

José Henrique da Silva Friães Santos

# Soldadura por explosão de alumínio a aço carbono, recorrendo a chapa intermédia

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

Julho/2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Soldadura por explosão de alumínio a aço carbono, recorrendo a chapa intermédia**

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

**Autor**

**José Henrique da Silva Friães Santos**

**Orientadores**

**Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**

**Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro  
Professor Associado com Agregação da Universidade de  
Coimbra

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

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

---

**Coimbra, julho, 2018**



*“However bad life may seem, there is always something you can do and succeed at. Where there's life, there's hope”.*

Stephen Hawking



## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que ajudaram na realização desta dissertação porque sem elas não seria possível.

Ao LEDAP pela cedência das condições experimentais necessárias à realização da parte experimental deste trabalho.

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes, por todo o apoio na realização dos ensaios, pelos ensinamentos transmitidos que vieram enriquecer o trabalho e pela sua orientação.

Ao Professor Doutor Ivan Galvão, pela sua disponibilidade, paciência e colaboração principalmente na redação da dissertação.

Ao Gustavo Senna e ao Luís Machado, por toda a ajuda prestada, principalmente quando as coisas corriam menos bem.

Ao Grupo de Tecnologia pelo bom ambiente e sentido de entreajuda que proporcionou.

A todos os meus amigos, principalmente ao Marco por toda a ajuda e disponibilidade que me ofereceu longo desta etapa.

À minha namorada Cristina, que me apoiou sempre e me ajudou quando mais precisava.

À minha família, que sem o carinho e apoio dela nada disto era possível.



## Resumo

A soldadura por explosão é um dos processos em que a ligação alumínio a aço carbono se torna possível, sendo que, esta ligação normalmente não requer o uso de placa intermédia para que se obtenham boas propriedades na ligação. O principal objetivo deste trabalho é a comparar juntas soldadas por explosão de aço carbono-alumínio AA6082 com a utilização, ou não, de uma chapa intermédia de alumínio AA1050, sendo estudada a influência de parâmetros como a velocidade de detonação e a velocidade de impacto do ensaio. Foram realizados vários ensaios, com e sem placa intermédia. Nestes ensaios, foram usadas duas misturas explosivas, ANFO e Primer com sensibilizante. Verificou-se que a utilização de Primer como explosivo diminui a quantidade de intermetálicos na interface, o que se pode dever ao uso de um menor rácio de explosivo nestas condições. No ensaio com ANFO, em que se utilizou placa intermédia, as ondas formadas são muito maiores do que no ensaio em que se usou Primer. A tensão máxima ao corte diminuiu e a deformação aumentou com o uso de placa intermédia, isto possivelmente devido ao alumínio AA1050 que foi usado nessa chapa. O uso de chapa intermédia levou a que a fratura dos provetes de tração passasse a ser dúctil, sendo que sem placa intermédia a fratura era maioritariamente frágil. A quantidade de intermetálicos presentes na interface diminuiu com o uso de placa intermédia quando se usou Primer como explosivo, sendo que nos ensaios em que se usou ANFO, a quantidade de intermetálicos passou de pontuais para uma camada contínua junto à interface. O uso de placa intermédia não favorece muito a ligação entre alumínio e aço carbono, sendo que as limitações das ligações em que se usou placa intermédia foram devido ao uso do alumínio AA1050 como chapa intermédia, que pode ser facilmente substituído por outro material.

**Palavras-chave:** Janela de soldabilidade, interface, placa intermédia, velocidade de detonação, soldadura por explosão, Intermetálicos.



## Abstract

Explosion welding is one of the processes which allows the joining of aluminum to carbon-steel. This method normally does not require the use of an intermediate plate to obtain good properties. The main objective of this work is to compare of explosion welded joints of carbon-steel and aluminum AA6082 with and without an intermediate layer of aluminum AA1050. The influence of parameters like the velocity of detonation and velocity of impact will be studied. Several tests were made, some with and some without an intermediate plate. In these tests, two types of explosive mixtures were used: ANFO and Primer with a sensitizer. It has been found that the use of Primer as an explosive decreases the amount of intermetallics at the interface, which may be due to the use of a lower explosive ratio. The use of an intermediate plate led to the appearance of large waves between aluminums. These waves are bigger in the tests with ANFO than with Primer. The maximum shear stress decreased, and the deformation increased with the use of intermediate plate, this is possibly due to the aluminum AA1050 that was used on that plate. Without an intermediary plate, the fracture of the tensile specimens was mostly brittle and by using an intermediary plate the fracture becomes ductile. The amount of intermetallics present at the interface decreased with the use of an intermediate layer (when using Primer as an explosive). When using ANFO, the amount of intermetallics went from punctual to a continuous layer next to the interface. The use of an intermediate plate does not extensively favor the connection between aluminum and carbon-steel. The limitations of the connections when using an intermediate plate have been due to the use of aluminum AA1050 as an intermediate plate, which can easily be replaced by another material.

**Keywords** Weldability window, interface, intermediate plate, detonation speed, explosive welding, intermetallics.



---

## Índice

|   |      |
|---|------|
| Índice de Figuras .....   | ix   |
| Índice de Tabelas .....   | xiii |
| Simbologia e Siglas .....                                       | xv   |
| Simbologia.....   | xv   |
| Siglas .....  | xvi  |
| 1. Introdução.....  | 1    |
| 2. Estado de arte.....  | 3    |
| 2.1. Contextualização histórica.....                            | 3    |
| 2.2. Princípios do processo .....                               | 4    |
| 2.2.1. Características da Interface.....                        | 5    |
| 2.2.2. Mecanismo de formação de ondas .....                     | 6    |
| 2.3. Parâmetros do processo .....                               | 8    |
| 2.3.1. Seleção do explosivo .....                               | 8    |
| 2.3.2. Distância entre placas .....                             | 9    |
| 2.3.3. Janela de soldabilidade .....                            | 10   |
| 2.4. Placa intermédia.....                                      | 14   |
| 2.5. Aplicações do processo.....                                | 14   |
| 2.5.1. Materiais compatíveis.....                               | 14   |
| 2.5.2. Ligações aço-alumínio.....                               | 15   |
| 2.5.3. Aplicações a nível industrial.....                       | 16   |
| 2.6. Vantagens e desvantagens do processo .....                 | 17   |
| 2.7. Formação de compostos intermetálicos .....                 | 17   |
| 2.8. Aspetos a realçar .....                                    | 18   |
| 3. Procedimento experimental .....                              | 19   |
| 3.1. Materiais e equipamentos utilizados.....                   | 19   |
| 3.1.1. Materiais utilizados .....                               | 19   |
| 3.1.2. Equipamentos utilizados.....                             | 20   |
| 3.2. Nomenclatura dos ensaios .....                             | 20   |
| 3.3. Preparação dos ensaios .....                               | 21   |
| 3.3.1. Medição da velocidade de detonação .....                 | 22   |
| 3.4. Realização dos ensaios de soldadura .....                  | 24   |
| 3.5. Preparação das amostras para a análise de resultados ..... | 24   |
| 3.5.1. Corte .....  | 24   |
| 3.5.2. Polimento.....   | 25   |
| 3.5.3. Ataque químico .....                                     | 25   |
| 3.5.4. Microdureza.....   | 25   |
| 3.5.5. Ensaios de tração-corte.....                             | 26   |
| 3.5.6. Análise SEM/EDS .....                                    | 26   |
| 4. Resultados.....  | 27   |
| 4.1. Janela de soldabilidade .....                              | 27   |
| 4.2. Análise Macroscópica.....                                  | 30   |

|        |                                 |    |
|--------|---------------------------------|----|
| 4.2.1. | AA/CS-PRI15.....                | 30 |
| 4.2.2. | AA/CS-ANF20.....                | 31 |
| 4.2.3. | AA/CS-ANF25.....                | 31 |
| 4.2.4. | AA/AA/CS-ANF25.....             | 32 |
| 4.2.5. | AA/AA/CS-PRI15.....             | 32 |
| 4.3.   | Análise microscópica.....       | 33 |
| 4.3.1. | AA/CS-PRI15.....                | 33 |
| 4.3.2. | AA/CS-ANF20.....                | 34 |
| 4.3.3. | AA/CS-ANF25.....                | 35 |
| 4.3.4. | AA/AA/CS-ANF25.....             | 37 |
| 4.3.5. | AA/AA/CS-PRI15.....             | 38 |
| 4.4.   | Microdureza.....                | 40 |
| 4.4.1. | AA/CS-PRI15.....                | 40 |
| 4.4.2. | AA/CS-ANF20.....                | 40 |
| 4.4.3. | AA/CS-ANF25.....                | 41 |
| 4.4.4. | AA/AA/CS-ANF25.....             | 42 |
| 4.4.5. | AA/AA/CS-PRI15.....             | 42 |
| 4.5.   | Ensaaios de tração-corte.....   | 43 |
| 5.     | Discussão de resultados.....    | 47 |
| 6.     | Conclusão.....                  | 53 |
| 7.     | Trabalhos Propostos.....        | 55 |
|        | Referências Bibliográficas..... | 57 |
|        | Apêndice A.....                 | 61 |
|        | Apêndice B.....                 | 63 |
|        | Apêndice C.....                 | 67 |
|        | Apêndice D.....                 | 68 |
|        | Apêndice E.....                 | 70 |
|        | Apêndice F.....                 | 73 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Exemplo da disposição das placas (adaptada de Han et al., 2003) .....   | 4  |
| Figura 2.2. Tipos de ondas vs velocidade de detonação (adaptada Industrial, 2018) .....   | 6  |
| Figura 2.3. Deformação por indentação de jato (adaptada de Abrahamson, 1961) .....  | 7  |
| Figura 2.4. Exemplo formação ondas por mecanismo de fluxo instável (adaptada de Carton, 2014).....  | 7  |
| Figura 2.5. Padrão do fluxo produzido por Von Karman (adaptada de Reid, 1974).....  | 8  |
| Figura 2.6. A influência do STD na interface das ligações de Zircónio com Aço de Carbono, (a) STD=h, (b) STD=1,5h, (c) STD=2h, (d) STD=3h (adaptada de Prażmowski and Paul, 2012) ..... | 10 |
| Figura 2.7. Janela de soldabilidade (adaptada de Ribeiro et al., 2014) .....  | 13 |
| Figura 2.8. Exemplo da configuração com placa intermédia (adaptada de Hokamoto et al., 1993).....   | 14 |
| Figura 2.9. Compatibilidade de materiais na soldadura por explosão (adaptada de Findik, 2011).....  | 15 |
| Figura 2.10. a) modelo computacional, b) distribuição de temperatura (adaptada de Aizawa et al., 2016).....   | 16 |
| Figura 2.11. Diagrama de fases entre ferro e alumínio (adaptado de Tricarico et al., 2009) .....  | 17 |
| Figura 3.1. (a) Microestrutura do alumínio AA6082-T6 e (b) do aço carbono, ampliação 100x.....  | 19 |
| Figura 3.2. Esquema do ensaio AA/AA/CS-PRI15.....   | 21 |
| Figura 3.3. Cronómetros usados nos ensaios com ANFO.....  | 22 |
| Figura 3.4. Esquema para ensaios com Primer.....  | 23 |
| Figura 3.5. Esquema das sondas para os ensaios que usam o Primer .....  | 23 |
| Figura 3.6. Esquema de corte das placas do ensaio AA/CS-PRI15, com identificação das amostras a analisar.....   | 25 |
| Figura 4.1. Janela soldabilidade para os ensaios .....  | 27 |
| Figura 4.2. Velocidade de impacto AA/CS-ANF25.....  | 28 |
| Figura 4.3. Velocidade de impacto AA/AA/CS-ANF25.....   | 29 |
| Figura 4.4. Janela de soldabilidade com os ensaios .....  | 30 |
| Figura 4.5. Macroscopia ensaio AA/CS-PRI15 .....  | 30 |
| Figura 4.6. Macroscopia ensaio AA/CS-ANF20.....   | 31 |
| Figura 4.7. Macroscopia ensaio AA/CS-ANF25.....   | 31 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.8. Macroscopia ensaio AA/AA/CS-ANF25.....   | 32 |
| Figura 4.9. Macroscopia ensaio AA/AA/CS-PRI15 .....  | 32 |
| Figura 4.10. a) Interface AA/CS-PRI15, ampliação 200x, b) Interface AA/CS-PRI15,<br>ampliação 500x .....   | 33 |
| Figura 4.11. a) Espectro A e B, b) Espectro C e D .....  | 34 |
| Figura 4.12. Ondas ensaio AA/CS-PRI15, ampliação 53x .....   | 34 |
| Figura 4.13. a) Interface AA/CS-ANF20, ampliação 200x, b) Interface AA/CS-ANF20,<br>ampliação 500x .....   | 35 |
| Figura 4.14. a) Interface AA/CS-ANF25, ampliação 200x, b) Interface AA/CS-ANF25,<br>ampliação 500x .....   | 35 |
| Figura 4.15. a) Espectro E, b) Espectro F, c) Espectro G .....   | 36 |
| Figura 4.16. Ondas ensaio AA/CS-ANF25, Ampliação 52x .....   | 36 |
| Figura 4.17. a) Interface AA6082-AA1050, ampliação 200x, b) Interface AA1050-CS,<br>ampliação 500x .....   | 37 |
| Figura 4.18. a) Espectro H, b) Espectro I e J c) Espectro K e L d) Espectro M .....  | 38 |
| Figura 4.19. a) Interface AA6082-AA1050, ampliação 500x, b) Interface AA6082-CS,<br>ampliação 500x .....   | 39 |
| Figura 4.20. a) Espectro 44L 1.3 b) Espectro 44L 2.1 .....   | 39 |
| Figura 4.21. Perfil de dureza ensaio AA/CS-PRI15.....  | 40 |
| Figura 4.22. Perfil de dureza ensaio AA/CS-ANF20.....  | 41 |
| Figura 4.23. Perfil de dureza ensaio AA/CS-ANF25.....  | 41 |
| Figura 4.24. Perfil de dureza ensaio AA/AA/CS-ANF25 .....  | 42 |
| Figura 4.25. Perfil de dureza ensaio AA/AA/CS-PRI15.....   | 43 |
| Figura 4.26. Zona de rutura a) na soldadura (provete AA/CS-ANF25-T1, b) no alumínio<br>(provete AA/CS-ANF25-T3) .....  | 43 |
| Figura 4.27. a) Mapa de deformações provete AA/CS-ANF25-T1, b) Curvas força-<br>alongamento AA/CS-ANF25, c) Mapa de deformações provete AA/CS-ANF25-<br>T3 ..... | 44 |
| Figura 4.28. a) Curvas força-alongamento AA/CS-PRI15, b) Mapa de deformações provete<br>AA/CS-PRI15-T2.....  | 44 |
| Figura 4.29. a) Curvas força-alongamento AA/AA/CS-PRI15, b) Mapa de deformações<br>provete AA/AA/CS-PRI15-T2.....  | 45 |
| Figura 4.30. a) Curvas força-alongamento AA/AA/CS-ANF25, b) Mapa de deformações<br>provete AA/AA/CS-ANF25-T3 .....   | 45 |
| Figura 4.31. Zona de rutura a) AA/AA/CS-ANF25, b) AA/AA/CS-PRI15, ampliação<br>1000x.....  | 46 |
| Figura 4.32. Zona de rutura a) AA/CS-PRI15 b) AA/CS-ANF25, ampliação 1000x.....  | 46 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.1. Ondas a) AA/CS-ANF25, b) AA/CS-PRI15, ampliação 53x .....            | 50 |
| Figura 5.2. Comparação das curvas força-alongamento dos diferentes ensaios ..... | 51 |
| Figura 5.3. Ondas do ensaio AA/AA/CS-PRI15 a) início b) final .....              | 51 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1. Fases intermetálicas entre Fe-Al.....                          | 18 |
| Tabela 3.1. Composição química das placas (%peso).....                     | 19 |
| Tabela 3.2. Condições de soldadura .....                                   | 24 |
| Tabela 4.1. Dados para cálculo da velocidade de detonação.....             | 28 |
| Tabela 4.2. Parâmetros principais do ensaio .....                          | 29 |
| Tabela 4.3. Composição interface do ensaio AA/CS-PRI15 (%atômica).....     | 33 |
| Tabela 4.4. Composição interface do ensaio AA/CS-ANF25 (%atômica) .....    | 36 |
| Tabela 4.5. Composição interface do ensaio AA/AA/CS-ANF25 (%atômica) ..... | 38 |
| Tabela 4.6. Composição interface do ensaio AA/AA/CS-PRI15 (%atômica) ..... | 39 |
| Tabela 5.1. Espessura e dureza camada intermédia.....                      | 47 |
| Tabela 5.2. Composição da interface.....                                   | 48 |
| Tabela 5.3. Rácio de explosivo e tamanho de onda.....                      | 49 |



