



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Luís Manuel Silva Veloso

**SOLDADURA POR EXPLOSÃO  
ALUMÍNIO-AÇO INOXIDÁVEL  
ANÁLISE DO EFEITO DO ESTADO DA  
SUPERFÍCIE NA QUALIDADE DAS  
SOLDADURAS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, do ramo de Produção e Projeto, orientada pelos Professores Doutores Ricardo António Lopes Mendes e Rui Manuel Ferreira Leal e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia.**

Outubro de 2020





FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
**COIMBRA**

# **SOLDADURA POR EXPLOSÃO ALUMÍNIO-AÇO INOXIDÁVEL: ANÁLISE DO EFEITO DO ESTADO DA SUPERFÍCIE NA QUALIDADE DAS SOLDADURAS**

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

## **Explosion Welding Aluminium-Stainless Steel: Analysis of the Effect of the Surface State on the Quality of Welding**

Autor

**Luís Manuel Silva Veloso**

Orientadores

**Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**

**Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal**

Júri

**Presidente** Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro  
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

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

**Vogais** Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão  
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Lisboa

**Coimbra, Outubro, 2020**



“Make life an art rather than art from life.”

David Guilmour

“A vida é uma cornucópia de emoções e é também uma  
bifurcação constante, ou seja, escolhas.”

Bruno Nogueira



## Agradecimentos

A Dissertação de Mestrado representa uma etapa do percurso académico. Percurso que apenas foi possível realizar devido à intervenção de determinadas pessoas. Aqui em algumas palavras, e com o medo de não referir alguém, para essas pessoas o meu grande Obrigado.

Gostaria de agradecer particularmente,

Ao Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes, ao Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal, que sempre demonstraram disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas e orientação.

Ao Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro, pela sua partilha de conhecimento.

Ao Professor Doutor Carlos Leitão e ao Doutorando em Engenharia Mecânica David Andrade pelo auxílio no laboratório, sempre disponíveis para explicar o funcionamento dos equipamentos.

Um agradecimento ao LEDAP e CEMMPRE pela disponibilização das infraestruturas para realizar parte dos ensaios experimentais.

Aos meus amigos, pois sem eles a minha vida pessoal e académica não seria a mesma.

À minha namorada Vanessa pela paciência e motivação para ser melhor e continuar este caminho.

Aos meus professores de secundário, que sempre me motivaram e desenvolveram a minha curiosidade pela aprendizagem.

Aos meus avós que sempre investiram em mim, me alegraram e elevaram a moral.

Aos meus pais pelo amor, pelo trabalho e auxílio nas minhas escolhas, sendo a maior base na minha educação e formação.



## Resumo

O fabrico de componentes através de processos convencionais de soldadura, apresenta grandes dificuldades quando se verifica a necessidade de conjugar diferentes tipos de materiais. O processo de soldadura por explosão permite a ligação entre materiais dissimilares e a ligação de superfícies. Na soldadura por explosão a compatibilidade entre materiais a ligar nem sempre é ótima devido às características dos próprios materiais. No caso da ligação da liga de alumínio ao aço inoxidável, observa-se que a compatibilidade entre estes materiais não é ótima. Verifica-se que em grande parte dos estudos efetuados recorre-se à utilização de placa intermédia.

O presente trabalho tem como objetivo compreender a influência do estado da superfície dos materiais no processo de soldadura por explosão. No processo utilizou-se a liga de alumínio AA6082-T6 como placa voadora e o aço inoxidável AISI304 como placa de base.

Realizaram-se dois ensaios experimentais, com a alteração do estado da superfície das placas de base, sendo uma de maior rugosidade que outra. Os parâmetros iniciais para o primeiro ensaio desta dissertação são iguais aos parâmetros do último estudo realizado. O ANFO é o explosivo utilizado para aceleração da placa voadora, em ambos os ensaios. As amostras obtidas foram analisadas microscopicamente e foram sujeitas a ensaios mecânicos de dureza e de tração ao corte, procedeu-se à análise SEM e EDS da interface de ligação e superfície de rotura do provete. Verifica-se que a ligação ocorreu nos dois ensaios, ambos possuem uma grande percentagem de compostos intermetálicos, ao longo da interface. Nos ensaios de microdureza observou-se uma diminuição de dureza da liga de alumínio junto a interface, no aço inoxidável verifica-se um aumento de dureza. Na análise SEM e EDS observou-se vários pontos de ancoragem, fendas e cavidades em ambos os ensaios. No ensaio de tração ao corte observou-se que dos dois provetes testados, a rotura do provete ocorre na zona de ligação soldada.

**Palavras-chave:** Soldadura por Explosão, Estado de Superfície, ANFO, Rugosidade, Liga de Alumínio, Aço Inoxidável.



## Abstract

The manufacture of components through conventional welding processes presents great difficulties when there is a need to combine different types of materials. The explosion welding process allows the connection between dissimilar materials and the connection of surfaces. In explosion welding the compatibility between materials to be connected is not always optimal due to the characteristics of the materials themselves. In the case of the connection of the aluminum alloy to the stainless steel, it is observed that the compatibility between these materials is not ideal. It is verified that most of the studies carried out use an intermediate plate.

The present work aims to understand the influence of the surface state of the materials in the explosion welding process. In the process, the aluminum alloy AA6082-T6 was used as a flying plate and the stainless steel AISI304 as the base plate. Two experimental trials were performed, with the alteration of the surface state of the base plates, one of greater roughness than the other. The initial parameters for the first test of this dissertation are equal to the parameters of the last study conducted. The ANFO is the explosive used for acceleration of the flying plate in both tests. The samples obtained were microscopically analyzed and were subjected to mechanical tests of hardness and traction at cutting, SEM and EDS analysis of the bonding interface and rupture surface of the specimen were performed. It is verified that the connection occurred in the two tests, both have a large percentage of intermetallic compounds, along the interface. In the microhardness tests there was a decrease in hardness of the aluminum alloy near the interface, in stainless steel there was an increase in hardness. In the SEM and EDS analysis, several anchor points, fissures and cavities were observed in both tests. In the cutting traction test, it was observed that of the two specimens tested, the rupture of the specimen occurs in the welded bonding zone.

**Keywords** Explosion Welding, Surface State, ANFO, Roughness, Aluminium Alloy, Stainless Steel.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE .....	3
2.1. Enquadramento Histórico .....	3
2.2. Processo de soldadura por explosão .....	4
2.2.1. Formação do Jato.....	5
2.2.2. Interface .....	5
2.2.3. Parâmetros do Processo .....	6
2.3. Aplicações.....	13
2.4. Soldadura por explosão da Liga de Alumínio a Aço Inoxidável .....	14
2.4.1. Estudos realizados na Universidade de Coimbra .....	15
2.4.2. Alteração do estado de superfície .....	17
2.4.3. Causas possíveis do sucesso ou insucesso da ligação .....	19
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	21
3.1. Ensaio Explosivos .....	21
3.1.1. Material.....	21
3.1.2. Preparação das placas a ligar .....	22
3.1.3. Fabrico de caixas e espaçadores .....	23
3.1.4. Medição da velocidade de detonação .....	24
3.1.5. Montagem Experimental .....	25
3.1.6. Parâmetros Processo .....	25
3.2. Amostras Experimentais .....	26
3.2.1. Nomenclatura das Amostras .....	26
3.2.2. Corte de Amostras .....	26
3.2.3. Preparação das amostras .....	28
3.2.4. Ataque químico .....	28
3.2.5. Análise metalográfica .....	28
3.2.6. Ensaio mecânicos.....	29
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	31
4.1. Janela de Soldabilidade.....	31
4.2. Análise dos materiais de base .....	32
4.3. Previsão da velocidade terminal de placas aceleradas por emulsão explosiva. ....	33
4.3.1. Caracterização de Gurney.....	33
4.3.2. Evolução do espaço em função do tempo .....	36
4.4. Parâmetros Processo .....	38

4.4.1. Velocidade de Detonação .....	38
4.4.2. Posição dos Ensaios na Janela de Soldabilidade .....	39
4.5. Análise Macroscópica.....	39
4.6. Análise Metalográfica.....	40
4.7. Perfis de Microdureza.....	42
4.7.1. EW53L .....	43
4.7.2. EW53T .....	44
4.7.3. EW54L .....	44
4.7.4. EW54T .....	45
4.8. Microdureza dos Intermetálicos .....	46
4.9. SEM/EDS Intermetálicos .....	47
4.10. Ensaios de tração ao corte.....	49
5. CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
ANEXO A .....	59
ANEXO B .....	61
APÊNDICE A .....	63
APÊNDICE B .....	65
APÊNDICE C .....	67
APÊNDICE D .....	69
APÊNDICE E.....	79
APÊNDICE F .....	81
APÊNDICE G .....	83
APÊNDICE H .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação do processo de soldadura por explosão. ....	5
Figura 2.2- Diferentes morfologias da interface: (a) interface plana; (b) interface ondulada; (c) interface ondulada com porções de material fundido [16].....	6
Figura 2.3- Exemplo de janela de soldabilidade. Adaptado de [13]. ....	10
Figura 2.4- Aplicabilidade: (a) Reservatório químico fabricado a partir de placas produzidas através soldadura por explosão.[2] (b) Triplate® produto fabricado pela SMT [34]. ....	13
Figura 2.5- Compatibilidade na combinação de metais ligados através de soldadura por explosão [35]. ....	14
Figura 2.6- Patente: a) estado da superfície das placas ; b) exemplo de tratamento superficial pré-ligação. Adaptado de [6]. ....	18
Figura 2.7- Vista de perfil da placa fabricada através soldadura por explosão [43]. ....	18
Figura 3.1- Ilustração exemplificativa: (a) caixa de MDF; (b) corte transversal do conjunto caixa, explosivo e placas com os respetivos espaçadores. ....	24
Figura 3.2- Montagem com o explosivo inserido na caixa.....	25
Figura 3.3- Ensaio EW53 (superfície lixada) após corte.....	27
Figura 3.4- Ensaio EW54 (superfície retificada) após corte. ....	27
Figura 3.5- Localização das indentações, realizadas na placa de AA6082-T6 e AISI 304 ligadas por soldadura por explosão. ....	29
Figura 4.1- Janela de soldabilidade que melhor limita o processo de ligação do AA6082-T6/SS AISI304 .....	31
Figura 4.2- Materiais de base : (a) microestrutura liga de alumínio AA6082-T6; (b) microestrutura aço inoxidável AISI 304. ....	32
Figura 4.3- Cálculo: (a) Medição velocidade terminal da placa[49] ; (b) calculo do coeficiente para explosivos não ideais. ....	34
Figura 4.4- Parâmetros utilizados em [36]. ....	35
Figura 4.5- Cálculos: (a) valores obtidos em [36]; (b) calculo de $V_P$ e $\beta$ utilizando o coeficiente 2,78 e a velocidade detonação de (a). ....	35
Figura 4.6- Localização dos ensaios na Figura 4.5 (a) e (b) na janela de soldabilidade da Figura 4.1.....	36
Figura 4.7- Gráfico da velocidade da parede em função do tempo, de uma secção tubular [49]. ....	36
Figura 4.8- Curva espaço vs tempo e curva velocidade parede vs tempo para carga n°7 com $w=3$ [mm]. ....	37

Figura 4.9- Curva espaço vs tempo e curva velocidade parede vs tempo para carga nº8 w=3 [mm].....	38
Figura 4.10- Materiais após o ensaio explosivo EW53.....	40
Figura 4.11- Materiais após o ensaio explosivo EW54.....	40
Figura 4.12- Metalografia: (a) Interface da amostra EW53L ampliação a 200x; (b) Interface da amostra EW54L ampliação a 200x. ....	41
Figura 4.13- Metalografia: (a) Interface da amostra EW53T ampliação a 200x; (b) Interface da amostra EW54T ampliação a 200x. ....	42
Figura 4.14- Perfil de dureza da amostra EW53L e dureza média do AISI304 e AA6082-T6. ....	43
Figura 4.15- Perfil de dureza da amostra EW53T e dureza média do AISI 304 e AA6082-T6. ....	44
Figura 4.16- Perfil de dureza da amostra EW54L e dureza média da liga de alumínio AA6082-T6 e aço inoxidável AISI 304. ....	45
Figura 4.17- Perfil de dureza da amostra EW54T e dureza média da liga de alumínio AA6082-T6 e aço inoxidável AISI 304. ....	45
Figura 4.18- Análise EDS à amostra EW53L, na zona das indentações nº 4, 5, 6 e 7.....	48
Figura 4.19- Análise EDS à amostra EW54L, junto das indentações nº 3 e 4.....	49
Figura 4.20- Ensaio de tração ao corte: (a) mapa de deformação do provete; (b) curva força alongamento do ensaio de tração ao corte EW54P2 .....	50
Figura 4.21- Análise EDS da superfície de rotura da zona de aço inoxidável do ensaio EW54 provete 2. ....	50

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Parâmetros utilizados em ensaios anteriores. ....	16
Tabela 3.1- Composição do AA6082-T6 em % peso dos elementos de liga [47].....	21
Tabela 3.2- Composição do AISI 304 em % peso dos elementos de liga [48]. ....	21
Tabela 3.3- Propriedades mecânicas e físicas da liga de alumínio AA6082-T6 [47] e do aço inoxidável AISI304 [48].....	22
Tabela 3.4- Rugosidades obtidas para a placa lixada e retificada. ....	23
Tabela 3.5- Parâmetros utilizados nos ensaios explosivos realizados.....	26
Tabela 4.1- Distância entre sondas mm e intervalos de tempo $\mu\text{m}$ . ....	39
Tabela 4.2- Fases do diagrama de fases Fe-Al e a correspondente dureza teórica da fase. Adaptado de [51][52]. ....	46
Tabela 4.3- Intervalos de dureza das indentações e possíveis fases formadas. ....	47



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

E - Módulo de Elasticidade

$V_P$  - Velocidade de Impacto

$V_d$  - Velocidade de Detonação

$V_C$  - Velocidade no ponto de colisão

$\beta$  - Ângulo de Colisão

$C_b$  - Velocidade do som nos materiais

$V_{c,tr}$  - Velocidade de transição, no ponto de colisão

$\rho_b$  - Densidade do material de base

$\rho_v$  - Densidade do material voador

$Hv_{,b}$  - Dureza Vickers, material de base

$Hv_{,v}$  - Dureza Vickers, material voador

$Re_{,cr}$  - Reynolds Critico

$k_0$  - Constante empírica

$V_{c,min}$  - Velocidade mínima no ponto de colisão

$k_1$  - Constante qualidade superfície de materiais

$h$  - Espessura da placa voadora

$K_W$  - Parâmetro calculável

$T_f$  - Temperatura de Fusão

$k$  - Condutividade Térmica

$C_p$  - Calor específico a pressão constante

$N$  – Constante em função do tipo de metal

$R$  – Rácio de explosivo

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$R_a$  – Rugosidade média aritmética

$R_z$  – Rugosidade média aritmética das alturas máximas de perfil

$X_2$  - Coeficiente empírico para explosivos de comportamento não ideal

## **Siglas**

AA – Aluminium Alloy

AISI – American Iron and Steel Institute

ANFO – Ammonium Nitrate Fuel Oil

CEMMPRE – Centro de Engenharia Mecânica Materiais e Processos

DC – Direct Current

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EDS – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

EW – Explosive Welding

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPN – Instituto Pedro Nunes

LEDAP – Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio

LED – Light Emitting Diode

MDF – Medium Density Fiberboard

PDV – Photonic Doppler Velocimetry

SEM – Scanning Electron Microscopy

SS – Stainless Steel

STD – Stand-Off Distance

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldadura convencionais, são processos que podem alterar as propriedades mecânicas dos materiais de base, devido à utilização de elevadas temperaturas que fundem os materiais envolvidos. Os diferentes pontos de fusão, na ligação de materiais dissimilares através de processos de soldadura convencionais condiciona a qualidade da soldadura.

Sendo a soldadura por explosão um processo no estado sólido e a frio, permite resolver esse problema. Apresentando assim uma variedade de aplicações, vantagens e desvantagens.

O objetivo deste trabalho é realizar a ligação de materiais dissimilares, como a liga de alumínio AA6082-T6 e aço inoxidável AISI304, através de soldadura por explosão e verificar qual a influência do estado da superfície das placas na qualidade da soldadura. Pois em vários estudos anteriores realizados no LEDAP e CEMMPRE, a ligação dos materiais acima referidos não ocorre e quando ocorre esta não é consistente.

A ligação direta da liga de alumínio ao aço inoxidável é uma soldadura difícil de se realizar através de soldadura por explosão, sendo comum a utilização de uma placa intermédia para criar uma ligação de qualidade. Caso a alteração do estado de superfície promova boas ligações, não será necessária a utilização da placa intermédia.

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, a introdução ao tema, no capítulo seguinte, expõe-se o estado de arte, onde se realizou uma pesquisa bibliográfica extensiva para familiarização com o processo de soldadura por explosão. No capítulo 3, expõe-se o procedimento experimental, neste encontram-se todos os passos realizados para obtenção de resultados, apresentados no capítulo seguinte. No capítulo 5 encontram-se as conclusões retiradas dos resultados obtidos.



## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Enquadramento Histórico

Na indústria metalomecânica o uso de explosivos como meio de obter componentes já é conhecido à mais de um século, mas apenas nos últimos 25 anos é que foi transformado numa ferramenta de produção industrial, difundindo-se e sendo adotado por toda a indústria e por todo o mundo até aos dias de hoje [1].

O processo foi descoberto por acidente durante a primeira guerra mundial, não foi reconhecido imediatamente a sua aplicação, apenas se averiguou que os estilhaços e projeteis balísticos ficavam ligados a superfícies metálicas [2].

Existem documentos que consideram que o ponto de partida para o processo de soldadura por explosão ocorreu em 1944 quando Leroy Carl realizou o primeiro estudo [3] [4].

Devido à Segunda Guerra Mundial, o uso extensivo de explosivos, resulta no estudo mais aprofundado destes, mas a falta de tecnologias torna-se uma barreira à progressão científica. Com o desenvolvimento de novos equipamentos destinados a fenómenos rápidos e técnicas de estudo, como “high speed photography”, estes avanços permitem realizar medições na escala dos milissegundos e microssegundos, levando à melhor compreensão da soldadura por explosão [1]. Em 1957 a soldadura por explosão é reconhecida como um potencial processo industrial [5].

A partir de 1960 as primeiras patentes referentes ao processo de soldadura por explosão começam a surgir, como por exemplo em 1962 a Atlantic Research Corporation cria a patente (U.S. Patent 3,024,526- “Explosive Welding”) tendo como inventores Franklin L.Bois e Vasil Philipchuk [6] e em 1964 a E.I. du Pont de Nemours & Co, que criaram a patente (U.S.Patent 3,140,539- “Process for bonding metals by explosive means”) tendo como inventor Arnold.H.Holtzman [7].

## 2.2. Processo de soldadura por explosão

O processo de soldadura por explosão permite unir superfícies, na detonação da carga são geradas pressões elevadas num reduzido período de tempo, trata-se de um processo instantâneo, realizado à temperatura ambiente, permitindo a ligação de componentes no estado sólido e se existir fusão é localizada e limitada [8]. Pois mesmo com as temperaturas elevadas da detonação do explosivo, na superfície da placa voadora, o tempo para realizar a soldadura é muito curto, não existindo transferência suficiente de calor entre placas para fundir material de forma extensiva, poderá ocorrer fusão localizada.

Dependendo da revisão literária, a soldadura por explosão pode ser considerada um processo na fase sólida, como um processo de soldadura por fusão localizada. Uma abordagem impõe que: quando a pressão é exercida sobre as placas e estas se encontram em contacto, os eletrões de valência vencem as forças repulsivas resultando na partilha das suas orbitais, efetuando a ligação metalúrgica, tratando-se assim de um processo na fase sólida [9] [10]. No outro ponto de vista, quando as placas são observadas ao microscópio, por vezes é possível verificar a presença de pequenas porções de material fundido [9].

Neste processo a pressão gerada deve-se à projeção a elevada velocidade da placa voadora, contra a superfície, denominada de placa base ou estacionária [11]. Um dos parâmetros a ter em conta, para que a pressão necessária à união das superfícies seja produzida é o espaçamento entre placas, ou seja, a placa voadora encontra-se distanciada relativamente à placa de base.

Na Figura 2.1 encontra-se esquematizado o modo como se processa a soldadura por explosão. A detonação da carga explosiva projeta a placa voadora contra a placa de base com uma determinada velocidade de impacto ( $V_P$ ), o que provoca o aumento de pressão, temperatura e deformação plástica na interface, o que favorece a ligação. A velocidade de detonação do explosivo ( $V_d$ ) influencia a velocidade a que a soldadura é realizada, ou seja, a velocidade no ponto de colisão ( $V_c$ ) assim como o ângulo de colisão ( $\beta$ ) da placa voadora com a placa de base [12].

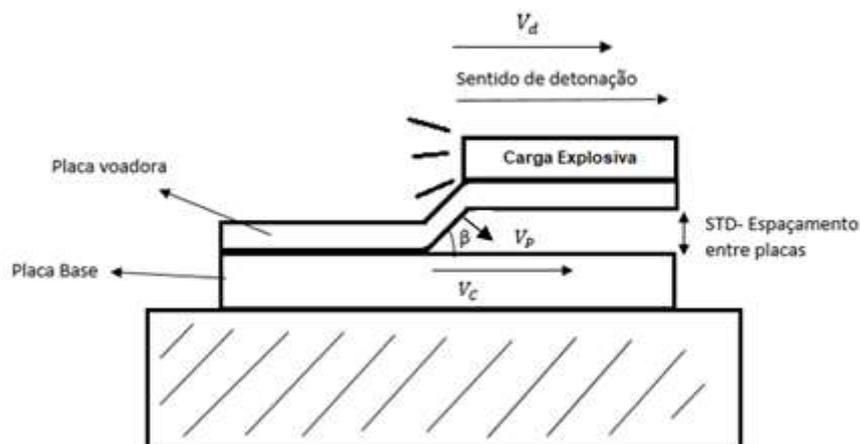


Figura 2.1- Representação do processo de soldadura por explosão.

Note-se que existem casos em que para efetuar a soldadura por explosão é utilizada uma placa intermédia, em que a placa voadora colide com a placa intermédia e o conjunto colide com a placa de base. A utilização de uma placa intermédia deve-se à soldabilidade entre a placa voadora e a placa de base não ser ótima, logo utiliza-se um material intermediário com boa soldabilidade à placa de base e placa voadora, de forma a permitir a ligação [13] [14].

