive Bonding Parameters,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 21, pp. 634–638, 2006.
- [41] “EN 573-3 - Aluminium and Aluminium Alloys; Part 3 - Chemical Composition.” CEN/CENELEC, 2003.
- [42] “EN 515 - Aluminium and Aluminium alloys - Wrought products - Temper Designations.” CEN/CENELEC, pp. 1–30, 2017.
- [43] “EN 485-2 - Aluminium and Aluminium Alloys - Sheet/strip and plate; Part 2 - Mechanical Properties.” CEN/CENELEC, 2004.
- [44] J. A. Rego da Fonseca, “Soldadura por explosão do aço inoxidável AISI 304 à liga AA6082 T6,” University of Coimbra, 2017.
- [45] “EN 10088-2 - Stainless Steels - Part 2, Technical Delivery Conditions, Sheet/plate.” CEN/CENELEC, 2005.
- [46] “EN 10130 - Cold rolled low carbon steel flat products for cold forming - Technical

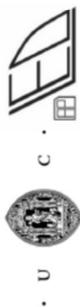
- delivery conditions.” CEN/CENELEC, 2006.
- [47] Azo Materials, “Lead (Pb) - Properties, Applications,” 2013. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9100>. [Accessed: 25-Jul-2019].
- [48] W. H. Tarn and P. Walker, *Handbook of Metal Etchants*. CRC Press, 1990.
- [49] X. Li, A. Scherf, M. Heilmaier, and F. Stein, “The Al-Rich Part of the Fe-Al Phase Diagram,” *J. Phase Equilibria Diffus.*, vol. 37, no. 2, pp. 162–173, Apr. 2016.
- [50] M. Rathod and M. Kutsuna, “Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding,” *Weld. Journal, Am. Weld. Soc.*, pp. 16S-26S, 2004.
- [51] P. Matysik, S. Józwiak, and T. Czujko, “Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System—Microstructures and Mechanical Properties,” *Materials (Basel)*., vol. 8, no. 3, pp. 914–931, Mar. 2015.

APÊNDICE A

Listagem dos Equipamentos Utilizados no Procedimento Experimental

Procedimento	Equipamento
Realização das Soldaduras	Câmara de explosão do LEDAP em Condeixa-A-Nova
Medição da Velocidade de Detonação	Osciloscópio digital LeCroy Wavejet 352, do DEM em Coimbra
Análise Microestrutural	Microscópio Ótico LEICA DM 4000 MLED, câmara fotográfica incorporada LEICA MC 120 HD, com respetivo software de tratamento do equipamento, do DEM em Coimbra
Medição de Microdurezas	Microdurómetro SHIMADZU HVM-G e respetivo software de análise incorporado, do DEM em Coimbra.
SEM/EDS	Microscópio Eletrónico de Varrimento ZEISS – GEMINI 2 e software de análise EDS da OXFORD Instruments, do IPN em Coimbra.
Ensaio de Tração	Máquina universal de tração SHIMADZU AGS-X de 100 kN, do DEM em Coimbra.

B2 – Ficha Técnica da Soldadura EW50



Ficha técnica

Soldadura por explosão: Paralela totalmente sobreposta
 Data: 04/04/2019
 Identificação Soldadura: EW50
 Responsáveis: Ricardo António Lopes Mendes

	Material	Dimensões [mm]			Dist. Entre placas (mm)	Massa [g]	Explosivo											
		Comp.	Largura	Esp.			Tipo	ANFO										
Flyer plate	6082-T6	250	70	3	4.5	143	ANFO											
Interlayer	Chumbo	250	70	1	1.5	187	25											
Base plate	AISI 304	250	70	3		414	2.56											
Sensibilizante		Dim. da caixa de explosivo [mm]				Iniciador		446250										
Tipo	-	Comp.	Largura	Esp.	Tipo	RDX	366											
Volume [mm ³]	-	263	70	25	Volume [mm ³]	14000	820.2											
Massa [g]	-	Diam. Agulha [mm]	0,9		Massa [g]	24												
Cilindro padrão		Resistência [Ω]			Sondas		Nº1		Nº2		Nº3		Nº4		Nº5		Nº6	
Densidade [kg/m ³]	-	Díodo			Distância entre seringas		-		-		-		-		-		-	
Volume [mm ³]	-	Condensador [nF]			Distância (c/ agulhas) [mm]		-		-		-		-		-		-	
Massa [g]	-	Dif. Potencial [V]			Tempo s/ agulhas [µs]		-		-		-		-		-		-	
File name:		-			-		-		-		-		-		-		-	

ANEXO A

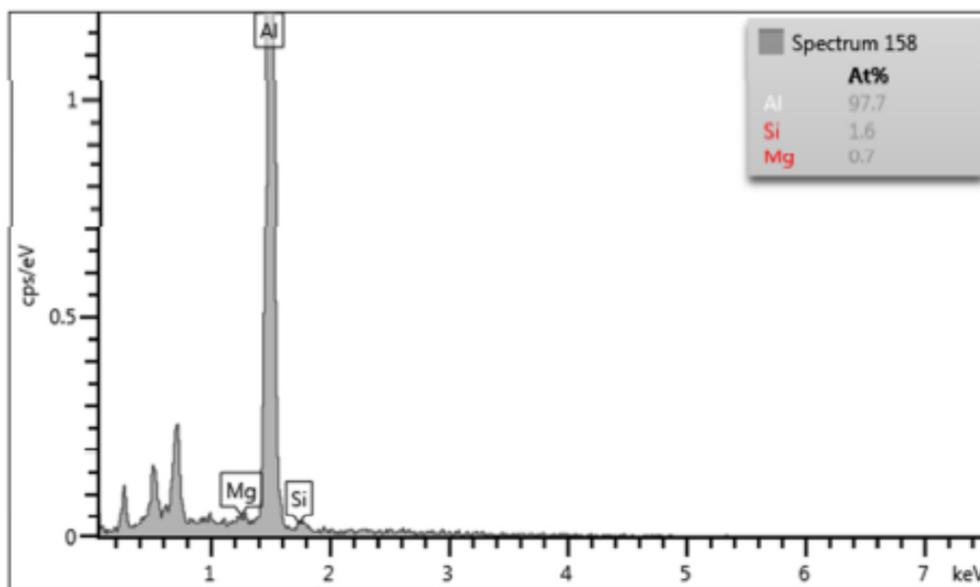
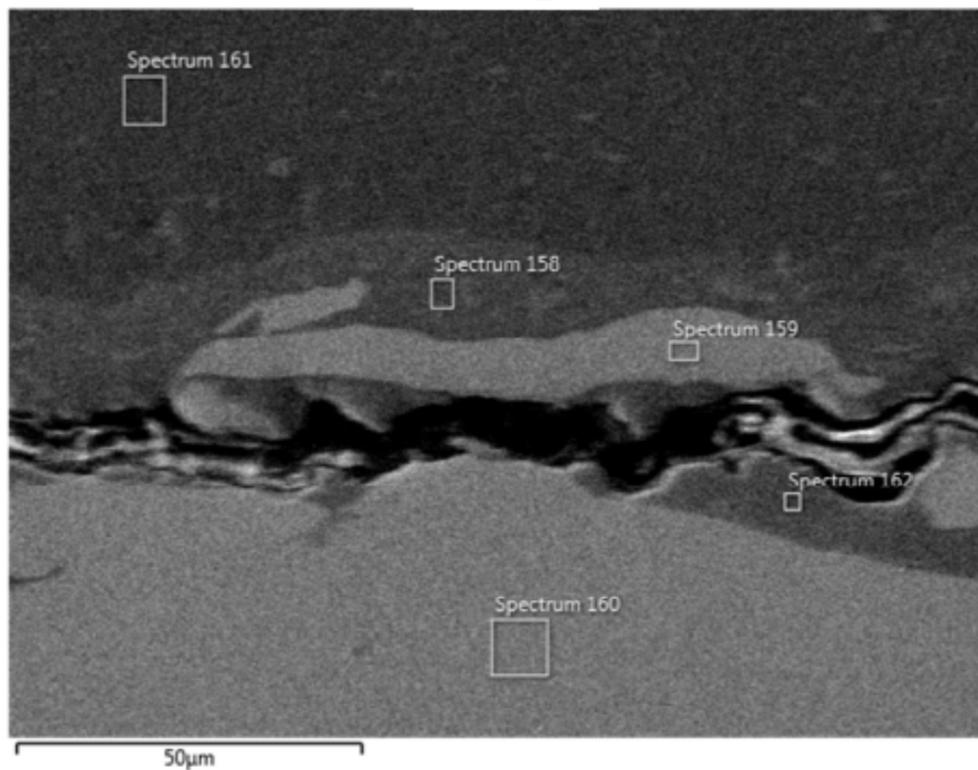
Neste apêndice incluem-se, nas páginas seguintes, os relatórios originais do EDS emitidos no IPN, pela sequência abaixo:

- EDS da amostra EW49-L2;
- EDS da amostra EW49-L4;
- EDS da fratura de EW49-T2, lado alumínio, relatório 1;
- EDS da fratura de EW49-T2, lado alumínio, relatório 2;
- EDS da fratura de EW49-T2, lado aço inoxidável, relatório 1;
- EDS fratura de EW49-T2, lado aço inoxidável, relatório 2;
- EDS da fratura de EW49-T2, lado aço inoxidável, relatório 3;
- EDS da amostra EW50, relatório 1 – EW50-BL;
- EDS da amostra EW50, relatório 2 – EW50-BL;
- EDS da amostra EW50, relatório 3 – EW50-FL;
- EDS da amostra EW50, relatório 4 – EW50-FL;
- EDS da amostra EW50, relatório 5 – EW50-FL;
- EDS da amostra EW50, relatório 6 – EW50-BL, rotura chumbo;
- EDS da amostra EW50, relatório 7 – EW50-BL, rotura chumbo.

Dr.Altino

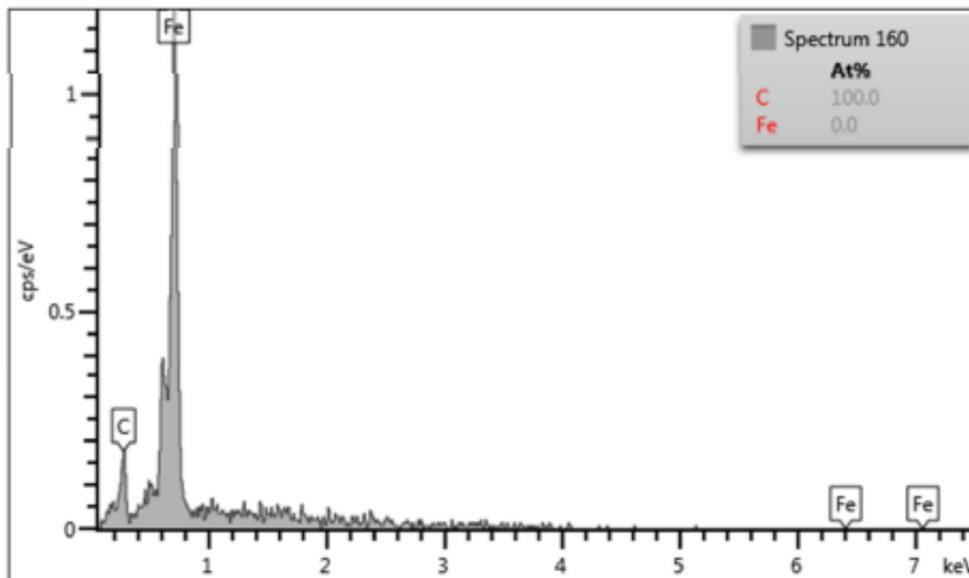
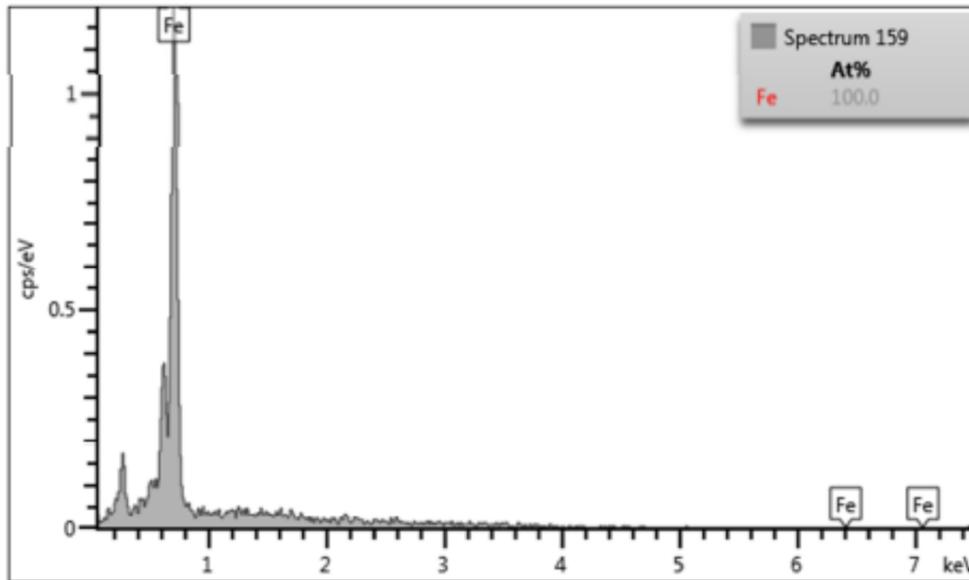
7/1/2019