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

AA/AA/CS – Projecção do alumínio em aço carbono, com placa intermédia de alumínio

AA/CS – Projecção do alumínio em aço carbono

C – Massa de explosivo

C1, C2 – Constantes de calibração

$C_{b,f}$  – Velocidade de propagação do som na placa voadora

$C_p$  – Calor específico a pressão constante

$h_f$  – espessura da placa

$H_{v,b}$  – Dureza Vickers da placa base

$H_{v,f}$  – Dureza Vickers da placa voadora

$k_1$  – Coeficiente adimensional para a limpeza das superfícies

$K_f$  – Condutibilidade térmica da placa voadora

M – Massa da placa voadora

N – Constante empírica para o limite superior

$p_{cj}$  – Pressão de Chapman-Jouguet produzida pela detonação

R – Rácio de explosivo

$R_c$  – Reynolds crítico

t – Instante de tempo

$t_0$  – Instante de tempo inicial

$T_{m,f}$  – Temperatura de fusão da placa voadora

$t_v$  – Tempo necessário para que a placa voadora atinja a velocidade de projecção calibrada

$V_c$  – Velocidade do ponto de colisão

$V_d$  – Velocidade de detonação

$V_p$  – Velocidade de impacto

$V_{p1}$  – Velocidade de impacto no momento antes da colisão com a placa intermédia

$V_{p2}$  – velocidade de impacto do conjunto placa voadora-placa intermédia

$V_p(t)$  – Velocidade de projeção ou velocidade de impacto em função do tempo

$V_{p,Gurney}$  – Velocidade de projeção ou velocidade de impacto de Gurney

$V_{pcal}$  – Velocidade de projeção calibrada

$V_s$  – Velocidade de propagação do som

$X(t)$  – Distância percorrida pela placa voadora em função do tempo

$\beta$  – Ângulo de colisão

$\rho_b$  – Densidade da placa base

$\rho_f$  – Densidade da placa voadora

$\tau$  – Constante de tempo

## **Siglas**

ANFO – Ammonium Nitrate Fuel Oil

CEMMPRE – Centro de Engenharia Mecânica Materiais e Processos

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EDS – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

EPS – Expanded polystyrene

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

MDF – Placa de fibra de média densidade (Medium-Density Fiberboard)

RDX – *Research Department X*, hexogeno

SEM – Scanning Electron Microscope

STD – Stand-off (distância entre placas)

## 1. INTRODUÇÃO

A soldadura por explosão é uma técnica bastante interessante já que permite juntar materiais dissimilares com propriedades distintas, sem problemas que ocorrem noutros tipos de soldadura, como a fusão. Neste processo, uma chapa que se encontra em contacto com um explosivo é projetada e ao colidir a alta velocidade com uma outra chapa que se encontra estática, ocorre soldadura. O alumínio e o aço carbono são dois materiais muito usados na indústria, pelo que é vantajoso que sejam estudadas formas de os unir.

Na literatura existem alguns artigos sobre este processo, sendo que os trabalhos com placa intermédia são escassos, porém com melhores resultados em relação à resistência das ligações. Como é um tema relativamente novo, é interessante estudar novos usos e as limitações deste processo, de modo a aperfeiçoar a técnica. O principal objetivo deste trabalho é comparar juntas soldadas por explosão de aço carbono-alumínio AA6082 com a utilização, ou não, de uma chapa intermédia de alumínio AA1050, sendo estudada a influência de parâmetros como a velocidade de detonação e a velocidade de impacto do ensaio.

Este trabalho encontra-se subdividido em sete capítulos sendo este o primeiro. No capítulo seguinte encontra-se o estado de arte, onde se evidencia o estado do conhecimento sobre o tema em estudo. Subsequentemente é descrito o procedimento experimental e os resultados obtidos em cada ensaio estão descritos no capítulo seguinte. De seguida comparam-se os vários resultados obtidos e apresenta-se a conclusão sobre este trabalho. No final são apresentadas ideias para trabalhos futuros.



## 2. ESTADO DE ARTE

### 2.1. Contextualização histórica

A soldadura por explosão foi descoberta e desenvolvida a partir da primeira guerra mundial, sendo observada pela primeira vez durante a primeira guerra quando os estilhaços provenientes de explosões, embatiam a grande velocidade em superfícies metálicas e ocorria uma união metálica (Carpenter and Wittman, 1975). Apesar de ter sido observada na primeira guerra, só durante a segunda guerra mundial é que foram realizados os primeiros testes em laboratório para este processo. Estes testes foram realizados em 1944 por L. R. Carl que realizou várias experiências para gerar “soldadura no estado sólido”, tendo sido estas experiências realizadas usando latão. O nome “soldadura no estado sólido” foi dado depois de ter sido observado que as uniões não possuíam nenhuma parte fundida (Young, 2004). No entanto, estas soldaduras possuíam uma pequena zona fundida, zona que só é possível observar em microscópios mais modernos.

Como estes trabalhos não tiveram grande êxito e não havia um potencial uso comercial na altura, esta técnica não foi estudada até 1957. Neste ano, Philipchuk conseguiu soldar alumínio num perfil de aço (Crossland, 1976), dois materiais que não eram possíveis de soldar até esse momento, e assim desencadeou um interesse internacional neste tipo de soldadura. Em 1962, Arnold Holtzman e a sua equipa realizaram vários testes neste tipo de soldadura e foram estes que patentearam pela primeira vez este processo (Cowan and Holtzman, 1963). Esta patente foi aceite em 1964 e em 1965 a Dupont já comercializava uniões heterogéneas concebidas por este processo (Young, 2004).

Atualmente existem mais de 360 combinações diferentes de materiais semelhantes e dissemelhantes que podem ser unidos utilizando este tipo de soldadura, já que, cada vez há mais procura de ligações obtidas por este processo para indústrias químicas e nucleares (Findik, 2011).

Apesar de já haver muitas aplicações deste processo, existe uma forte investigação neste ramo para melhorar os parâmetros do processo, otimizá-lo e descobrir novas aplicações.

## 2.2. Princípios do processo

O processo de soldadura por explosão é considerado um processo em estado sólido já que não é necessária fusão (pelo menos total) dos materiais intervenientes, o que torna possível unir materiais com pontos de fusão bastante diferentes, contrariamente ao que acontece nos processos convencionais. Este processo utiliza a energia libertada na detonação de um explosivo de modo a acelerar a placa voadora, que se encontra a uma certa distância da placa base, e assim ocorrer uma colisão a alta velocidade entre as duas placas. Apesar de serem atingidas elevadas temperaturas devido à detonação, como o processo é demasiado rápido não existirá zona térmica afetada nem transferência de calor entre placas, o que faz com que possam ser usadas placas com espessuras reduzidas. Todos os parâmetros do processo têm de ser elaborados antes da detonação pois, durante este não há nada que possa ser alterado. (Ribeiro et al., 2014)

Existe também uma variante do processo referido anteriormente, mas que necessita de três placas em vez das duas. As chapas a unir têm o nome de: placa voadora, a que fica em contacto com o explosivo, placa base, que fica estacionária durante todo o processo, e placa intermédia, que se encontra entre a placa base e a placa voadora. (Maliutina et al., 2014)

Na figura 2.1 encontra-se representado o modelo em paralelo usado para o caso de se usar placa intermédia.

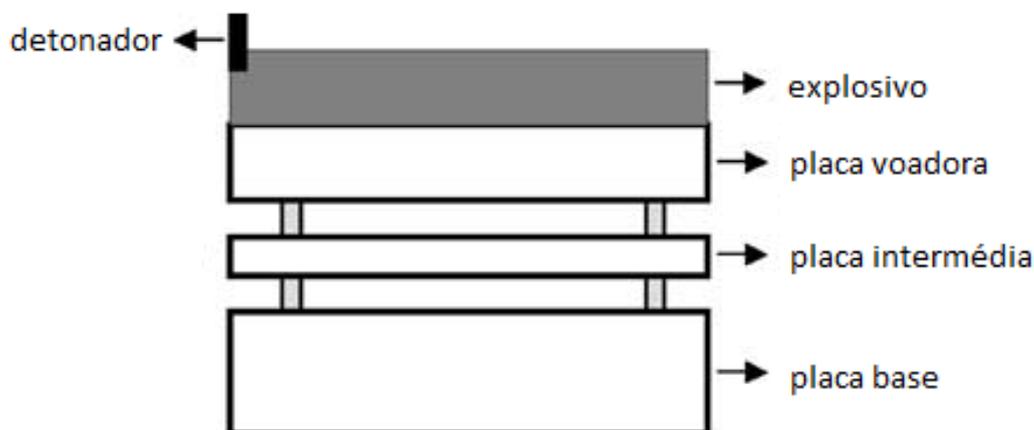


Figura 2.1. Exemplo da disposição das placas (adaptada de Han et al., 2003)

---

O processo de soldadura usado pode ser dividido em quatro etapas:

- Detonação da carga explosiva;
- Aceleração e deformação da placa voadora;
- Colisão entre a placa voadora e a placa intermédia;
- Colisão do conjunto placa voadora-placa intermédia com a placa base.

Na primeira etapa ocorre a detonação do explosivo e, portanto, a libertação de energia necessária para que ocorra este processo. Esta energia irá servir para acelerar a placa voadora em direção à placa intermédia até esta atingir uma velocidade de impacto ( $V_p$ ). Quando a placa voadora atinge a placa intermédia com a velocidade  $V_{p1}$ , as duas percorrem o resto da distância até à placa base praticamente juntas, mas com uma velocidade de impacto  $V_{p2}$ , que é menor que  $V_{p1}$ , já que há perda de energia cinética na colisão das placas. Na terceira etapa dá-se a união final a nível atómico entre as três placas.

Por vezes usa-se um buffer entre o explosivo e a placa voadora para que esta placa não fique danificada pelos produtos da detonação. A qualidade das juntas varia com o tipo de materiais a unir e com os parâmetros definidos para a soldadura: distância entre as placas (STD), rácio de explosivo (razão entre massa do explosivo e massa da placa voadora), velocidade de detonação ( $V_d$ ), velocidade de impacto ( $V_p$ ), ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ ) e o tipo de explosivo. Quando se dá a colisão ocorre formação de um jato entre as placas que retira todas as impurezas e óxidos e que melhora, portanto, a qualidade da união (Mousavi and Al-Hassani, 2005).

### **2.2.1. Características da Interface**

Neste tipo de processo temos três tipos de interface característicos (Findik, 2011):

- Interface placa
- Interface ondulada
- Interface com material fundido

Para uma soldadura entre os mesmos materiais podemos ter interfaces diferentes dependendo dos parâmetros definidos para essa soldadura (Carton, 2004). A figura 2.2, apresenta um exemplo de uma soldadura com interface plana a uma velocidade de detonação de 1800 m/s e a velocidades superiores apresenta uma interface ondulada.

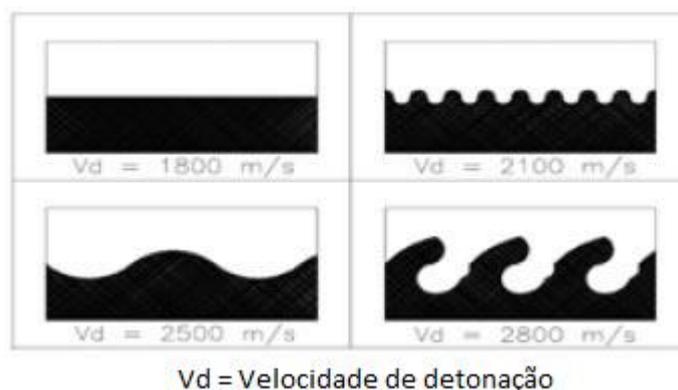


Figura 2.2. Tipos de ondas vs velocidade de detonação (adaptada Industrial, 2018)

A velocidades mais elevadas normalmente aparece um maior número de ondas, mas por vezes mesmo se a velocidade for muito elevada, pode não haver formação destas. Normalmente sempre que ocorre aparecimento de ondas ocorrem zonas de material fundido. Se a presença deste material fundido não for excessiva não ocorrem problemas de ligação associados. No caso de se obter interface plana, em alguns casos pode-se obter uma fraca ligação dos materiais, mas noutros podem-se obter propriedades razoáveis, tudo depende do tipo de materiais que se usam. (Durgutlu et al., 2005)

## 2.2.2. Mecanismo de formação de ondas

Os mecanismos de formação de ondas são um assunto de discussão na comunidade científica. Como o processo de detonação é demasiado rápido não é possível até ao momento, observar o que ocorre durante o impacto entre as placas. Portanto, como é um assunto a ser debatido pela comunidade científica, existem várias teorias sobre os mecanismos de formação de ondas:

- Mecanismo de indentação por jato (Abrahamson, 1961);
- Mecanismo de fluxo instável (Hunt, 1968)
- Mecanismo de formação de vórtices (Cowan et al., 1971);

### 2.2.2.1. Mecanismo de indentação por jato

Este mecanismo de formação de ondas, defendido por Abrahamson (1961), indica que estas são formadas por ação da indentação do jato na placa base, que forma depressões e saliências no ponto de colisão devido ao material removido pelo jato, tal como está representado na figura 2.3. Mais tarde em 1967, Bahrani dá uma explicação mais

detalhada deste processo, onde explica o jato reentrante e a formação de vórtices devido à assimilação do material removido pelo jato. (Reid, 1974)

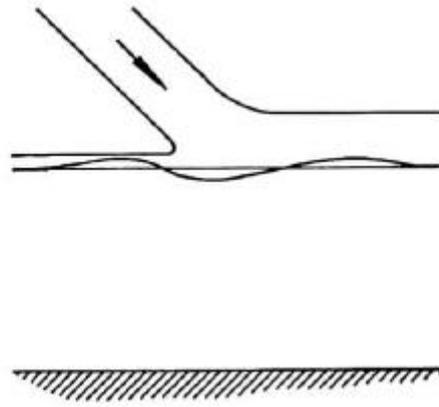


Figura 2.3. Deformação por indentação de jato (adaptada de Abrahamson, 1961)

#### 2.2.2.2. Mecanismo de fluxo instável

Este mecanismo apresentado por Hunt (1968) pressupõe que o processo de formação de ondas é devido à instabilidade de Kevin-Helmoltz. Esta instabilidade pode ser comparada à formação de vórtices na interface entre dois líquidos a velocidades horizontais diferentes tal como se mostra na figura 2.4. Hunt indica que esta diferença de velocidades entre a placa base e o jato reentrante produzem as ondas originárias da soldadura (Carton, 2004).