### 2.2.1. Formação do Jato

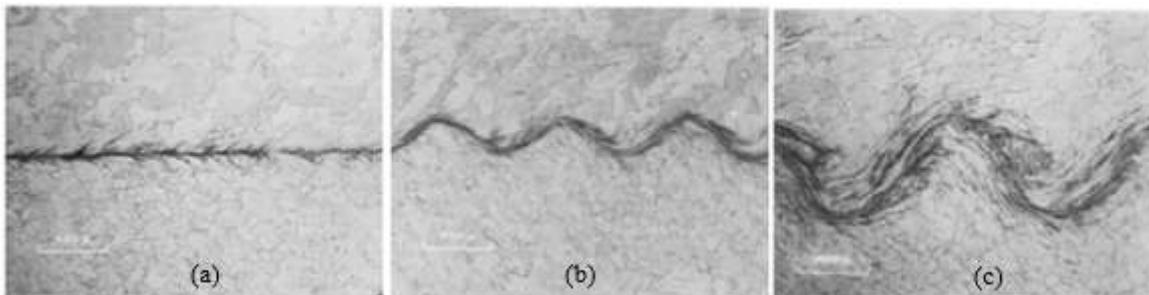
No choque a alta velocidade entre as chapas metálicas, se o ângulo de colisão e a velocidade de colisão possuírem os valores mínimos para efetuar a ligação, ou seja, a pressão gerada for a necessária e durar o tempo suficiente, efetuar-se-á a ligação interatômica e formar-se-á um jato, que irá progredir no sentido de progressão da explosão [2]. O jato formado é responsável por eliminar da camada superficial, filmes não metálicos e/ou filmes de óxidos que prejudicam e impedem a ligação metálica [11] [15].

### 2.2.2. Interface

Cowan *et al.* [16], no estudo do processo de soldadura por explosão, verificou que a interface das placas unidas apresenta três morfologias características, Figura 2.2, interface plana, interface ondulada e uma interface com presença de porções fundidas de material. Das

três interfaces características do processo de soldadura por explosão, aquela que se pretende obter é a ondulada, pois a interface plana e a interface com presença de porções fundidas de material, por vezes representam ligações não consistentes, sendo que muitas vezes efetuam a ligação, mas quando sujeita a uma pequena solicitação de carga a ligação é quebrada.

Para uma velocidade no ponto de colisão abaixo da necessária, observa-se uma interface plana e suave, esta pode ter boas propriedades mecânicas, como pode possuir uma ligação inconsistente entre placa voadora e placa de base. Para velocidades no ponto de colisão superiores, existe uma maior deformação plástica e a interface torna-se ondulada, apresenta melhores propriedades mecânicas e uma boa ligação com maior contacto entre a placa voadora e a placa de base. Quando a velocidade no ponto de colisão é excessiva, verifica-se uma interface ondulada, mas com porções de material fundido, ou seja, tem-se presença de compostos intermetálicos que possuem um comportamento frágil, comprometendo a qualidade da soldadura [16].



**Figura 2.2-** Diferentes morfologias da interface: (a) interface plana; (b) interface ondulada; (c) interface ondulada com porções de material fundido [16].

### 2.2.3. Parâmetros do Processo

O processo de soldadura por explosão pode dividir-se em três estágios: a detonação da carga explosiva, a deformação e aceleração adquirida pela placa voadora e a colisão entre as duas placas.

Na soldadura por explosão existem vários parâmetros que devem ser tidos em conta, como por exemplo, as propriedades da placa voadora, pois estas podem aumentar ou diminuir a zona útil da janela de soldabilidade, ou seja, a escolha de material para placa

---

voadora é um ponto importante no processo. A placa de base deve ser rígida o suficiente para assegurar uma boa transferência de potência, entre a placa voadora e a placa de base.

### **2.2.3.1. Parâmetros iniciais**

A seleção do rácio de explosivo, o espaçamento entre placas e a configuração a utilizar, são parâmetros que devem ser discutidos e definidos inicialmente no processo de soldadura por explosão. Pois a escolha destes influencia os parâmetros dinâmicos que possibilitam a ligação das placas, tais como a velocidade de detonação ( $V_d$ ), velocidade de impacto ( $V_P$ ), velocidade no ponto de colisão ( $V_c$ ) e o ângulo de colisão ( $\beta$ ) [17].

#### **2.2.3.1.1. Explosivo**

Uma explosão ocorre devido ao rápido aumento de volume e libertação de energia de forma violenta, propagando-se no formato de onda. Existem dois tipos de ondas explosivas, as de deflagração e as de detonação. As de deflagração deslocam-se a velocidades subsónicas, dependendo diretamente da taxa de reação química, térmica e difusão de massa. Já as de detonação deslocam-se a velocidades supersónicas, dependendo da compressibilidade, densidade do explosivo e energia efetiva libertada por unidade peso de explosivo [9].

Na soldadura por explosão a seleção do explosivo para carga principal deve satisfazer vários requisitos, tais como: ser facilmente depositado sobre a placa voadora, detonar de forma uniforme, não libertar produtos tóxicos e produzir a energia cinética necessária para realizar a ligação [18].

O explosivo mais usual na realização da soldadura por explosão é o ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil), este é um dos mais utilizados devido à relativa facilidade de acesso aos materiais que o compõe e mostra-se capaz de produzir a energia cinética necessária [10]. É também usual a utilização de emulsões explosivas, composições de solução aquosa de nitrato de amónio com sensibilizantes, cuja a concentração de sensibilizantes permite variar a densidade e conseqüentemente a velocidade de detonação do explosivo [19] [20] [21].

Nos explosivos que possuem elevada velocidade de detonação, os sensibilizantes ao reduzir a densidade do explosivo, permitem reduzir e obter a velocidade pretendida [12].

Os sensibilizantes mais comuns de ser utilizados são microesferas ocas de polímero ou de vidro [21].

Para determinar a velocidade de detonação durante o processo, esta pode ser calculada através de vários métodos nomeadamente: método de Dautriche, através “*wire and pin contactor*” ou através de “*high speed photography*” [18] [22]. Existem ainda outros métodos de medição mais recentes como, a utilização de sondas de ionização [20], aplicação de fibras óticas associadas a conversores opto-elétricos [23].

Para detonar a carga principal ANFO, utiliza-se uma carga iniciadora, um explosivo de alta velocidade de forma a detonar a carga principal e esta propagar-se à velocidade pretendida e de forma uniforme [18].

#### **2.2.3.1.2. Rácio de explosivo**

Segundo Hoseini *et al.* [13] na soldadura por explosão de Alumínio-Cobre-Alumínio, verificou-se a influência do rácio de explosivo na interface, este é a razão entre a massa de explosivo e a massa da placa voadora. Verificou-se que a amplitude de onda e a quantidade de compostos intermetálicos aumentou com o incremento no rácio de explosivo. Foi ainda verificado que quando a placa voadora possui maior densidade e maior temperatura de fusão do que a placa de base, é mais usual a não formação de ondas na interface.

Assim na soldadura por explosão o rácio de explosivo deve ser sempre o mais otimizado possível, de modo a este possuir a energia de ligação mínima necessária e não promover a fusão excessiva de material na interface, pois pode originar a formação de compostos intermetálicos.

#### **2.2.3.1.3. Stand-off-distance**

A distância entre placas é um parâmetro a ter em conta, este designa-se de STD (*stand-off distance*) e permite que a placa metálica adquira velocidade antes de ocorrer o impacto com a placa de base, assim como o ângulo de colisão pretendido. É usual a distância entre placas variar entre 0.5 a 2 vezes a espessura da placa voadora [9]. É possível aferir que para velocidades de detonação superiores, é necessário espaçamento menor entre placas para realizar a ligação entre elas [24]. Pode-se ainda verificar que o espaçamento entre placas terá

---

influência nas características da interface, pois com o aumento do espaçamento existirá uma maior tendência para a formação de uma interface ondulada [24].

#### **2.2.3.1.4. Configurações possíveis**

Na soldadura por explosão de placas metálicas, as configurações mais comuns são a oblíqua, a paralela e a cilíndrica. Se a espessura da placa for fina e possuir uma pequena área é usual utilizar-se configuração oblíqua, em que esta utiliza explosivos com velocidades de detonação e densidades superiores. Se a placa possuir espessuras e áreas elevadas, é comum recorrer à configuração paralela [15]. Na configuração paralela associam-se três parâmetros, a massa do explosivo por unidade de área, a velocidade de detonação do explosivo e o espaçamento entre placas [25]. Na configuração oblíqua é acrescentado um parâmetro em relação à configuração paralela, que é o ângulo de inclinação inicial [25].

O *Buffer* é uma placa que é colocada entre o explosivo e a placa voadora, que tem por finalidade proteger a placa voadora da explosão, de forma a esta não sofrer danos e possuir um bom acabamento superficial.

#### **2.2.3.2. Parâmetros dinâmicos**

Parâmetros como o ângulo de colisão, velocidade de impacto, velocidade de detonação e velocidade no ponto de colisão, podem ser considerados parâmetros dinâmicos, visto que estes podem variar com as escolhas dos parâmetros iniciais.

De forma a controlar os parâmetros dinâmicos utiliza-se a janela de soldabilidade, que prevê a possibilidade de ligação dos materiais em causa, permitindo um controlo do processo. A janela de soldabilidade, baseia-se na relação entre a velocidade no ponto de colisão e o ângulo de colisão [13], para a configuração paralela a velocidade no ponto de colisão é igual à velocidade de detonação, sendo esta a utilizada neste estudo.

A janela de soldabilidade é delimitada por quatro linhas Figura 2.3, caso os parâmetros definidos tenham sido cumpridos, existe a possibilidade de verificar que a soldadura se encontra dentro dos limites da janela de soldabilidade [26] [13]. É possível ainda evidenciar diferentes zonas referentes à morfologia da interface da ligação soldada, nomeadamente a interface plana, interface ondulada e interface ondulada com porções de material fundido.

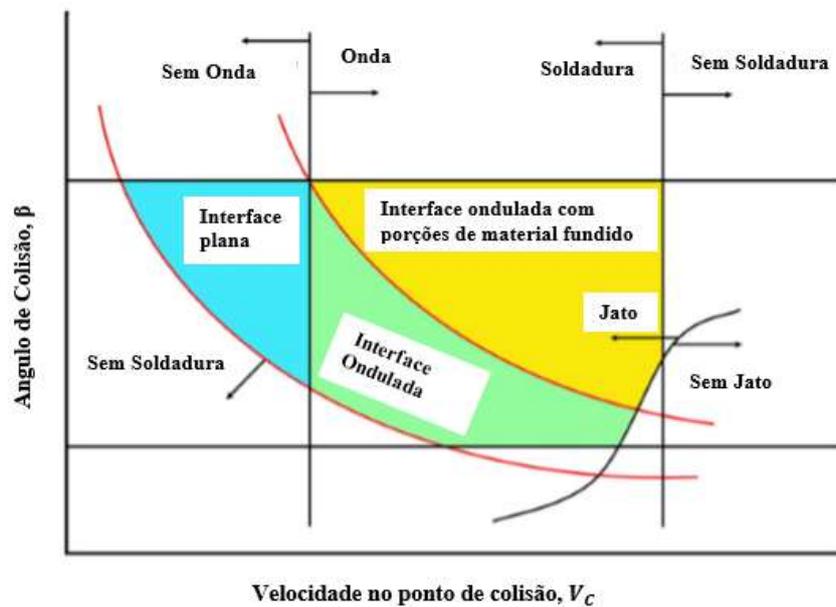


Figura 2.3- Exemplo de janela de soldabilidade. Adaptado de [13].

Existe uma condição para cada limite imposto na janela de soldabilidade, o limite mais a direita da Figura 2.3 relaciona-se com a formação do jato no ponto de colisão que é uma condição necessária para ocorrer ligação em soldadura por explosão. Para cumprir esta condição, ou seja, ocorrer a formação do jato, Walsh *et al.* [27] afirma que a velocidade no ponto de colisão  $V_C$  deve ser menor que a velocidade do som nos materiais  $C_b$ , como definido em (2.1). Segundo Wylie *et al.* [28], a velocidade no ponto de colisão deve ser menor que  $1.25 \times C_b$  como definido em (2.2). Contudo alguns autores como Abrahamson [29], afirmam que a velocidade no ponto de colisão depende do ângulo de colisão  $\beta$ , como definido em (2.3), logo ao invés de uma reta na vertical o limite mais à direita na janela de soldabilidade deve ser ligeiramente côncavo como ilustrado em discussão.

$$V_C < C_b \quad (2.1)$$

$$V_C < 1,25 * C_b \quad (2.2)$$

$$V_C = \frac{\beta}{10} + 5.5 \quad (2.3)$$

O limite mais à esquerda da Figura 2.3 relaciona-se com a morfologia da interface formada, ou seja, interface ondulada ou interface plana, que se torna consequência de determinadas condições. A linha reta vertical que define o limite mais à esquerda resulta da velocidade de transição no ponto de colisão  $V_{c, tr}$ , que varia em função do ângulo de colisão. Logo não deveria ser uma reta vertical, como é representada na Figura 2.3 [26]. Contudo a maior parte dos autores considera como sendo uma linha reta vertical, independente do ângulo de colisão. Para definir este limite Cowan *et al.* [16] propôs a equação (2.4), em que  $V_{c, tr}$  é expresso em km/s, as densidades  $\rho_b$  e  $\rho_v$  expressa em  $\text{kg/m}^3$ , a dureza Vickers  $H_{v,b}$  e  $H_{v,v}$  expressa em MPa e o numero de Reynolds critico  $Re_{cr}$  que pode variar entre 8.0 e 13.0 para uma soldadura por explosão de configuração assimétrica.

$$V_{C,tr} = \left( \frac{2 * Re_{cr}(H_{V,b} + H_{V,v})}{\rho_b + \rho_v} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

Simonov [30] para definir o limite em questão utiliza outros parâmetros, como expresso em (2.5),  $k_0$  com coeficiente igual a 1, mas existem casos reportados em que utilizam 1.8,  $V_{c,tr}$ ,  $H_v$ , e  $\rho$  são expressos respetivamente em km/s, GPa e  $\text{g/cm}^3$ .

$$V_{C,tr} = k_0 * \left( \frac{2 * H_V}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

O limite inferior é referente ao alcance de uma velocidade de impacto  $V_P$ , para que a pressão devido ao impacto no ponto de colisão exceda a tensão limite elástica dos materiais, desta forma a ligação pode-se estabelecer, este é representado na Figura 2.3. Para definir este limite desenvolveram a equação (2.6), como mencionado por Zakharenko *et al.* [31]. Em que  $V_{c,min}$  é a velocidade mínima no ponto de colisão, que é determinada em função da dureza expressa em MPa, da densidade  $\rho$  expressa em  $\text{kg/m}^3$  do material mais macio a soldar, do ângulo de colisão  $\beta$  expresso em radianos e uma constante  $k_1$  em que caso a superfície dos materiais a soldar esteja perfeitamente limpa possui um valor de 0,6 caso as superfícies não se encontrem perfeitamente limpas assume o valor de 1,2.

$$V_{C,\min} = \frac{k_1}{\beta} \left( \frac{H_V}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

O limite superior, da Figura 2.3, este impõe que a velocidade de impacto tem de se situar abaixo de um determinado valor, de forma a que a energia cinética dissipada não provoque uma fusão contínua das camadas de material na interface de ligação. Para definir o limite superior Wittman [32] desenvolveu uma equação para a velocidade máxima de impacto que evita a formação de compostos intermetálicos, usando uma relação entre a velocidade de impacto e a velocidade no ponto de colisão. Esta relação torna-se possível através da equação (2.7), onde o ângulo de colisão  $\beta$  expresso em radianos, a espessura da placa voadora  $h$  expressa em cm, a velocidade no ponto de colisão  $V_C$  expresso em cm/s e o parâmetro  $K_W$  que pode ser obtido a partir da equação (2.8), dependendo este das propriedades físicas e térmicas da placa voadora, como a temperatura de fusão  $T_f$  expressa em °C, a velocidade de propagação do som no material  $C_b$  expressa em cm/s, a condutividade térmica  $k$  expressa em W/m.K, constante de calor específico a pressão constante  $C_p$  expressa em J/kg.K, a densidade  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>] e a constante  $N$  que toma valor de 0,11 para determinados metais, este valor é referido por Roset [33] ou 0,062 segundo Ribeiro *et al.* [26].

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{K_W}{h^{1/4} * V_C^2} \quad (2.7)$$

$$K_W = \left[ \frac{(T_f * C_b)^{1/2}}{2 * N} \left( \frac{k * C_p * C_b}{\rho} \right)^{1/4} \right] \quad (2.8)$$

Existe uma outra proposta para definir o limite superior da janela de soldabilidade, a equação (2.9), onde  $\beta$ ,  $h$  e  $V_C$  assumem o mesmo significado, mas  $h$  e  $V_C$  estão expressos em m e m/s,  $K_{DZ}$  é um parâmetro obtido através da equação (2.10), este por sua vez dependente das propriedades físicas e mecânicas, como o módulo de elasticidade  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] a densidade  $\rho$  expressa em g/cm<sup>3</sup> e coeficiente de Poisson  $\nu$ .

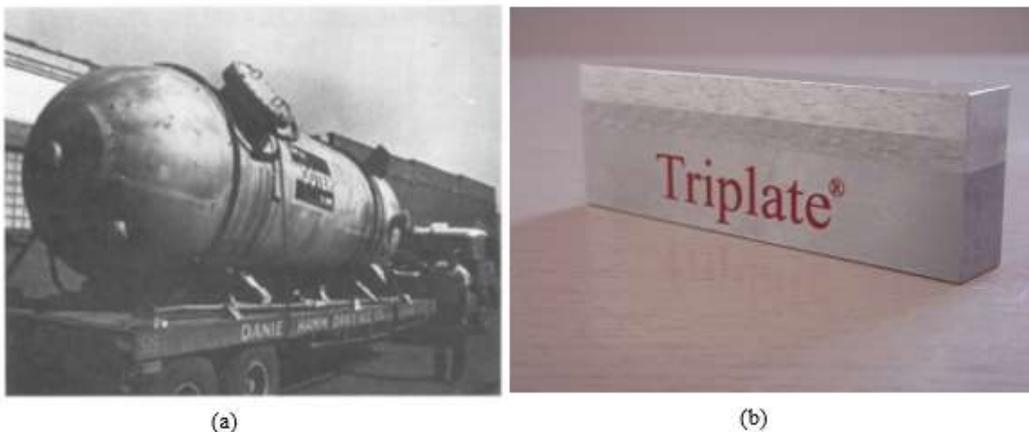
$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{K_{DZ}}{h^{1/4} * V_C^{1,25}} \quad (2.9)$$

$$K_{DZ} = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{E}{3(1-2\nu)} \right)^{1/2} \right] \quad (2.10)$$

### 2.3. Aplicações

Os componentes produzidos através de soldadura por explosão têm uma ampla aplicação em diferentes tipos de industria. Sendo comum na construção naval, processamento químico, industria automóvel, mineira, nuclear, criogênica e outras [14].

A principal finalidade dos produtos realizados através de soldadura por explosão são: criar superfícies protetoras resistentes à corrosão, Figura 2.4 (a); criar soluções que permitam uma melhor permutação de calor; fabrico de juntas de transição ao nível estrutural Figura 2.4 (b) e o fabrico de juntas de transição elétricas.



**Figura 2.4-** Aplicabilidade: (a) Reservatório químico fabricado a partir de placas produzidas através soldadura por explosão.[2] (b) Triplate® produto fabricado pela SMT [34].

A **Triplate®** é um produto fabricado pela **SMT (Shockwave Metalworking Technologies BV)**, Figura 2.4 (b), que é um exemplo da aplicabilidade do processo de

soldadura por explosão. A **Triplate®** é uma junta de transição estrutural produzida através de soldadura por explosão a vácuo, sendo a **Triplate®** usada na construção naval e offshore, permitindo a ligação de superestruturas de alumínio a bases de aço. É produzida a vácuo, porque permite obter melhores ligações entre placas, uma vez que se verificava na interface de ligação a presença de bolhas de óxidos, quando a soldadura é efetuada em ambiente atmosférico, diminuindo a performance da ligação [34].

## 2.4. Soldadura por explosão da Liga de Alumínio a Aço Inoxidável

Em julho de 2006 David Cutter [35], criou a tabela ilustrada na Figura 2.5 que demonstra a compatibilidade de materiais a ligar através de soldadura por explosão. De onde podemos averiguar que a ligação do alumínio ou liga de alumínio ao aço inoxidável é possível e resulta em ligações herméticas, mas é comum a utilização de placas intermédias, ou seja, sem uma ligação direta.

	Zirconium	Vanadium	Tungsten	Titanium	Tantalum	Steel alloy	Steel, mild	Steel, stain	Silver	Rhenium	Platinum	Palladium	Niobium	Ni alloy	Nickel	Moly alloy	Molybdenum	Magnesium	Kovar	Indium	Hafnium	Gold	Copper alloy	Copper	Beryllium Cu	Al Bronze	Al alloy	Aluminum
Aluminum	8	8	4	1	1,3	6,3	1	6,3	1	8	8	7	1	6	0	8	8	7	6,3	7	8	1	6	6	7	8	1	1
Al alloy	8	8	4	1	1,3	6	6,3	6,3	1	8	8	7	1	6	0	8	8	7	6,3	7	8	8	6	6	7	8	1	1
Al Bronze	7	8	7	8	8	1	7	7	8	7	8	7	8	7	8	8	8	7	8	8	7	8	8	8	8	8	8	8
Beryllium Cu	7	8	7	8	7	1	7	7	8	7	8	7	8	7	8	8	8	7	7	7	7	8	1	1	7	8	8	8
Copper	8	8	4	1,3	1,3	1	1,3	1,3	1	8	1	1	1	1	1	1	8	1	7	1,3	1	8	1	1	1	1	1	1
Copper alloy	8	8	8	8	8	1	1	1	8	8	8	8	1	1	8	8	1	7	1,3	8	8	8	1	1	1	1	1	1
Gold	8	8	8	8	8	8	8	8	1	8	1	8	8	8	8	8	8	7	8	8	8	1	1	1	1	1	1	1
Hafnium	7	1	8	7	8	8	8	1	8	8	8	8	7	7	7	1	1	6	8	7	8	1	1	1	1	1	1	1
Indium	8	8	8	7	8	7	7	8	7	7	7	8	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	1	1	1	1	1	1
Kovar	7	8	8	7	8	1	1	1	8	7	8	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	1	1	1	1	1	1
Magnesium	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Molybdenum	8	1	4	8	1	1	1	1	8	1	8	8	8	8	8	8	1	8	1	8	8	8	1	1	1	1	1	1
Moly alloy	8	1	4	8	8	8	8	8	8	1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	1	1	1	1	1	1
Nickel	8	8	8	1	1	1	1	1	7	8	7	7	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ni alloy	7	8	8	7	8	1	1	1	8	7	8	7	8	7	8	8	8	8	8	8	8	8	1	1	1	1	1	1
Niobium	8	1	4	8	8	8	8	8	1	8	1	8	1	8	1	8	1	8	1	8	1	8	1	1	1	1	1	1
Palladium	7	7	7	7	7	1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Platinum	8	8	8	8	8	1	8	1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Rhenium	7	1	8	7	1	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Silver	8	8	8	8	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Steel, stain	2,5	1	4	2,5	1,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Steel, mild	2,5	8	8	2,5	1,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Steel alloy	8	8	8	2,5	1,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tantalum	8	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Titanium	8	1	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tungsten	8	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vanadium	8	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zirconium	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1. Commonly bonded with clad layer of 1/8" to 3/4".<sup>A</sup>

2. Can be done with increases edge affect and scrape.

3. Proven hermetic bonds.<sup>B</sup>

4. Common with small thin clads.<sup>C</sup>

5. Commonly bonded but the bond is below the strength of the weaker material.

6. Commonly bonded with inner layer (no direct bonds).<sup>D</sup>

7. Unknown system may require inner layer.<sup>D</sup>

8. Unknown system with high probability of direct bonding.<sup>E</sup>

Figura 2.5- Compatibilidade na combinação de metais ligados através de soldadura por explosão [35].