EW49L2_1



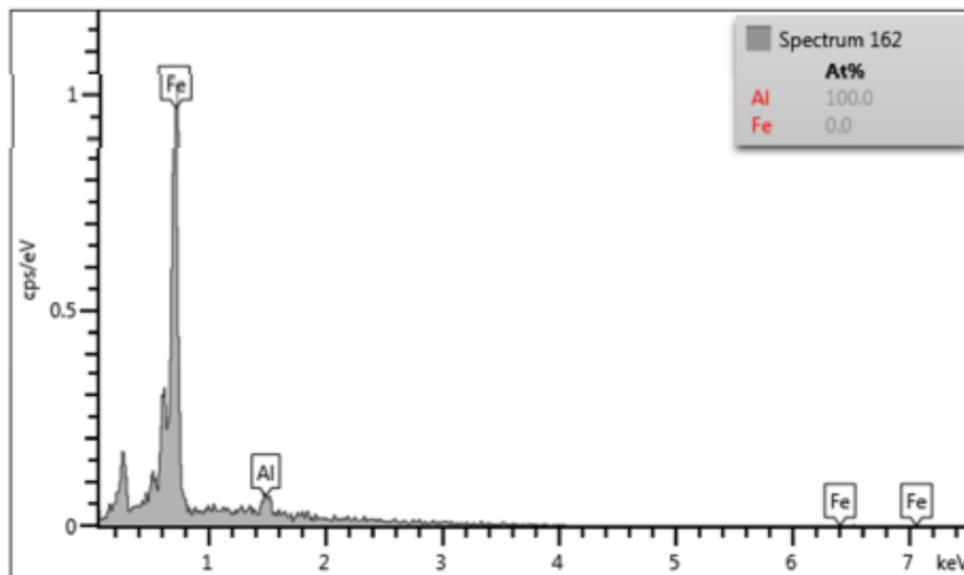
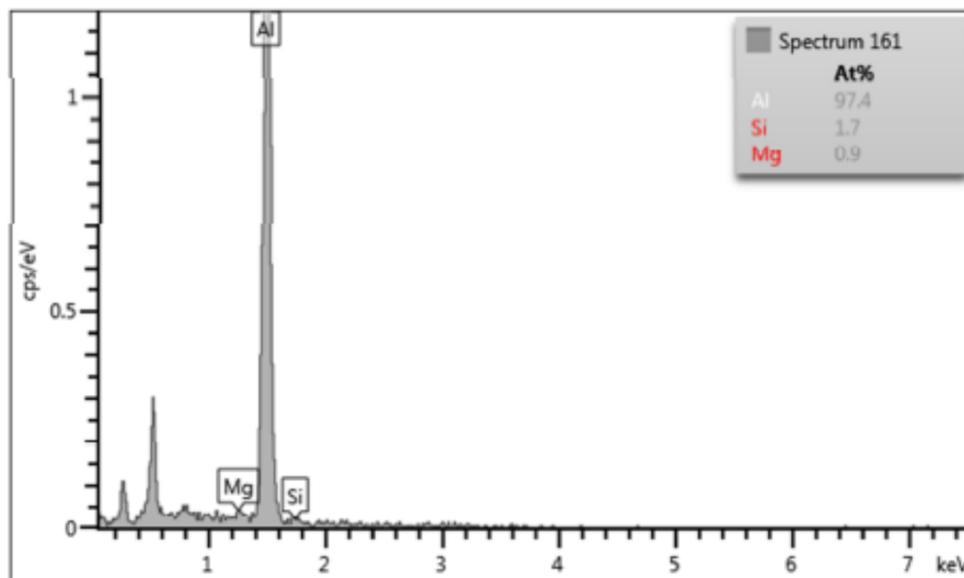
Dr.Altino

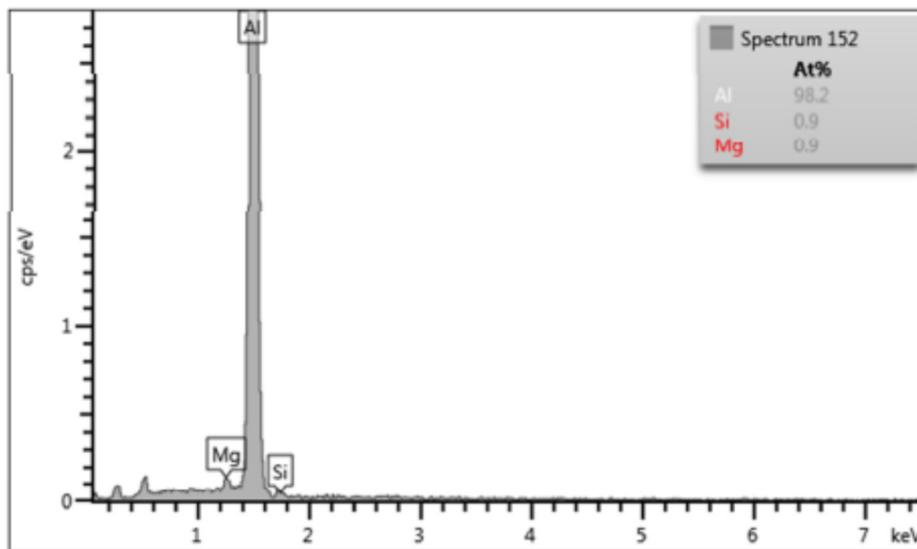
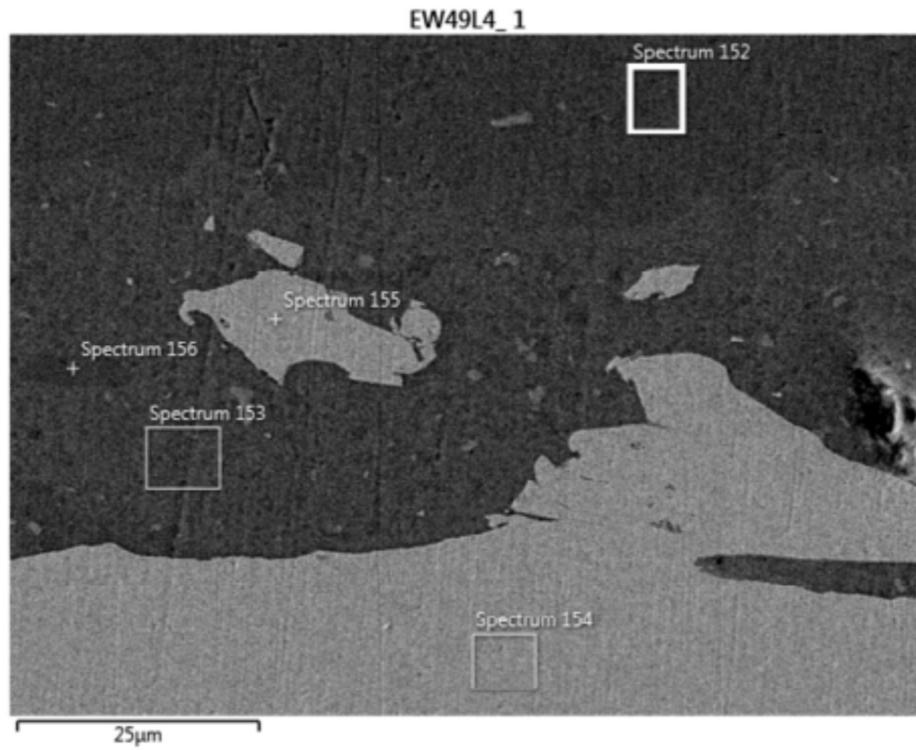
7/1/2019



Dr. Altino

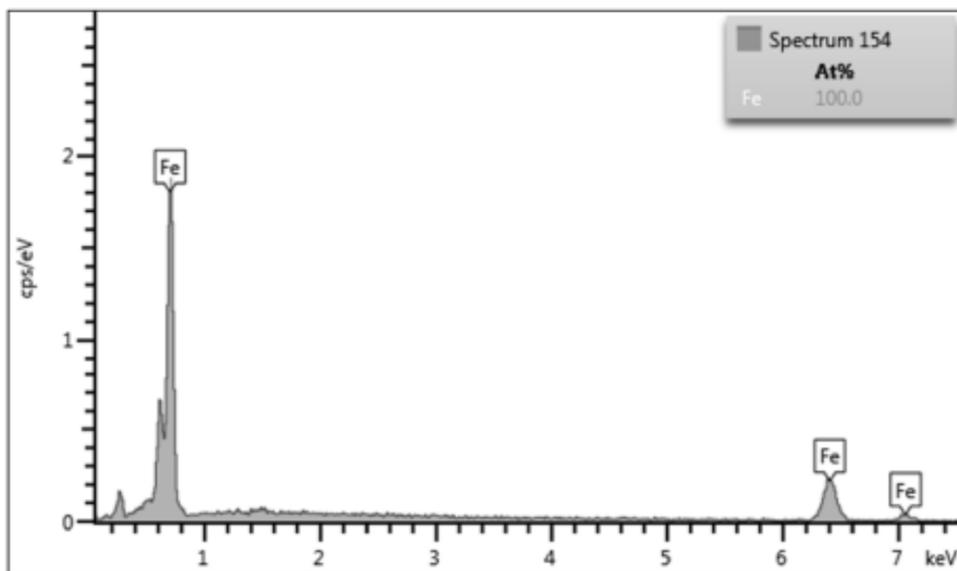
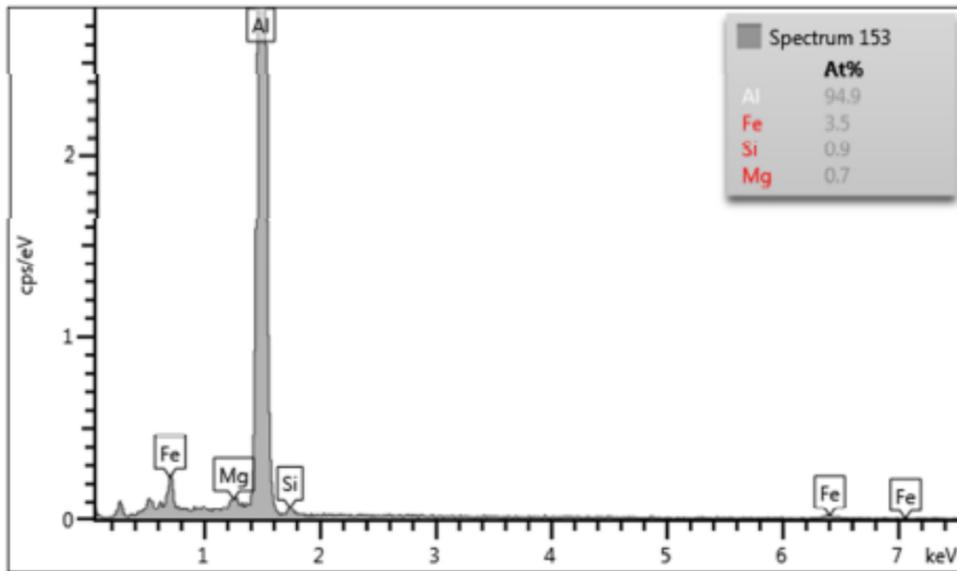
7/1/2019