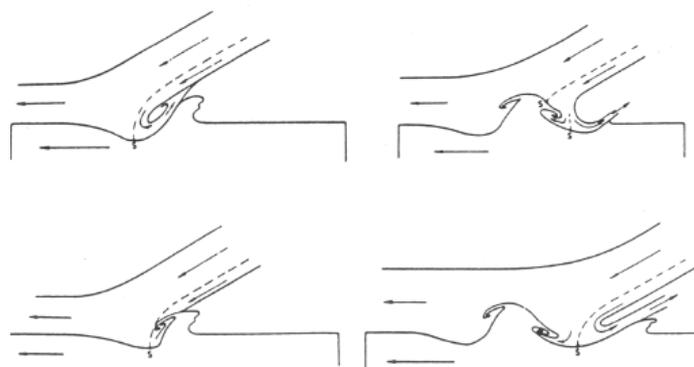


Figura 2.4. Exemplo formação ondas por mecanismo de fluxo instável (adaptada de Carton, 2014)

### 2.2.2.3. Mecanismo de formação de vórtices

Este mecanismo primeiro referenciado por Cowan and Holtzman (1963), aponta que a formação de ondas se deve a um mecanismo de formação de vórtices, similar à formação do vórtice de Karman que pode ser observado na figura 2.5. (Reid, 1974)

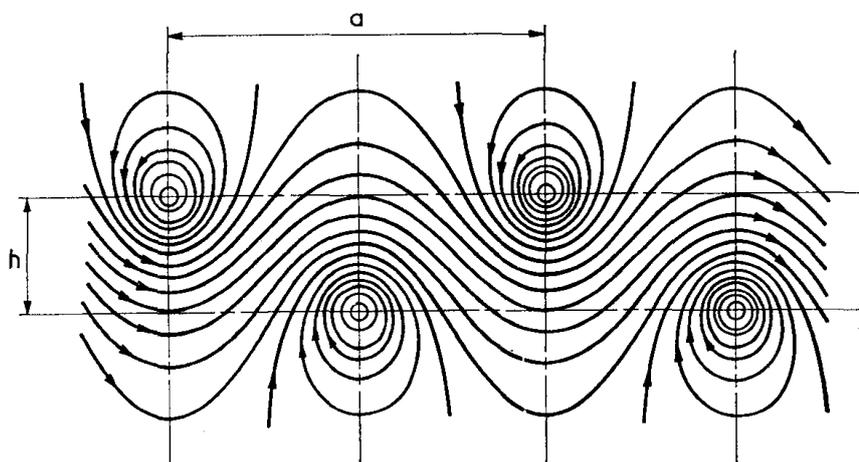


Figura 2.5. Padrão do fluxo produzido por Von Karman (adaptada de Reid, 1974)

## 2.3. Parâmetros do processo

Antes de qualquer ensaio é necessário fazer uma avaliação prévia teórica no qual se expõem todos os parâmetros da soldadura e assim, chegar à conclusão se o teste é possível ou não, já que não é exequível mudar nenhum desses critérios durante o ensaio. As principais condições que devem ser consideradas antes de qualquer ensaio são a escolha dos materiais a unir, a velocidade de detonação do explosivo ( $V_d$ ), a velocidade de impacto ( $V_p$ ) e o ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ ). Os parâmetros referidos podem ser alterados com a escolha do explosivo. (De Rosset, 2006)

### 2.3.1. Seleção do explosivo

A seleção do explosivo condiciona os principais parâmetros da soldadura e, portanto, deve ser um dos aspetos a ter mais em conta antes de qualquer soldadura já que é a fonte de energia de todo o processo.

Em primeiro lugar, temos de seleccionar explosivos de baixa velocidade de detonação (abaixo de 3500m/s) já que os explosivos de alta velocidade de detonação destroem os materiais quando usados neste processo, portanto, explosivos plásticos não

---

podem ser considerados durante esta seleção (Findik, 2011). O explosivo deverá ser de fácil manuseamento que permita que a caixa onde será colocado, seja uniformemente preenchida para não ocorrer o problema de mudanças de densidade do explosivo ao longo da caixa, o que pode provocar alterações da velocidade de detonação. A espessura mínima de explosivo deve ser também considerada, sendo que esta varia de explosivo para explosivo. Podem ser adicionados auxiliares ao explosivo para originar explosões mais controladas (Mendes et al., 2014):

- Sensibilizantes, como é o caso do poliestireno expandido (EPS), para que reduzam a densidade do explosivo e assim, diminuam a velocidade de detonação, (Mendes et al., 2013);
- No início da detonação, onde se coloca o detonador, deve-se usar um explosivo de maior velocidade de detonação para desencadear melhor a reação. Neste caso deve-se usar explosivos plásticos, como o RDX, que possui uma velocidade de detonação de cerca de 8750m/s.

### 2.3.2. Distância entre placas

Distância entre placas, ou *stand-off distance* (STD) como é denominado na comunidade científica, é a distância a que cada uma das placas se encontram entre si. É um parâmetro bastante importante na soldadura, já que é necessário ter uma distância mínima entre placas para que estas adquiram uma maior velocidade de impacto.

Muitos autores defendem que o STD deve depender da espessura da placa voadora ( $h$ ), tal como foi referido por Prazmowski and Paul (2012) e por Durgutlu et al. (2008) que conseguiram provar uma relação entre STD e a existência de ondas na interface. Na verdade, teoricamente, é possível determinar a distância mínima necessária para termos o aproveitamento total da energia do explosivo, pelo que se deve considerar sempre esta a distância mínima de STD. Os trabalhos de Prazmowski and Paul (2012) indicam que não é rentável usar valores de STD maiores que o dobro da espessura da placa voadora, já que não existe uma grande mudança nas interfaces, tal como se observa na figura 2.6. A partir desta distância e por norma, obtém-se a velocidade máxima da placa voadora.

No uso de placa intermédia existirão dois STDs, mas sendo um assunto pouco abordado na literatura, considera-se que cada um dos STDs têm de ser pelo menos 1,5 vezes a espessura da placa que o antecede, tal como acontece nos ensaios sem placa intermédia.

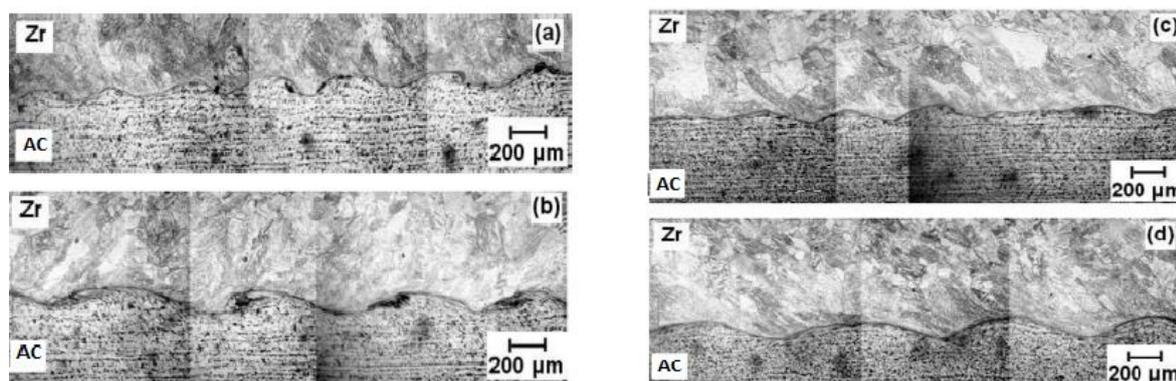


Figura 2.6. A influência do STD na interface das ligações de Zircónio com Aço de Carbono, (a) STD=h, (b) STD=1,5h, (c) STD=2h, (d) STD=3h (adaptada de Prazmowski and Paul, 2012)

### 2.3.3. Janela de soldabilidade

A janela de soldabilidade é um gráfico em que se representam os requisitos da soldadura em função do ângulo dinâmico de colisão ( $\beta$ ) e da velocidade de colisão ( $V_c$ ) e em que, impondo várias condições, teremos uma zona ideal que, teoricamente, todas as soldaduras são possíveis. A velocidade de colisão para configurações de soldadura paralelas, é igual à velocidade de detonação ( $V_d$ ). (El-Sobky, 1983)

Para traçar esta janela é necessário ter em consideração vários parâmetros:

- Formação de jato;
- Formação de ondas;
- Velocidade mínima de soldadura;
- Fusão por uso de velocidade excessiva.

#### 2.3.3.1. Formação de jato

Sendo um dos parâmetros mais importantes na soldadura, a formação de jato só existe abaixo de uma velocidade crítica que se deve ter em conta em todos os ensaios. O jato forma-se na colisão das placas, onde existe um aumento de pressão que faz dispersar uma fina camada de material em forma de jato de cada uma das superfícies. Este jato limpa cada uma das superfícies, retirando qualquer impurezas e óxidos.

A condição para existir formação de jato é que a velocidade de detonação do explosivo que não pode ser superior à velocidade sónica dos materiais (Walsh et al., 1953).

$$V_d < V_s \quad (1)$$

Em que  $V_d$  é a velocidade de detonação [km/s] e  $V_s$  é a velocidade de propagação do som na placa voadora [km/s].

Na realidade existem várias teorias, mas são encaradas como alternativas. Uma dessas teorias é a existência de um ângulo mínimo para a formação de jato. Os trabalhos de Abrahamson (1961) mostraram que a equação para o ângulo dinâmico mínimo seria a seguinte:

$$\beta = 10 * (V_d - 5,5) \quad (2)$$

Em que  $\beta$  é o ângulo dinâmico crítico em rad.

### 2.3.3.2. Formação de ondas

Outro dos parâmetros considerados na janela de soldabilidade é a formação de ondas. A equação (3) serve para calcular a velocidade mínima para que ocorra formação de ondas sendo uma proposta de Cowan et al. (1971):

$$V_d = \sqrt{\frac{2 * R_c * (H_{v,p} + H_{v,f})}{\rho_b + \rho_f}} \quad (3)$$

Em que  $R_c$  é o número de Reynolds crítico que pode tomar valores entre 8,0 e 13,0 (é considerado normalmente 10,5),  $H_{v,p}$  e  $H_{v,f}$  são, respetivamente, a dureza da placa base e a dureza da placa voadora [Pa] e  $\rho_b$  e  $\rho_f$  que são respetivamente, a densidade da placa base e a densidade da placa voadora [kg/m<sup>3</sup>].

### 2.3.3.3. Velocidade mínima de soldadura

A velocidade mínima de soldadura é a velocidade a atingir para que a pressão de impacto no ponto de colisão seja suficiente para vencer a tensão limite de elasticidade dos materiais (Ribeiro et al., 2014). Este parâmetro foi estudado por Zakharenko and Zlobin (1983) que chegou à seguinte equação (4):

$$V_{d,min} = \frac{k_1}{\beta} * \sqrt{\frac{H_{v,f}}{\frac{\rho_b + \rho_f}{2}}} \quad (4)$$

Sendo  $k_1$  um valor compreendido entre 0,6, para superfícies completamente limpas, e 1,2, para superfícies sujas.

### 2.3.3.4. Fusão por uso de velocidade excessiva

A equação referente a este fator, reflete o facto de a velocidade de impacto ( $V_p$ ) ter de ser inferior a um certo valor, tal que a dissipação da energia cinética seja insuficiente

para produzir uma camada fundida contínua na interface dos materiais. Segundo Carpenter and Wittman (1975) a equação (5) representa essa velocidade máxima:

$$V_p = \frac{1}{N} * \frac{(C_{b,f} * T_{m,f})^{\frac{1}{2}}}{V_d} * \left( \frac{K_f * C_{p,f} * C_{b,f}}{\rho_f * h_f} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

Nesta equação, N é uma constante empírica que pode ter dois valores, 0,11 (De Rosset, 2006) e 0,062 (Ribeiro et al., 2014).  $C_{b,f}$  é a velocidade de propagação do som na placa voadora [cm/s],  $T_{m,f}$  é a temperatura de fusão da placa voadora [°C],  $K_f$  [W/m.K] é a condutibilidade térmica da placa voadora,  $C_{p,f}$  é o calor específico a pressão constante da placa voadora [erg/g.°C] e  $h_f$  é a espessura da placa [cm].

Também é necessária a equação para calcular o ângulo dinâmico a partir da velocidade de projeção e a velocidade de detonação (Crossland, 1976):

$$V_p = 2V_d * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (6)$$

Juntando estas duas últimas equações temos a equação (7) para o ângulo dinâmico:

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{N} * \frac{(T_{m,f} * C_{b,f})^{\frac{1}{2}}}{2V_d^2} * \left( \frac{K_f * C_{b,f}}{\rho_f * h_f} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Para estimar a velocidade da placa voadora ao longo do tempo é necessário recorrer a outras equações. Nos primeiros trabalhos que houveram à cerca deste tema, o trabalho de Gurney (1963) é o que melhor explica como calcular a velocidade de impacto da placa voadora a partir do rácio do explosivo.

$$V_{p,Gurney} = \sqrt{2E} * \sqrt{\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4}} \quad (8)$$

Nesta equação (8),  $\sqrt{2E}$  [m/s] é denominada de energia de Gurney, que é a energia específica de um explosivo cujos valores se encontram tabelados. R é o rácio de explosivo que se calcula na seguinte equação onde M é a massa da placa voadora e C á massa de explosivo (Gurney, 1963):

$$R = \frac{C}{M} \quad (9)$$

Posteriormente, calcula-se a velocidade da placa voadora em relação ao tempo (Chou and Flis, 1986):

$$V(t) = V_{p,Gurney} * \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right] \quad (10)$$

Para isso, é necessário o valor de  $\tau$  que se calcula pela equação (11):

$$\tau = C_1 * \frac{M * V_{p,Gurney}}{p_{cj}} + C_2 \quad (11)$$

No qual  $p_{cj}$  corresponde à pressão de Chapman-Jouguet e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes empíricas que mudam de valor para cada caso, de modo a que a curva  $V(t)$  contenha o ponto  $[V_{p,cal}, t_v]$ , no qual  $V_{p,cal}$  é 80% da velocidade de Gurney e  $t_v$  é o tempo necessário para que hajam 7 reflexões da onda de choque. (Kennedy and Zukas, 1998)

$$t_v = 7 * \frac{h_f}{C_{b,f}} \quad (12)$$

No caso de se usar placa intermédia, quando a distância percorrida pela placa voadora for correspondente ao valor do primeiro STD, considera-se que apenas se muda o valor de  $M$ , que passa a ser a soma das massas da placa intermédia com a placa voadora. Considera-se também que a energia fornecida pelo explosivo já foi totalmente transferida, e a partir desse ponto a equação da posição ao longo do tempo passa a ser:

$$x(t) = x_{t-1} + V(t) * t_0 \quad (13)$$

Sendo  $t_0$  o intervalo de tempo entre cada ponto.