Carvalho *et al.* [36] refere que na ligação da liga de alumínio ao aço inoxidável, esta só será possível se for utilizada a liga de alumínio como placa voadora e o aço inoxidável como placa de base, pois caso contrario, esta é sujeita a tensões de tração antes de o material que sofreu fusão estar solidificado, impedindo a ligação das placas.

Pode-se assim verificar, que na soldadura de materiais dissimilares a escolha do material para placa voadora é importante. Portanto, deve ser utilizado como placa voadora o material que: possuir menor densidade; maior condutividade térmica e maior temperatura de fusão relativamente ao material da placa de base [36].

Mesmo utilizando o alumínio como placa voadora, podem surgir problemas, tais como, fendas e segundo Han *et al.* [37], a formação de soldaduras não consistentes.

Ainda existem referências acerca da formação de compostos intermetálicos na interface das placas na ligação de alumínio ao aço inoxidável, estes compostos possuem elevada dureza, logo associa-se a estes compostos um comportamento frágil, o que afeta as propriedades mecânicas do produto final [38] [37].

Na soldadura por explosão do alumínio ao aço inoxidável, a formação de compostos intermetálicos deve ser controlada, pois a principal dificuldade de soldar estes materiais reside no facto de possuírem propriedades físicas muito diferentes, como afirmado por Carvalho *et al.* [36].

#### **2.4.1. Estudos realizados na Universidade de Coimbra**

A ligação dos materiais em estudo, através de soldadura por explosão, é um processo que foi efetuado diversas vezes no LEDAP (Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio) e analisada no CEMMPRE (Centro de Engenharia Mecânica Materiais e Processos). Logo a informação obtida em ensaios anteriores, pode ser fundamental na interpretação e compreensão do processo.

A nomenclatura utilizada para definir a soldadura efetuada é EWXX, em que EW significa “*Explosive Welding*”, de seguida encontra-se o número do ensaio, que representa uma ordem, de forma a aferir cronologicamente a realização do ensaio relativamente aos anteriores.

Os ensaios EW14 e EW22 foram realizados em 2016 por José Nunes [39], os ensaios EW33 e EW34 foram realizados por João Fonseca [40] em 2017 e os ensaios EW36, EW37, EW39 e EW48 foram realizados por Luís Machado [41] em 2018.

Os ensaios expostos utilizam todos a liga de alumínio AA 6082-T6 e aço inoxidável AISI 304, o ensaio é realizado em configuração paralela, tanto a placa voadora como a placa de base possuem espessura de 3 mm. A placa de base encontra-se sobre uma base de areia. Os parâmetros que variam neste processo são a posição do material relativamente à placa voadora ou placa de base. Sendo o ensaio EW36 o único a utilizar aço inoxidável AISI 304 como placa voadora. O explosivo utilizado, a altura do explosivo e a distância entre placas, pode ser analisado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1-** Parâmetros utilizados em ensaios anteriores.

	EW 14	EW 22	EW 33	EW 34	EW 36	EW 37	EW 39	EW 48
<b>Placa Voadora</b>	AA 6082T6	AA 6082T6	AA 6082T6	AA 6082T6	AISI 304	AA 6082T6	AA 6082T6	AA 6082T6
<b>Placa Base</b>	AISI 304	AISI 304	AISI 304	AISI 304	AA 6082T6	AISI 304	AISI 304	AISI 304
<b>Espessura placa voadora [mm]</b>	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>Espessura placa base [mm]</b>	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>Explosivo</b>	ANFO	ANFO + 30% Eex (NH4N O3)	ANFO	ANFO	Eex (NH4N O3)+ 3%EPS	Primer + 4%EPS	ANFO	ANFO
<b>Altura de explosivo [mm]</b>	20	20	25	20	20	15	20	25
<b>STD [mm]</b>	3,40	2,40	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50

Foi possível concluir que nos ensaios EW39, EW14 e EW48 não ocorreu a detonação completa do explosivo, nos restantes ensaios a detonação propaga-se na total extensão da placa. Nos ensaios EW22, EW36 e EW48, não ocorreu a ligação entre placas. Nos ensaios EW14, EW33, EW34, EW37 e EW39, a ligação ocorreu, mas no processo de corte de amostras estas separam-se. O ensaio EW33 possui uma fenda de dimensão razoável na superfície de contacto do explosivo com a placa voadora (liga alumínio AA6082-T6), a

fenda encontra-se na proximidade da carga de iniciação, concluiu-se que a violência de detonação da carga de iniciação pode ter sido a causa da formação da fenda. O ensaio consecutivo ao EW33, ou seja, EW34 possui uma melhor qualidade de superfície, visto que se reduziu a altura de explosivo. No ensaio EW14 utilizou-se placas com comprimentos diferentes, sendo a placa voadora de maior comprimento que a placa de base. O motivo da diferença foi possibilitar que a onda de choque se estabilizasse ao mesmo tempo que ocorre o choque entre placas. O que não aconteceu, o resultado final foi o empeno da placa voadora, o que contribuiu para a quebra da ligação. No ensaio EW22, utilizou-se placas em que ambas têm as mesmas dimensões.

Todos os ensaios realizados, não alcançaram soldaduras consistentes, na maioria ocorre a ligação entre placas, mas esta quebra-se no processo de corte de amostras. Na zona de ligação entre placas, pode-se averiguar a presença de uma interface plana e uma grande percentagem de intermetálicos.

Dos ensaios em discussão, apenas foi possível obter provetes para a análise da resistência ao corte da ligação, no ensaio EW34 realizado por João Alexandre Fonseca. A rotura do provete de tração ocorre na região soldada e apresenta uma tensão de corte máxima de 75,6 MPa e alongamento de 0,81 mm.

Como não se alcançou soldaduras consistentes e perante uma predominante interface plana com excesso de intermetálicos, levanta-se a questão da influência do estado da superfície nas placas a soldar, assunto que será analisado neste estudo.

#### **2.4.2. Alteração do estado de superfície**

O estado da superfície é um fator a ter em conta na soldadura por explosão, pois esta influencia a ligação entre placas. O intuito de realizar alterações no estado das superfícies das placas a soldar é eliminar possíveis impurezas, permitir uma maior superfície de contacto durante o impacto, de certo modo, promover três fatores que permitem a ligação entre placas, que são: deformação plástica conferindo uma interface com vários pontos de ancoragem; promover a formação localizada de material fundido e permitir a interdifusão atômica [42].

Em 1962 V.Philipchuck e Franklin L.Bois [6], lança uma patente referente a soldadura por explosão (U.S. Patent 3,024,526- “Explosive Welding”), onde este afirma alterar previamente a superfície das placas a soldar, de forma a promover a ligação entre

materiais. Para realizar a alteração da superfície, atacam quimicamente ambas as superfícies das placas a soldar, formando uma rede de pequenas cavidades como exposto na Figura 2.6 (a). Este afirma que a rede de cavidades fornece uma maior superfície de ligação obtendo-se melhor qualidade de soldadura [6].

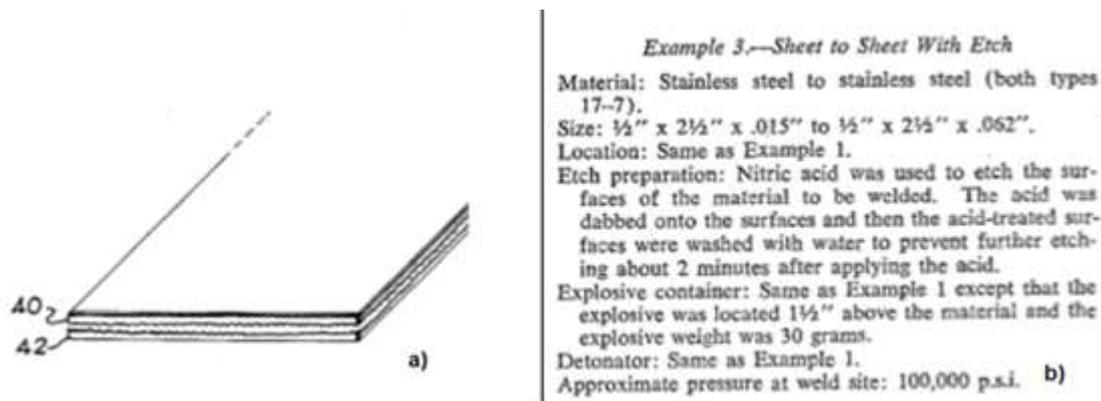


Figura 2.6- Patente: a) estado da superfície das placas ; b) exemplo de tratamento superficial pré-ligação. Adaptado de [6].

Li *et al.* [43], na soldadura por explosão de AA5083 ao aço Q345, altera previamente a superfície da placa de base a soldar, criando cortes transversais e longitudinais. A forma geométrica são “dovetail grooves”, como representado na Figura 2.7. Esta alteração da superfície permitiu concluir que é possível soldar duas placas diretamente através deste método, obtendo soldaduras de boa qualidade, cumprindo os requisitos, relativamente à força de ligação para os materiais em questão [43].

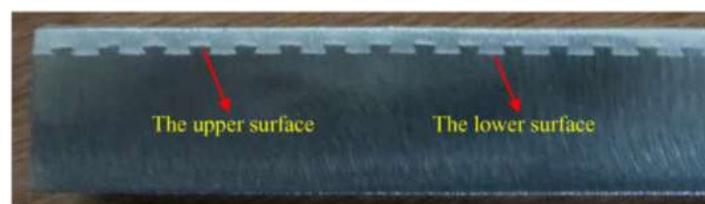


Figura 2.7- Vista de perfil da placa fabricada através soldadura por explosão [43].

### 2.4.3. Causas possíveis do sucesso ou insucesso da ligação

Existem vários motivos para não se obter resultados positivos no processo de soldadura por explosão, ou seja, a ligação entre materiais não ser atingida ou possuir má qualidade [36]. Os principais motivos para que este facto ocorra encontram-se enumerados abaixo:

- Cowan e Holtzman [44], afirmam que não se pode obter uma boa ligação entre materiais sem ocorrer a formação do jato;
- Carpenter e Wittman [2], afirmam que o excesso de material fundido presente na interface, resulta em ligações de má qualidade;
- Deribas e Zakharenko [45], provaram que uma insuficiente deformação do material, resulta em ligações inconsistentes;
- Zakharenko [46], mostrou que excesso de calor na interface impede o arrefecimento e solidificação de pequenas porções de material fundido, identificou também que se o tempo disponível para efetuar a ligação das placas for insuficiente, depois da chegada das tensões de stress à interface, resulta em más ligações.



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Ensaaios Explosivos

##### 3.1.1. Material

Nos ensaios realizados os materiais utilizados foram a liga de alumínio AA 6082-T6 e o aço inoxidável AISI304, cujas composições químicas estão representadas, respetivamente na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.

**Tabela 3.1-** Composição do AA6082-T6 em % peso dos elementos de liga [47].

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
<b>AA 6082-T6</b>	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-0,1	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	Restante

Como é possível aferir através da Tabela 3.1, os principais elementos da liga AA 6082-T6 é o silício e o magnésio. A partir da nomenclatura da liga pode-se aferir que esta é tratada termicamente e envelhecida artificialmente [47].

**Tabela 3.2-** Composição do AISI 304 em % peso dos elementos de liga [48].

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Outros	Fe
<b>AISI 304</b>	0,08 Max	2,0 Max	1,0 Max	18,0-20,0	8,0-12,0	0,675 Max	Restante

A partir da Tabela 3.2 pode-se aferir que o principal elemento de liga do aço inoxidável AISI 304 é o cromo, o que lhe confere boas propriedades anticorrosivas, é um aço inoxidável austenítico com uma microestrutura cubica de faces centradas (CFC), não magnético e relativamente rico em níquel [48].

É fundamental identificar os valores das diversas propriedades mecânicas e físicas dos materiais, pois com esses dados é possível realizar a janela de soldabilidade. Na Tabela 3.3 encontra-se algumas das propriedades dos materiais em estudo.

**Tabela 3.3-** Propriedades mecânicas e físicas da liga de alumínio AA6082-T6 [47] e do aço inoxidável AISI304 [48].

	AA 6082-T6	AISI 304
Temperatura de fusão [°C]	660	1400
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	7900
Dureza [MPa]	1118	1265
Calor específico [J/kg °C]	894	500
Condutividade térmica [W/m °C]	180	21
Velocidade propagação no som [km/s]	5,27	4,51

### 3.1.2. Preparação das placas a ligar

A liga de alumínio AA 6082-T6 e o aço inoxidável AISI 304, em chapas de 3 mm, foram cortadas, ambas com 250 mm de comprimento, 70 mm de largura.

Para modificar o estado de superfície, ponderou-se em atacar quimicamente a superfície, retificar e lixar. De forma a provocar diferentes rugosidades e texturas na placa de base, ou seja, de aço inoxidável.

Inicialmente em uma amostra de aço inoxidável AISI 304, atacou-se quimicamente a sua superfície através do uso de ácido nítrico. No final deste processo verificou-se que o ácido nítrico não teve o efeito pretendido, como expectável, pretendia-se a formação de uma rede de cavidades na superfície, como explicado na (U.S. Patent 3,024,526- “Explosive Welding”) [6]. Mas o ácido nítrico teve uma ação contrária à pretendida, o aço inoxidável é passivado. De seguida alterou-se o tipo de ácido, utilizou-se ácido clorídrico com 36,46 g/mol, que do mesmo modo, não se verificou qualquer alteração de superfície.

A alteração do estado da superfície foi realizada através do uso de uma lixa de grau grosseiro (lixa de grau P60), lixou-se a superfície da chapa de AISI 304 no sentido transversal ao sentido da velocidade de detonação.

Visto que seriam realizados dois ensaios, na segunda chapa a superfície foi alterada através da ação de uma retificadora. A placa foi retificada no sentido transversal à velocidade de detonação, utilizando a mó exposta no APÊNDICE A.

A placa de AISI 304 lixada, será utilizada no ensaio explosivo EW53, a placa de AISI 304 retificada, será utilizada no ensaio explosivo EW54, diferenças entre placas visíveis no APÊNDICE B.

Após a alteração do estado de superfície das chapas, procedeu-se à análise de rugosidade através do equipamento de análise de superfície Mitutoyo SurfTest SJ-500, equipamento exposto no APÊNDICE C. Os resultados obtidos encontram-se expostos na Tabela 3.4.

Os parâmetros utilizados para avaliar a rugosidade são, a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) e a rugosidade média aritmética das alturas máximas do perfil ( $R_z$ ), medida em cinco comprimentos consecutivos.

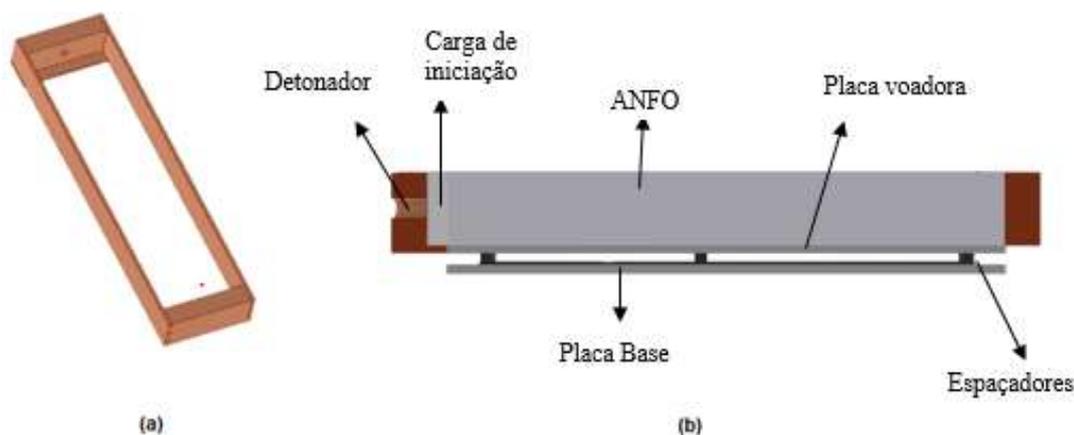
**Tabela 3.4-** Rugosidades obtidas para a placa lixada e retificada.

	EW 53 Lixada	EW 54 Retificada
<b><math>R_a</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	0,67	1,25
<b><math>R_z</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	6,99	10,66

### 3.1.3. Fabrico de caixas e espaçadores

O fabrico de caixas, espaçadores e sondas foi realizado no DEM, sendo as caixas e espaçadores fabricados em MDF (Medium Density Fiberboard) e os componentes montados através de colagem. A principal função das caixas é posicionar o explosivo sobre a placa voadora e suportar as sondas. O desenho dos diferentes componentes das caixas encontra-se no APÊNDICE D. Na Figura 3.1 (a) está representada a caixa de MDF e na (b) o corte transversal do conjunto caixa, explosivo e placas com os respetivos espaçadores.

Após as caixas estarem fabricadas, realizou-se a pesagem das placas intervenientes no processo. De seguida efetuou-se a colagem da placa voadora à caixa, e efetuou-se a pesagem do conjunto.



**Figura 3.1-** Ilustração exemplificativa: (a) caixa de MDF; (b) corte transversal do conjunto caixa, explosivo e placas com os respetivos espaçadores.

#### 3.1.4. Medição da velocidade de detonação

De forma a determinar a velocidade de detonação do explosivo, construiu-se uma série de sondas que quando ligadas a um cronómetro, permitem obter o tempo de detonação entre sondas, sabida a distancia entre sondas, é possível calcular a velocidade de detonação. Depois de obter a velocidade de detonação entre sondas realiza-se a média das velocidades, obtém-se uma aproximação à velocidade de detonação total [20]. As sondas são realizadas a partir de tubos de aço inoxidável, fio de cobre revestido e cabos elétricos. Primeiramente prepara-se o tubo de aço inoxidável, de seguida o fio de cobre é interlaçado e inserido no interior do tubo, as pontas são soldadas aos cabos elétricos. Através de um multímetro realiza-se um teste de diodo para verificar se o sistema se encontra em curto-circuito, cortando-se de seguida o fio de cobre de modo a abrir o circuito. Realiza-se um novo teste de diodo para verificar se o sistema não se encontra em curto-circuito.

Após verificações, aplica-se cola epóxi de modo a agregar fio e cabo ao tubo de aço inoxidável com o objetivo de dar robustez à sonda.

### 3.1.5. Montagem Experimental

No LEDAP realiza-se a montagem final, testa-se uma última vez as sondas, fixa-se o suporte das sondas à caixa, o suporte possui 4 sondas, logo o cronómetro efetua a leitura de 3 intervalos de tempo, as sondas penetram o explosivo entre 7 a 10 milímetros. Determina-se a massa do ANFO e verifica-se o volume de ANFO inserido, de modo a calcular a densidade deste. Obtém-se assim a montagem representada na Figura 3.2. No local de explosão, realiza-se a ligação das sondas ao cronómetro. Assenta-se a montagem na base de areia. Conecta-se o detonador e de seguida insere-se na montagem.

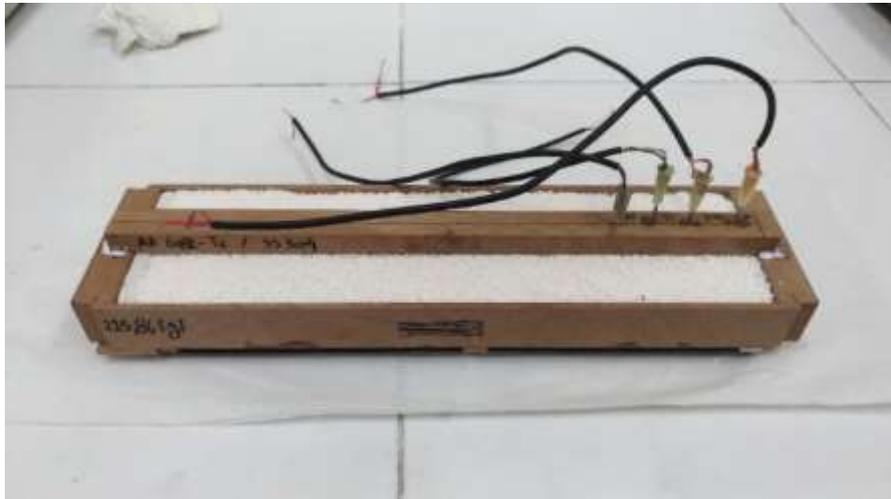


Figura 3.2- Montagem com o explosivo inserido na caixa.

### 3.1.6. Parâmetros Processo

Os parâmetros do processo indicados na Tabela 3.5, enquadram-se nos parâmetros já utilizados em estudos anteriores, nomeadamente o ensaio EW53, que utiliza os mesmos parâmetros usados no ensaio EW48. Assim possivelmente existirá uma base de comparação, de forma a aferir a influência do estado da superfície.