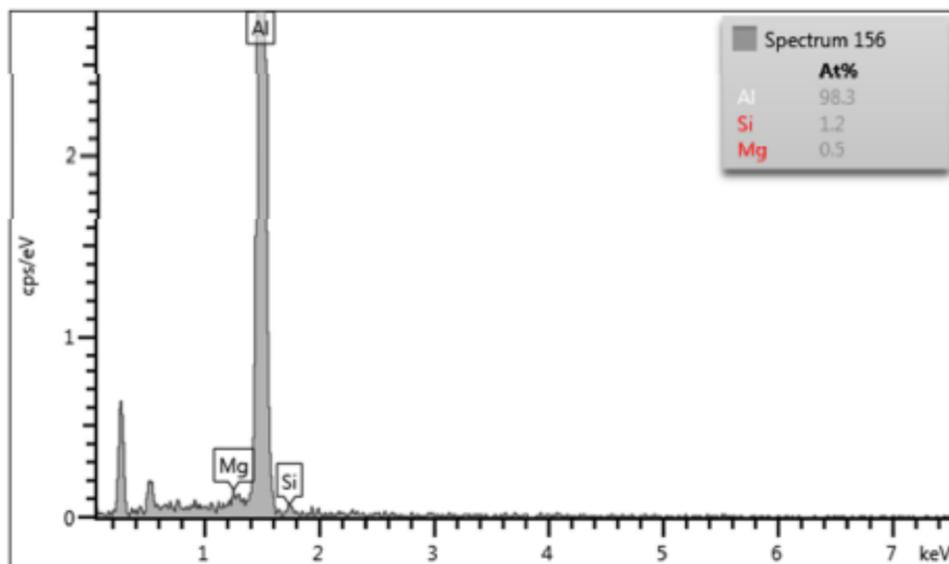
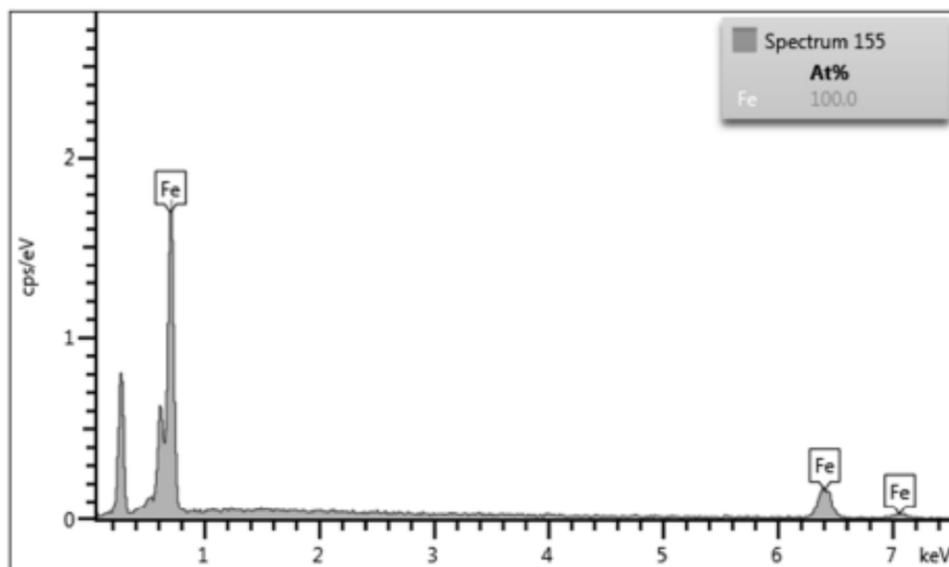
Dr. Altino

7/1/2019

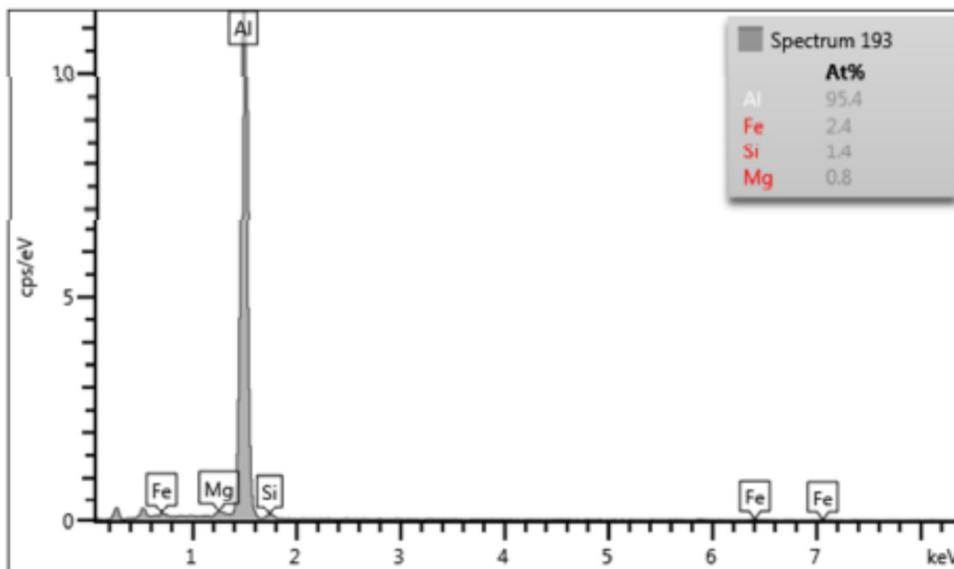
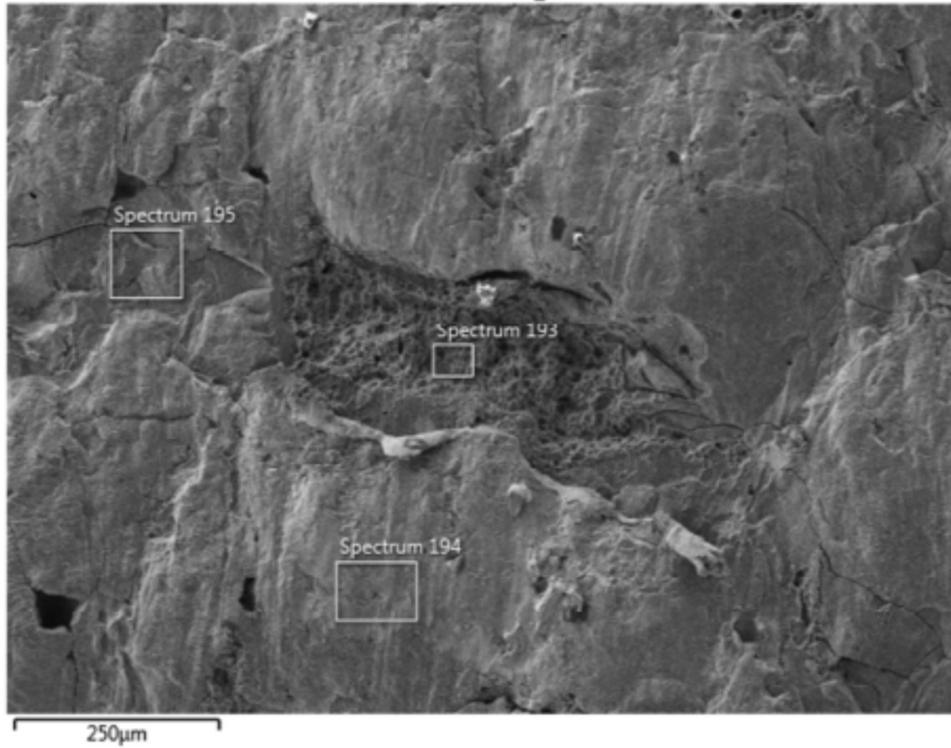


Dr.Altino

7/1/2019

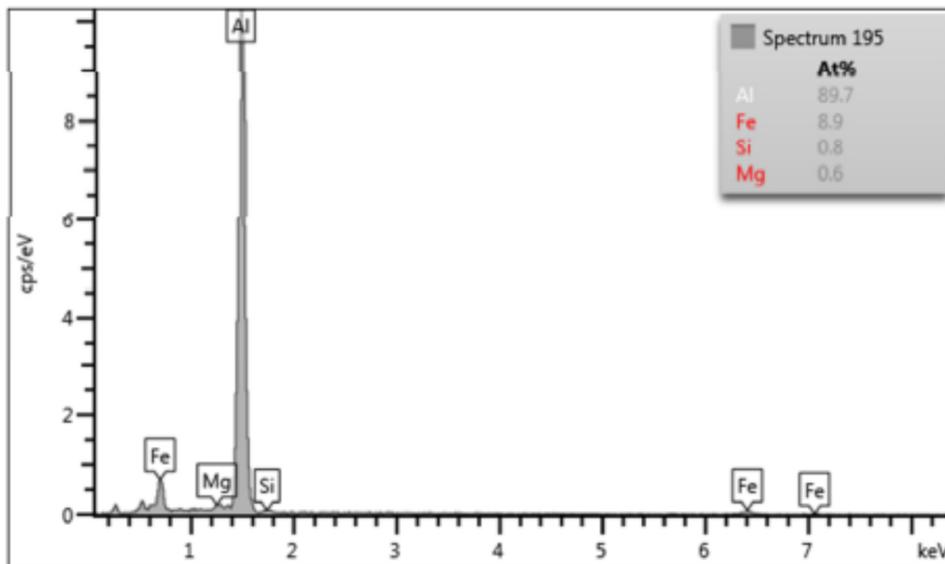
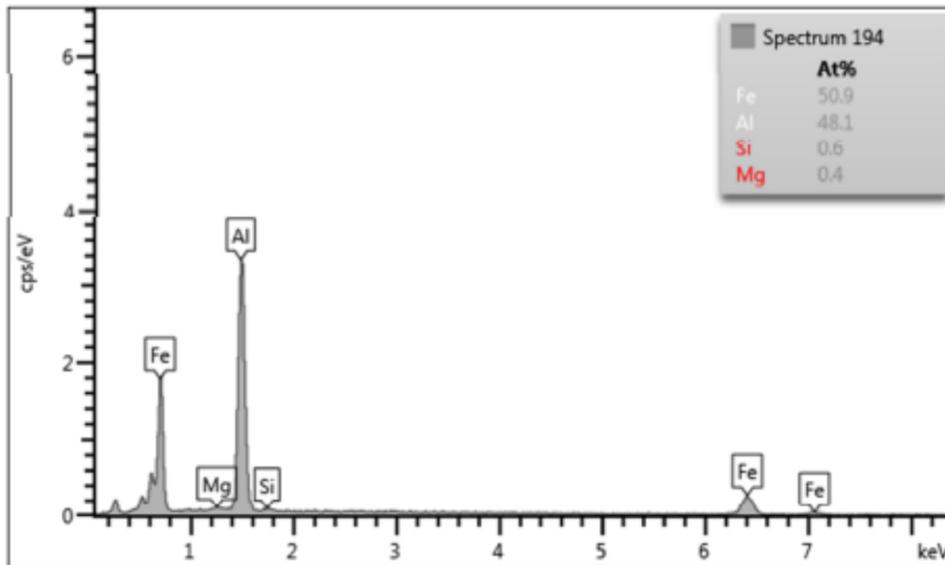