### 2.3.3.5. Janela de soldabilidade

Juntando todas as equações referidas anteriormente num gráfico, resulta a janela de soldabilidade apresentada na figura 2.7.

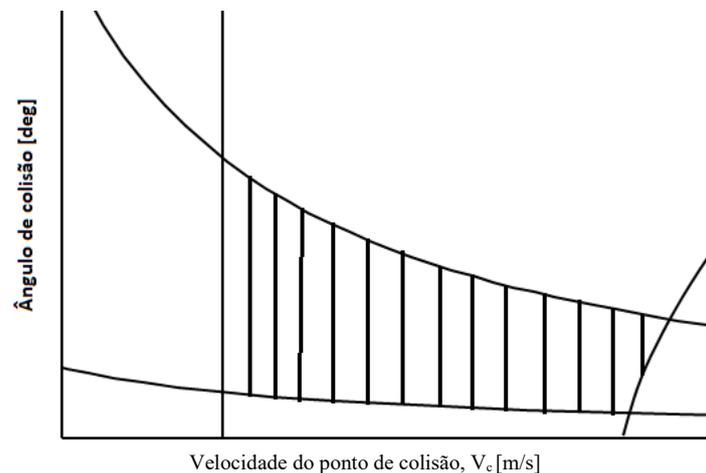


Figura 2.7. Janela de soldabilidade (adaptada de Ribeiro et al., 2014)

Sendo que a zona marcada será onde cada um dos ensaios se deverá situar no gráfico de modo a obter uma melhor soldadura.

## 2.4. Placa intermédia

A placa intermédia deve-se usar para situações em que os materiais sejam de difícil ligação ou em situações que as propriedades mecânicas da soldadura não sejam as melhores. Os estudos de Hokamoto et al. (1993) mostraram que a energia dissipada na colisão é menor no caso de se usar placa intermédia.

A utilização de placa intermédia provoca um aumento da força de ligação e uma interface com uma menor quantidade de compostos intermetálicos que tornam a interface mais frágil. A placa intermédia pode ser de material igual ou diferente da placa voadora, deve apenas possuir uma menor espessura (Han et al., 2003). Na figura 2.8 está representado o esquema dos ensaios com placa intermédia, e como se pode observar são necessários dois STDs para este tipo de ligações.

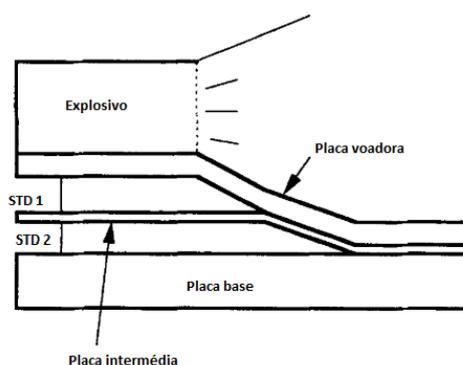


Figura 2.8. Exemplo da configuração com placa intermédia (adaptada de Hokamoto et al., 1993)

## 2.5. Aplicações do processo

### 2.5.1. Materiais compatíveis

A soldadura por explosão, como já referido anteriormente, permite a ligação de materiais distintos, mantendo as características de cada um deles, e é por esta razão que cada vez há mais combinações diferentes de materiais a ser estudados nesta área. A figura 2.9 apresenta algumas combinações de materiais que são possíveis de soldar usando este processo.

|                   | Ligas de alumínio | Nióbio | Titânio | Tântalo | Molibdénio | Zircónia | Ligas Fe-Ni | Níquel e ligas Ni | Cobre e ligas Cu | Aço Inoxidável |
|-------------------|-------------------|--------|---------|---------|------------|----------|-------------|-------------------|------------------|----------------|
| Ligas de alumínio | ■                 | ■      | ■       | ■       | ■          | ■        | ■           | ■                 | ■                | ■              |
| Ligas Fe-Ni       | ■                 | ■      | ■       | ■       | ■          | ■        | ■           | ■                 | ■                | ■              |
| Níquel e ligas Ni | ■                 | ■      | ■       | ■       | ■          | ■        | ■           | ■                 | ■                | ■              |
| Cobre e ligas Cu  | ■                 | ■      | ■       | ■       | ■          | ■        | ■           | ■                 | ■                | ■              |
| Aço inoxidável    | ■                 | ■      | ■       | ■       | ■          | ■        | ■           | ■                 | ■                | ■              |
| Aço carbono       | ■                 | ■      | ■       | ■       | ■          | ■        | ■           | ■                 | ■                | ■              |

■ É possível e já foi realizado  
 ■ Ainda não foi realizado, mas é possível

É uma lista parcial pois são possíveis muitas mais combinações

Figura 2.9. Compatibilidade de materiais na soldadura por explosão (adaptada de Findik, 2011)

### 2.5.2. Ligações aço-alumínio

A ligação aço carbono-alumínio é uma ligação bastante estudada em soldadura por explosão, já que, é uma junção bastante difícil de obter por outros tipos de soldadura. Nos trabalhos de Aizawa et al. (2016) foi estudada a interface que resulta desta ligação. Ao contrário desta junção, existem outras ligações de materiais que possuem uma fraca força de ligação devido à quantidade excessiva de intermetálicos presentes na sua interface. O objetivo deste trabalho foi apresentar a razão para a ligação aço-alumínio ter boa resistência usando uma análise numérica e uma análise experimental.

A velocidade de impacto obtida neste processo foi de 750m/s e um ângulo de 15°, o que fez com que a interface obtida contivesse ondas. Neste estudo, a análise experimental e a análise numérica mostraram que a camada intermédia pode ter aparecido devido às elevadas temperaturas a que a interface pode estar exposta. Na figura 2.10, pode-se observar que existem pontos da interface em que a temperatura de fusão do aço e do alumínio são ultrapassadas, o que pode provocar a existência de uma camada de material diferente.

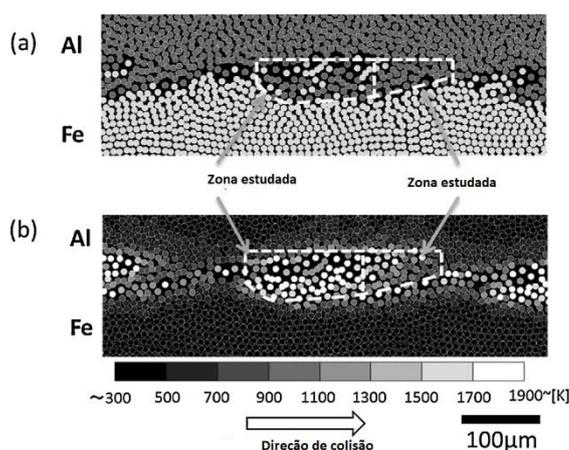


Figura 2.10. a) modelo computacional, b) distribuição de temperatura (adaptada de Aizawa et al., 2016)

Os trabalhos de Saravanan and Raghukandan (2013) indicam que a utilização de placa intermédia reduz a energia perdida no processo o que reduz a presença de intermetálicos na interface e provoca um melhoramento da força de ligação. Nos trabalhos de Han et al. (2003), foi estudada a ligação alumínio-aço inoxidável usando alumínio AA1050 como placa intermédia. O objetivo deste trabalho foi observar a diferença da ligação usando diferentes espessuras na placa intermédia. Foram usadas espessuras de 0,2, 0,5, 1 e 2mm, sendo que o resto dos parâmetros de soldadura não foram alterados. A conclusão deste trabalho foi que se não houvesse uso de qualquer tipo de placa intermédia, a ligação entre estes materiais era muito fraca, pelo que esta ligação não poderia ser usada na prática. No caso de se usar placa intermédia, a ligação tinha para todos os casos boas propriedades, sendo que as propriedades melhoravam quanto menor a espessura da placa intermédia utilizada. O tamanho da camada de transição aumentava quanto maior a espessura da placa intermédia.

### 2.5.3. Aplicações a nível industrial

Algumas aplicações do processo são enumeradas por Findik (2011):

- União de tubos;
- Ligação de materiais com propriedades muito diferentes;
- Indústria naval;
- Vasos de pressão e tubos para permutadores de calor;
- Uniões em ambientes perigosos;
- Indústria Criogénica.

## 2.6. Vantagens e desvantagens do processo

Como já foi referido anteriormente, a principal vantagem deste processo é a ligação de materiais dissimilares e com propriedades bastante distintas, já que com processos convencionais não é possível ligar, por exemplo, alumínio com aço carbono. Outras das vantagens deste processo são os valores elevados de resistência mecânica nas juntas, a elevada área de juntas que se pode obter em cada ensaio, e o custo do processo que é relativamente baixo. Os materiais base de cada um dos ensaios também não perdem muitas propriedades ao contrário de outros processos e a soldadura pode ser realizada em ambientes hostis.

Quanto a desvantagens e limitações do processo, há que notar que não é possível usar materiais sem resistência ao impacto e de baixa ductilidade, o ruído de cada ensaio pode obrigar ao uso de equipamento de proteção, bem como câmaras de vácuo, o local onde se realiza o ensaio terá de ser resistente às detonações e terá de ser longe de habitações.

## 2.7. Formação de compostos intermetálicos

Na interface da soldadura forma-se uma camada intermédia que é uma mistura dos dois materiais envolvidos na colisão. Para o caso aço-alumínio formam-se intermetálicos compostos essencialmente por ferro e alumínio. Estes intermetálicos têm fases diferentes dependendo da percentagem de alumínio que contêm, tal como se pode observar na figura 2.11. (Tricarico et al., 2009)

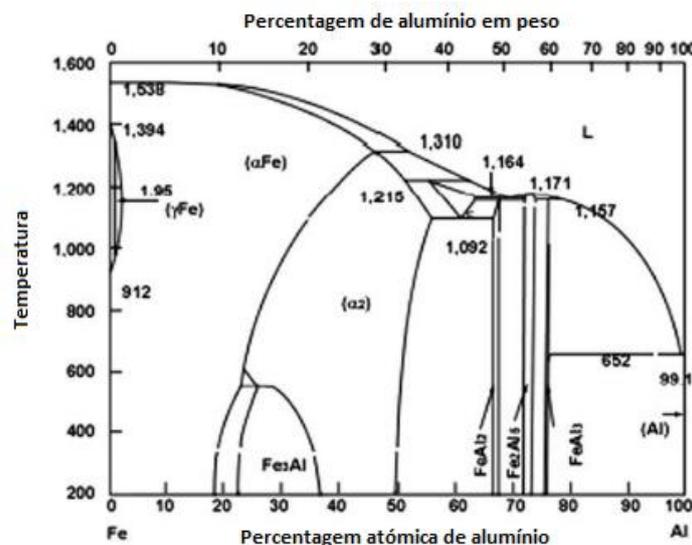


Figura 2.11. Diagrama de fases entre ferro e alumínio (adaptado de Tricarico et al., 2009)

As fases que aparecem mais frequentemente no impacto entre aço e alumínio, bem como as suas propriedades podem ser consultadas na tabela 2.1.

**Tabela 2.1. Fases intermetálicas entre Fe-Al**

| Fase                            | Alumínio (%at) | Dureza    |
|---------------------------------|----------------|-----------|
| Fe <sub>3</sub> Al              | 25             | 250-350   |
| FeAl                            | 50             | 400-520   |
| Fe <sub>2</sub> Al <sub>7</sub> | 63             | 650-680   |
| FeAl <sub>2</sub>               | 66-67          | 1000-1050 |
| Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> | 69,7-73,2      | 1000-1100 |
| FeAl <sub>3</sub>               | 74-76          | 820-980   |

## 2.8. Aspetos a realçar

Completada a pesquisa que envolve esta parte da dissertação, e mesmo com muitos autores a considerarem que usando placa intermédia as ligações têm melhores propriedades, não existem muitos artigos a corroborar esta afirmação por comparação de resultados. Não foi elaborada até ao momento nenhuma janela de soldabilidade para ligações com placa intermédia pelo que se deve considerar a já existente, mesmo sabendo que o uso de placa intermédia pode permitir ligações fora da janela, sem problemas associados.

Deve-se usar uma espessura para a placa intermédia, igual ou inferior a 1mm, já que é para estas espessuras que as ligações são mais resistentes. (Han et al., 2003)

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Materiais e equipamentos utilizados

##### 3.1.1. Materiais utilizados

Para a realização das soldaduras foram usadas três materiais base:

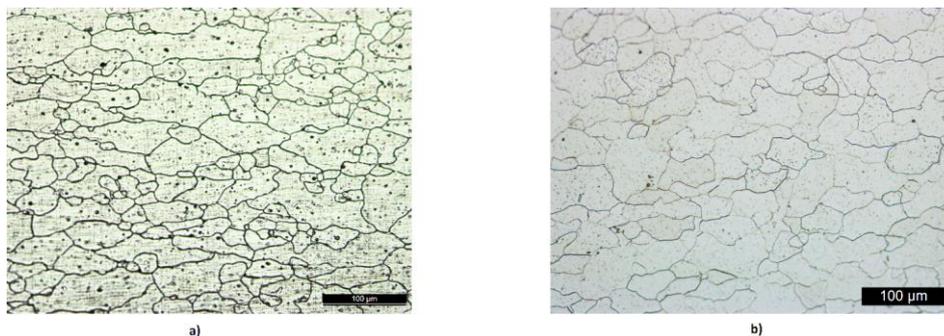
- Aço de baixo teor em carbono DC06 com 3mm de espessura, usado como placa base; (Semimetais, 2018)
- Alumínio AA6082-T6 com 3mm de espessura, usado como placa voadora; (da Silva et al., 2013)
- Alumínio AA1050 com 1mm de espessura, usado como placa intermédia. (Alumicopper, 2009)

As chapas soldadas apresentam a dimensão 250x70mm. A composição química de cada um dos materiais pode ser consultada na tabela 3.1:

**Tabela 3.1. Composição química das placas (%peso)**

| Material  | C    | Mn   | Si   | P    | Al    | Cr   | Zn   | Mg   | Cu   | Ti   | Fe   | Outro |
|-----------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| DC06      | 0,02 | 0,25 | 0    | 0,02 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 99,7 | 0,02  |
| AA6082-T6 | 0    | 0,68 | 1,05 | 0    | 97,08 | 0,01 | 0,02 | 0,8  | 0,04 | 0,01 | 0,26 | 0,05  |
| AA1050    | 0    | 0,05 | 0,25 | 0    | 99,5  | 0    | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,4  | 0,03  |

Na figura 3.1 está representada a microestrutura do alumínio AA6082-T6 e do aço carbono DC06. Pode-se notar que o tamanho de grão no alumínio é bastante irregular e em alguns casos muito alongado. Já no caso do aço, os grãos não são muito alongados apesar de o tamanho de grão ser também irregular.