**Tabela 3.5-** Parâmetros utilizados nos ensaios explosivos realizados.

	<b>EW53</b>	<b>EW54</b>
<b>Placa voadora</b>	AA 6082-T6	AA 6082-T6
<b>Placa de Base</b>	AISI 304 SS	AISI 304 SS
<b>Espessura placa voadora [mm]</b>	3	3
<b>Espessura placa base [mm]</b>	3	3
<b>Explosivo</b>	ANFO	ANFO
<b>Altura de explosivo [mm]</b>	25	30
<b>Rácio de explosivo</b>	2,58	2,89
<b>STD [mm]</b>	4,5	4,5
<b>Alteração de Superfície</b>	Lixada	Retificada

## **3.2. Amostras Experimentais**

### **3.2.1. Nomenclatura das Amostras**

As amostras retiradas para as análises metalográficas apresentam a seguinte nomenclatura, EWXX T ou EWXX L. Sendo que EWXX T ou L, tem o seguinte significado, EW (explosive welding), XX é o número do ensaio, T ou L refere-se à interface que será analisada, ou seja, se a interface em análise é transversal ao sentido de detonação ou se é longitudinal ao sentido de detonação. O sentido de detonação encontra-se registado na amostra através do uso de uma seta.

A amostra retirada para o ensaio à tração ao corte, possui a seguinte nomenclatura, EWXX PX, em que EWXX tem o mesmo significado acima apresentado e PX, o P significa provete de tração e X o número de provete.

Esta nomenclatura é apresentada na Figura 3.3 e Figura 3.4.

### **3.2.2. Corte de Amostras**

Para realizar a análise metalográfica e ensaio de tração de resistência ao corte, as placas tiveram de ser cortadas, de forma a retirar as amostras necessárias das zonas de ligação

pretendidas e os provetes necessários ao ensaio de tração. O corte de cada placa foi realizado numa serra alternativa e numa serra manual foi realizado o corte das amostras mais pequenas.

No ensaio EW53 (lixada) a extração de amostras e provetes foi realizado segundo o formato apresentado na Figura 3.3. No ensaio EW53 verificou-se a quebra de ligação entre placa voadora e placa de base, durante o corte de amostras devido à carga realizada pela serra na chapa. Verificou-se a ligação consistente da amostra K. Sendo que as amostras utilizadas na análise metalográfica se encontram entre a posição M e N. Na zona seguinte realizou-se o corte dos provetes de tração.



**Figura 3.3-** Ensaio EW53 (superfície lixada) após corte.

No ensaio EW54 (retificada) a chapa foi cortada segundo o formato apresentado na Figura 3.4. As amostras utilizadas na análise metalográfica foram retiradas da região central da chapa, entre a localização da amostra E e F. Apresentando uma ligação consistente, sem ocorrer a quebra de ligação na interface. Os provetes de tração foram retirados da zona posterior das amostras de metalografia.



**Figura 3.4-** Ensaio EW54 (superfície retificada) após corte.

### **3.2.3. Preparação das amostras**

As amostras EW53L, EW53T, EW54L e EW54T foram inseridas em resina epóxi num molde circular. Após estas solidificarem, procedeu-se à fase de polimento de forma a nivelar as amostras e eliminar riscos que dificultam a análise da microestrutura. Na máquina de polir as amostras foram polidas segundo uma determinada ordem de lixas. Para finalizar, poliu-se as amostras através do uso de um pano de polimento, onde é aplicado um composto a base de diamante com granulometria de 6  $\mu\text{m}$ , no pano deve ser aplicada água de forma atuar como lubrificante de modo a diminuir o atrito e conseqüentemente o aquecimento entre a amostra e o pano.

### **3.2.4. Ataque químico**

Para realizar o ataque químico da liga de alumínio AA6082-T6, utilizou-se o reagente Weck's, (100 ml de água destilada, 4 g de  $\text{KMnO}_4$  e 1 g de  $\text{NaOH}$ ), pela duração de 30 segundos, com limpeza posterior com sílica coloidal.

Para revelar a microestrutura do aço inoxidável AISI 304, realizou-se um ataque eletrolítico utilizando 6V e 1A com corrente DC. A composição utilizada possui as seguintes proporções, 40 g ácido oxálico para 400 ml de água destilada. O polo positivo é ligado à amostra e o polo negativo é ligado à solução. A amostra foi submetida ao ataque eletrolítico em intervalos de tempo de 20 segundos.

### **3.2.5. Análise metalográfica**

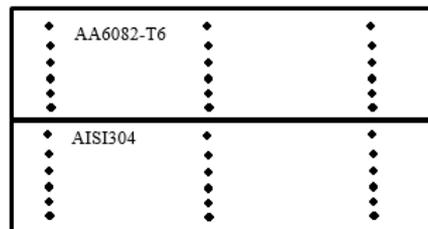
A análise metalográfica foi realizada através do uso de um microscópio Leica DM4000 M LED. Trata-se de um microscópio vertical, específico para análise de materiais, para aquisição de fotos possui uma máquina fotográfica Leica MC 120 HD, onde o registo fotográfico é realizado no software Leica Application suite.

Procedeu-se ainda à realização de uma análise SEM (Scanning Electron Microscopy) e EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), no IPN (Instituto Pedro Nunes), que permitiu analisar e realizar a caracterização de elementos presentes na interface.

### 3.2.6. Ensaios mecânicos

#### 3.2.6.1. Microdureza

Na realização dos ensaios de microdureza, utilizou-se o seguinte procedimento, cada amostra foi sujeita a 36 indentações, sendo estas 36 indentações divididas por 3 colunas de 12 indentações, as colunas localizam-se na extremidade esquerda da amostra, na região central e na extremidade direita, como pode ser observado na Figura 3.5. As indentações foram realizadas com um intervalo de 0,5 mm na vertical. A medição foi realizada em dureza Vickers. Na realização das indentações em questão utilizou-se uma carga de 200 g, ou seja, 1,961 N com a duração de 15 s.



**Figura 3.5-** Localização das indentações, realizadas na placa de AA6082-T6 e AISI 304 ligadas por soldadura por explosão.

De seguida realizou-se entre 20 a 33 indentações por amostra. nos compostos intermetálicos. A microdureza dos intermetálicos, foi medida em dureza Vickers, utilizando uma carga de 25 g, ou seja, 245,2 mN, pela duração de 15 s.

O equipamento de medição utilizado é uma SHIMADZU HMV-G, é automatizada e utiliza um software de computador para efetuar o cálculo da dureza.

#### 3.2.6.2. Ensaios de tração ao corte

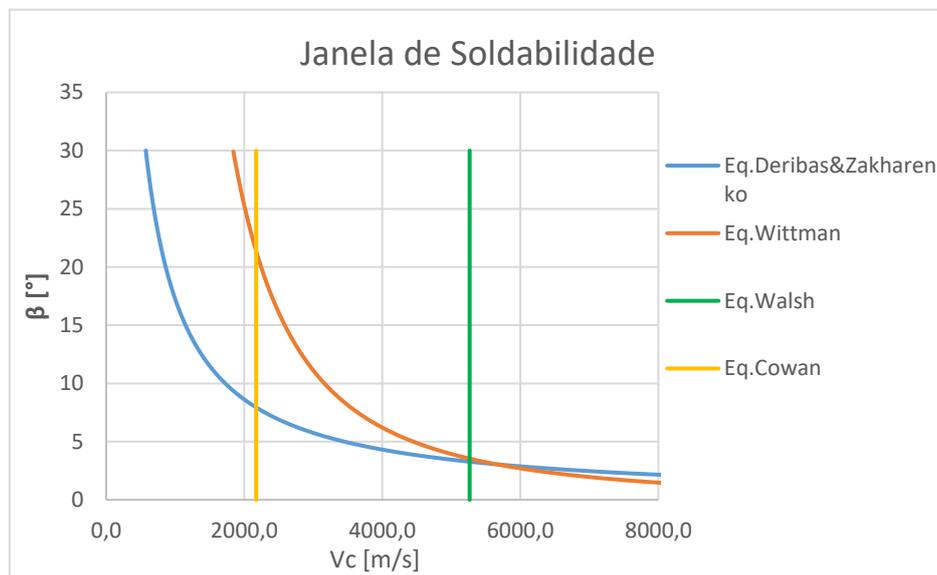
Os ensaios de tração ao corte foram realizados com o intuito de estudar a resistência ao corte da ligação soldada. Para realizar os ensaios foi necessário maquinar entalhes nos provetes, inicialmente foi-lhe retirada a curvatura associada à deformação plástica sofrida durante o ensaio explosivo. Os provetes foram maquinados segundo as dimensões expostas no APÊNDICE E. De seguida procedeu-se à pintura da superfície do provete a analisar de cor branca, sendo posteriormente borrifada com pintas de tinta preta. Este processo permitirá visualizar uma malha, através do software de análise ARAMIS, que permite a análise das

deformações locais em função da carga a que a ligação soldada é sujeita. Após a realização dos ensaios de tração ao corte, efetuou-se o tratamento de dados, de forma a determinar o gráfico força-alongamento da soldadura.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. Janela de Soldabilidade

A janela de soldabilidade representa um conjunto de condições que permitem uma ligação soldada, foi elaborada tendo em conta que a liga de alumínio AA6082-T6 é utilizada como placa voadora e o aço-inoxidável AISI 304 é utilizado como placa de base. Para definir os limites da janela de soldabilidade da melhor forma possível, aplicou-se uma série de equações empíricas plausíveis a cada limite. Observou-se que as que melhor definem os limites de ligação das placas em questão são: equação de Wittman (2.7) define o limite superior; equação de Deribas & Zakharenko (2.6) limite inferior; equação de Walsh (2.1) limite mais à direita e por fim a equação de Cowan (2.4) limite mais à esquerda, obtendo-se assim a janela de soldabilidade representada na Figura 4.1.



**Figura 4.1-** Janela de soldabilidade que melhor limita o processo de ligação do AA6082-T6/SS AISI304

## 4.2. Análise dos materiais de base

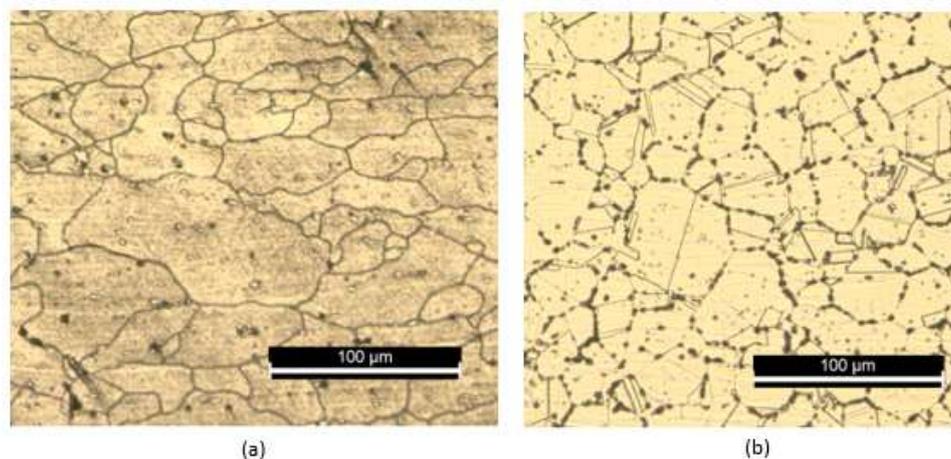
A microestrutura dos materiais de base explica a presença de determinadas propriedades nos materiais. Sendo assim interessante a análise da microestrutura do material de base.

Na Figura 4.2 (a), é possível observar a microestrutura da liga de alumínio AA6082-T6, com tamanho de grão variável, apresenta uma fronteira de grão bem definida. Por vezes observa-se grão com um formato achatado e alongado devido ao processo de laminagem durante fabrico.

Na Figura 4.2 (b), é possível observar a microestrutura do aço inoxidável AISI 304, com um tamanho e formato de grão irregular, apresenta uma fronteira de grão bem definida.

Através do software de leitura de gráficos e figuras (ImageJ) e do método de interceção linear, realizou-se a medição do tamanho de grão.

Tendo a liga de alumínio AA6082-T6, como valor médio do tamanho do grão de 40,49  $\mu\text{m}$ , o aço inoxidável AISI304, tem como valor médio do tamanho do grão 20,63  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.2-** Materiais de base : (a) microestrutura liga de alumínio AA6082-T6; (b) microestrutura aço inoxidável AISI 304.

Foi calculada a microdureza média dos materiais em questão e obteve-se os seguintes valores, para a liga de alumínio AA6082-T6, 114 Hv, ou seja, 1118 MPa e para o aço inoxidável AISI 304, 143 Hv que é 1402 MPa. Comparando os valores calculados com os valores teóricos presentes na Tabela 3.3, verifica-se uma proximidade de valores.

### 4.3. Previsão da velocidade terminal de placas aceleradas por emulsão explosiva.

#### 4.3.1. Caracterização de Gurney

Para determinar a velocidade de impacto da placa voadora  $V_P$  (m/s), foi utilizado o modelo de Gurney. Pelo que é necessário caracterizar a energia de Gurney  $\sqrt{2E_G}$ , do explosivo que acelera a placa em m/s, o rácio de explosivo  $R$  que é um parâmetro adimensional e o tipo de configuração. Para uma configuração paralela, podemos calcular  $V_P$  através da equação (4.1).

$$V_P = \sqrt{2E_G} * \sqrt{\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4}} \quad (4.1)$$

A caracterização de Gurney é um parâmetro estimado através de uma correlação empírica, como apresentado na equação (4.2), esta permite obter a energia de Gurney para a velocidade do explosivo com comportamento ideal.

O explosivo utilizado neste processo não possui um comportamento ideal, ou seja, não existe uma reação total de todos os seus reagentes, por consequência existe uma percentagem de energia desperdiçada. Logo ao utilizar a equação (4.2) para calcular a caracterização de Gurney para um explosivo não ideal, obtém-se uma velocidade impacto da placa voadora com a placa de base  $V_P$ , com uma percentagem de erro associada. Pois o coeficiente 2,97 representa uma constante empírica, para explosivos com comportamento ideal, não existindo dados para os explosivos de comportamento não ideal.

$$\sqrt{2E_G} = \frac{V_d}{2,97} \quad (4.2)$$

Com o objetivo de diminuir o erro associado ao cálculo da velocidade de impacto procedeu-se à determinação do coeficiente empírico para explosivos de comportamento não ideal, tendo em conta o estudo de Kunzel *et al.* [49], realizado em cargas cilíndricas de cobre aceleradas por emulsão explosiva.

A medida da velocidade da parede em configuração cilíndricas, é realizada através de PDV (Photonic Doppler Velocimetry). A velocidade de detonação foi obtida através do uso de sondas de fibra ótica acoplados a um cronómetro eletrónico. Os dados da velocidade da parede extraídos através de PDV foram tratados através do uso de uma transformada de Fourier de modo a obter uma curva velocidade vs tempo.

Através da equação de Gurney para uma configuração paralela, foi possível obter os valores correspondentes ao coeficiente em causa. De seguida realizou-se a média dos valores obtidos, obtendo-se assim um possível valor do coeficiente para explosivos com um comportamento não ideal, como o ANFO e emulsões explosivas a base de ANFO.

Visto que existe uma insuficiência de ensaios para a espessura de parede de 3 mm. A espessura da parede em análise é de 2 mm devido à maior proximidade da espessura do estudo a realizar. Obtendo-se assim 2,78 como coeficiente, para explosivos com comportamento não ideal Figura 4.3.

no.	d	$\rho$	D	$TV_2$	M/C	$\sqrt{2E_0}$
	mm	$g.cm^{-3}$	$m.s^{-1}$	$m.s^{-1}$		$m.s^{-1}$
13	46	0.95	4470	1470	0.516	1482
14	46	0.95	4150	1440	0.516	1451
15	26	0.97	4230	1210	0.922	1443
16	26	0.97	4150	1310	0.922	1556
17	18	0.94	3880	1080	1.418	1496
18	18	0.95	3860	1070	1.404	1476



D	$\sqrt{(2 \cdot E)}$	X2
$m.s^{-1}$	$m.s^{-1}$	
4470	1482	3,016194
4150	1451	2,860096
4230	1443	2,931393
4150	1556	2,667095
3880	1496	2,593583
3860	1476	2,615176
	$\bar{X}_2$	2,78059

Figura 4.3- Cálculo: (a) Medição velocidade terminal da placa[49] ; (b) calculo do coeficiente para explosivos não ideais.

Utilizando o coeficiente de 2,78 obtido empiricamente, procede-se ao calculo da velocidade de impacto  $V_P$  (m/s) e ângulo de colisão  $\beta$  em graus equação (4.3), ensaios publicados em [36] devido à semelhança de parâmetros para o caso em estudo, como se pode verificar na Figura 4.4.

	Weld series						
	SA-EHG	SA-AEX	SA-EEP AISI 304	SA-A08	SA-A09	AS-A24 AA6082 T6	AS-A19 AISI 304
Flyer plate alloy							
Baseplate alloy	AA6082 T6						
Explosive	EE + HGMS	ANFO + EE + HGMS	EE + EPS	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO
Flyer plate thickness	3	3	3	3	3	3	3
Baseplate thickness	15	15	15	15	15	3	3
Explosive ratio	0.65	1.05	0.52	0.89	0.98	2.45	1.92
STD				4.5 mm			

Figura 4.4- Parâmetros utilizados em [36].

$$\beta = 2 * \arcsin\left(\frac{V_p}{2 * V_d}\right) \tag{4.3}$$

Obtendo-se assim os seguintes valores.

Weld series	$V_c$ (m.s <sup>-1</sup> )	$V_p$ (m.s <sup>-1</sup> )	$\beta$ (°)
SA-EHG	3514	481	7.8
SA-AEX	3527	671	10.9
SA-EEP	3172	367	6.6
SA-A08	2300	393	9.8
SA-A09	2537	462	10.4
AS-A24	2300	697	17.4
AS-A19	2077	559	15.5

(a)

Vd	Vp	$\beta$
m.s <sup>-1</sup>	m.s <sup>-1</sup>	[°]
3514	513,7	8,4
3527	717,0	11,7
3172	392,0	7,1
2300	430,5	10,7
2537	493,2	11,2
2300	744,1	18,6
2077	661,6	18,3

(b)

Figura 4.5- Cálculos: (a) valores obtidos em [36]; (b) calculo de  $V_p$  e  $\beta$  utilizando o coeficiente 2,78 e a velocidade de detonação de (a).

Através da Figura 4.5 podemos comparar e verificar as diferenças entre os valores dos parâmetros obtidos com o coeficiente para explosivos com comportamento ideal (a) e coeficiente para explosivos com comportamento não ideal (b). Inserindo estes valores na janela de soldabilidade, Figura 4.6, obter-se-á a posição dos ensaios relativamente aos limites.

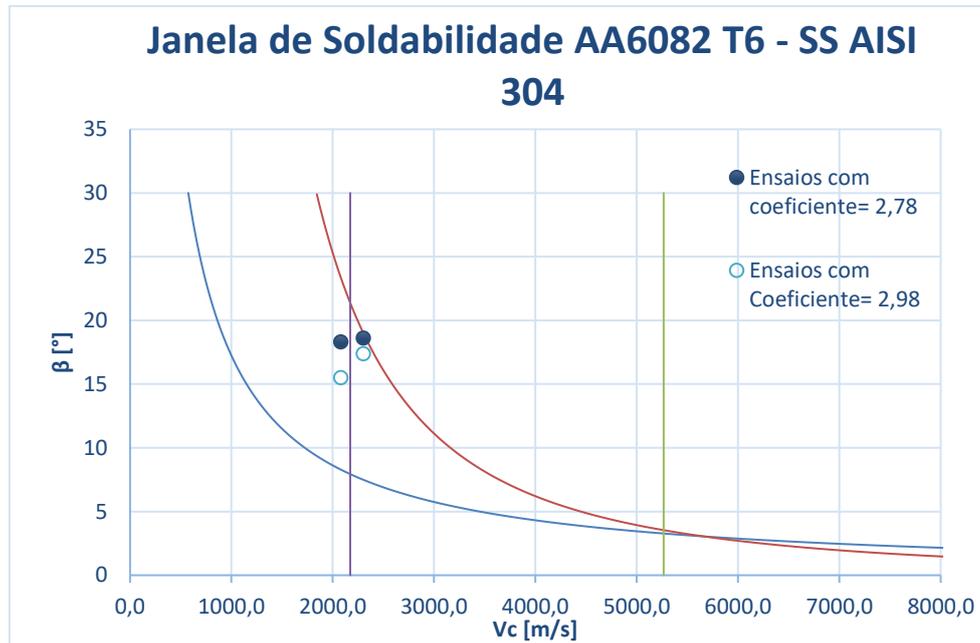


Figura 4.6- Localização dos ensaios na Figura 4.5 (a) e (b) na janela de soldabilidade da Figura 4.1.

### 4.3.2. Evolução do espaço em função do tempo

No estudo de Kunzel *et al.* [49], é possível determinar a distância de aceleração de placas em configuração cilíndrica em virtude do autor apresentar a curva velocidade da parede em função do tempo, Figura 4.7.

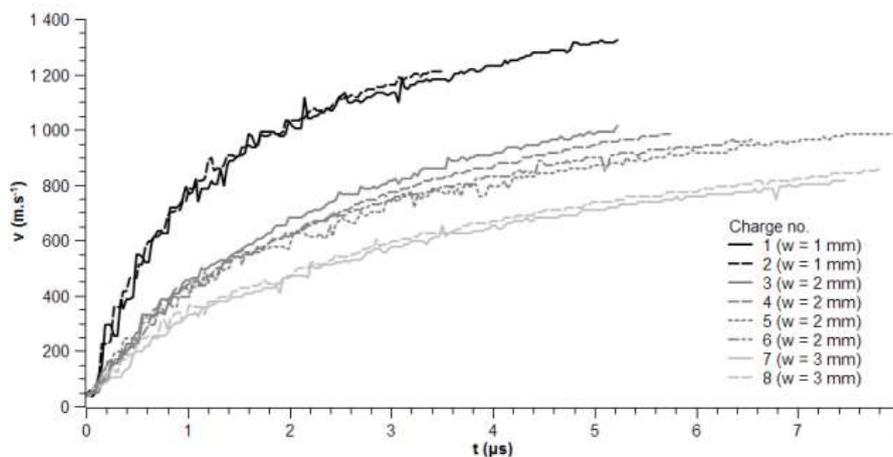
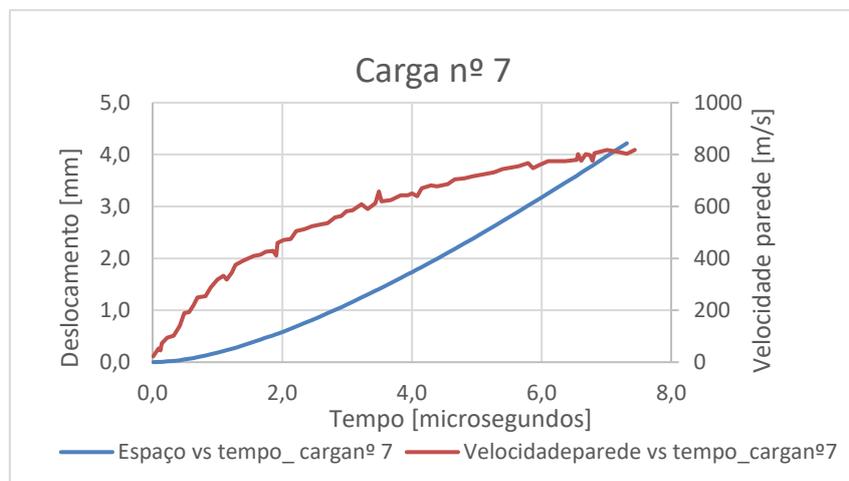


Figura 4.7- Gráfico da velocidade da parede em função do tempo, de uma secção tubular [49].