EW49-T2 Al_1



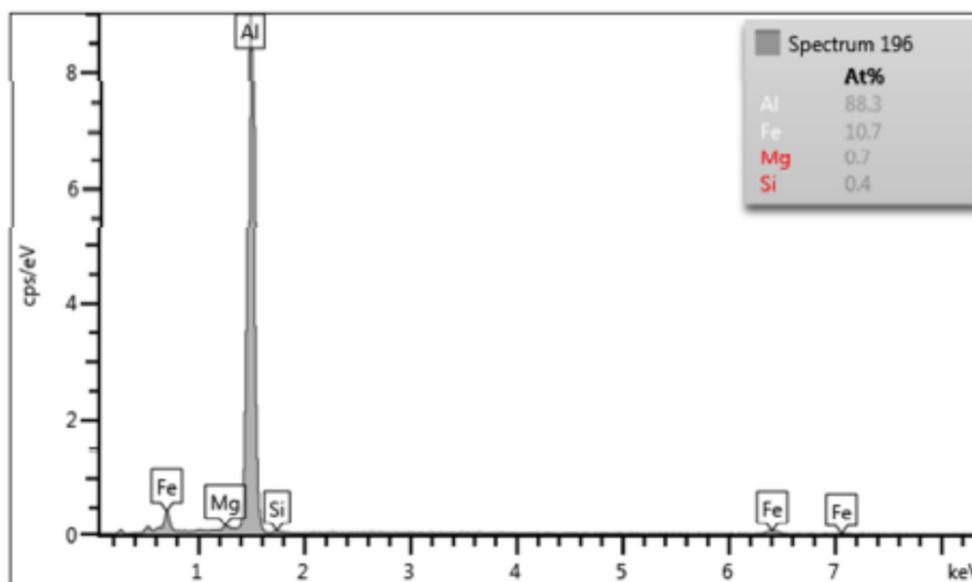
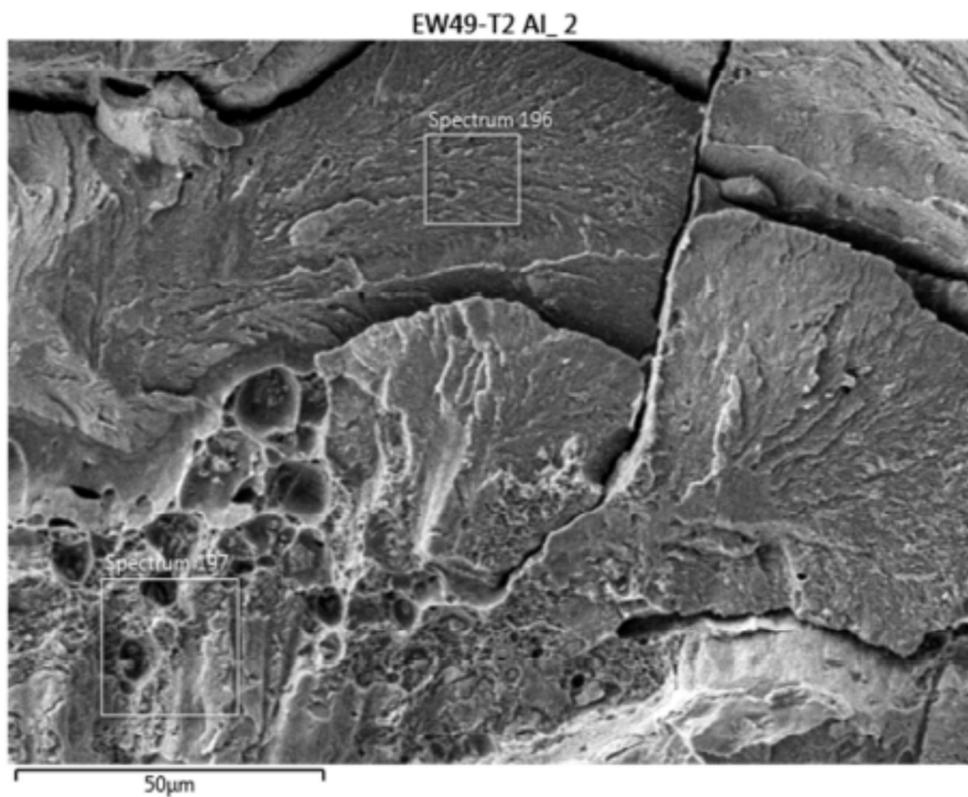
Dr.Altino

7/9/2019



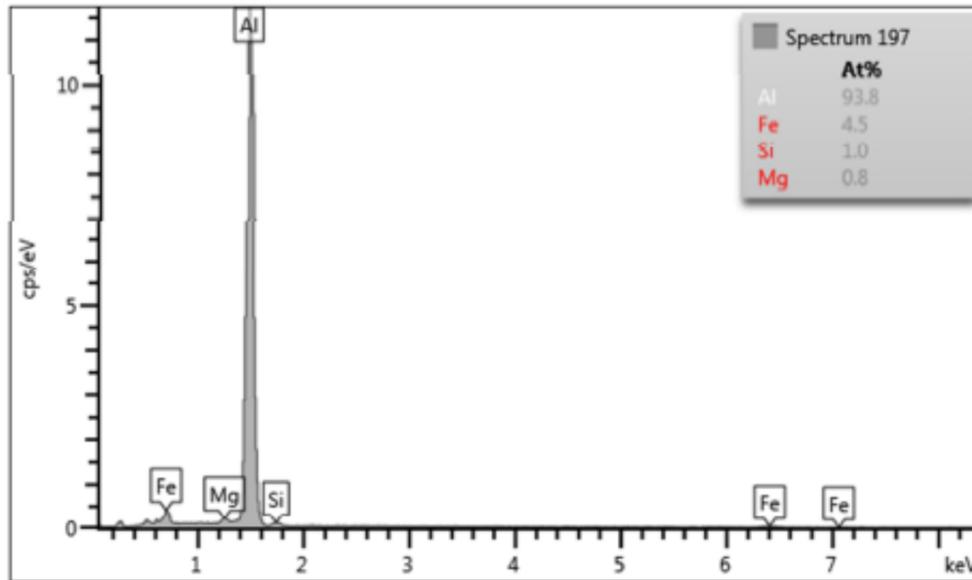
Dr.Altino

7/9/2019

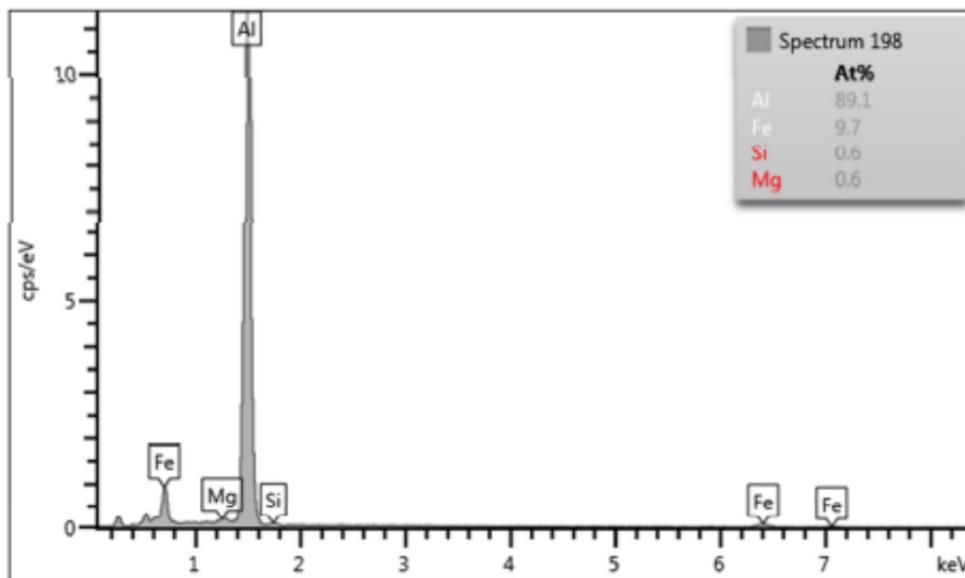
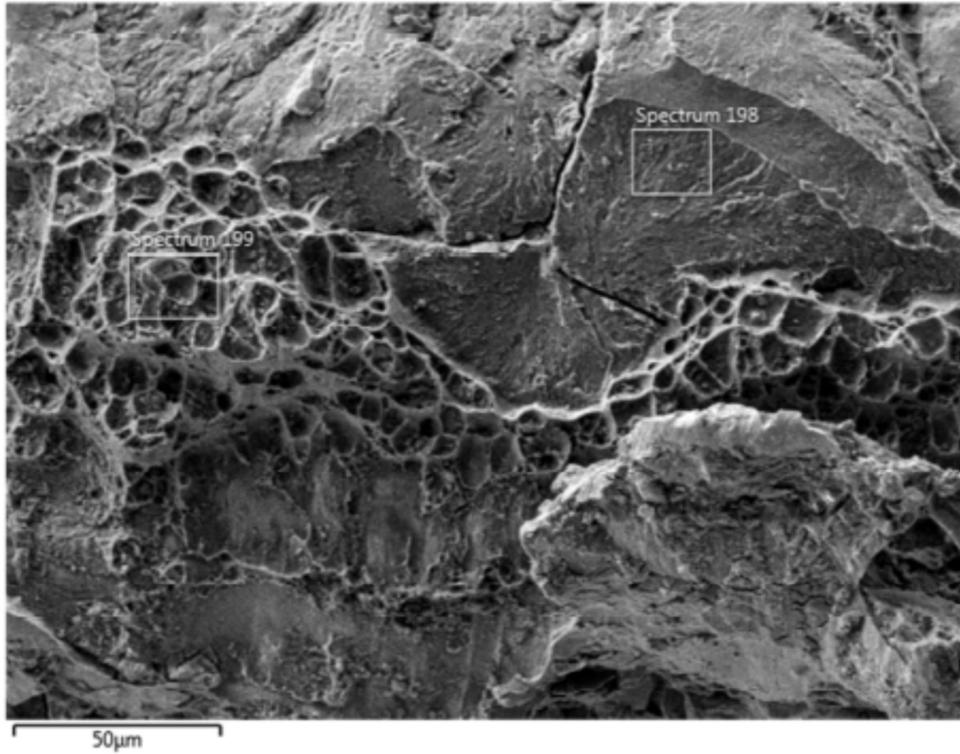