**Figura 3.1. (a) Microestrutura do alumínio AA6082-T6 e (b) do aço carbono, ampliação 100x**

O alumínio AA6082-T6 tem uma dureza média de 107,0 HV<sub>0,2</sub>, o alumínio AA1050 uma dureza de 37,9 HV<sub>0,2</sub> e o aço carbono 99,5 HV<sub>0,2</sub>, medidas no microdurómetro.

### 3.1.2. Equipamentos utilizados

#### 3.1.2.1. Análise microestrutural

A análise microestrutural foi realizada usando o microscópio ótico Leica DM 4000 MLED, com a câmara incorporada Leica MC 120HD, usando ampliações de 100x até 1000x, sendo que o registo fotográfico foi realizado através do software LAS (Leica Application Suite).

#### 3.1.2.2. Análise de durezas

Para a medição da dureza em Vickers, usou-se o microdurómetro Struers-Duramin 2 para realizar as indentações e o microscópio Leica DM4000 MLED para realizar a medição das diagonais dessas indentações. Com a média das duas diagonais usava-se a seguinte equação:

$$Dureza(Vickers) = 1854,4 * \frac{F}{D^2} \quad (14)$$

Sendo F a força usada em grammas/força e D a média das duas diagonais em micrómetros.

#### 3.1.2.3. Ensaios de tração-corte

Para a realização dos ensaios de tração-corte, foi usado o equipamento SHIMADZU AGS-X 100kNXplus e o extensómetro ótico GOM Aramis 5M para a avaliação da deformação.

#### 3.1.2.4. Análise SEM/EDS

Para a realização da análise SEM/EDS foi usado o microscópio eletrónico de varrimento ZEISS GEMINI 2, disponível no Instituto Pedro Nunes.

## 3.2. Nomenclatura dos ensaios

Os materiais usados foram identificados por CS (*carbon steel*) para o aço carbono e AA (*aluminum alloy*) para os alumínios, seguidos de AA6082 ou AA1050, para o caso do alumínio AA6082-T6 e do alumínio AA1050, respetivamente.

Para uma melhor leitura e análise, os ensaios neste documento terão a seguinte nomenclatura: A primeira parte será indicar os materiais envolvidos, sendo que para cada caso será placa voadora/placa intermédia/placa base. A segunda parte será indicar o explosivo, que será ANF para o ANFO e PRI para o Primer, bem como a sua espessura.

Por exemplo, no caso de ser ter um ensaio com placa voadora e intermédia de alumínio e placa base de aço carbono e usando 20mm de ANFO a configuração será AA/AA/CS-ANF20. No caso dos ensaios de tração-corte, acrescenta-se à nomenclatura anterior descrita Tx sendo que, x é o número de provete de tração para esse ensaio.

### 3.3. Preparação dos ensaios

É necessário para cada uma das chapas, cortá-las à medida correta, lixá-las e limpá-las para retirar qualquer oxidação ou impurezas presentes antes de qualquer ensaio para que a ligação seja de maior qualidade.

De seguida, é necessário montar a caixa de MDF que irá conter o explosivo que ficará acima da placa voadora. Estas caixas variam de tamanho de ensaio para ensaio conforme se apresenta no Apêndice A. É necessário também montar um sistema para que seja possível medir a velocidade de detonação.

Por fim, a colocação do explosivo na caixa é realizada por um professor responsável no local onde se realiza a explosão (Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio (LEDAP), Condeixa) para que não haja perigo no transporte. Nestes ensaios foram usadas duas misturas explosivas:

- Primer com EPS (que é usado como sensibilizante);
- ANFO.

A figura 3.2 apresenta o esquema de um dos ensaios apenas com as placas e com caixa.



Figura 3.2. Esquema do ensaio AA/AA/CS-PRI15

### 3.3.1. Medição da velocidade de detonação

A medição da velocidade de detonação depende do explosivo a utilizar:

- No caso de usar Primer, usam-se sondas, produzidas no departamento, e conectam-se essas sondas a um osciloscópio digital LeCroy Wavejet 352 de modo a obtermos os tempos a que cada sonda é destruída na detonação. Neste caso usam-se 6 sondas;
- Quando se usa ANFO, utilizam-se apenas quatro sondas, cada uma é conectada a um cronómetro HP 5334B *Universal Counter* que irá fornecer o tempo que passa desde que a primeira sonda é acionada até quando uma nova sonda seja alcançada. Os aparelhos utilizados para este caso encontram-se na figura 3.3. Como só existem três aparelhos, o número máximo de sondas que podemos usar são quatro, ao contrário do osciloscópio, em que se podem usar quantas sondas precisarmos. Não se deve usar osciloscópio neste caso, já que para o caso do ANFO, em outros ensaios realizados ocorrem erros de medição.

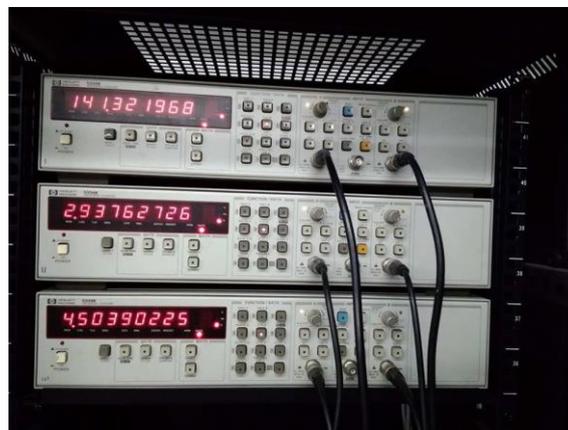
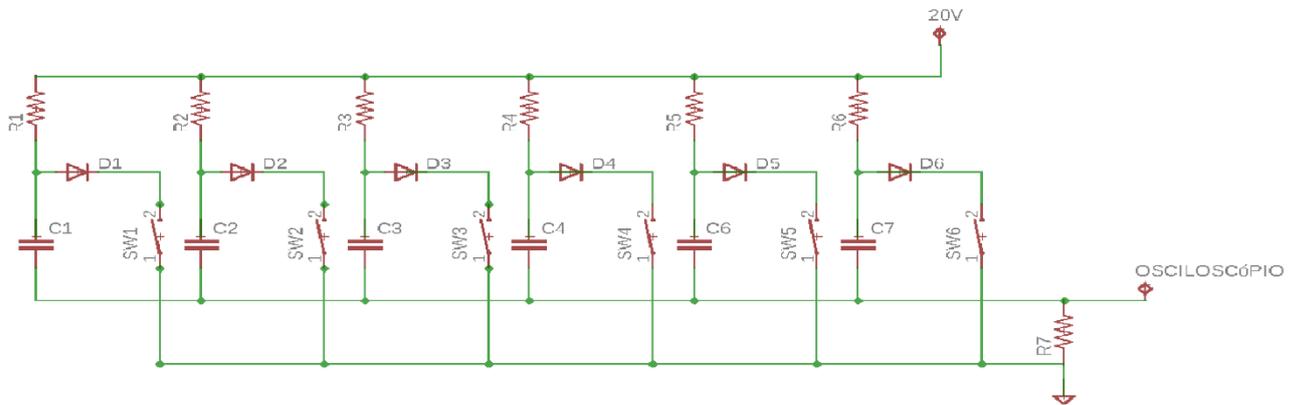


Figura 3.3. Cronómetros usados nos ensaios com ANFO

Cada sonda é constituída por um tubo de aço com 0,9mm de diâmetro e fios condutores. As sondas para o caso do Primer têm além dos constituintes já referidos, um condensador (1nm), um díodo que não permite a passagem de uma corrente inferior a 40V e uma resistência (1M $\Omega$ ) para cada sonda. É necessária outra resistência de 47 $\Omega$  para fazer o contacto entre o fio proveniente do osciloscópio e o fio proveniente dos condensadores.

O esquema está representado na figura 3.4 representa o circuito usado nos ensaios com Primer.



**Figura 3.4. Esquema para ensaios com Primer**

O fio de cobre revestido passa pelo meio do tubo de aço e é ligado a um fio condutor no caso do ANFO. No caso do Primer este fio de cobre é ligado ao diodo, e depois fazem-se duas ligações: uma para o condensador e outra para a resistência de  $1\text{M}\Omega$ . Em ambos os casos, existe um outro fio condutor ligado a todos tubos de aço. Apenas no Primer é necessário colocar uma ligação entre o fio proveniente do condensador com o fio proveniente dos tubos de aço, usando para essa ligação uma resistência de  $47\Omega$ . A ligação com a resistências de  $1\text{M}\Omega$  é alimentada por 20V em todo o processo. Quando ocorre a explosão, o fio dos tubos e o fio em cobre ficam em contacto, e é esse sinal que é obtido e que nos proporciona os dados necessários para calcular a velocidade de detonação.

As sondas são colocadas num suporte de MDF que é colocado por cima do explosivo tal como se observa na figura 3.5.



**Figura 3.5. Esquema das sondas para os ensaios que usam o Primer**

### 3.4. Realização dos ensaios de soldadura

Realizaram-se cinco ensaios de soldadura. Os ensaios usaram explosivos distintos, sendo realizados ensaios com o uso de placa intermédia e outros sem. Como por exemplo, o ensaio AA/CS-ANF25 é muito semelhante com o ensaio AA/AA/CS-ANF25 pois só muda a utilização da placa intermédia, e o ensaio AA/AA/CS-ANF25 pode ser comparado com o ensaio AA/AA/CS-PRI15, em que se muda o explosivo. Na tabela 3.2. estão presentes os principais parâmetros principais de cada um dos ensaios.

**Tabela 3.2. Condições de soldadura**

|  | AA/CS-<br>PRI15       | AA/CS-<br>ANF20 | AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS<br>- ANF25 | AA/AA/CS<br>-PRI15 |
|--|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| Massa explosivo (g)                      | 125                   | 265             | 351             | 354                 | 123                |
| Massa placa voadora (g)                  | 143                   | 144             | 149             | 144                 | 141,53             |
| Massa placa intermédia (g)               | -                     | -               | -               | 48                  | 47,4               |
| Explosivo usado                          | Primer<br>+ 4%<br>EPS | ANFO            | ANFO            | ANFO                | Primer +<br>EPS    |
| Rácio do explosivo                       | 0,868                 | 1,84            | 2,36            | 2,458               | 0,872              |
| STD1 (mm)                                | 4,5                   | 4,5             | 4,5             | 4,5                 | 4,5                |
| STD2 (mm)                                | -                     | -               | -               | 1,5                 | 1,5                |
| Densidade explosivo (kg/m <sup>3</sup> ) | 515,36                | 815,98          | 793,42          | 809,14              | 476,2              |
| Volume de explosivo (mm <sup>3</sup> )   | 242550                | 324800          | 442387          | 437500              | 258300             |
| Massa iniciador (RDX) (g)                | 27                    | 25              | 26              | 31                  | 22,82              |

### 3.5. Preparação das amostras para a análise de resultados

#### 3.5.1. Corte

Após a realização dos ensaios de soldadura, o conjunto foi cortado na oficina no DEM, retirando as amostras. Um esquema de corte das placas pode ser consultado na figura 3.6. As amostras das restantes placas podem ser observadas no Apêndice B.

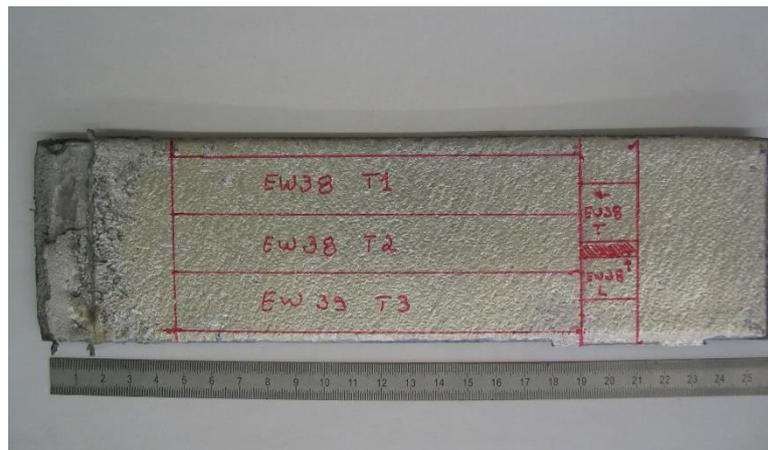


Figura 3.6. Esquema de corte das placas do ensaio AA/CS-PRI15, com identificação das amostras a analisar

### 3.5.2. Polimento

Para proceder à análise metalográfica é necessário polir as amostras. Esta tarefa foi realizada usando várias lixas começando por uma de maior tamanho de grão seguindo-se outras de menor tamanho. Por fim, com um pano, poliram-se as amostras usando uma suspensão de diamante, com partículas com  $3\mu\text{m}$  de diâmetro, e lubrificante.

### 3.5.3. Ataque químico

O ataque químico é realizado após o polimento e é feito no intuito de revelar as fronteiras de grão dos metais em uso. Para isso é necessário realizar dois ataques químicos distintos: primeiro realiza-se o ataque químico no alumínio AA6082 e de seguida no aço carbono. Não foi possível realizar o ataque químico no alumínio AA1050, tendo sido feitas várias tentativas, mas sem nenhum sucesso.

O ataque químico para o alumínio é realizado usando o reagente “Weck’s”, composto por uma solução com 100ml de água, 4g de  $\text{KMnO}_4$  (Permanganato de potássio) e 1g de  $\text{NaOH}$ . O ataque químico do aço é realizado usando o reagente *Nital 2%*, constituído por 98% de álcool etílico e 2% de  $\text{HNO}_3$ .

### 3.5.4. Microdureza

Foram medidas microdurezas em cada um dos ensaios para comparar com os valores obtidos na microdurezas dos materiais bases. As indentações efetuadas em cada uma das amostras foram com uma carga de 200g durante 15 segundos sendo que o espaçamento entre as indentações pode ser consultado no Apêndice C. Já no caso dos intermetálicos,

foram criadas várias indentações com uma carga de 25g durante 15 segundos ao longo da interface entre placas.

### **3.5.5. Ensaio de tração-corte**

Os ensaios de tração-corte de cada um dos ensaios de soldadura foram realizados usando três provetes maquinados como se apresenta no Apêndice F. Esta maquinação serviu para que a fratura dos provetes fosse localizada. Após a maquinação, pintam-se os provetes com tinta branca de um dos lados e pulveriza-se tinta preta. O padrão que se obtém, permite ao software Aramis detetar a zona que será tracionada e criar a malha necessária para a medição da deformação. A velocidade usada no ensaio de tração-corte é de 1mm/min.

### **3.5.6. Análise SEM/EDS**

Esta análise serviu para realizar a fractografia dos provetes de tração-corte e para caracterizar a microestrutura e a composição química na zona da interface das amostras retiradas dos ensaios.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Janela de soldabilidade

A janela de soldabilidade obtida para os ensaios encontra-se apresentada na figura 4.1.