Analisou-se a curva espaço-tempo para a carga numero 7 e 8, devido à espessura da parede ser igual a 3 milímetros, ou seja, espessura utilizada nas placas deste estudo.

Através de um software de análise de gráficos (Web Plot Designer) foi possível obter uma serie de pontos associados às cargas pretendidas. Pois no artigo apenas estava disponível o gráfico exposto na Figura 4.7, sendo assim necessário extrair os dados.

Após extrair os vários pontos referentes ao gráfico velocidade-tempo, procede-se à transformação desse em uma curva espaço-tempo. A curva espaço-tempo é obtida através de integração numérica, utilizando como ponto de partida a curva velocidade-tempo da carga nº 7 e 8 da Figura 4.7, obtendo-se os gráficos representados nas Figura 4.8 e Figura 4.9.



**Figura 4.8-** Curva espaço vs tempo e curva velocidade parede vs tempo para carga nº7 com  $w=3$  [mm].

Verifica-se que para um deslocamento de 4,5 mm em ambas as cargas o material projetado adquire uma grande percentagem da velocidade terminal, Figura 4.8 e Figura 4.9, para justificar tal afirmação, foi calculada a velocidade terminal para a carga nº8, recorrendo ao software de análise de dados SciDavis e à equação (4.4), retirada de [50]. Através da extrapolação do perfil de velocidade de parede da secção tubular presente na Figura 4.9, que se representa por uma curva exponencial de primeira ordem, obtém-se como valor para a at

$$V_p(t) = V_{pGurney} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right) \quad (4.4)$$

A secção tubular na carga nº 8 para um deslocamento de 4,5 mm, atinge uma velocidade de 848,45 m/s, adquire aproximadamente 97 % da velocidade terminal. Por exemplo, caso o espaçamento utilizado fosse de 2,5 mm, a velocidade da parede seria de 750,50 m/s, significando que 14,2 % da velocidade terminal foi desperdiçada.

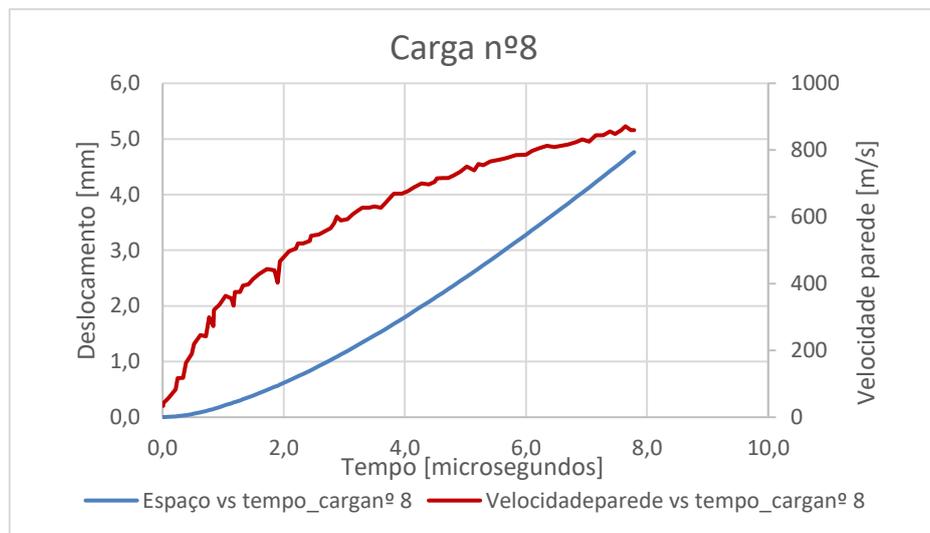


Figura 4.9- Curva espaço vs tempo e curva velocidade parede vs tempo para carga nº8 w=3 [mm].

## 4.4. Parâmetros Processo

### 4.4.1. Velocidade de Detonação

Na Tabela 4.1 encontra-se registada a distância entre sondas e o intervalo de tempo entre sondas. No ensaio EW53 a sonda 2 e 3 falharam, estas não devolveram sinal, assim foi impossível obter o intervalo de tempo entre a sonda 1-2 e 1-3. No ensaio EW54 a sonda 4 não devolveu sinal, não sendo possível obter o intervalo de tempo entre a sonda 1-4.

Após o ensaio explosivo foi possível observar na superfície da placa de AA6082-T6 de ambos os ensaios, que a detonação do explosivo não ocorreu em toda a extensão da placa voadora. Sendo que a detonação do explosivo se extingue antes da chegada às sondas, ou seja, quando as sondas emitem sinal, o que está a ocorrer ao explosivo é a sua deflagração (processo de queima), sendo assim registado no aparelho de medição, intervalos de tempo muito maiores aos esperados. Como não ocorreu detonação do explosivo na extensão das sondas não é possível obter uma velocidade de detonação.

**Tabela 4.1-** Distância entre sondas mm e intervalos de tempo  $\mu\text{s}$ .

N°	EW53 Lixada		EW54 Retificada	
	Sonda [mm]	Tempo [ $\mu\text{s}$ ]	Sonda [mm]	Tempo [ $\mu\text{s}$ ]
1	0	0	0	0
2	14,26	-	13,54	76,784
3	14,12	-	14,50	94,352
4	19,28	225,422	19,38	-
$V_d$ [m/s]	-	-	-	-

#### 4.4.2. Posição dos Ensaios na Janela de Soldabilidade

Para determinar a posição dos ensaios na janela de soldabilidade é necessário determinar a velocidade de detonação do explosivo e o ângulo de colisão da placa voadora com a placa de base. Como não foi possível calcular esses parâmetros, torna-se impossível determinar a posição dos ensaios na janela de soldabilidade.

A velocidade de impacto pode ser calculada através da equação (4.1), o ângulo de colisão pode ser obtido através da equação (4.3), mas como durante o ensaio EW53 e EW54 não ocorreu detonação completa do explosivo, ou seja a detonação extingue-se antes da chegada a zona das sondas, não foi possível determinar a velocidade de detonação.

#### 4.5. Análise Macroscópica

Na Figura 4.10 é possível observar o ensaio EW53, este ensaio utiliza como explosivo ANFO e possui uma altura de explosivo de 25 mm. Após o ensaio a placa voadora e placa de base encontram-se ligadas. Verifica-se a partir da Figura 4.10, que não ocorreu a detonação completa do explosivo, pois a detonação extingue-se antes de atingir a região central da placa, como se pode concluir através do estado da superfície, existe uma transição de velocidade supersônica para velocidade subsônica ao longo da placa. Na extremidade da chapa, na zona de ligação entre placas é possível observar a presença de fendas.



**Figura 4.10-** Materiais após o ensaio explosivo EW53.

Na Figura 4.11 é possível observar o ensaio EW54, após o ensaio a placa voadora encontra-se ligada à placa de base, a ligação aparenta possuir uma melhor qualidade em relação ao ensaio EW53, pois não se observa zonas de não ligação, como interstícios ou aberturas. Ao observar a Figura 4.11 é possível afirmar que não ocorreu a detonação completa do explosivo, devido ao estado de superfície da placa, onde se averigua uma transição de velocidade supersónica para velocidade subsónica ao longo da placa.



**Figura 4.11-** Materiais após o ensaio explosivo EW54.

## 4.6. Análise Metalográfica

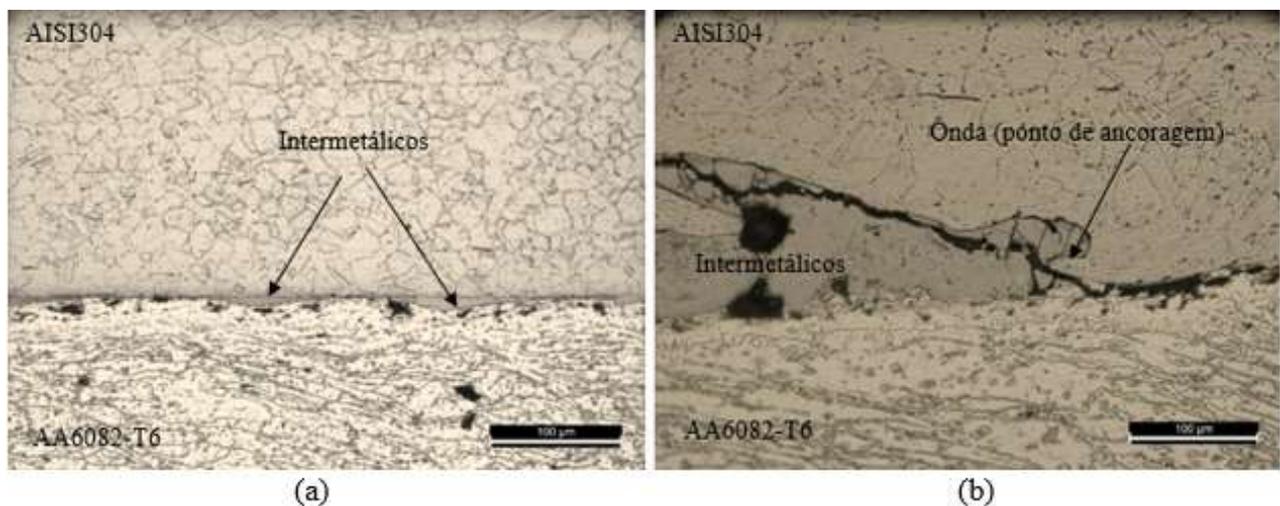
Na Figura 4.12 (a) e na Figura 4.12 (b) é possível observar a zona de interface da amostra EW53L e da amostra EW54L. Em ambas as amostras a liga de alumínio AA6082- T6 junto à interface toma um formato de grão alongado e achatado, com um padrão ondulado, provavelmente devido à deformação plástica sofrida durante o impacto. O aço

inoxidável AISI 304, apresenta uma diminuição do tamanho do grão junto à interface, nas duas amostras, é ainda possível afirmar que ambas as amostras analisadas microscopicamente possuem fendas presentes nos intermetálicos.

A amostra EW53L apresenta uma camada contínua de intermetálicos junto à interface, sendo estes de espessura reduzida, comparativamente à amostra EW54L (APÊNDICE F). Os intermetálicos sujeitos a medição apresentaram uma espessura com um intervalo de valores entre 7,06 e 12,26  $\mu\text{m}$ . A interface é irregular e a presença de ondas e pontos de ancoragem é menor comparando com a amostra EW54L.

A amostra EW54L apresenta uma camada de intermetálicos de espessura considerável, os intermetálicos sujeitos a medição apresentam um intervalo de valores entre 75,01 e 118,19  $\mu\text{m}$ , possui um padrão irregular de ondas e varios pontos de ancoragem.

A amostra EW54L pertence ao ensaio EW54 cuja a alteração de superfície foi realizada através de um processo de retificação, com uma rugosidade superior relativamente ao ensaio EW53. O facto de o ensaio EW54 possuir uma rugosidade superior ao ensaio EW53, pode explicar a presença de um maior número de ondas e pontos de ancoragem relativamente à amostra EW53L.

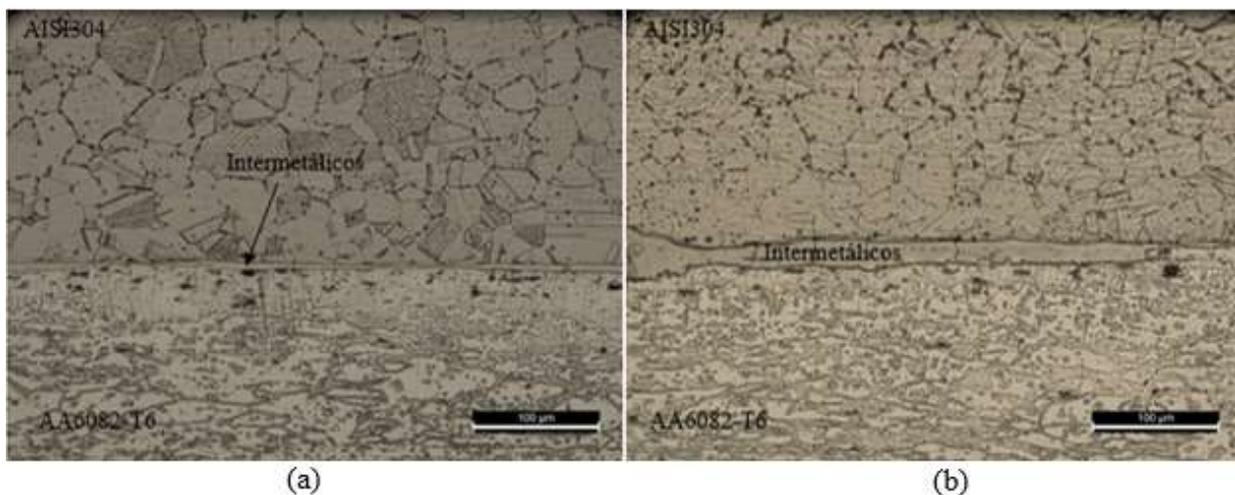


**Figura 4.12-** Metalografia: (a) Interface da amostra EW53L ampliação a 200x; (b) Interface da amostra EW54L ampliação a 200x.

Na Figura 4.13 (a), observa-se a interface da amostra EW53T e na Figura 4.13 (b) a interface da amostra EW54T. Em ambas as amostras com a aproximação à interface, verifica-se uma diminuição do tamanho de grão no aço inoxidável, este possui um formato

irregular. Na liga de alumínio AA6082-T6, verifica-se o alongamento do grão, com a proximidade à interface. Não se verifica o padrão ondulado no grão como era possível verificar nas amostras EW53L e EW54L. Em ambas as amostras analisadas microscopicamente, verificam-se fendas presentes nos intermetálicos.

A amostra EW53T apresenta uma camada de intermetálicos de espessura bastante reduzida quando comparada com a espessura dos intermetálicos da amostra EW54T (APÊNDICE G), em ambas as amostras a camada de intermetálicos é praticamente contínua. Os intermetálicos sujeitos a medição na amostra EW53T, tem uma espessura com intervalo de valores entre os 7,16 e os 10,04  $\mu\text{m}$ . Já os intermetálicos na amostra EW54T, possuem um intervalo de valores entre os 13,38 e 33,21  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.13-** Metalografia: (a) Interface da amostra EW53T ampliação a 200x; (b) Interface da amostra EW54T ampliação a 200x.

## 4.7. Perfis de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados com o objetivo de criar um perfil de dureza, assim é possível comparar a dureza média dos materiais de base com o perfil de dureza das amostras, de forma a averiguar as alterações ocorridas e o porquê de estas terem ocorrido.

A dureza média calculada para a liga de Alumínio é de 114 Hv e para o aço inoxidável de 143 Hv.

#### 4.7.1. EW53L

Na Figura 4.14, o gráfico ilustra o perfil de dureza da amostra referenciada, comparando a dureza média dos materiais com o perfil de dureza da amostra, verifica-se que no aço inoxidável existe um aumento significativo da sua dureza e na liga de alumínio existe um ligeiro aumento. Este aumento de dureza deve-se à deformação plástica sofrida pelos materiais.

Verifica-se ainda no perfil de dureza do ensaio EW53L, que na região da interface, a dureza da liga de alumínio diminui, obtendo um valor inferior ao do seu material de base. Isto acontece devido à possível dissolução de precipitados no alumínio, visto que no momento do impacto entre placas existe um aumento de temperatura, este aumento leva a que os precipitados mais pequenos se dissolvam na matriz da liga de alumínio tornando esta mais macia.

Os três ensaios de microdureza realizados, apresentam comportamentos semelhantes e intervalos de valor próximos.

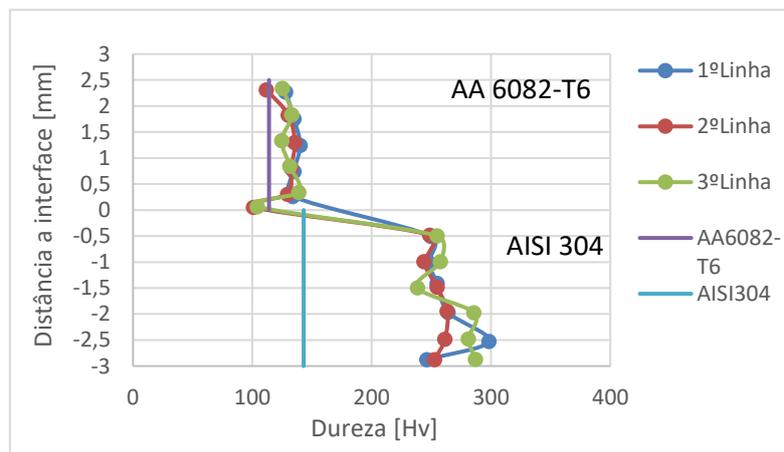


Figura 4.14- Perfil de dureza da amostra EW53L e dureza média do AISI304 e AA6082-T6.

#### 4.7.2. EW53T

O perfil de dureza da amostra EW53T Figura 4.15, apresenta um comportamento semelhante ao da amostra EW53L, sendo pouco visíveis as diferenças. Existe um aumento ligeiro da dureza na liga de alumínio, na zona de interface esta diminui, sendo inferior ao valor médio de dureza do material pré-explosão, pelas mesmas razões já acima explicadas. O aço inoxidável conhecido por sofrer encruamento facilmente, apresenta aumento significativo no valor de dureza.

Os três ensaios de microdureza realizados, apresentam comportamentos semelhantes e intervalos de valor próximos.

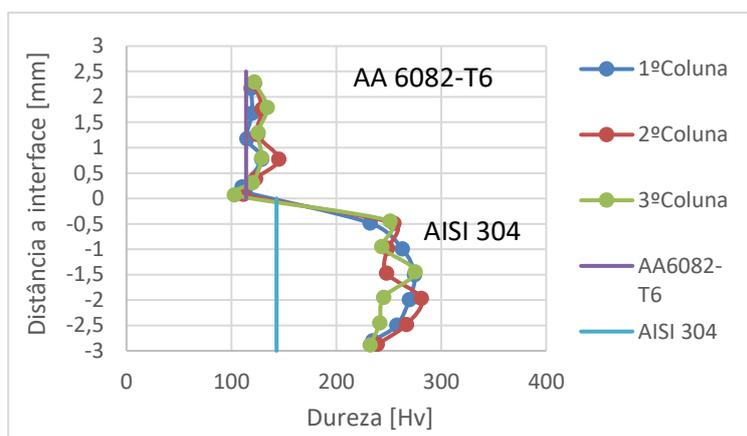
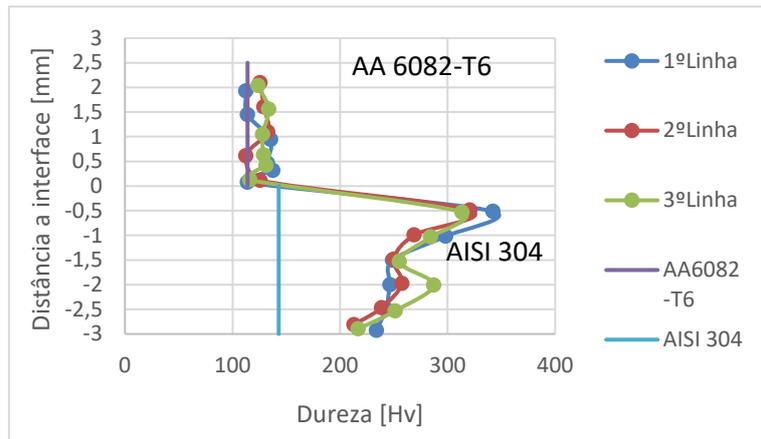


Figura 4.15- Perfil de dureza da amostra EW53T e dureza média do AISI 304 e AA6082-T6.

#### 4.7.3. EW54L

A amostra EW54L possui o perfil de dureza apresentado na Figura 4.16, a liga de alumínio sofreu um aumento ligeiro de dureza, devido à deformação plástica, mas próximo da zona de interface ocorre uma diminuição de dureza, possivelmente devido à dissolução de precipitados. O aço inoxidável sofre um aumento significativo de dureza, após ensaio explosivo, isto deve-se à deformação plástica. O valor máximo de dureza presente no perfil, encontra-se a aproximadamente 0,5 mm da interface, na região predominante de aço inoxidável.

Os três ensaios de microdureza realizados, apresentam comportamentos semelhantes e intervalos de valor próximos.



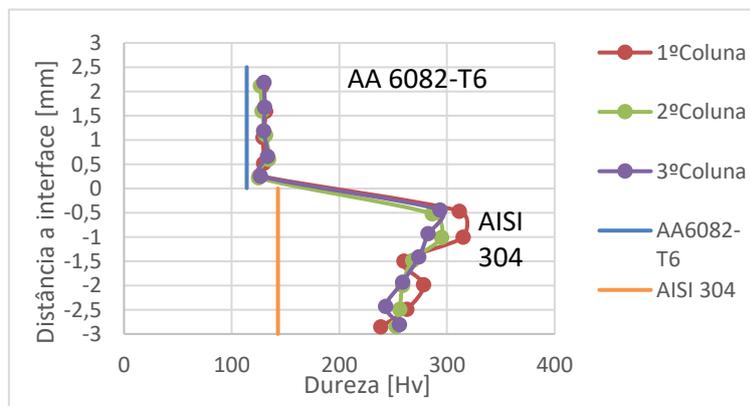
**Figura 4.16-** Perfil de dureza da amostra EW54L e dureza média da liga de alumínio AA6082-T6 e aço inoxidável AISI 304.

#### 4.7.4. EW54T

O perfil de dureza da amostra EW54T, apresenta um aumento ligeiro da dureza na liga de alumínio, na zona de interface esta diminui. O aço inoxidável conhecido por sofrer encruamento facilmente, apresenta aumento significativo no valor de dureza.

Comparando amostra EW54T com amostra EW54L, averigua-se que o perfil de dureza da amostra EW54T, na região da placa voadora, demonstra uma menor variação de valores relativamente á amostra EW54L.

Os três ensaios de microdureza realizados, no geral apresentam comportamentos semelhantes e intervalos de valor próximos, como se pode observar na Figura 4.17.