Dr. Altino

7/9/2019

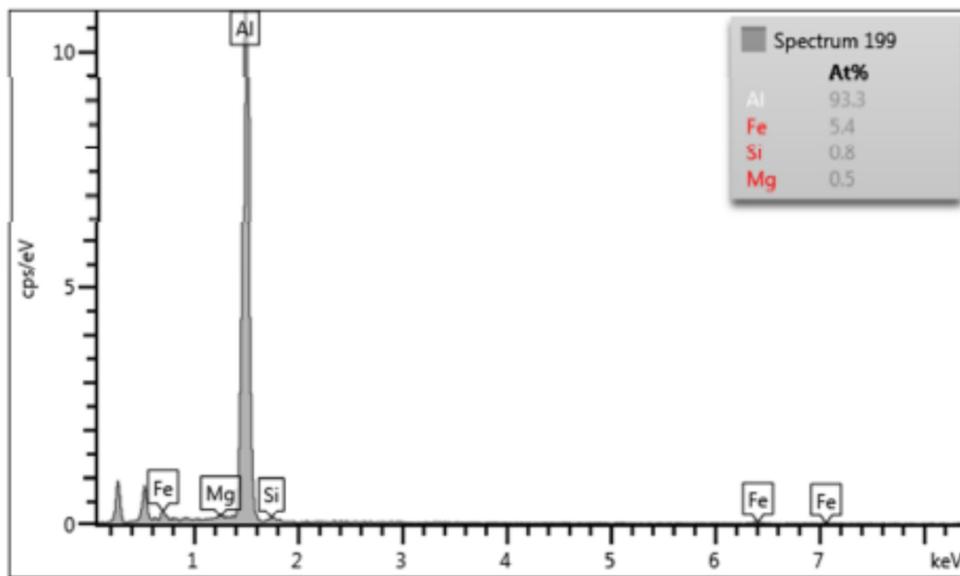


EW49-T2 inox_1



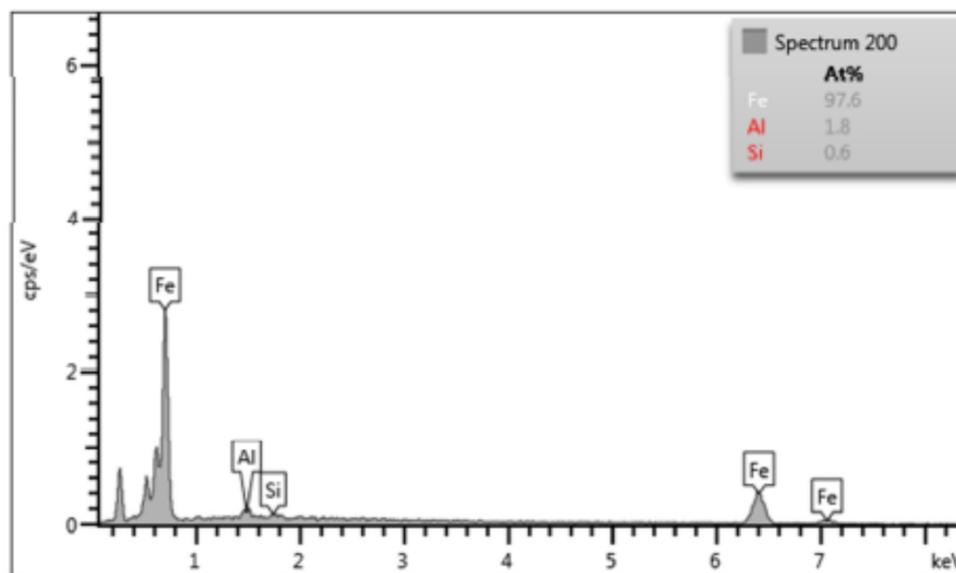
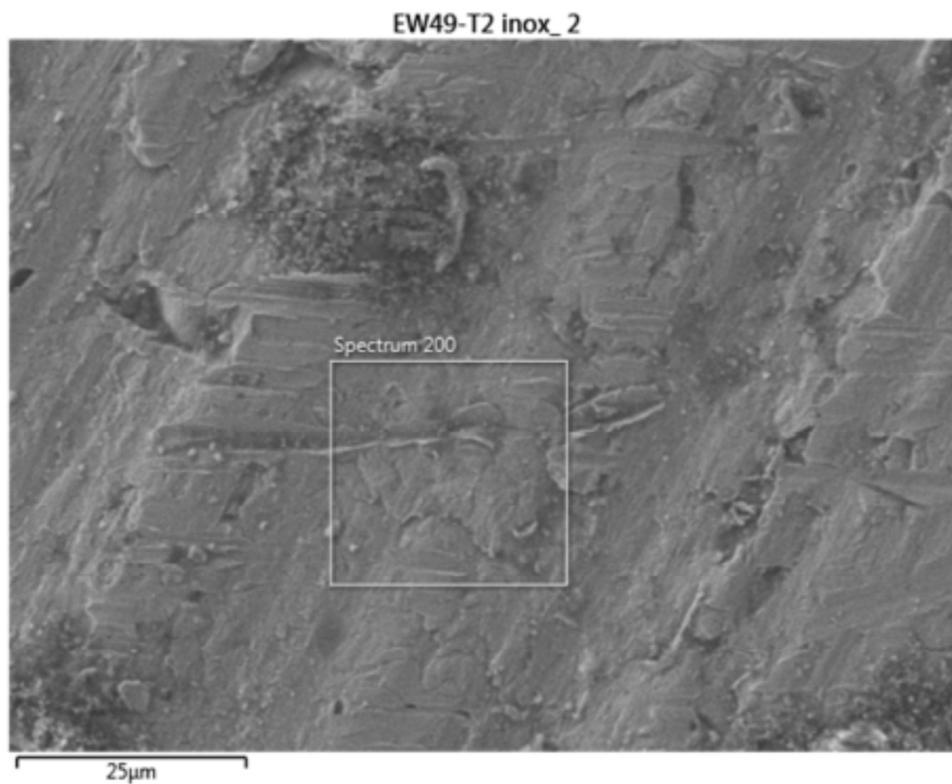
Dr.Altino

7/9/2019

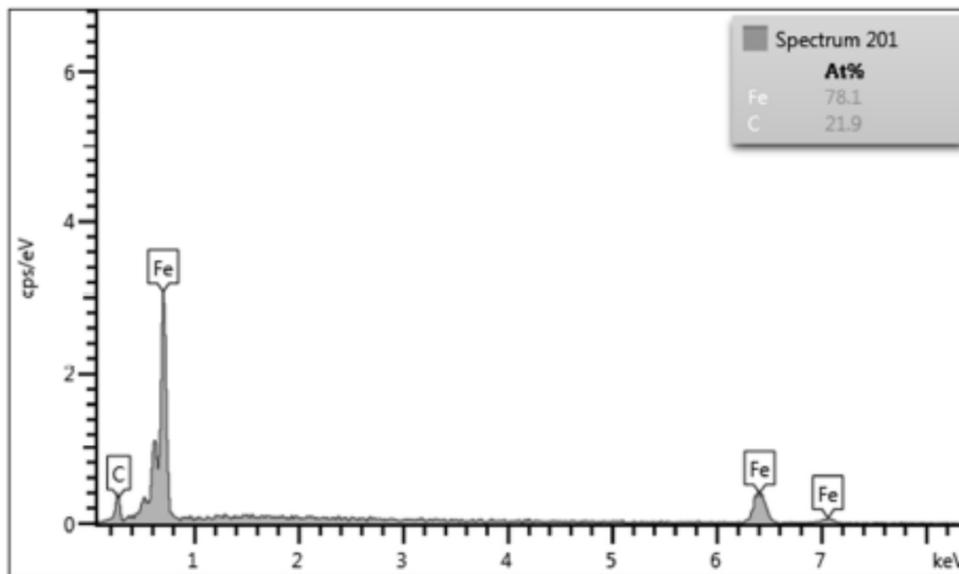
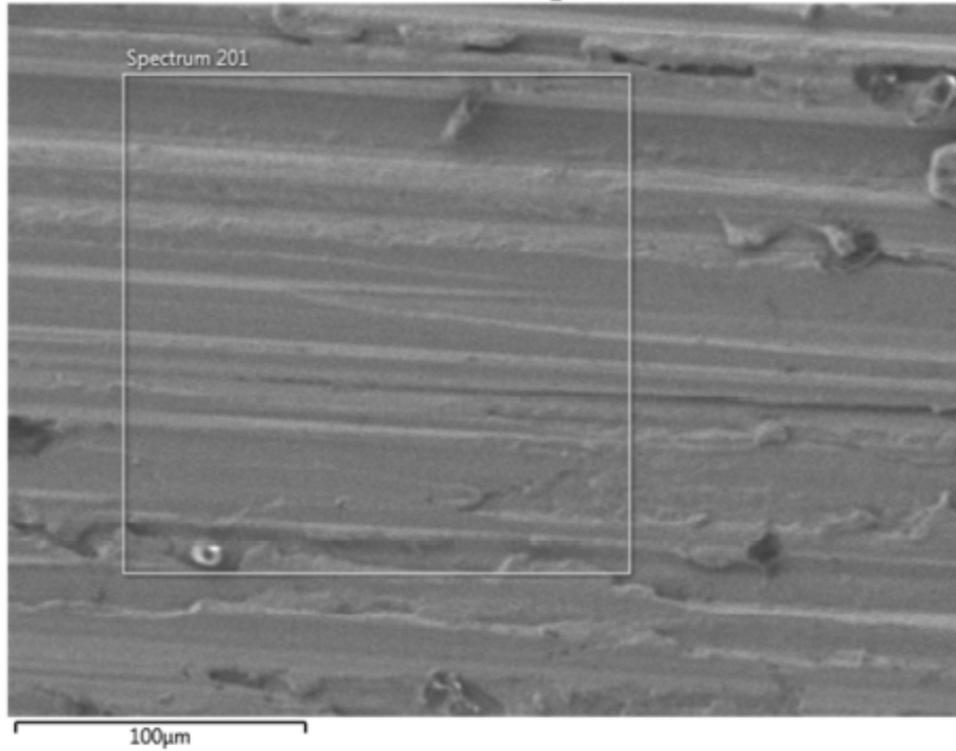


Dr.Altino

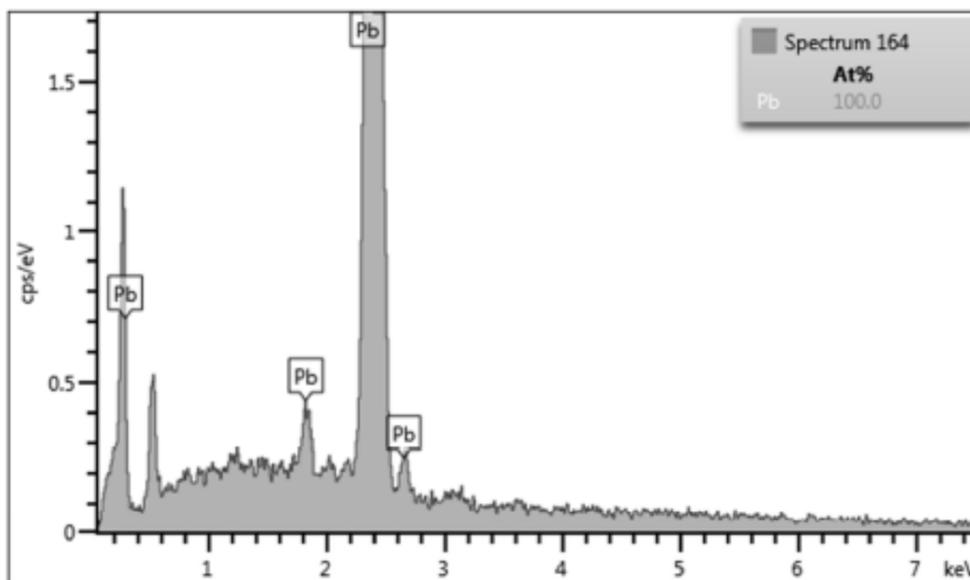
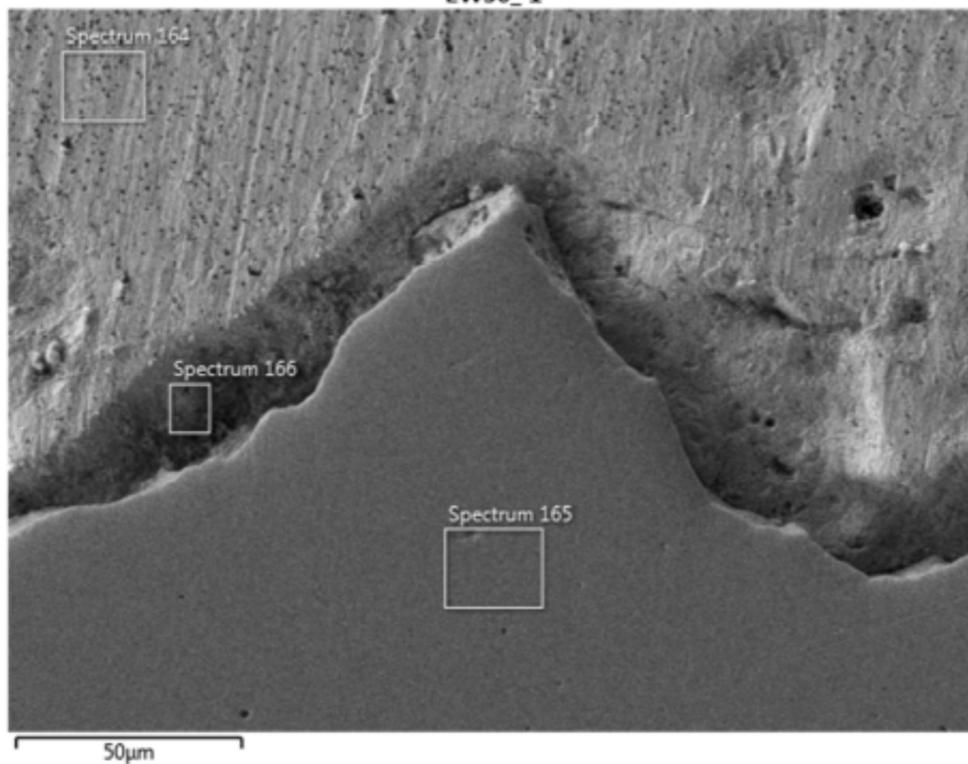
7/9/2019