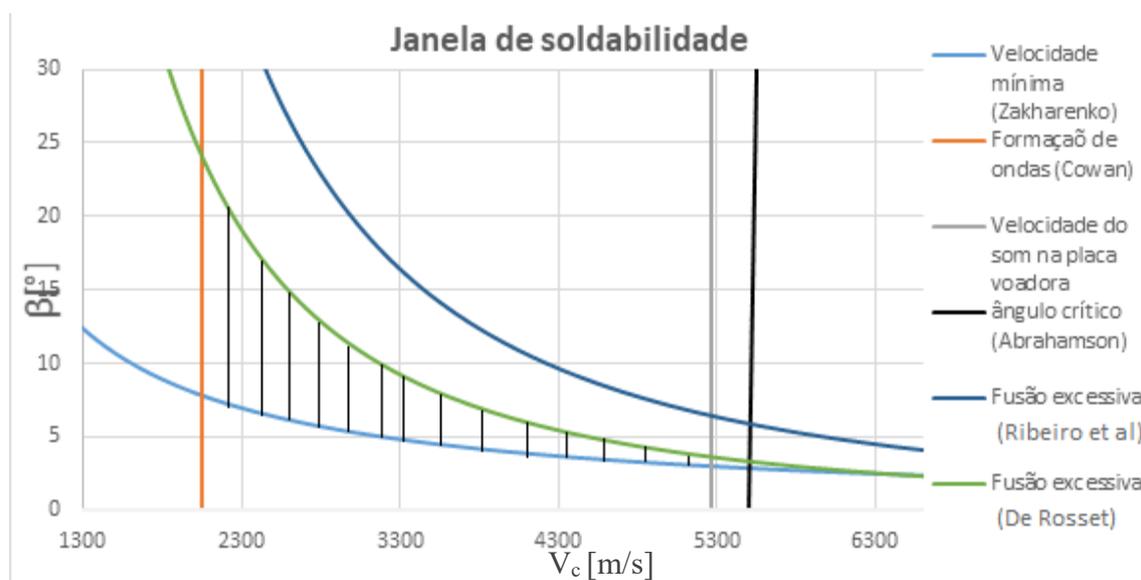


Figura 4.1. Janela soldabilidade para os ensaios

Como referido anteriormente é possível calcular a velocidade de impacto através das fórmulas anteriormente apresentadas, equação (8) até à equação (13). Como se tem a distância entre cada uma das sondas e utilizando os valores dos sinais elétricos captados pelo osciloscópio, no caso de usarmos Primer como explosivo, e pelo *Universal Counter*, no caso do ANFO, é possível calcular a velocidade de detonação a partir do declive da reta formada pelos pontos obtidos. Para todas as soldaduras realizadas, à exceção do ensaio AA/CS-ANF20 em que a detonação não se deu na totalidade, o  $R^2$  foi um valor muito próximo de 1, tal como se pode observar no Apêndice D. Depois de calculada a velocidade de detonação para cada um dos ensaios referidos na tabela 4.1, é possível calcular a velocidade de impacto. As constantes  $C1$  e  $C2$ , que servem para calibrar a curva, foram calculadas de modo a que o ponto de calibração  $[V_{p,cal}, t_v]$  pertencesse a essa curva. A velocidade de detonação do ensaio AA/CS-ANF25 foi usada para o ensaio AA/AA/CS-ANF25 já que se usou o mesmo explosivo.

Tabela 4.1. Dados para cálculo da velocidade de detonação

| Sondas      | AA/CS-PRI15                    |                     | AA/CS-ANF25<br>AA/AA/CS-ANF25  |                     | AA/AA/CS-PRI15                 |                     |
|-------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|
|             | Distância<br>à 1ªsonda<br>[mm] | Tempo<br>[ $\mu$ s] | Distância<br>à 1ªsonda<br>[mm] | Tempo<br>[ $\mu$ s] | Distância<br>à 1ªsonda<br>[mm] | Tempo<br>[ $\mu$ s] |
| 1           | 14,64                          | 4,76                | 9,94                           | 5,202               | 15,2                           | 5,9                 |
| 2           | 34,88                          | 12,02               | 24,32                          | 13,111              | 35,38                          | 17,5                |
| 3           | 45,04                          | 15,88               | 44,204                         | 22,713              | 45,44                          | 23,4                |
| 4           | 59,82                          | 20,8                | -                              | -                   | 60,64                          | 30,6                |
| 5           | 79,66                          | 27,96               | -                              | -                   | 80,12                          | 36,9                |
| $V_d$ [m/s] | 2836                           |                     | 1937,7                         |                     | 2054,6                         |                     |

No gráfico apresentado na figura 4.2 apresenta-se a velocidade e a sua posição ao longo do tempo para o caso de não existir placa intermédia. Como se sabe o valor da distância entre placas, sabe-se a velocidade a que a placa voadora colide com a placa base retirando os valores no gráfico tal como está esboçado. Neste caso, a velocidade de impacto foi de 574m/s e a placa esteve no ar cerca de 9 $\mu$ s. Os valores para o cálculo da velocidade de impacto dos vários ensaios podem ser consultados no Apêndice E.

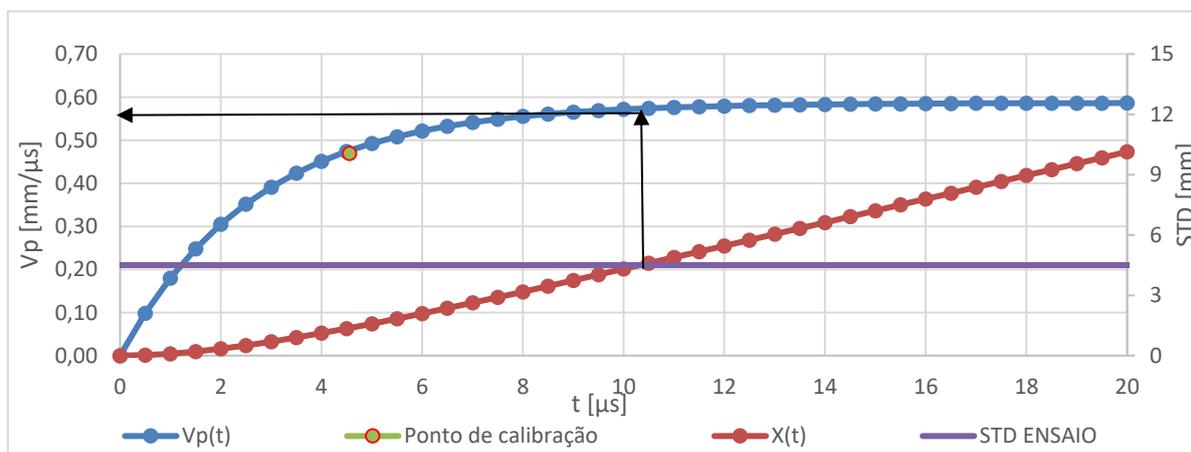


Figura 4.2. Velocidade de impacto AA/CS-ANF25

Na figura 4.3, é apresentado um ensaio com os mesmos parâmetros do teste apresentado anteriormente, mas com o uso de placa intermédia.

Como se pode observar, a velocidade de impacto baixou para os 504m/s e como o STD total do ensaio são 6mm, o tempo em que a placa voadora se encontra no ar será de 13,5 $\mu$ s. Os parâmetros gerais dos vários ensaios são apresentados na tabela 4.2.

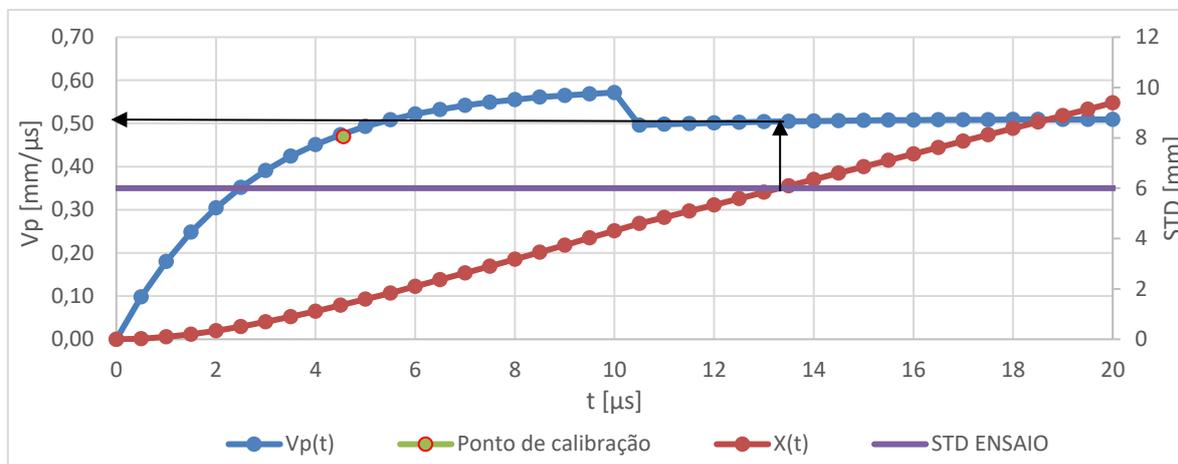


Figura 4.3. Velocidade de impacto AA/AA/CS-ANF25

Tabela 4.2. Parâmetros principais do ensaio

|  | AA/CS-<br>PRI15 | AA/CS-ANF25 | AA/AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS-<br>PRI15 |
|--|-----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| $V_p$ [m/s]                                    | 500,57          | 574,18      | 504,82             | 284,37             |
| $V_d$ [m/s]                                    | 2836            | 1937,7      | 1937,7             | 2054,6             |
| $\beta$ [°]                                    | 10,40           | 17,49       | 15,36              | 8,15               |
| $\rho_{\text{explosivo}}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 515,36          | 793,42      | 793,42             | 476,2              |
| Placa intermédia                               | Não             | Não         | Sim                | Sim                |

Com estes parâmetros, podem-se colocar os pontos na janela de soldabilidade, tal como se apresenta na figura 4.4. Existem pontos um pouco fora da janela de soldabilidade. O ensaio AA/CS-PRI15 encontra-se um pouco acima da linha de fusão excessiva, para o qual usamos  $N=0,11$  e os ensaios AA/CS-ANF25 e o AA/AA/CS-ANF25 encontram-se à esquerda da linha de formação de ondas. Sendo isto observado, é esperado que no ensaio AA/AA/CS-ANF25 e no AA/CS-ANF25 não ocorra formação de ondas, e no ensaio AA/AA/CS-PRI15 existam zonas com demasiado material fundido. O ensaio AA/CS-ANF20, como não foi possível medir a velocidade de detonação, não foi colocado na janela de soldabilidade.

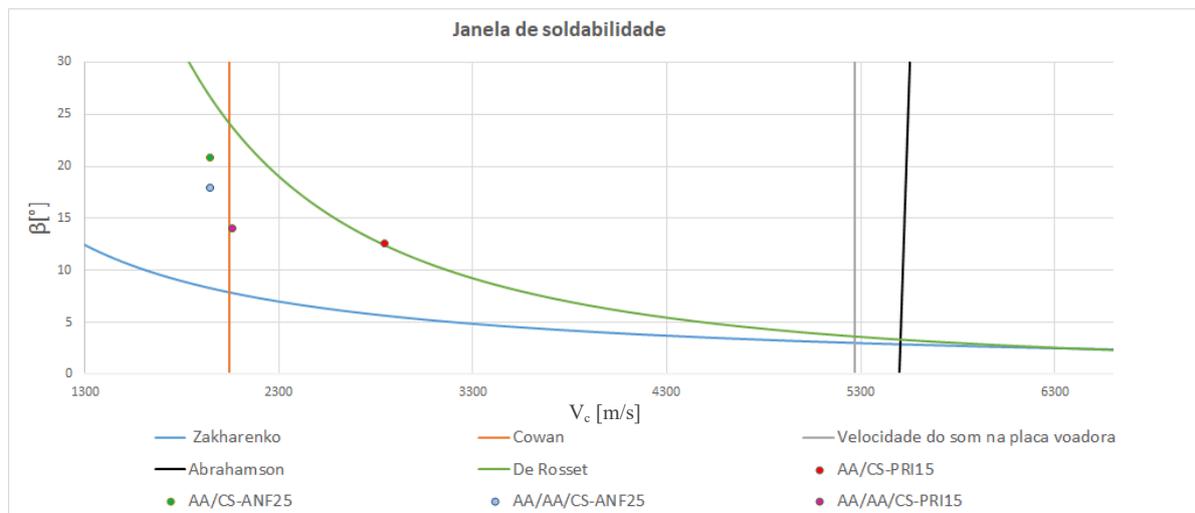


Figura 4.4. Janela de soldabilidade com os ensaios

## 4.2. Análise Macroscópica

### 4.2.1. AA/CS-PRI15

Neste ensaio, como se pode observar na figura 4.5, as placas uniram e apresentam uma aparente boa ligação. No ponto onde se inicia a ligação (esquerda) ocorre uma grande deformação das placas, principalmente a de alumínio, devido à grande velocidade de detonação do explosivo RDX. Também como se pode observar, a superfície do alumínio apresenta alguma rugosidade resultante do contacto direto com o PRIMER.



Figura 4.5. Macroscopia ensaio AA/CS-PRI15

#### 4.2.2. AA/CS-ANF20

Este foi o único ensaio em que as placas não soldaram totalmente, já que a detonação do ANFO só se deu até meio da placa. Uma das causas para que isto tenha ocorrido, pode ter sido que o ANFO não tivesse a espessura mínima de detonação necessária. Mais uma vez, pode-se observar que a detonação inicial do explosivo RDX danificou as placas, tal como se ilustra na figura 4.6.



Figura 4.6. Macroscopia ensaio AA/CS-ANF20

#### 4.2.3. AA/CS-ANF25

Como se pode observar na figura 4.7, o explosivo não teve uma detonação homogênea. Apesar de na imagem parecer que a detonação não ocorreu completamente, as placas ficaram bem soldadas. A partir deste ensaio usaram-se umas novas caixas com uma proteção inicial, o que fez com que a deformação inicial fosse muito menor que nos ensaios anteriores. (Apêndice A)

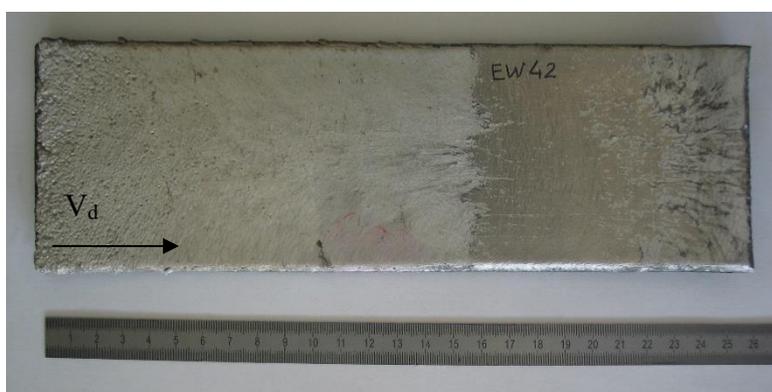


Figura 4.7. Macroscopia ensaio AA/CS-ANF25

#### 4.2.4. AA/AA/CS-ANF25

O ensaio AA/AA/CS-ANF25 é um ensaio com as mesmas características que o anterior, mas usou-se uma placa intermédia de alumínio AA1050. O ensaio apresenta boa coesão entre os materiais envolventes. Houve uma melhor detonação que no ensaio anterior, como se pode observar na figura 4.8.