**Figura 4.17-** Perfil de dureza da amostra EW54T e dureza média da liga de alumínio AA6082-T6 e aço inoxidável AISI 304.

## 4.8. Microdureza dos Intermetálicos

Com o auxílio do diagrama de fases do Ferro-Alumínio [51] (ANEXO A), é plausível prever os intermetálicos possíveis de serem formados. Pois a cada fase do diagrama corresponde uma dureza teórica (Tabela 4.2).

**Tabela 4.2-** Fases do diagrama de fases Fe-Al e a correspondente dureza teórica da fase. Adaptado de [51][52].

Fase	Quantidade de Al [At%]	Dureza [Hv]
<i>Fe<sub>3</sub>Al</i>	22-35	250-350
<i>FeAl</i>	23-56	400-520
<i>FeAl<sub>2</sub></i>	66-67	1000-1050
<i>Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub></i>	70-73	1000-1100
<i>FeAl<sub>3</sub></i>	74-76	820-980

Comparando a dureza teórica com a dureza calculada a partir das indentações realizadas, determina-se o possível constituinte do intermetálico. De seguida, através da análise EDS, que indica a percentagem de elementos presentes no local da indentação, é possível averiguar a veracidade da previsão.

A partir da Tabela 4.3 é possível analisar os intervalos de dureza em que se encontram as indentações realizadas na amostra e prever qual a fase mais provável de se ter formado a partir da Tabela 4.2.

Comparando o ensaio EW53 com o ensaio EW54, verifica-se a possibilidade de o ensaio EW53 ter formado um maior número de compostos intermetálicos da fase *Fe<sub>3</sub>Al*, intermetálicos de menor dureza, em relação ao ensaio EW54. E o ensaio EW54 possivelmente formou um maior número de compostos intermetálicos da fase *FeAl*, intermetálicos de maior dureza, em relação ao ensaio EW53 (Tabela 4.3).

**Tabela 4.3-** Intervalos de dureza das indentações e possíveis fases formadas.

Microdureza [Hv]	Indentações EW53L	Nº Indentações EW53T	Nº Indentações EW54L	Nº Indentações EW54T	
Menor 250	1	1	1	1	
250-350	14	12	6	6	<i>Fe<sub>3</sub>Al</i>
350-400	14	6	-	3	
400-520	4	1	5	10	<i>FeAl</i>
520-1000	-	-	8	-	
Nº total de indentações	33	20	20	20	

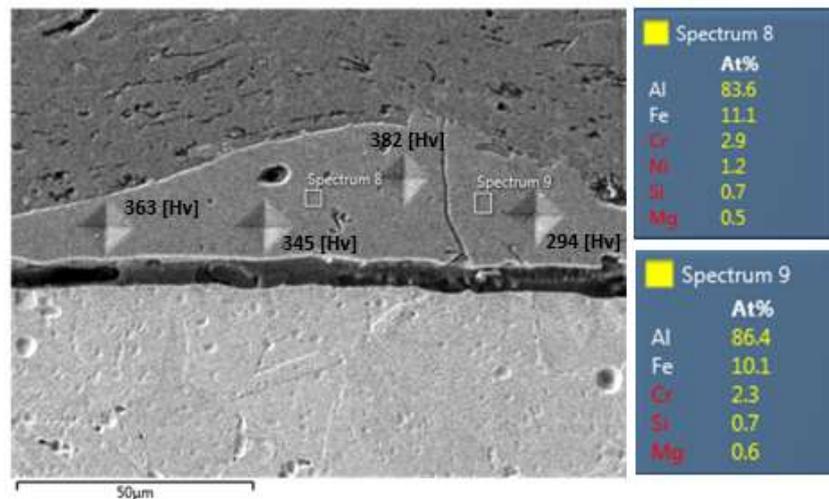
#### 4.9. SEM/EDS Intermetálicos

A análise SEM (Scanning Electron Microscopy) (APÊNDICE H), EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), aos intermetálicos, permitirá analisar as indentações e fendas presentes com um melhor detalhe e averiguar a percentagem de elementos químicos junto das indentações, informando qual a fase formada, ou seja, o constituinte do intermetálico.

Muitas das fases formadas podem não corresponder à fase prevista através da microdureza, como será possível verificar de seguida. Pois o processo de soldadura por explosão é um processo transiente, a transferência de calor dá-se num pequeno intervalo de tempo. Este curto intervalo de tempo pode ser insuficiente para que o composto intermetálico evoluía para uma fase estável durante o arrefecimento, acabando por se transformar em uma fase metastável. A presença de elementos residuais no aço inoxidável e liga de alumínio podem afetar a formação de determinadas fases. Visto que o diagrama de fases ferro-alumínio apenas tem em conta estes dois materiais.

Na Figura 4.18 é possível analisar o intervalo de valor das microdurezas realizadas no intermetálico da amostra EW53L, comparando esse intervalo com os intervalos de valores presentes na Tabela 4.2, é possível prever que a fase formada seja  $Fe_3Al$ . Mas através da análise EDS (spectrum 8 e 9), a percentagem atómica de elementos químicos presentes no intermetálico, não corresponde à fase  $Fe_3Al$ . Enquadrando a percentagem atómica de elementos químicos obtidos na análise EDS, no diagrama de fase ferro-alumínio, verifica-se

que a possível fase formada é uma fase metastável. É possível analisar fendas presentes no intermetálico, criadas pelo comportamento frágil, que o impede de se deformar.



**Figura 4.18-** Análise EDS à amostra EW53L, na zona das indentações nº 4, 5, 6 e 7.

Na Figura 4.19 o intervalo de valor de microdureza na amostra EW54L varia entre 458 Hv e 410 Hv, com este resultado através da Tabela 4.2 é possível prever que a fase constituinte do intermetálico seja FeAl. Com a análise EDS realizada no intermetálico é possível averiguar que a percentagem atômica de elementos químicos presentes no intermetálico não é compatível com a percentagem de elementos químicos presentes na fase FeAl. Analisando o diagrama de fases ferro-alumínio verifica-se que para uma das análises EDS (spectrum 2) a fase formada é uma fase metastável, já em uma outra análise (spectrum 1) apresenta uma percentagem de elementos típica da fase  $Fe_2Al_5$ . Duas análises EDS com diferentes percentagens de elementos químicos, presentes na mesma zona de análise, pode ocorrer devido à captação de espectros de elementos atômicos na vizinhança dos intermetálicos. Averigua-se a presença de fendas no intermetálico e uma cavidade de grande dimensão.

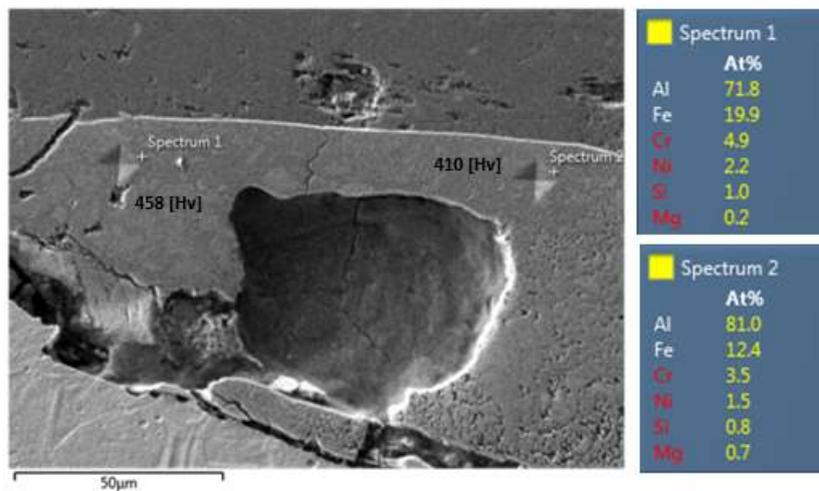
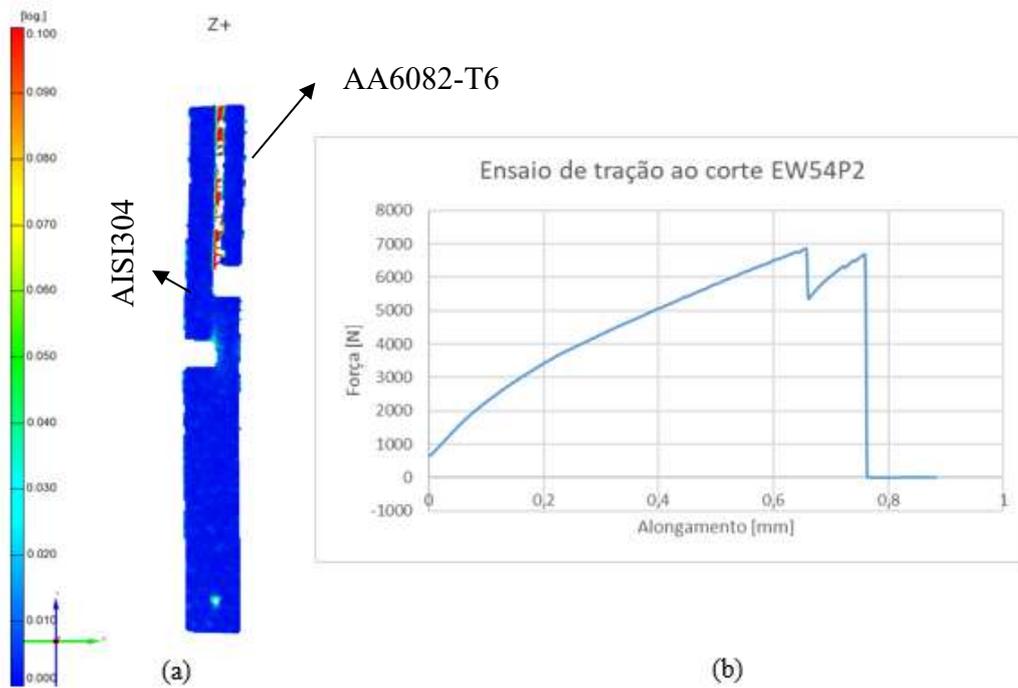


Figura 4.19- Análise EDS à amostra EW54L, junto das indentações nº 3 e 4.

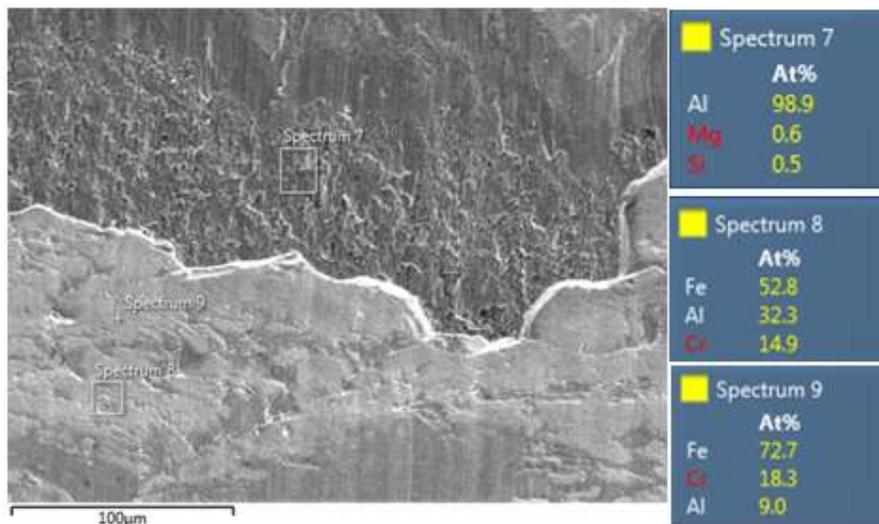
#### 4.10. Ensaios de tração ao corte

Os ensaios de tração ao corte realizados à amostra EW54P2 e EW54P3, apresentam comportamentos semelhantes, mas intervalos de valores diferentes. No ensaio EW54P2 a carga máxima suportada foi de 6681 Newton, o alongamento máximo de 0,883 mm. No ensaio EW54P3 carga máxima suportada foi de 6043 Newton, o alongamento máximo de 0,486 mm. Na tração dos provetes EW54P2 e EW54P3, ambos possui um comportamento específico, possível de observar no mapa de deformação, onde ocorre a quebra de ligações numa região primária Figura 4.20 (a), formando um pico de carga e só depois quebra-se a ligação soldada na região pretendida, formando um segundo pico de carga Figura 4.20 (b). Este comportamento difere-se do ensaio de tração ao corte realizado no ensaio explosivo EW34 (ANEXO B), visto que este atinge um pico e fratura na zona de soldadura.



**Figura 4.20-** Ensaio de tração ao corte: (a) mapa de deformação do provete; (b) curva força alongamento do ensaio de tração ao corte EW54P2

Na Figura 4.21, é possível observar a superfície de rotura e análise EDS, no aço inoxidável. Da observação da imagem, é possível salientar linhas verticais que correspondem à texturização provocada pela retificação inicial do provete. Verifica-se zonas de fratura frágil, pela presença de deformação plástica pontual.



**Figura 4.21-** Análise EDS da superfície de rotura da zona de aço inoxidável do ensaio EW54 provete 2.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é estudar a influência do estado de superfície das chapas, na qualidade da soldadura por explosão, na ligação da liga de alumínio AA6082-T6 ao aço inoxidável AISI304. O trabalho realizado permitiu retirar as seguintes conclusões:

- O ensaio EW54 (retificada) possui intermetálicos de maior dureza e dimensões comparativamente ao ensaio EW53 (lixada), este facto pode ser explicado pela utilização de uma altura de explosivo superior no ensaio EW54;
- O ensaio EW54 (retificada) possui um maior número de pontos de ancoragem comparativamente ao ensaio EW53 (lixada), o que pode explicar a melhor qualidade da soldadura no ensaio EW54;
- A variação do estado de superfície inicial das soldaduras, EW54 (Retificada) e EW53 (lixada), pode estar na origem de o ensaio EW54 ter um maior número de pontos de ancoragem;
- Grande parte das fases formadas nos compostos intermetálicos, correspondem a fases metastáveis, não sendo possível associa-los aos valores de dureza identificados;
- Os compostos intermetálicos do ensaio EW54 nos ensaios de microdureza registaram elevados valores de dureza, o que pode explicar o comportamento frágil da ligação na interface e a rotura na zona de soldadura;
- Nos ensaios de tração ao corte realizados, as fraturas do provete de tração, dá-se na zona de soldadura, podendo-se aferir que a ligação soldada não é consistente;
- Quanto maior o rácio de explosivo, maior número de fendas e cavidades presentes na intermetálico, devido à fragilidade que incapacita de se deformar plasticamente;
- A influencia do estado de superfície na qualidade das ligações indicia que a superfície retificada apresenta melhores resultados do que a superfície lixada. No entanto esta conclusão não pode ser completamente sustentada, devido a utilização de diferentes rácios explosivos;
- A realização de soldaduras com alteração do estado de superfície, quando comparadas com estudos anteriores (sem alteração do estado de superfície), para as mesmas condições de processo, apresentam uma melhor qualidade.

- **Propostas para trabalhos futuros:**

Devido as condicionantes verificadas, sugere-se que para trabalhos futuros exista um estudo de análise comportamental dos explosivos utilizados para realizar a aceleração de placas. Sugere-se que a alteração de superfície seja substancial, alterando esta através da maquinação de canais ou até mesmo a perfuração de cavidades, de forma a criar melhores pontos de ancoragem.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Pearson, “Introduction to high-energy-rate metalworking,” in *Explosive Welding, Forming and Compaction*, 1st ed., T.Z. Blazynski, Ed. Applied Science Publishers LTD, 1983, pp. 1–2.
- [2] S. H. ; Carpenter and R. . Wittman, “Explosion Welding.,” *Mech. Eng.*, vol. 100, no. 5, pp. 177–199, 1975.
- [3] 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, 2019.
- [4] L.R. Carl, “Brass Welds, made by detonation impulse,” *Met. Prog.*, pp. 102–103, 1944.
- [5] B. Crossland, “Review of the present state-of-the-art in explosive welding,” no. January, pp. 8–20, 1976.
- [6] V. Philipchuc and F. L. Bois, “U.S. Patent 3,024,526-Explosive welding,” 1962.
- [7] A. H. Holtzman, “U.S. Patent 3,140,539-Process for Bonding Metals by Explosive Means,” 1964.
- [8] K. Weman, “*Pressure welding methods*”, in *Welding Processes Handbook*,. Woodhead Publishing, 2012.
- [9] C. Merriman, “The fundamentals of explosion welding,” *Weld. J. (Miami, Fla)*, vol. 85, no. 7, pp. 27–29, 2006.
- [10] F. Findik, “Recent developments in explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1081–1093, 2011.
- [11] 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, 2018.
- [12] A. Loureiro, R. Mendes, J. B. Ribeiro, R. M. Leal, and I. Galvão, “Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminium,” *Mater. Des.*, vol. 95, pp. 256–267, 2016.

- [13] M. M. Hoseini Athar and B. Tolaminejad, “Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding,” *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 516–525, 2015.
- [14] T. Blazynsky, *Explosive Welding, Forming and Compaction*. 1983.
- [15] B. B. Sherpa, P. D. Kumar, and U. Batra, “Study of the Explosive Welding Process and Applications,” pp. 33–39.
- [16] G. R. Cowan, O. R. Bergmann, and A. H. Holtzman, “Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 2, no. 11, pp. 3145–3155, 1971.
- [17] H. El-Sobky, “Mechanics of Explosive Welding,” in *Explosive Welding, Forming and Compaction*, 1 st Editi., T.Z.Blazynski, Ed. Applie Science Publishers LTD, 1983, pp. 195–200.
- [18] D. B. Cleland, “Explosives,” in *Explosive Welding, Forming and Compaction*, 1 st Editi., B. TZ, Ed. Applied Science Publishers LTD, 1983, pp. 175–177.
- [19] R. Mendes, J. Ribeiro, I. Plaksin, and J. Campos, “Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal particles,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1426, no. March, pp. 267–270, 2012.
- [20] R. Mendes, J. B. Ribeiro, and A. Loureiro, “Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration,” *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 182–192, 2013.
- [21] R. Mendes, J. Ribeiro, I. Plaksin, J. Campos, and B. Tavares, “Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric micro-balloons,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 500, no. 5, 2014.
- [22] M. D. Chadwick AND P. W. Jackson, “Direct Measurement of Bonding Parameters,” in *Explosive Welding, Forming and Compaction*, 1 st Editi., B. TZ, Ed. Applied Science Publishers LTD, 1983, pp. 251–253.
- [23] J. Quaresma, L. Deimling, J. Campos, and R. Mendes, “Active and Passive Optical Fiber Metrology for Detonation Velocity Measurements,” *Propellants, Explos. Pyrotech.*, vol. 45, no. 6, pp. 921–931, 2020.
- [24] 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.

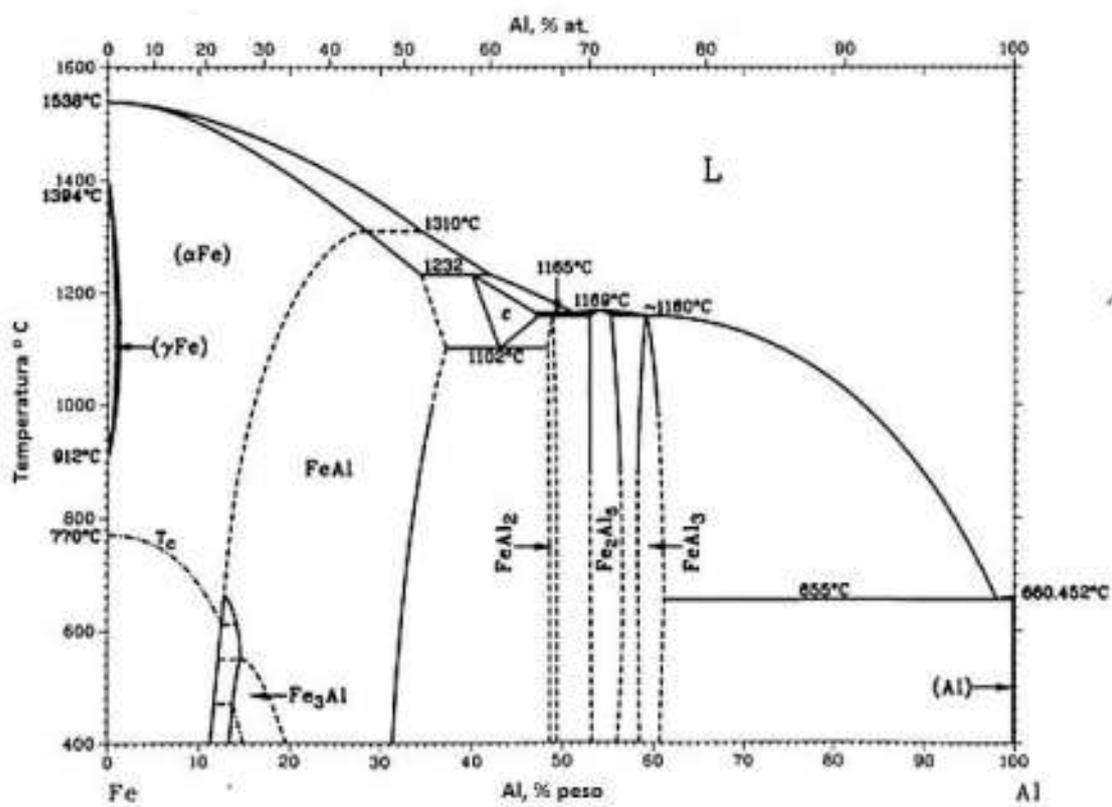
- 
- [25] D. B. Cleland, “Basic Consideration for Commercial Processes,” in *Explosive Welding, Forming and Compaction*, 1st ed., T.Z. Blazynski, Ed. Applied Science Publishers LTD, 1983, pp. 159–165.
- [26] J. B. Ribeiro, R. Mendes, and A. Loureiro, “Review of the weldability window concept and equations for explosive welding,” *J. Phys. Conf. Ser.* 500, 2014.
- [27] J. M. Walsh, R. G. Shreffler, and F. J. Willig, “Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions,” *J. Appl. Phys* 24, 1953.
- [28] H. . Wylie, P. E. . Williams, and B. Crossland, “Proc. of the 3rd Int. Conf. of the Center for High Energy Rate Forming (Denver, CO),” 1971.
- [29] G. . Abrahamson, “Permanente periodic surface deformation due to a travelling jet,” *J. Appl. Mech.* 83 519-28, 1961.
- [30] V. A. Simonov, “Binding criterion for metals with explosive welding,” *Combust. Explos. Shock Waves* 27 121-3, 1991.
- [31] 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* 19 689-92, 1983.
- [32] R. H. Wittman, “Proc. of the 2nd Int. Symp. on the Use of Explosive Energy in Manufacturing (Marianskie Lazni, Czechoslovakia),” 1973, pp. 153–168.
- [33] W. S. de Rosset, “Analysis of Explosive Bonding Parameters,” *Mater. Manuf. Process* 21 634-8, 2006.
- [34] K. Buijs, “TRIPLATE®: The ultimate solution for welding aluminium to steel,” *HSB Int.*, vol. 53, no. 3, pp. 45–48, 2004.
- [35] B. Y. D. Cutter, “What You Can Do with,” *Weld. J.*, no. July, pp. 20–21, 2006.
- [36] 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, no. March, pp. 340–349, 2018.
- [37] J. H. Han, J. P. Ahn, and M. C. Shin, “Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding,” *J. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 1, pp. 13–18, 2003.
- [38] 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, no. June, pp. 432–442, 2018.
-

- [39] J. Nunes, “Soldaduras Similares e Dissimilares, por explosão, de AA 6082-T6 e aço AISI 304.” Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto, Faculdade de ciências e tecnologias da Universidade de Coimbra, 2016.
- [40] J. Fonseca, “Soldadura por explosão do aço inoxidável AISI304 à liga AA6082-T6.” Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Projeto Mecânico, Faculdade de ciências e tecnologias da Universidade de Coimbra, 2017.
- [41] L. Machado, “Efeito da placa intermédia na soldadura por explosão de uma liga de alumínio a um aço inoxidável.” Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto, Faculdade de ciências e tecnologias da Universidade de Coimbra, 2018.
- [42] X. Guo, M. Fan, L. Wang, and F. Ma, “Bonding Interface and Bending Deformation of Al/316LSS Clad Metal Prepared by Explosive Welding,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 25, no. 6, pp. 2157–2163, 2016.
- [43] X. Li, H. Ma, and Z. Shen, “Research on explosive welding of aluminum alloy to steel with dovetail grooves,” *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 815–824, 2015.
- [44] G. R. Cowan and A. H. Holtzman, “Flow configurations in colliding plates: explosive bonding,” *J. Appl. Phys* 34, pp. 928–939, 1963.
- [45] A. . Deribas and I. . Zakharenko, “Surface effects with oblique collisions between metallic plates,” *Combust. Explos. Shock Waves* 10, pp. 358–367, 1974.
- [46] I. . Zakharenko, “Critical conditions in detonation welding,” *Combust. Explos. Shock Waves* 8, pp. 341–345, 1972.
- [47] Aalco metals Ltd, “Aluminium Alloy 6082 - T6/T651 Plate.” pp. 24–25, 2013.
- [48] Irestal Group, “Fichas Técnicas do Aço Inoxidável.”
- [49] M. Kunzel, O. Nemeč, and J. Pachman, “Terminal wall velocities of emulsion explosive charges,” pp. 1–4, 2013.
- [50] R. Mendes, J. B. Ribeiro, and A. Loureiro, “Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration,” *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 182–192, 2013.
- [51] K. U.R and B. B.P, “Al-Fe (Aluminum - Iron),” in *ASM Metals Handbook*, Volume 3., 1992.