EW49-T2 inox_3

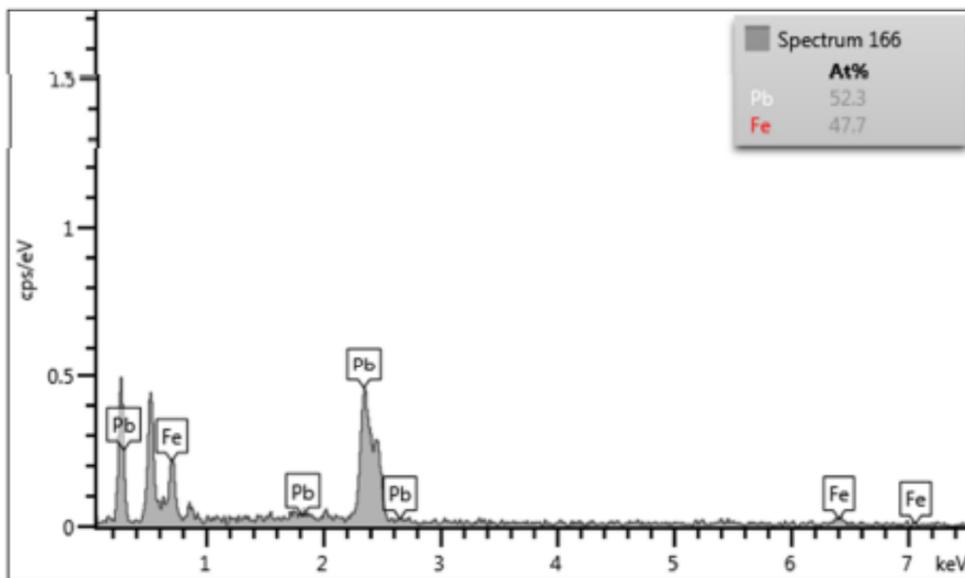
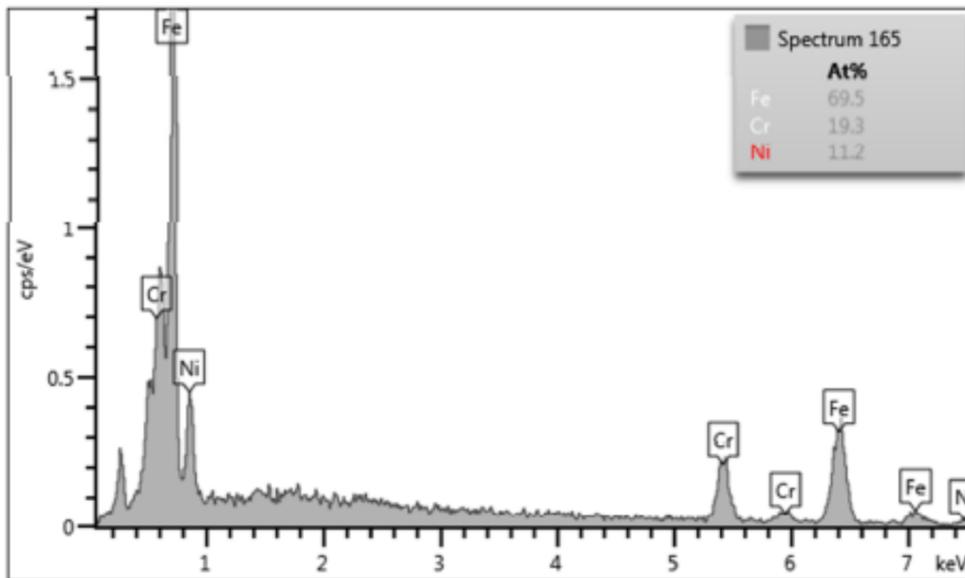


EW50_1



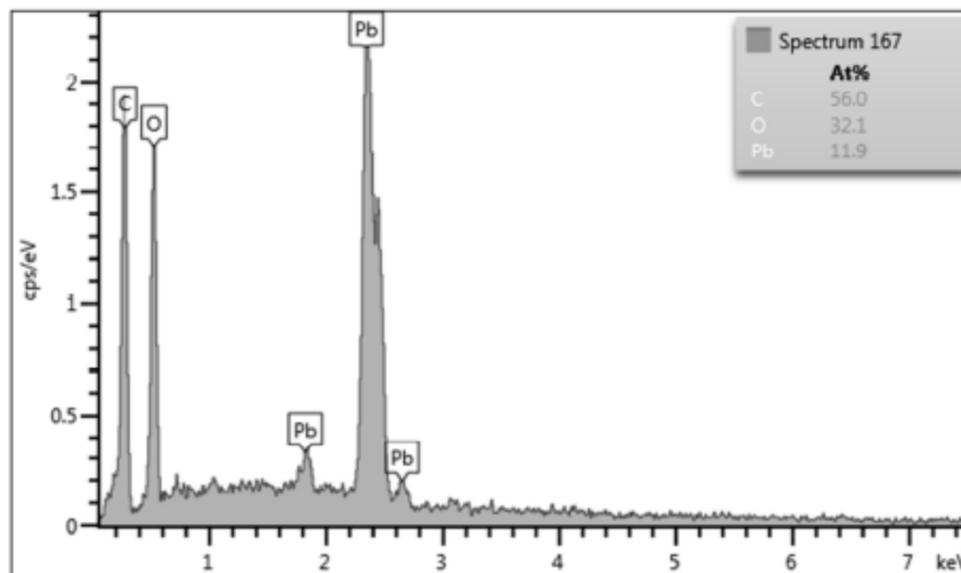
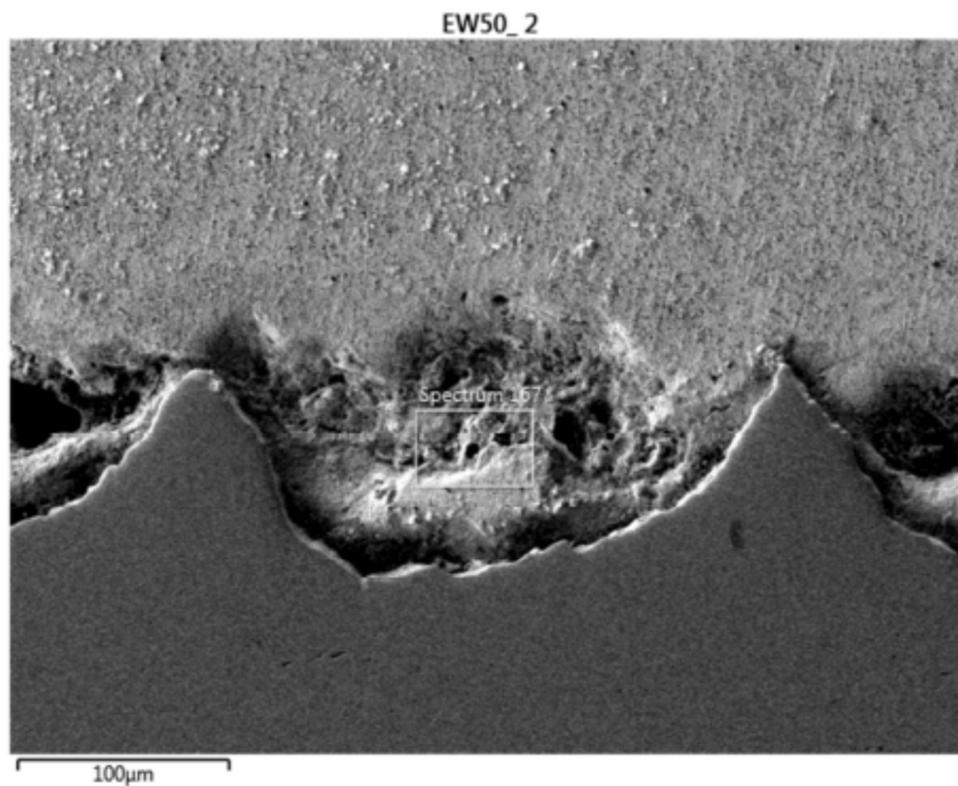
Dr. Altino

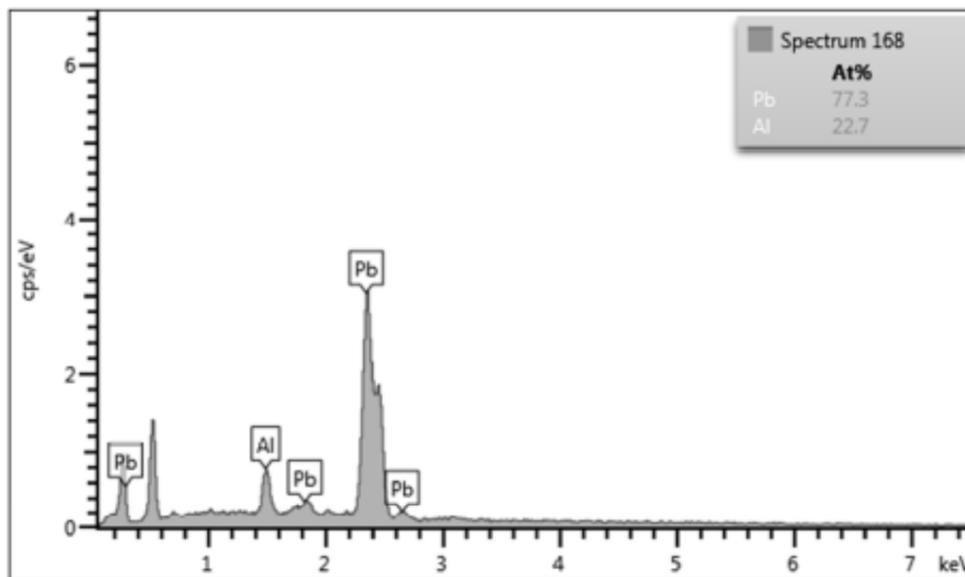
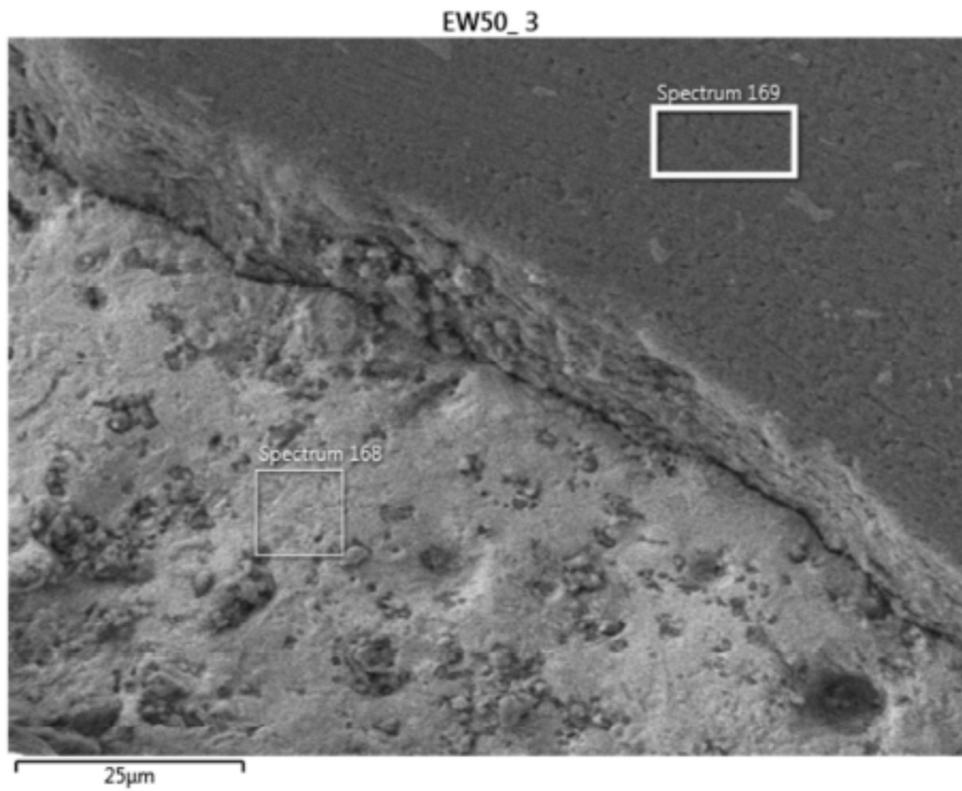
7/1/2019