Figura 4.8. Macroscopia ensaio AA/AA/CS-ANF25

#### 4.2.5. AA/AA/CS-PRI15

Este ensaio, que deveria ter os mesmos parâmetros que AA/CS-PRI15, obteve uma menor velocidade de detonação que o previsto, provavelmente devido ao excesso de EPS. Pode-se observar na figura 4.9 que a detonação ocorreu na totalidade e que houve um pouco de deformação no ponto inicial de detonação. As placas mais uma vez, apresentaram uma boa ligação entre elas.

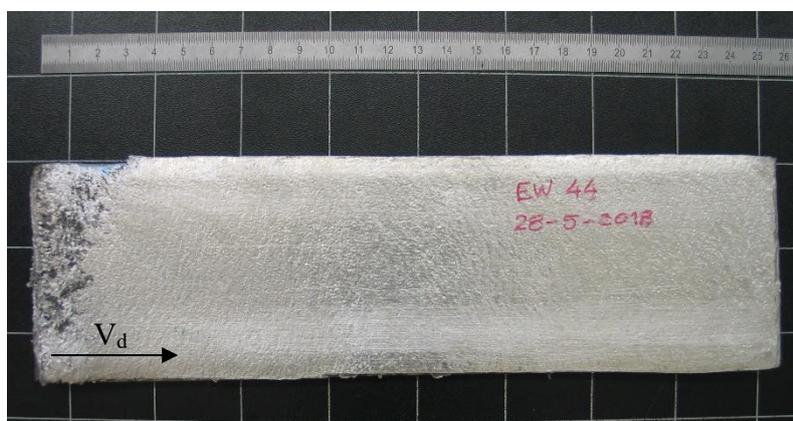


Figura 4.9. Macroscopia ensaio AA/AA/CS-PRI15

### 4.3. Análise microscópica

#### 4.3.1. AA/CS-PRI15

Na figura 4.10 está representada a interface do ensaio AA/CS-PRI15. Como se pode observar, esta interface tem uma camada intermédia praticamente contínua. É possível observar que há uma deformação entre as duas chapas, mas não grande o suficiente para que ocorra formação de ondas de dimensão considerável. Ocorre uma grande deformação do grão de alumínio na interface entre placas, sendo que no aço também ocorre, mas não tão elevada. A camada intermédia apresenta uma espessura média de  $31,72\mu\text{m}$  e uma dureza média de  $284,84\text{HV}_{0,025}$  (máxima dureza  $345,1\text{HV}_{0,025}$  e mínima  $209,04\text{HV}_{0,025}$ ).

Para saber a composição desta camada, foi realizada uma análise EDS, sendo que na tabela 4.3 estão apresentados valores da composição de algumas zonas da interface. Foi colocada a secção “Al(%) / Fe(%)”, que consiste no rácio entre o alumínio e o ferro, para tentar diferenciar os compostos presentes na interface. Este ensaio encontrava-se um pouco acima da linha de fusão excessiva na janela de soldabilidade, mas não se observaram zonas de fusão generalizada na interface.

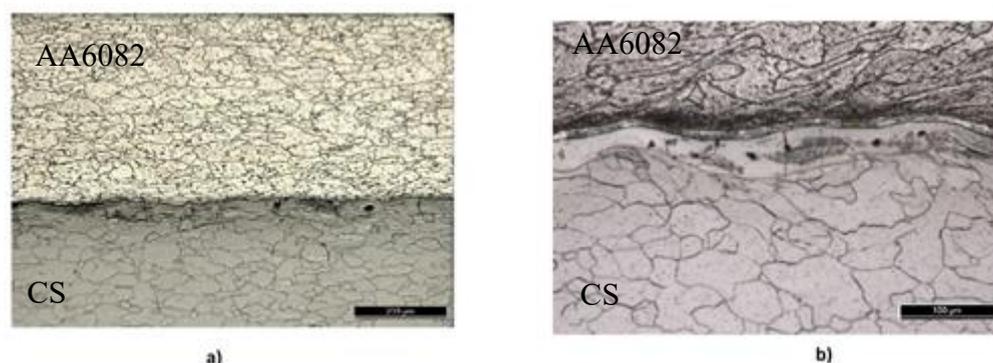


Figura 4.10. a) Interface AA/CS-PRI15, ampliação 200x, b) Interface AA/CS-PRI15, ampliação 500x

Tabela 4.3. Composição interface do ensaio AA/CS-PRI15 (%atômica)

|   | Al (%) | Fe (%) | Si (%) | Mg (%) | Al(%) / Fe(%) |
|---|--------|--------|--------|--------|---------------|
| A | 86,93  | 13,07  | 0      | 0      | 6,65          |
| B | 77,91  | 21,53  | 0      | 0,56   | 3,62          |
| C | 76,67  | 21,79  | 0,79   | 0,75   | 3,53          |
| D | 81,73  | 16,86  | 0,78   | 0,63   | 4,85          |

A zona de onde foram retirados estes espectros está representada na figura 4.11. Como se pode observar, a camada intermédia observada ao longo da interface não tem sempre a mesma composição podendo, portanto, ser composta por mais do que uma fase. As ondas deste ensaio apenas puderam ser observadas na análise SEM, tal como se observa na figura 4.12.

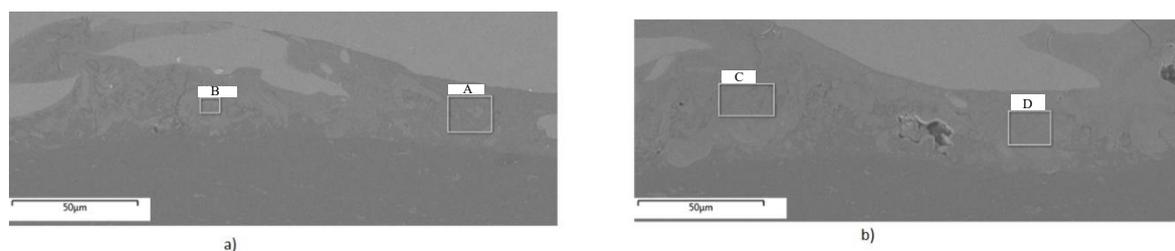


Figura 4.11. a) Espectro A e B, b) Espectro C e D

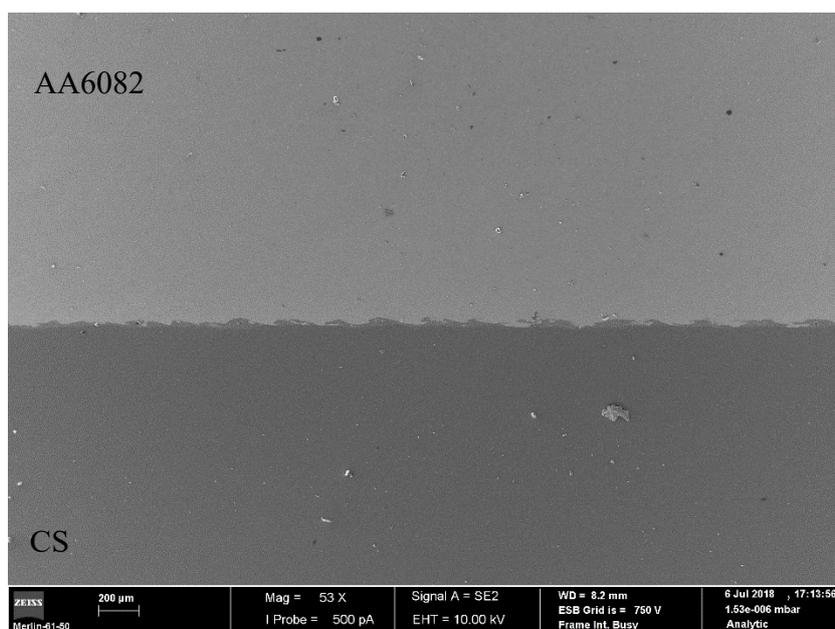


Figura 4.12. Ondas ensaio AA/CS-PRI15, ampliação 53x

### 4.3.2. AA/CS-ANF20

Na figura 4.13, observa-se que existe uma grande camada intermédia na interface e uma grande deformação dos grãos de alumínio e de aço carbono. A camada de transição neste caso, tem uma dureza média de 518,34HV<sub>0,025</sub> (máximo 879,21HV<sub>0,025</sub> e mínimo 236,43HV<sub>0,025</sub>) e uma espessura de 68,566µm, o que é muito superior ao ensaio anterior.

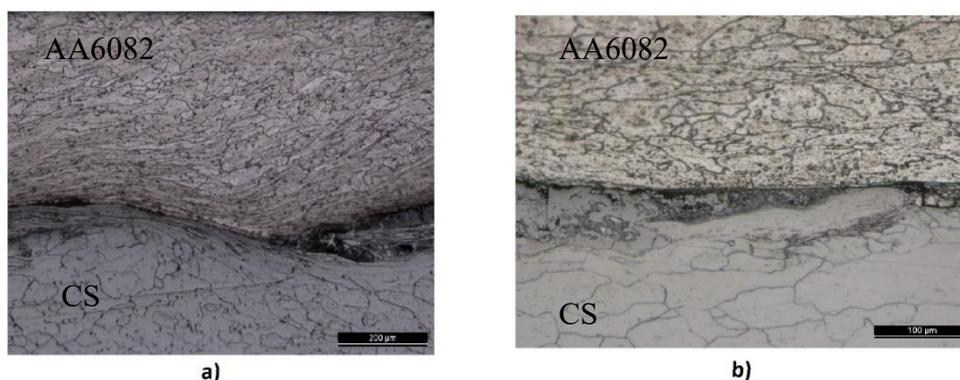


Figura 4.13. a) Interface AA/CS-ANF20, ampliação 200x, b) Interface AA/CS-ANF20, ampliação 500x

### 4.3.3. AA/CS-ANF25

Este ensaio foi muito semelhante ao ensaio anterior, porém, como se aumentou a espessura do ANFO, o rácio de explosivo também aumentou. Na figura 4.14 observa-se uma grande deformação dos grãos das duas placas e uma camada intermédia de grandes dimensões se bem que pontual. Neste ensaio a camada intermédia apresenta uma dureza máxima 832,89HV<sub>0,025</sub> e mínima de 220,60HV<sub>0,025</sub> e uma espessura média de 68,751 μm.

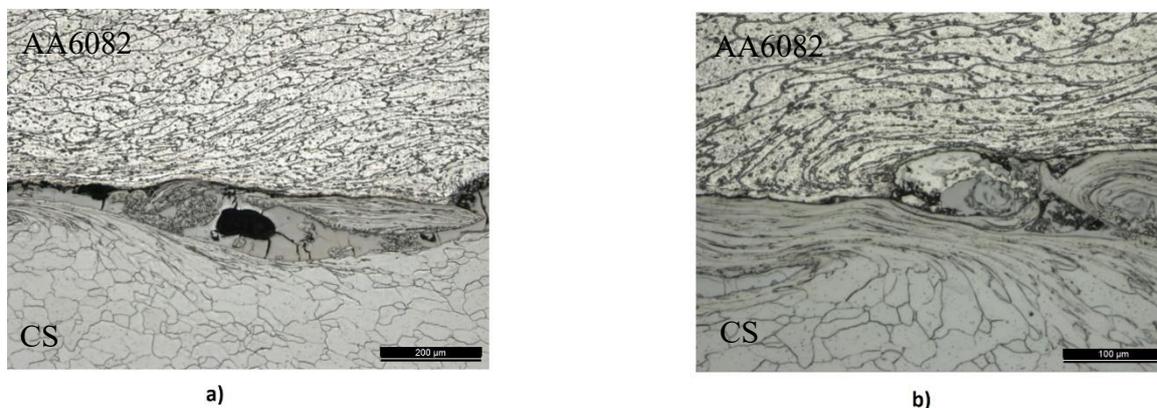


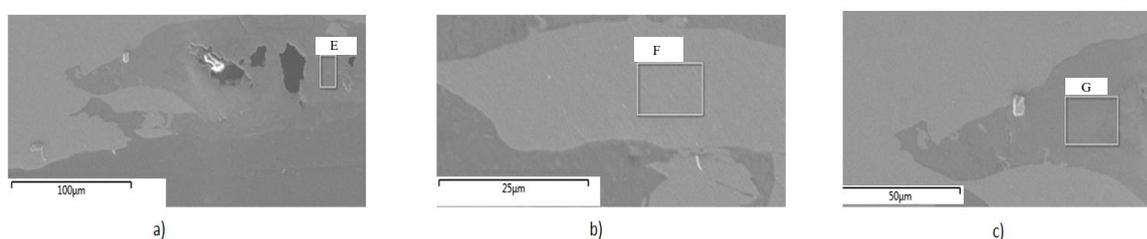
Figura 4.14. a) Interface AA/CS-ANF25, ampliação 200x, b) Interface AA/CS-ANF25, ampliação 500x

Mais uma vez, foi realizada uma análise EDS para saber a composição da camada intermédia presente na interface que pode ser consultada na tabela 4.4.

**Tabela 4.4. Composição interface do ensaio AA/CS-ANF25 (%atômica)**

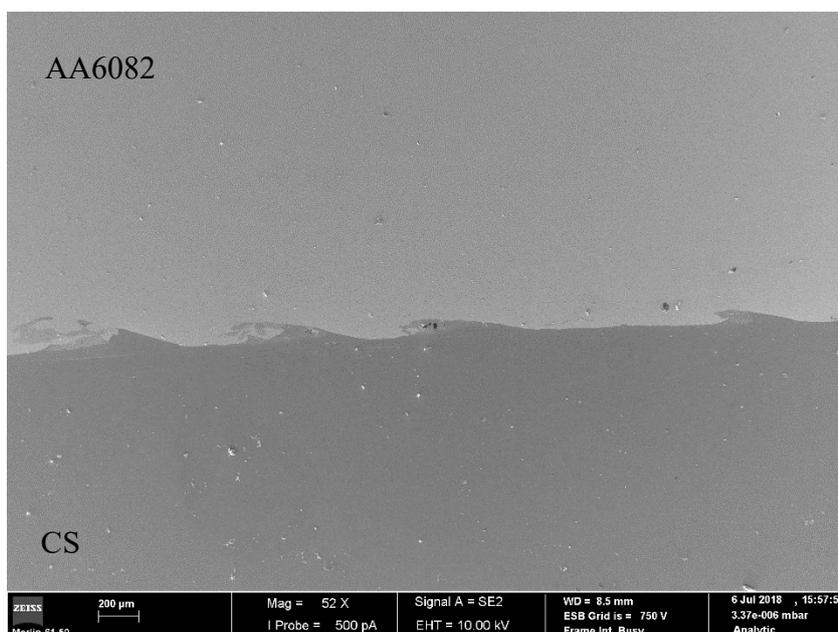
|   | Al (%) | Fe (%) | Si (%) | Mg (%) | Al(%) / Fe(%) |
|---|--------|--------|--------|--------|---------------|
| E | 85,27  | 13,31  | 0,77   | 0,63   | 6,41          |
| F | 0      | 100    | 0      | 0      | 0             |
| G | 81,3   | 17,14  | 0,81   | 0,76   | 4,74          |

A zona onde se encontram estes espectros podem ser observados na figura 4.15.