- [52] M. R. K. G. Shiran, H. Bakhtiari, S. A. A. A. Mousavi, G. Khalaj, and S. M. Mirhashemi, “Effect of stand-off distance on the mechanical and metallurgical properties of explosively bonded 321 austenitic stainless steel - 1230 aluminum alloy tubes,” *Mater. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 291–302, 2017.



## ANEXO A



Fonte: [51]



## ANEXO B



Fonte: [40]



## APÊNDICE A



Mó utilizada na retificadora, com classificação do grão quanto à dureza de [S] (duro).



## APÊNDICE B



Superfícies da placa de base (AISI304) alteradas, EW53 (lixada) e EW54(retificada).



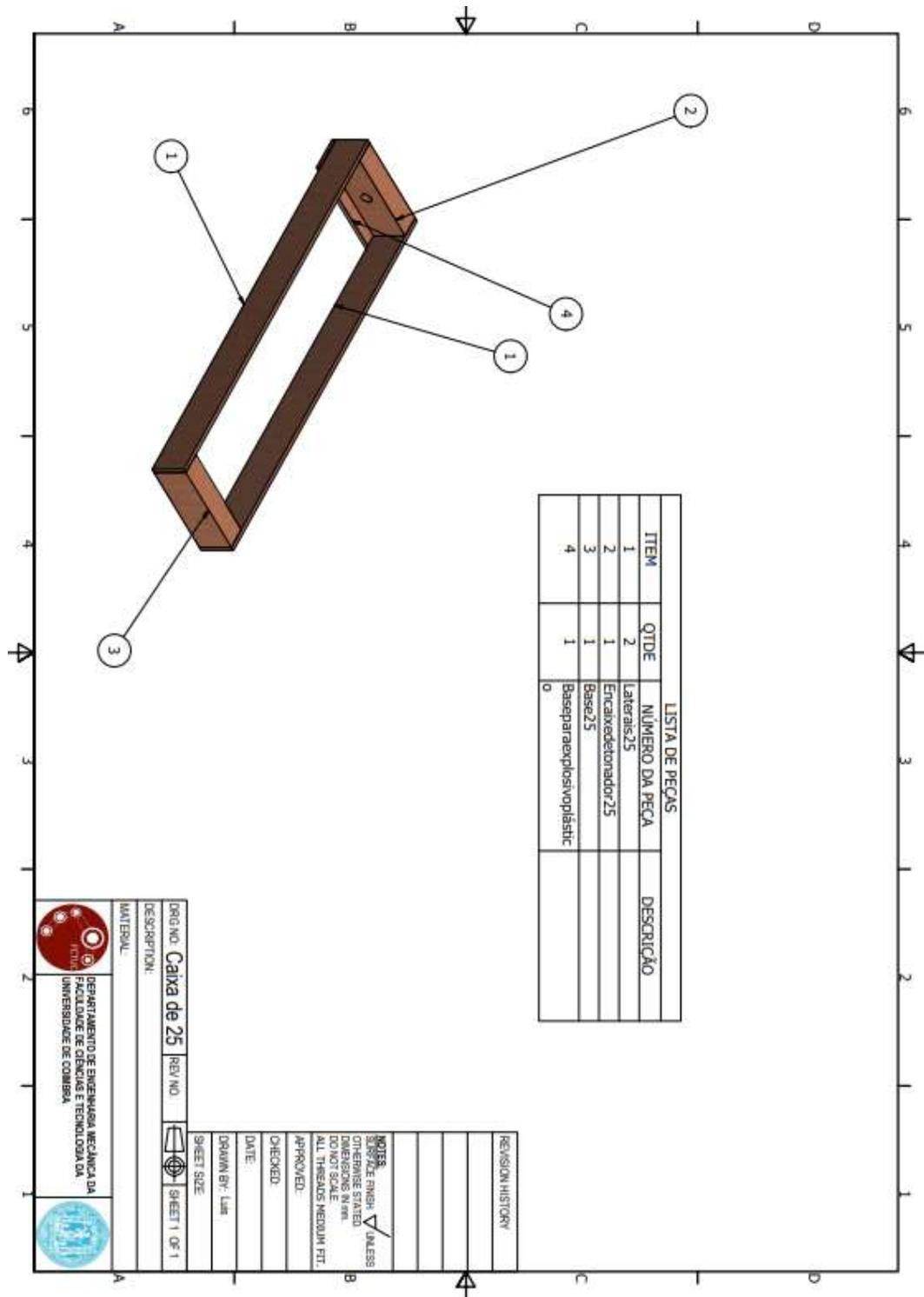
## APÊNDICE C

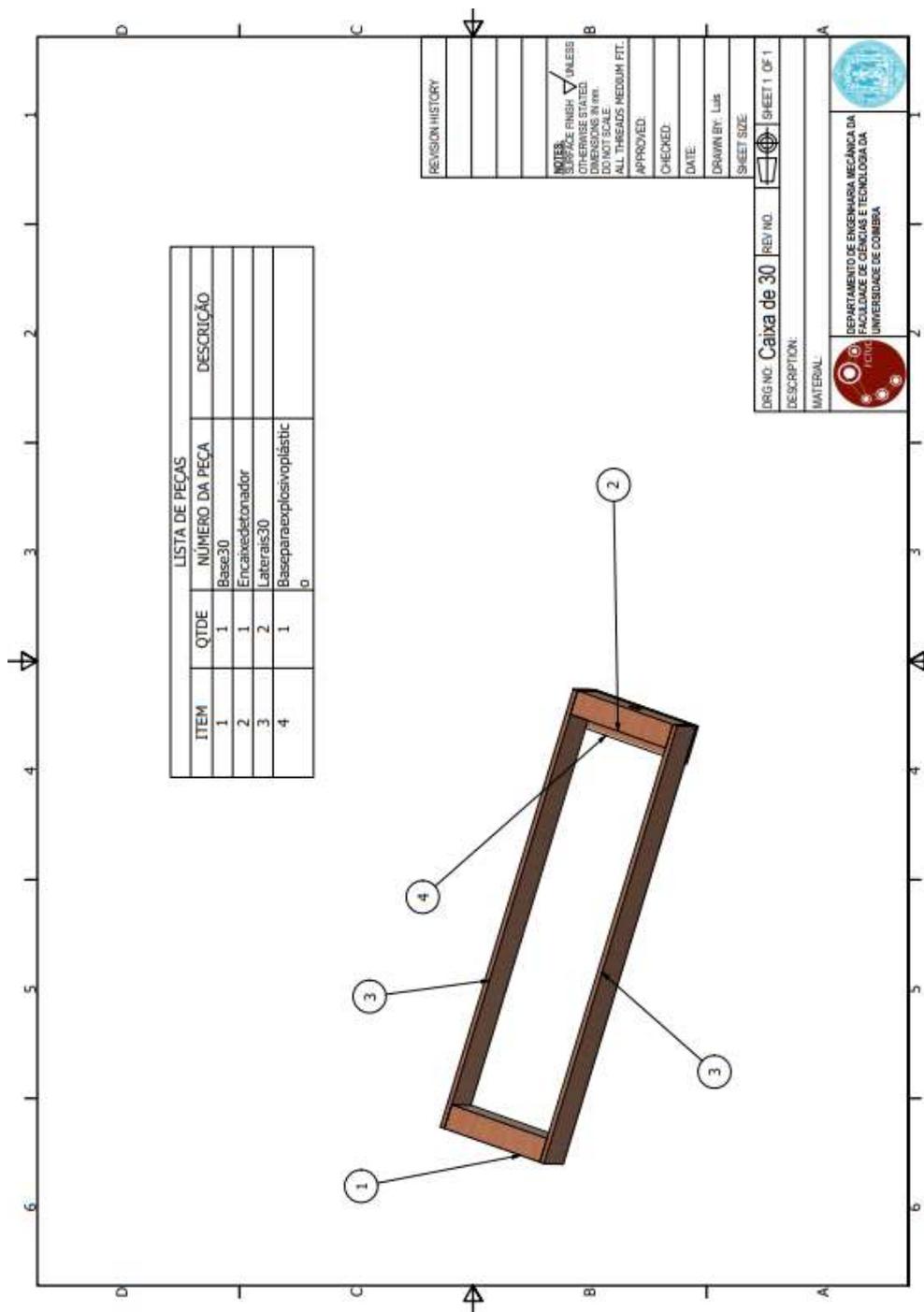


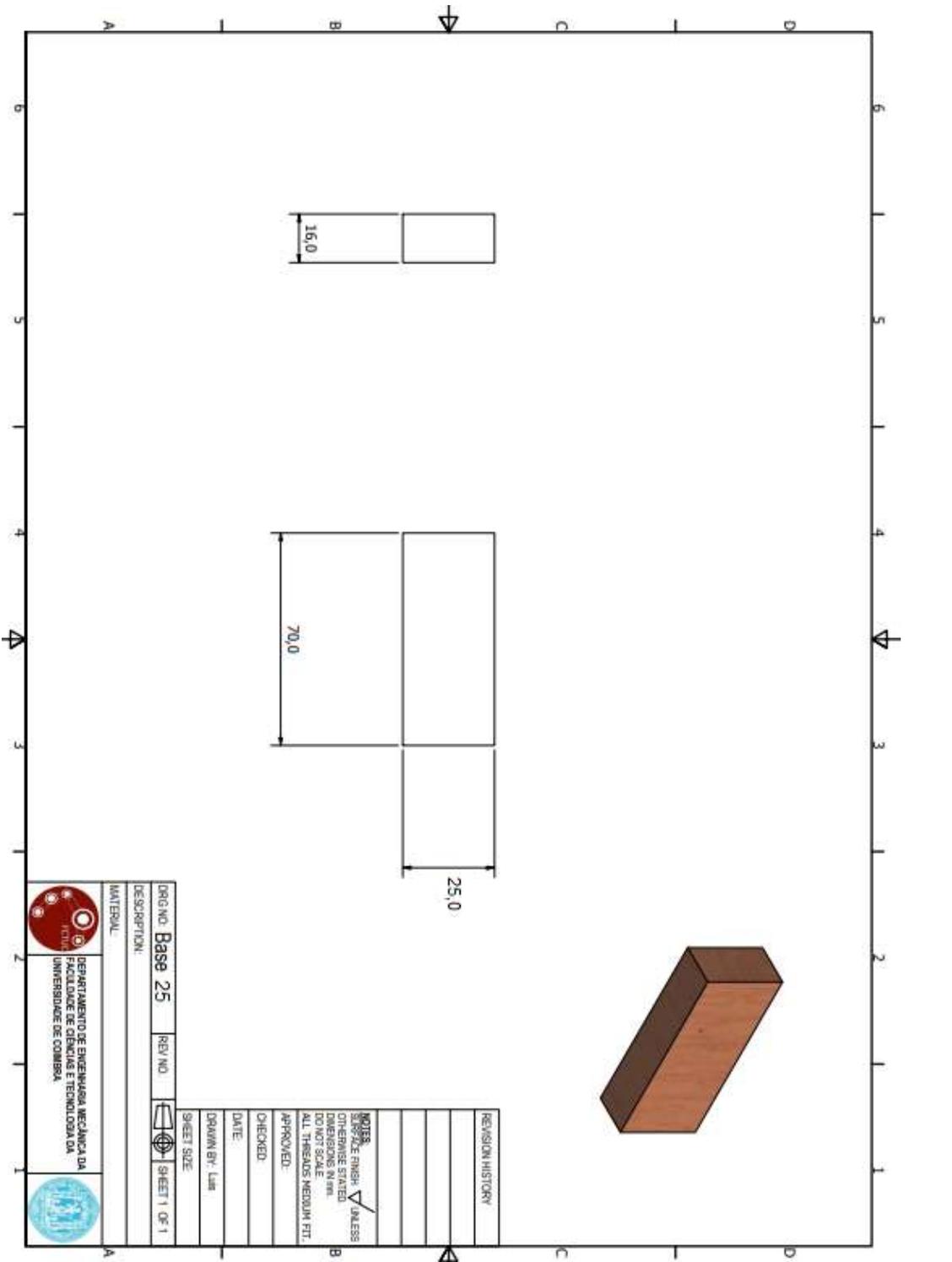
Equipamento de análise de rugosidade.