Dr.Altino

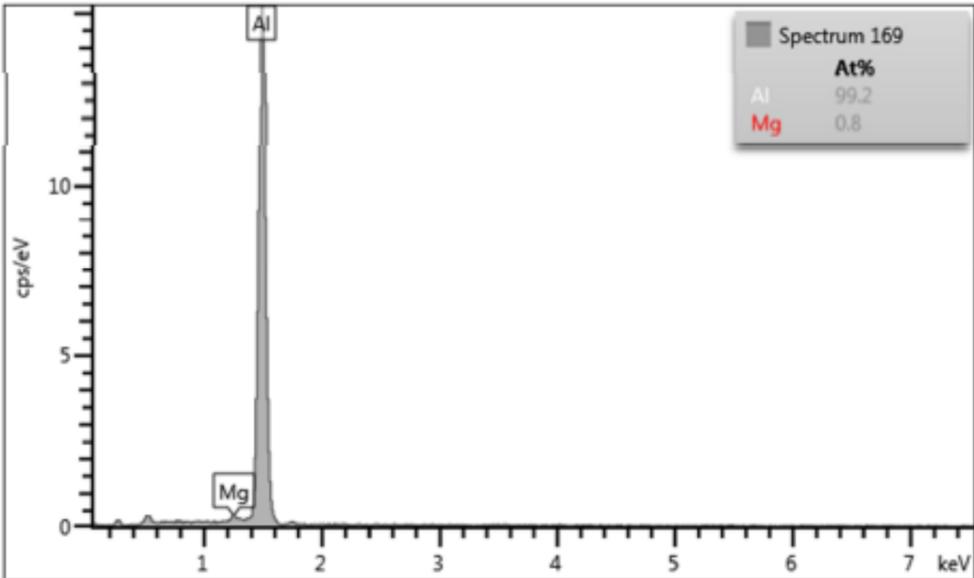
7/1/2019





Dr.Altino

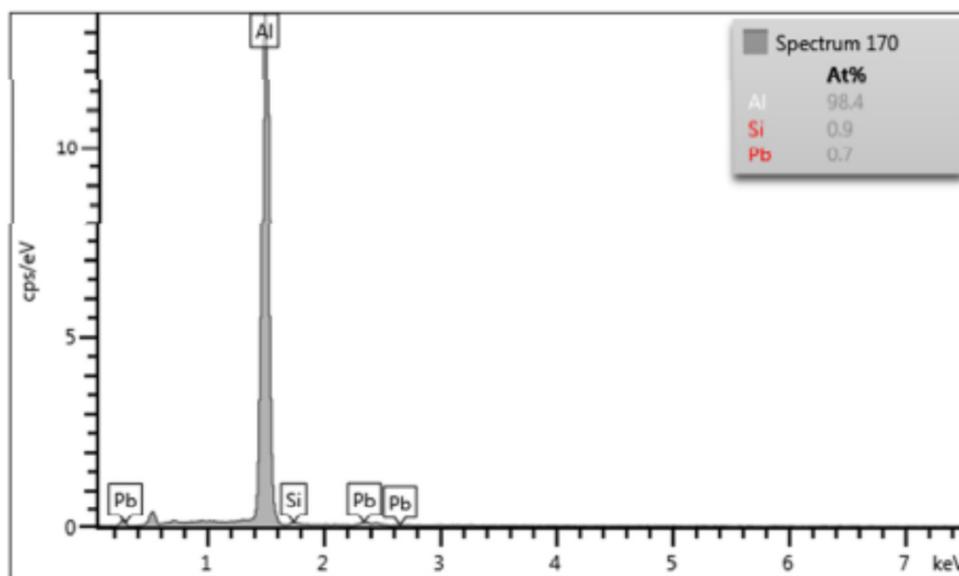
7/1/2019



Dr. Altino

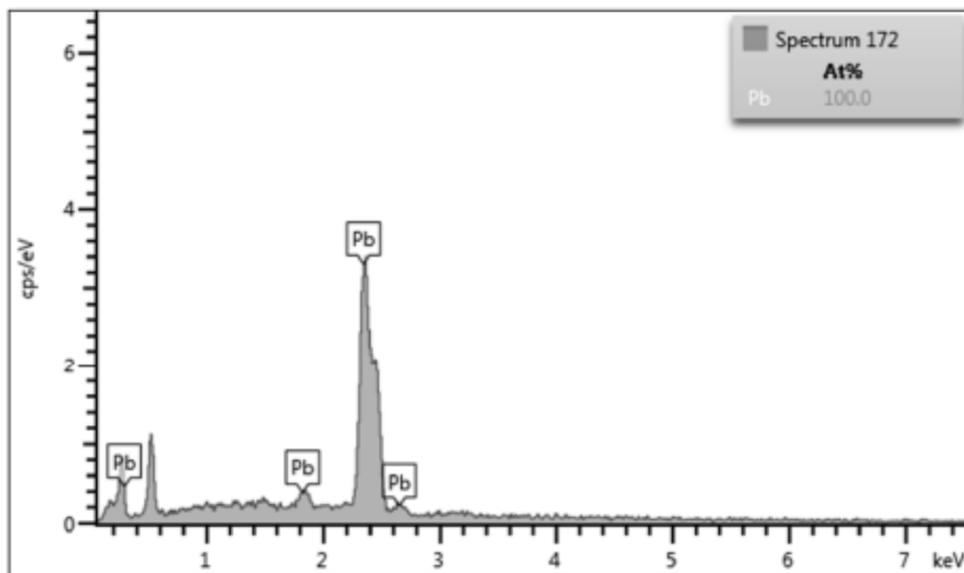
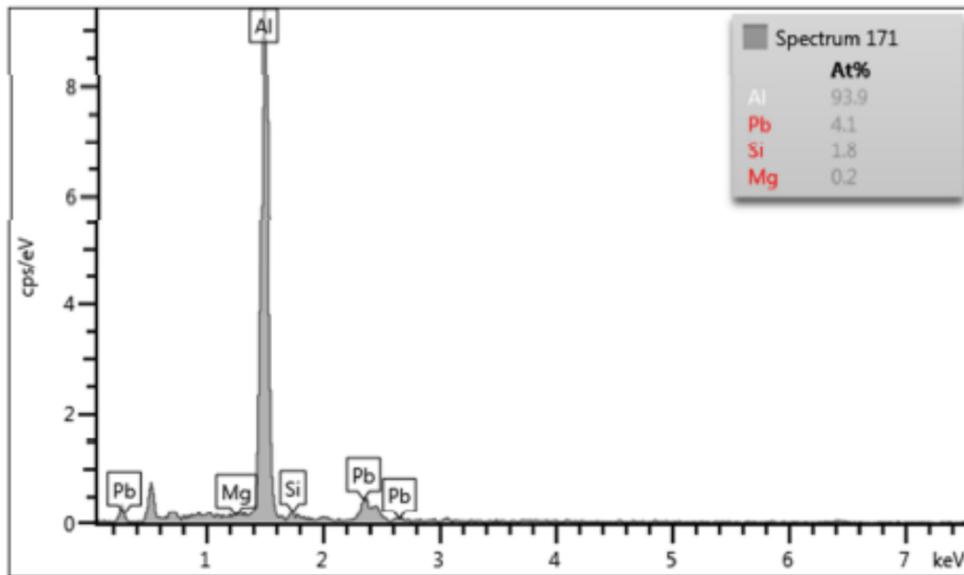
7/1/2019

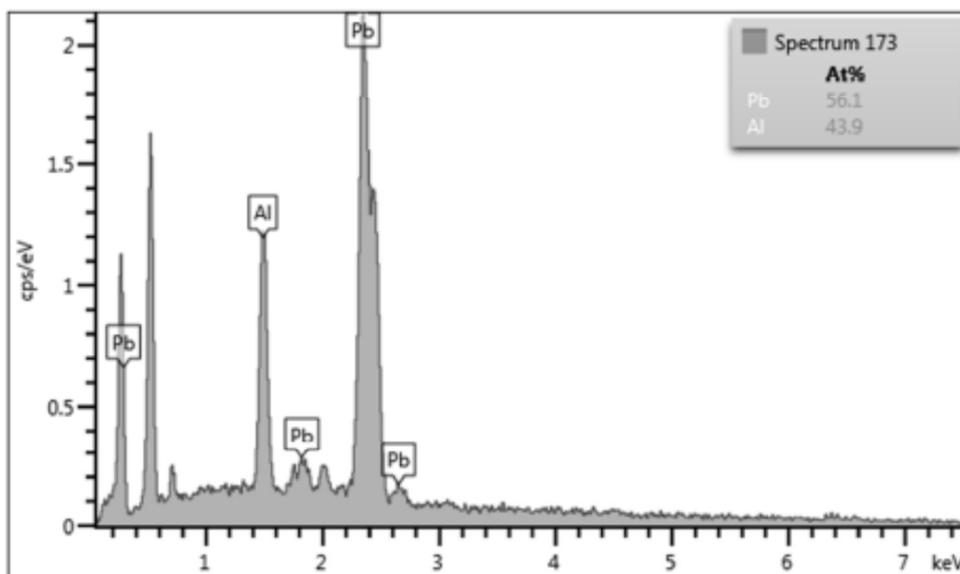
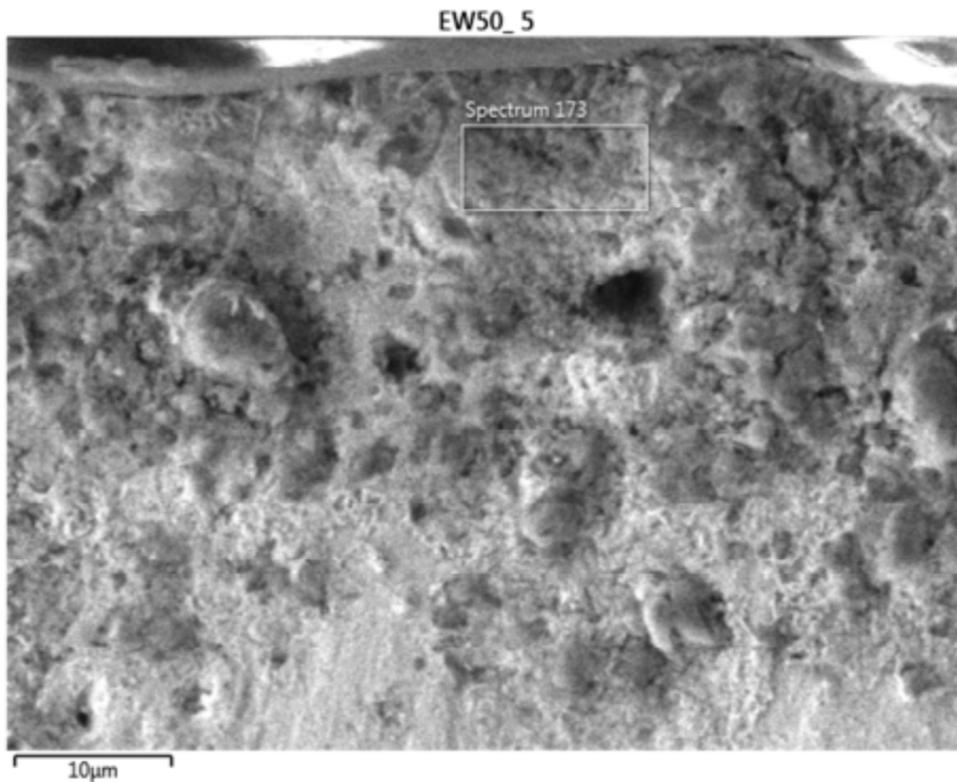
EW50_4