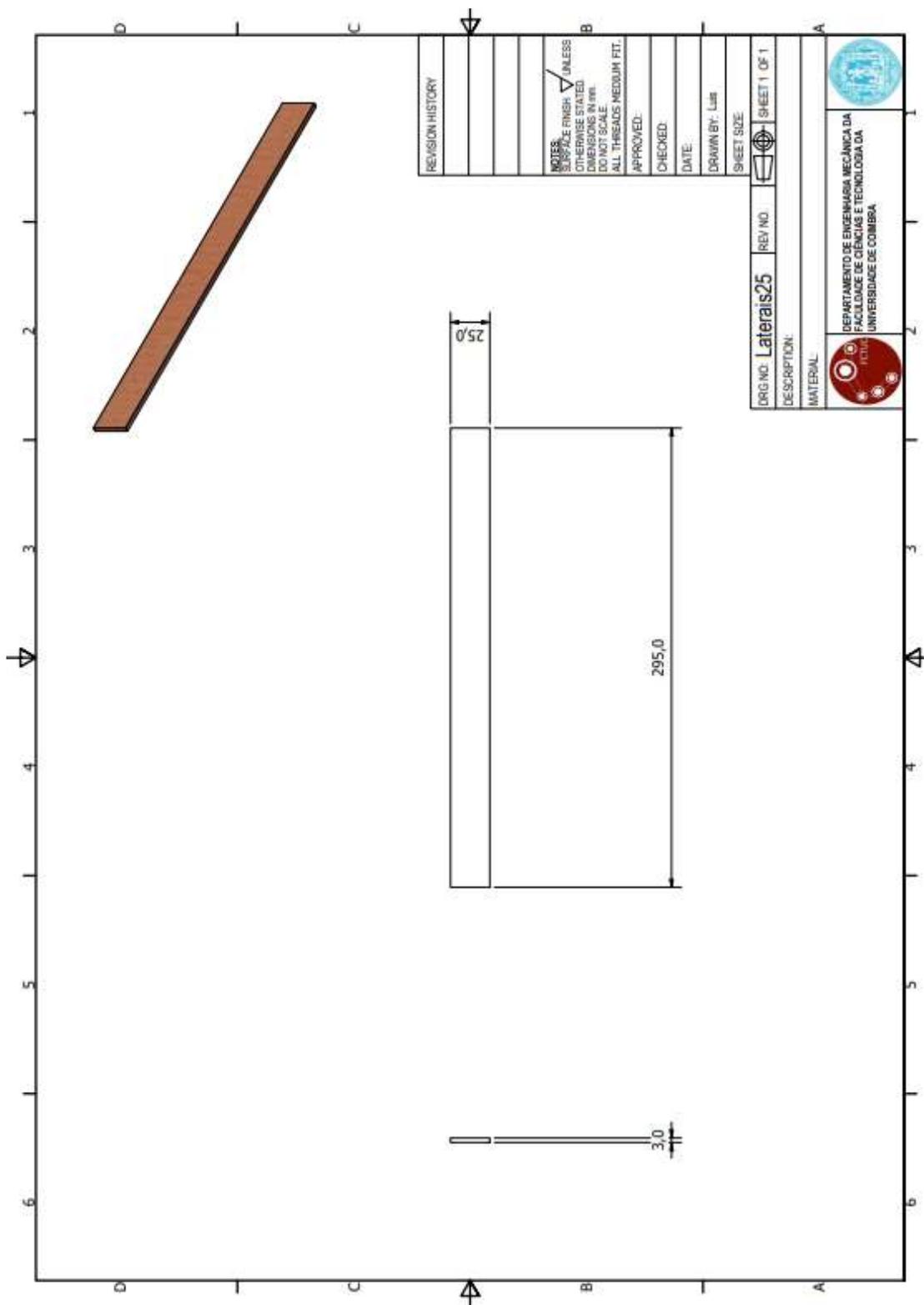


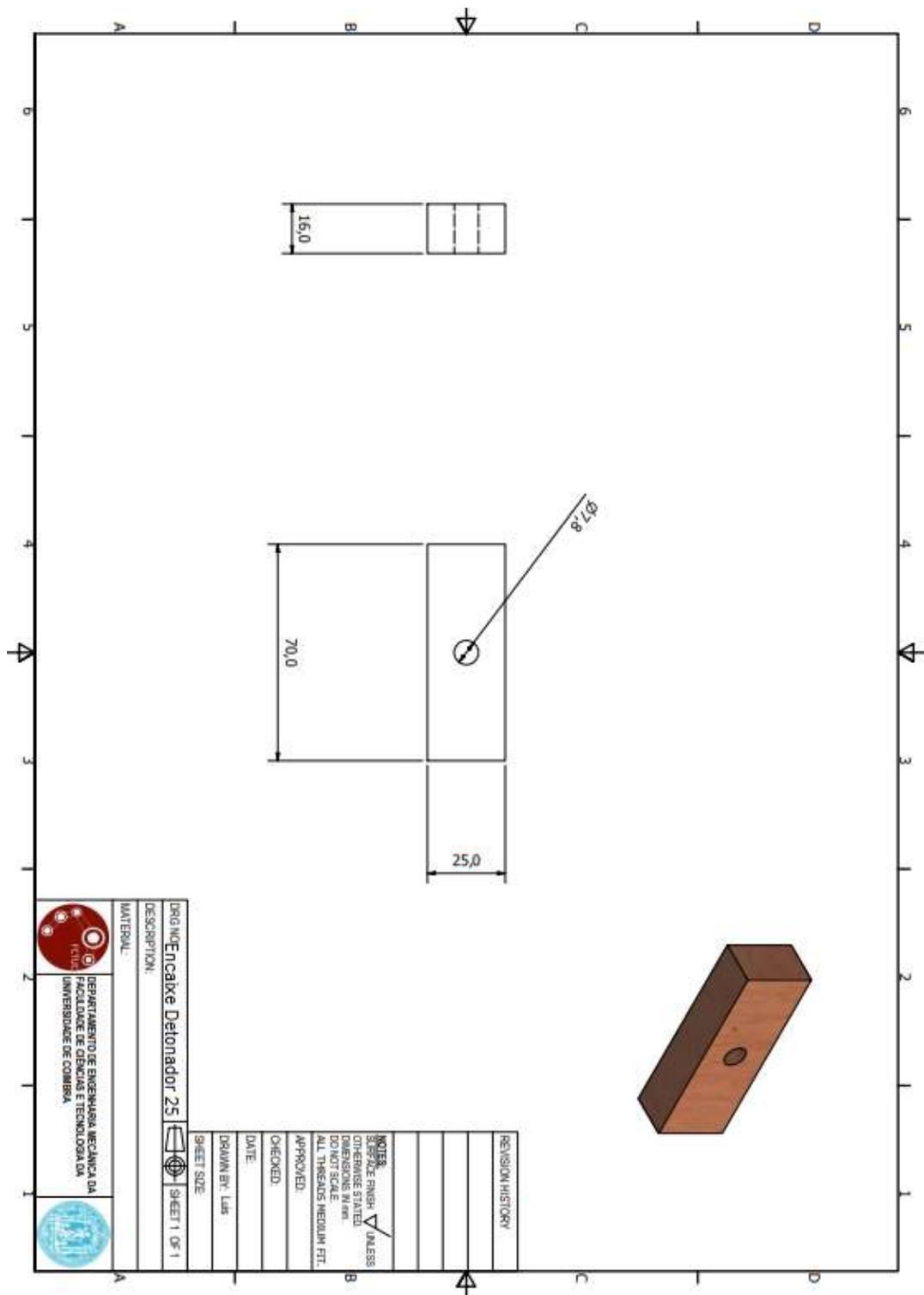


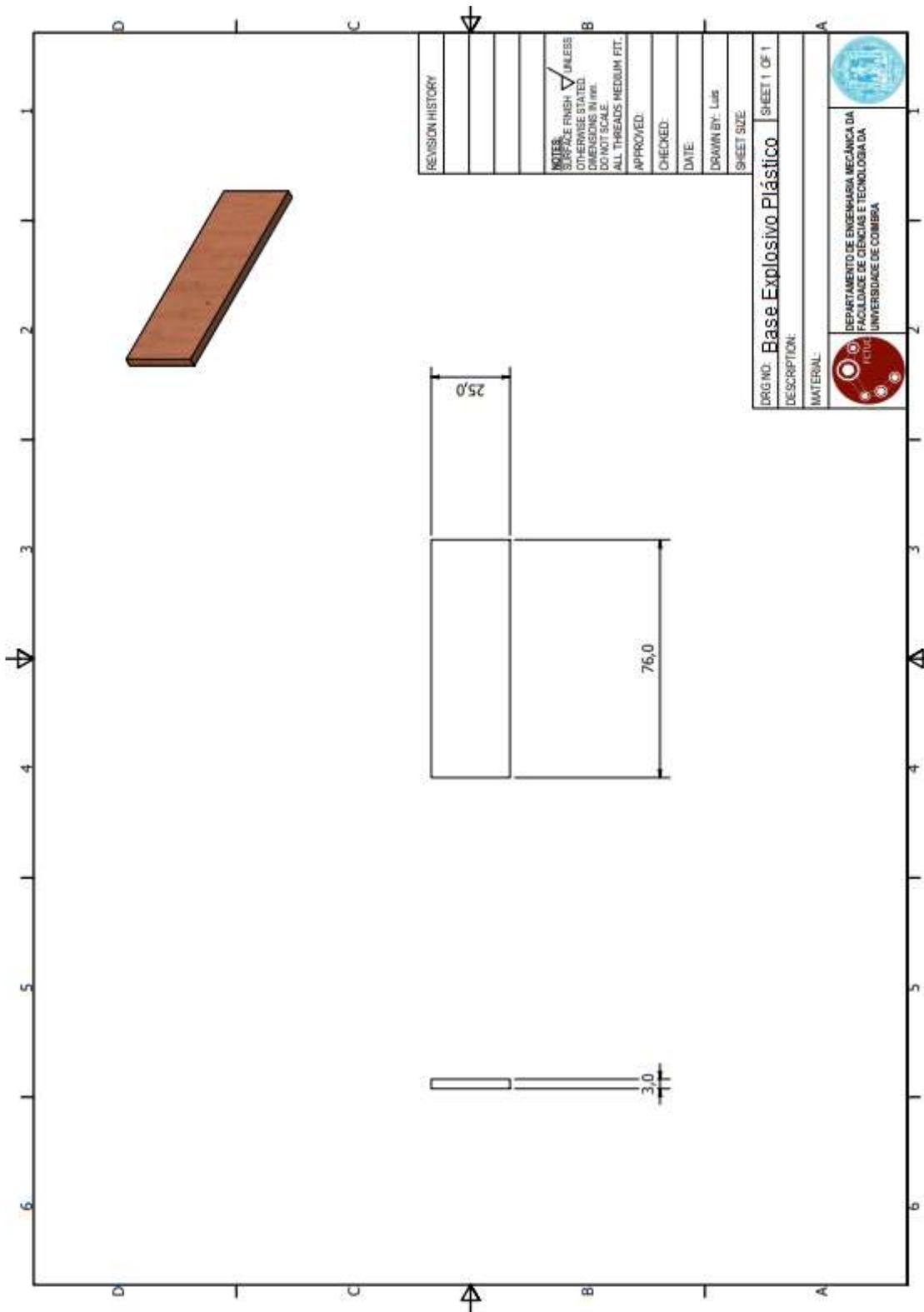
ORIG. NO. Base 25	REV. NO.	SHEET 1 OF 1
DESCRIPTION:		
MATERIAL:		

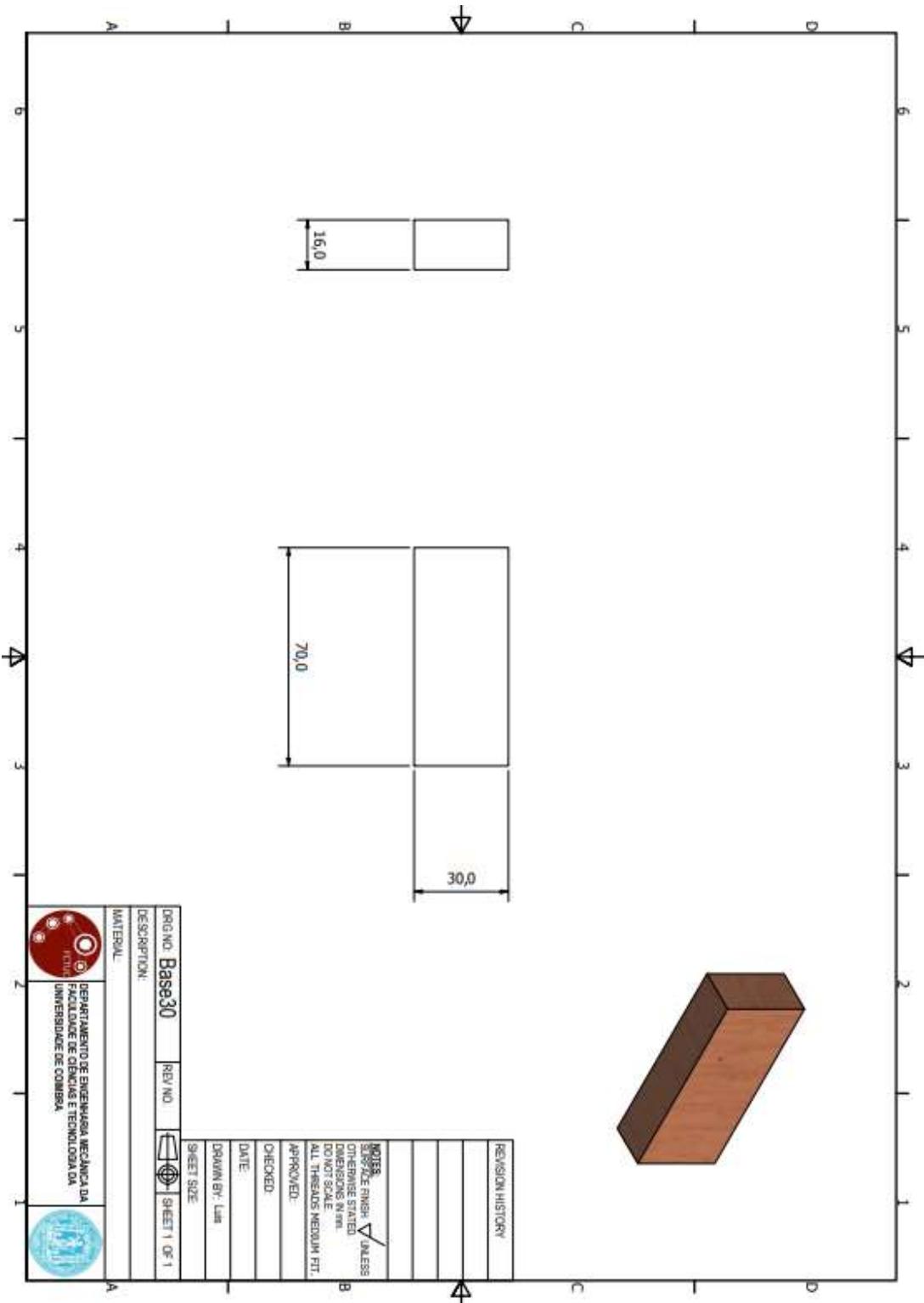
REVISION HISTORY
NOTES:
✓ SURFACE FINISH UNLESS OTHERWISE STATED
DIMENSIONS IN mm
DO NOT SCALE
ALL THREADS MEDIUM FIT.
APPROVED:
CHECKED:
DATE:
DRAWN BY: LIM
SHEET SIZE:

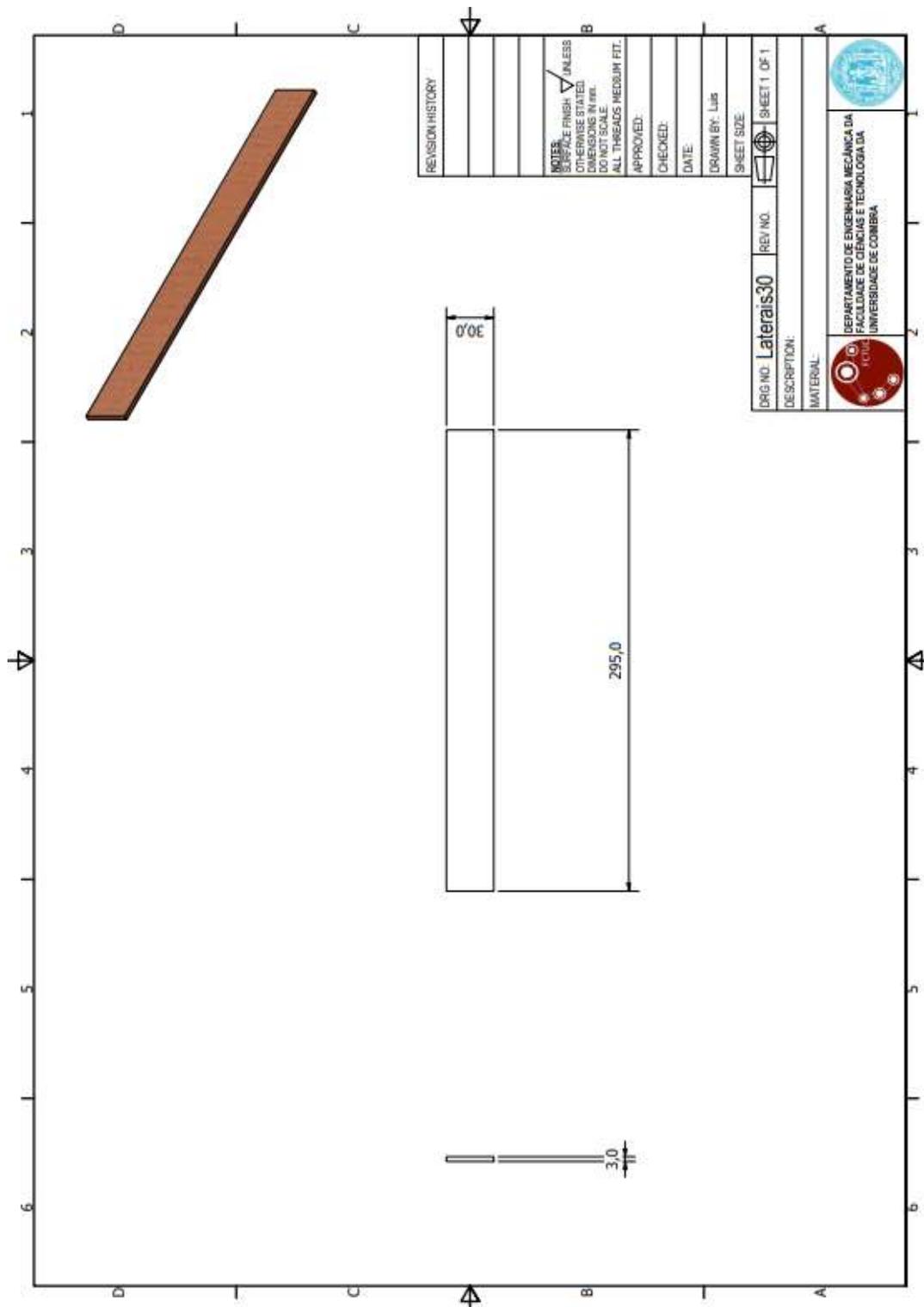

 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA  
 FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA  
 UNIVERSIDADE DE COIMBRA

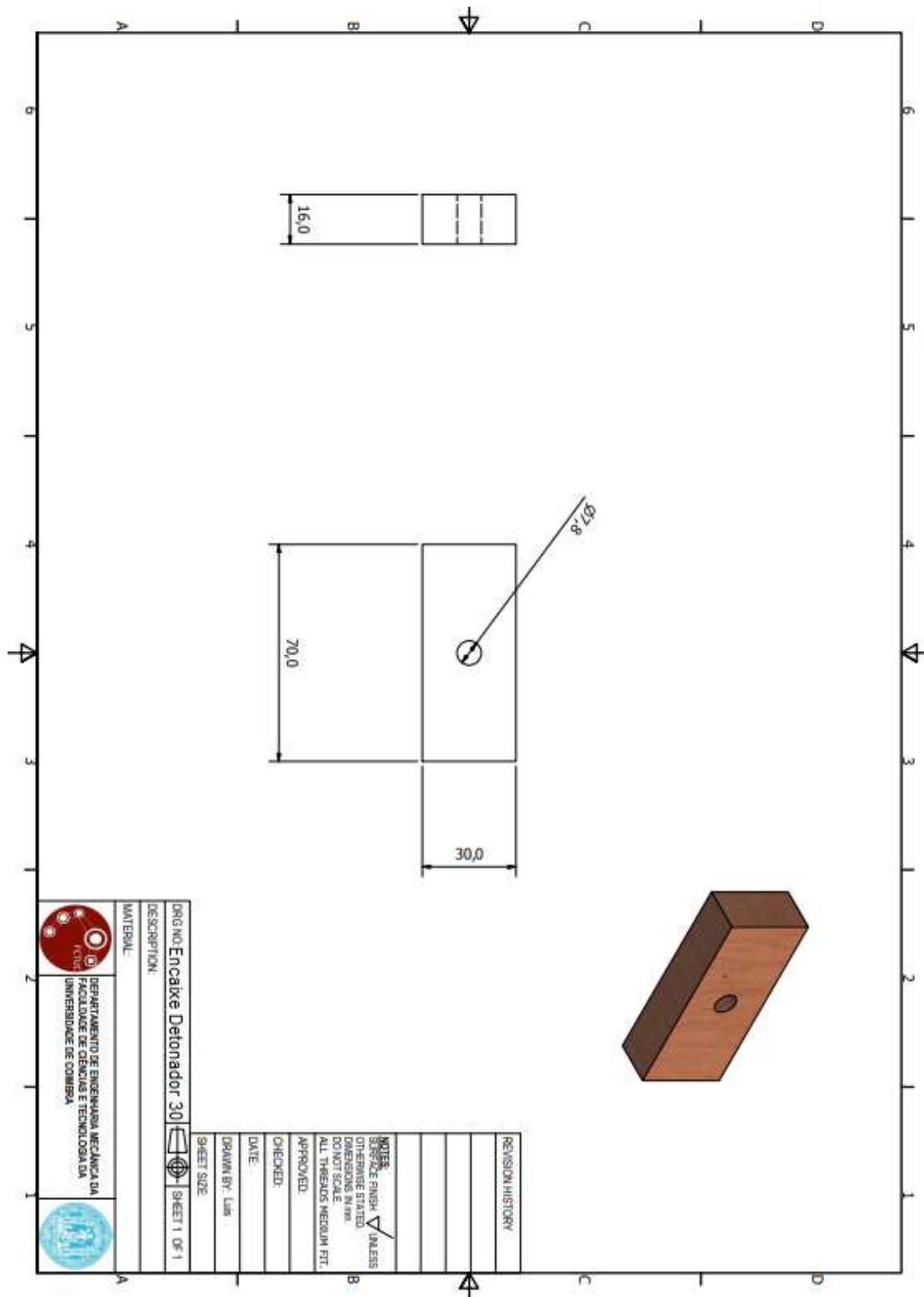




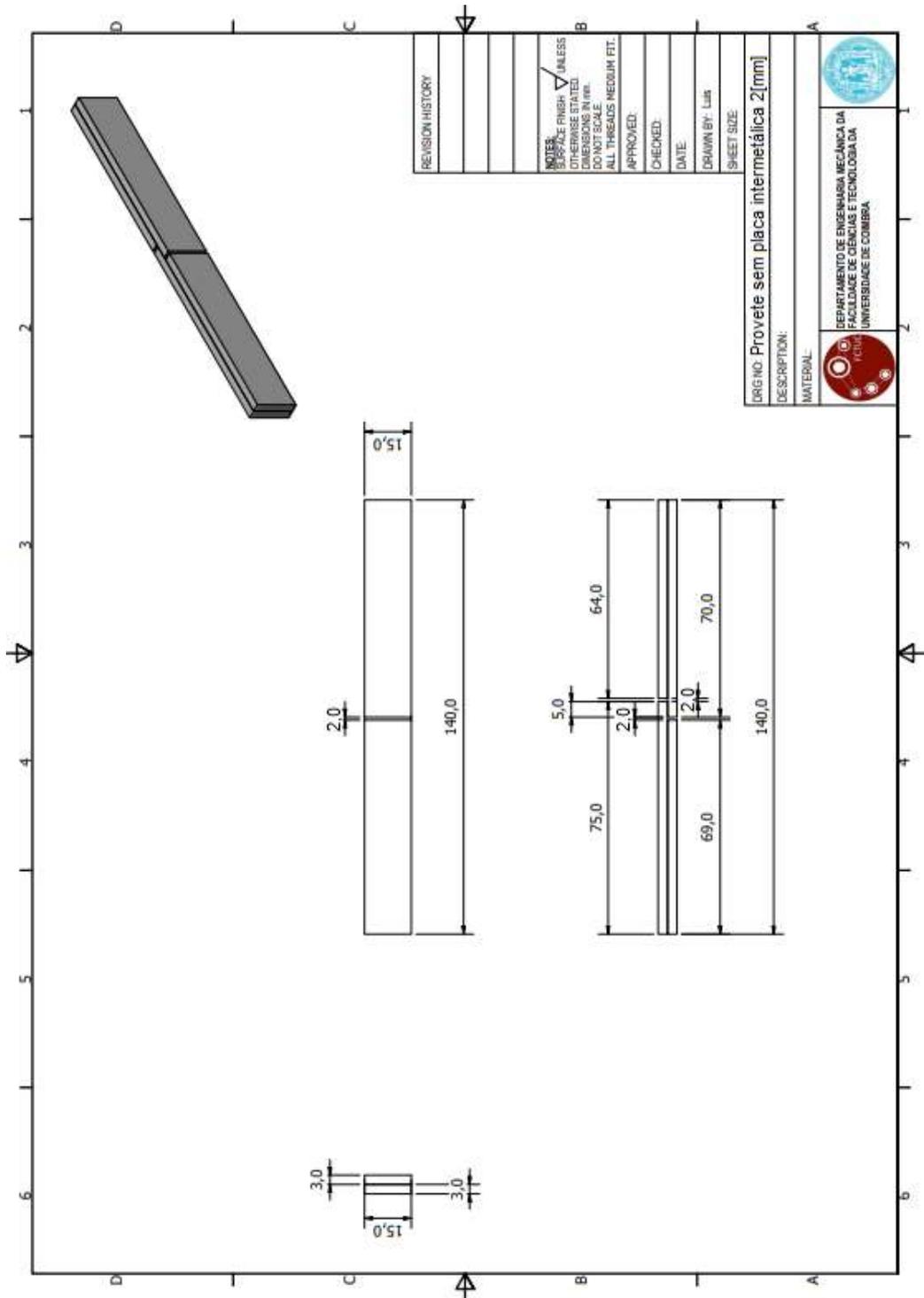








# APÊNDICE E





## APÊNDICE F

EW 53 L



EW 54 L



Análise das amostras EW53L e EW54L para uma ampliação de 50x.



## APÊNDICE G

EW53T



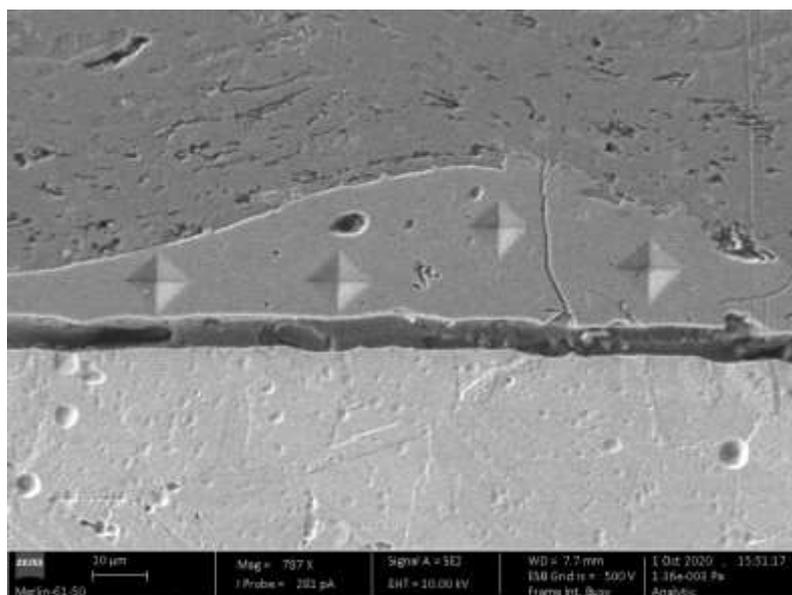
EW54T



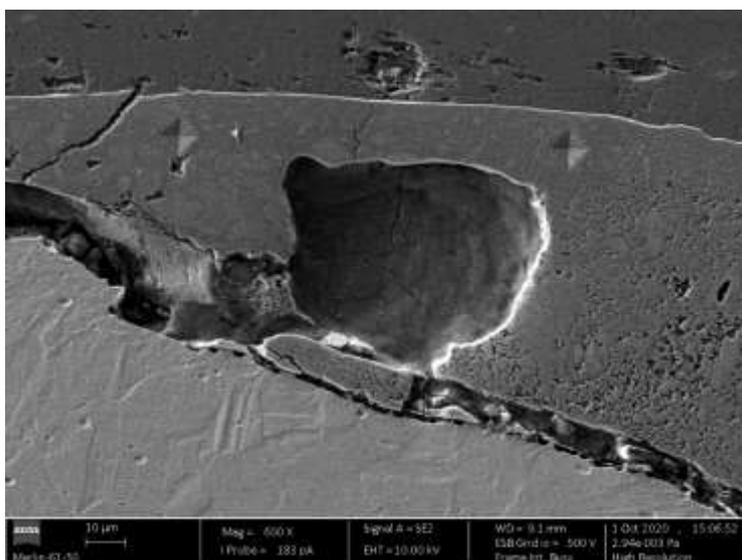
Análise das amostras EW53T e EW54T para uma ampliação de 50x.



## APÊNDICE H



SEM da amostra EW53L indentações nº4, 5, 6 e 7.



SEM da amostra EW54L indentações nº 3 e 4.