Dr. Altino

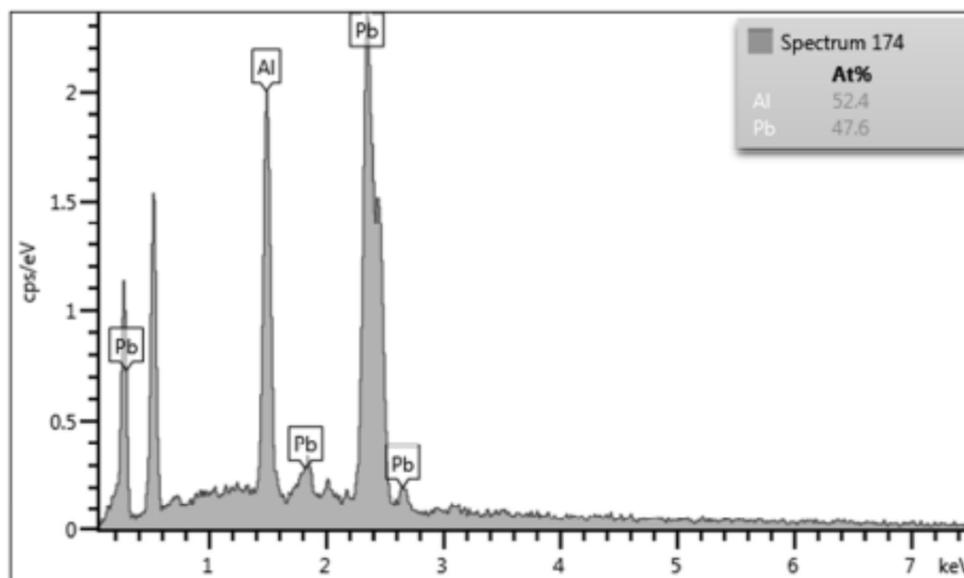
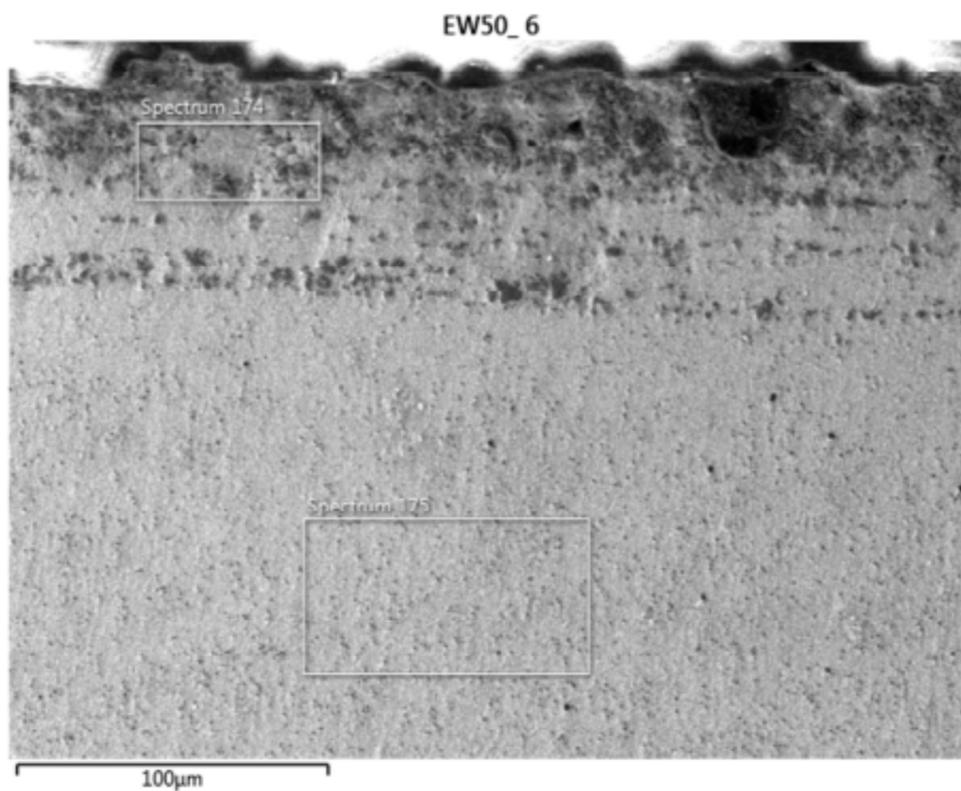
7/1/2019





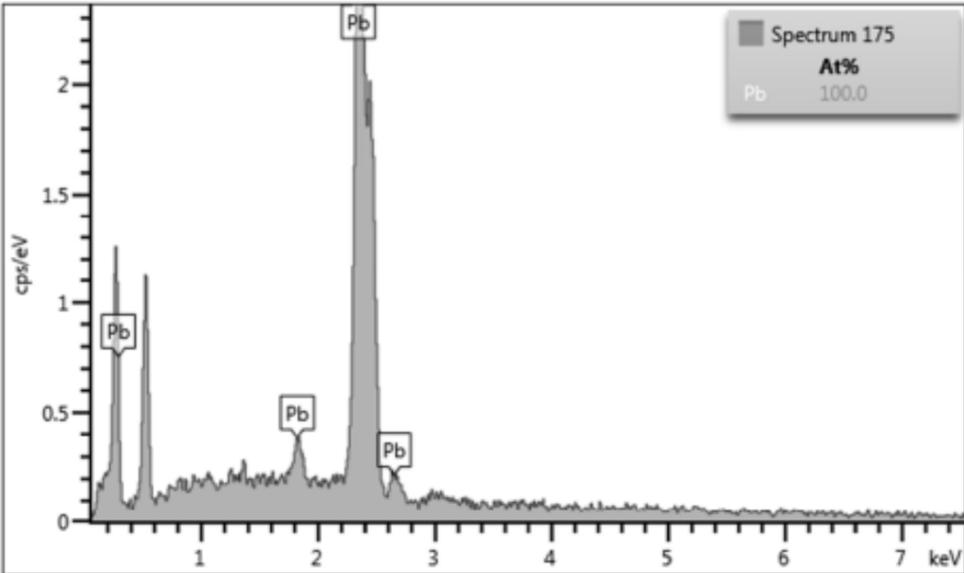
Dr. Altino

7/1/2019

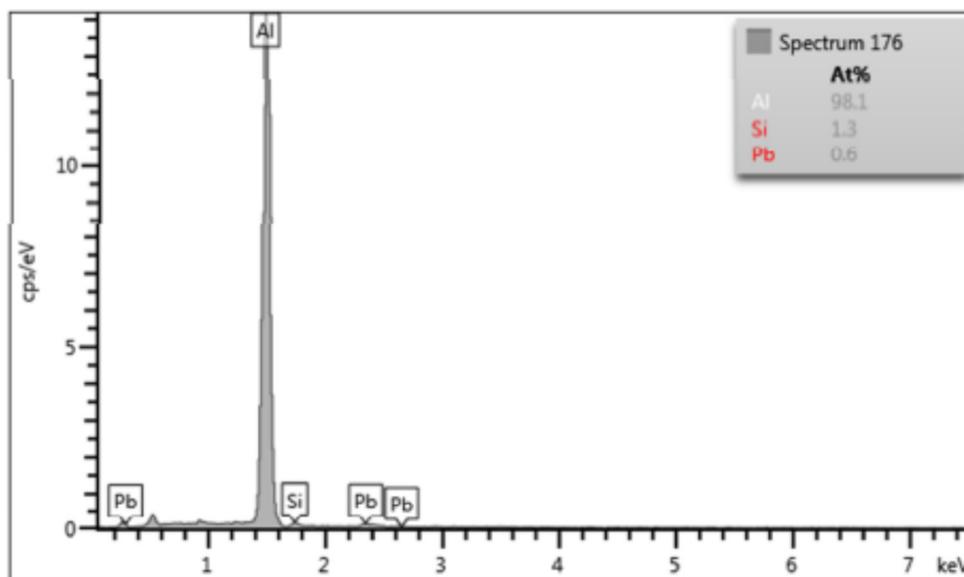
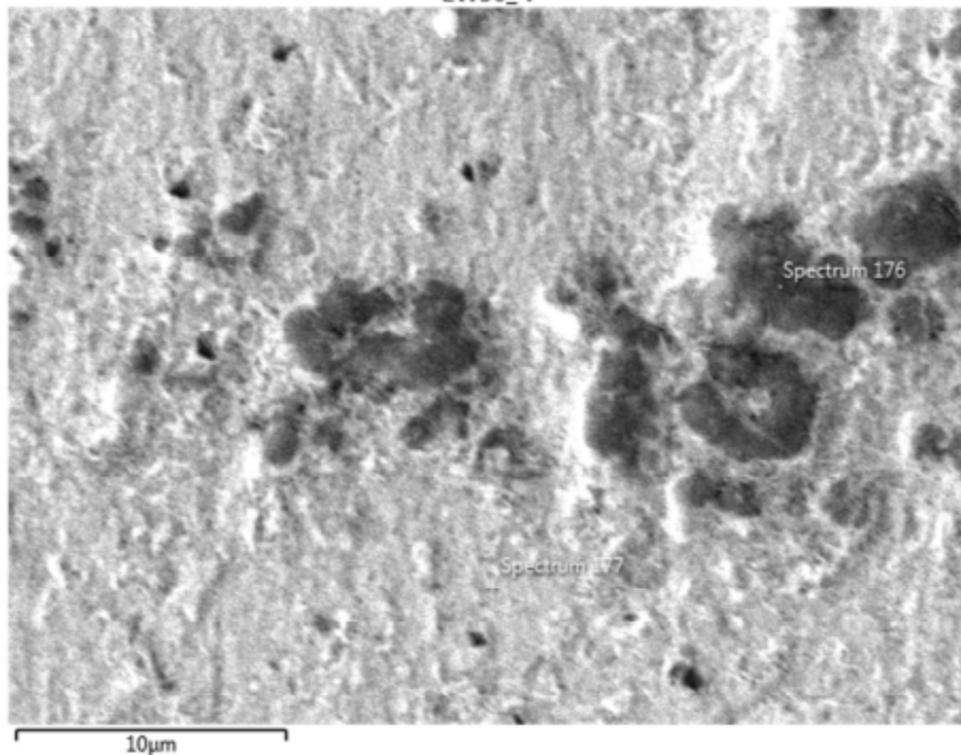


Dr.Altino

7/1/2019



EW50_7



Dr.Altino

7/1/2019