**Figura 4.15. a) Espectro E, b) Espectro F, c) Espectro G**

Mais uma vez, só foi possível observar as ondas neste ensaio recorrendo à análise SEM, que se encontra na figura 4.16.



**Figura 4.16. Ondas ensaio AA/CS-ANF25, Ampliação 52x**

#### 4.3.4. AA/AA/CS-ANF25

Este ensaio teve os mesmos parâmetros do ensaio anterior, mas colocou-se uma placa intermédia entre as outras duas placas. Como se pode observar na figura 4.17, formaram-se ondas nas interfaces AA6082-AA1050 e AA1050-CS. Em ambos os casos, nos materiais atacados quimicamente pode-se observar que o grão nas zonas de onda tem uma deformação muito elevada. As ondas entre o aço e o alumínio AA1050 (figura 4.17a) têm uma amplitude média de  $111,43\mu\text{m}$  e um comprimento de onda de  $1123\mu\text{m}$  e as ondas entre o alumínio AA1050 e o alumínio AA6082 (4.17b) têm uma amplitude média de  $467,52\mu\text{m}$  e um comprimento de onda de  $1191,3\mu\text{m}$ , sendo estas ondas mais semelhantes entre si. A camada intermédia entre o alumínio AA1050 e o aço carbono tem uma espessura média de  $45,38\mu\text{m}$  e uma dureza de  $589,23\text{HV}_{0,025}$  (dureza máxima  $827,33\text{HV}_{0,025}$  e mínima  $410,61\text{HV}_{0,025}$ ). Como se pode já constatar, o tamanho desta zona diminui com o uso de placa intermédia, sendo que a dureza aumentou um pouco. Este ensaio e o anterior encontram-se na zona de não formação de ondas na janela de soldabilidade, sendo que, neste ensaio houveram ondas de grande dimensão nas duas interfaces, provavelmente por causa da placa intermédia.

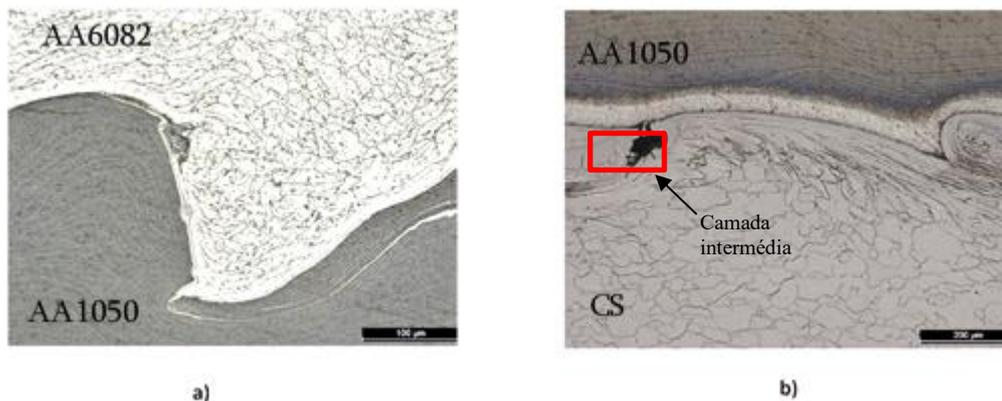


Figura 4.17. a) Interface AA6082-AA1050, ampliação 200x, b) Interface AA1050-CS, ampliação 500x

A análise EDS pode ser consultada na tabela 4.5. Pode-se observar que a composição química da camada intermédia revela alguma homogeneidade. As zonas destas análises podem ser visualizadas na figura 4.18.

Tabela 4.5. Composição interface do ensaio AA/AA/CS-ANF25 (%atômica)

|   | Al (%) | Fe (%) | Si (%) | Mg (%) | Al(%) / Fe(%) |
|---|--------|--------|--------|--------|---------------|
| H | 72,54  | 27,04  | 0,42   | 0      | 2,68          |
| I | 65,71  | 34,29  | 0      | 0      | 1,92          |
| J | 63,97  | 36,03  | 0      | 0      | 1,78          |
| K | 66,22  | 33,78  | 0      | 0      | 1,96          |
| L | 78,7   | 21,3   | 0      | 0      | 3,69          |
| M | 73,77  | 26,23  | 0      | 0      | 2,81          |

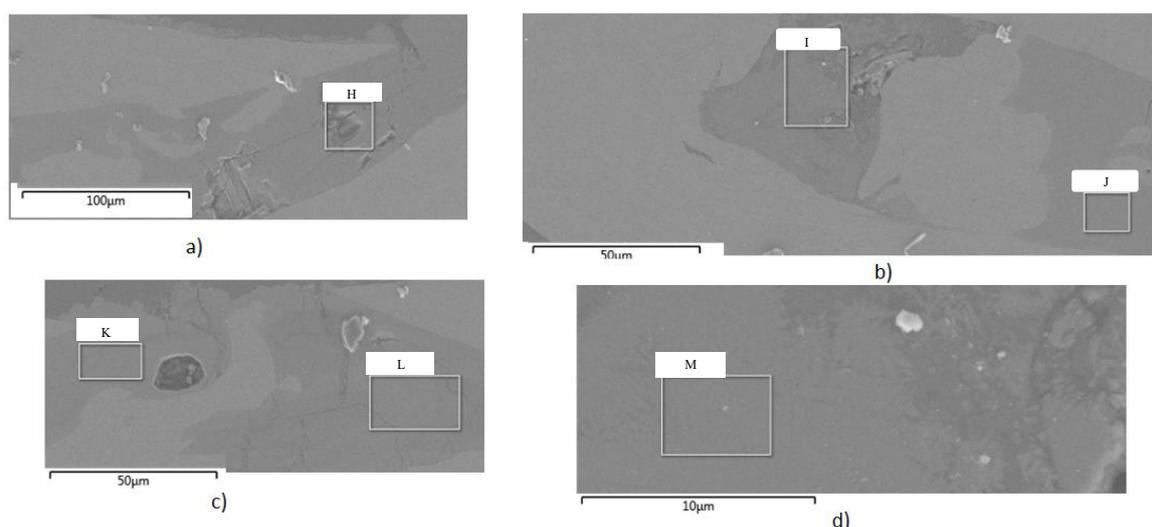


Figura 4.18. a) Espectro H, b) Espectro I e J c) Espectro K e L d) Espectro M

#### 4.3.5. AA/AA/CS-PRI15

Neste último ensaio, o Primer não obteve a velocidade pretendida (cerca de 2800m/s) e obteve uma velocidade semelhante à obtida na detonação do ANFO (um pouco mais de 2000m/s). Como se pode observar na figura 4.19, houve formação de ondas entre os alumínio com menor comprimento de onda que no ensaio anterior, mas de menor amplitude. Na interface alumínio AA1050- aço carbono ocorreram umas pequenas ondulações e entre cada ondulação uma grande camada de transição. A amplitude média das ondas entre alumínio é de 72,822  $\mu\text{m}$  e o comprimento de onda de 281  $\mu\text{m}$ . A camada intermédia para este caso teve uma dureza média de 354,93HV<sub>0,025</sub> (dureza máxima 463,1 e mínima 275,82) e

uma espessura média de 18,06  $\mu\text{m}$  sendo que foi o ensaio onde houve menos formação desta camada.

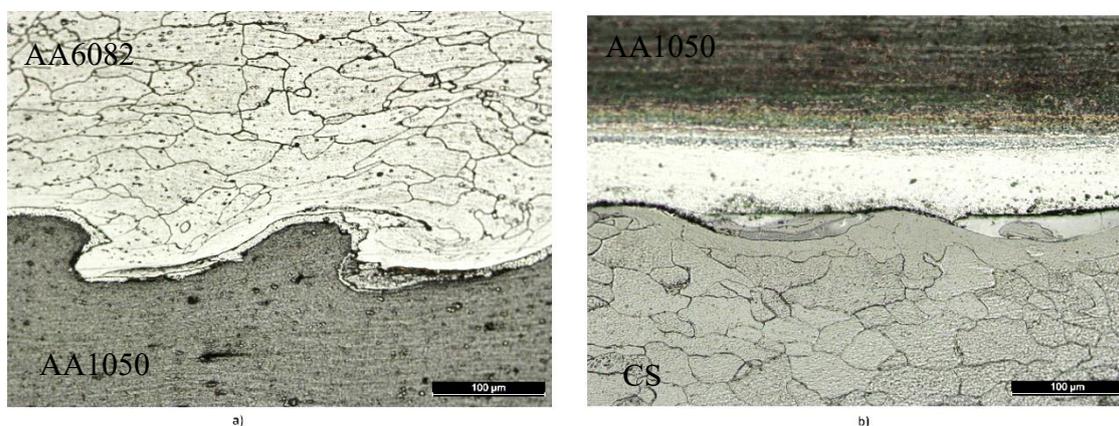


Figura 4.19. a) Interface AA6082-AA1050, ampliação 500x, b) Interface AA6082-CS, ampliação 500x

A análise EDS deste ensaio é muito diferente do ensaio anterior, já que a camada presente na interface têm uma maior percentagem de alumínio, tal como está representado na tabela 4.6. As zonas observadas estão na figura 4.20.

Tabela 4.6. Composição interface do ensaio AA/AA/CS-PRI15 (%atômica)

|   | Al (%) | Fe (%) | Si (%) | Mg (%) | Al(%) / Fe(%) |
|---|--------|--------|--------|--------|---------------|
| N | 88,92  | 11,08  | 0      | 0      | 8,03          |
| O | 89,24  | 10,76  | 0      | 0      | 8,30          |



Figura 4.20. a) Espectro 44L 1.3 b) Espectro 44L 2.1

## 4.4. Microdureza

### 4.4.1. AA/CS-PRI15

Na figura 4.21 está representado o perfil de microdureza para este ensaio. Como se pode observar, as durezas de ambos os materiais aumentam em relação ao material base sendo que na placa base, a dureza perto da interface é muito superior à observada nos restantes pontos. O alumínio apresenta um perfil de dureza uniforme em toda a sua espessura. A dureza média para a placa voadora foi de  $128,12\text{HV}_{0,2}$  e a dureza média da placa base foi de  $111,57\text{HV}_{0,2}$  o que corresponde a um aumento de 19,8% e de 12,2% em relação à dureza média do material base, respetivamente.

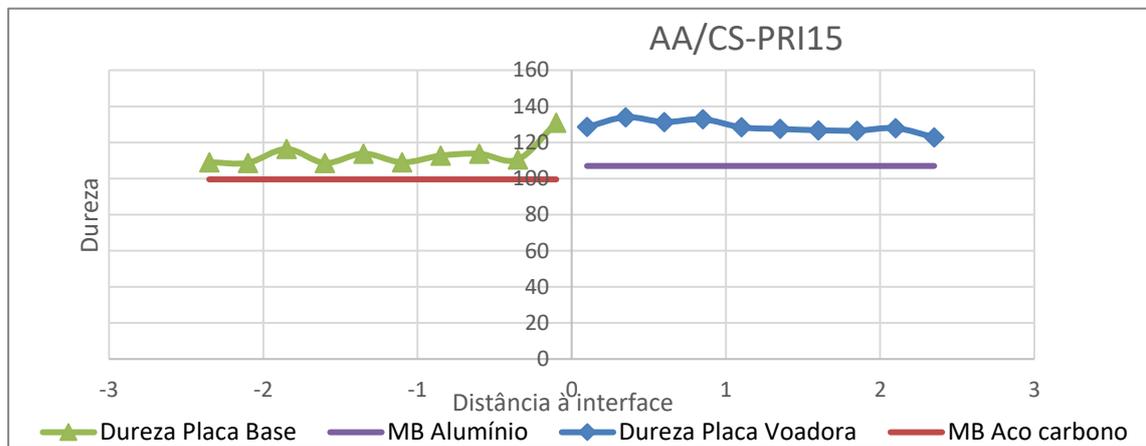


Figura 4.21. Perfil de dureza ensaio AA/CS-PRI15

### 4.4.2. AA/CS-ANF20

Neste ensaio, a dureza das placas é superior ao valor obtido no material base, tal como se observa na figura 4.22, sendo que mais uma vez, a chapa de aço carbono possui uma dureza com um valor mais elevado mais perto da interface. Isto deve-se à presença de uma grande deformação na zona da interface. A dureza média obtida na placa base é de  $116,06\text{HV}_{0,2}$  e a dureza média obtida no alumínio é de  $120,74\text{HV}_{0,2}$ , o que corresponde a um aumento de 16,6% na placa base e 12,8% na placa voadora em relação aos materiais base.

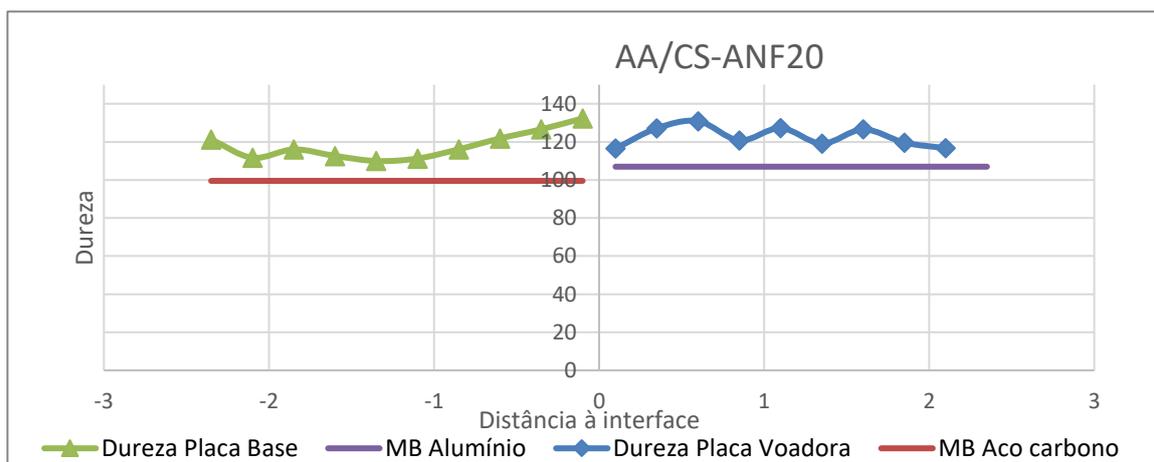


Figura 4.22. Perfil de dureza ensaio AA/CS-ANF20

#### 4.4.3. AA/CS-ANF25

Na figura 4.23, e tal como aconteceu nos resultados anteriores, as maiores diferenças entre durezas encontram-se na interface. Neste ensaio em particular, a dureza da placa voadora baixa para valores inferiores aos obtidos no material base perto da interface, algo que ainda não tinha acontecido anteriormente. Pode ter ocorrido perda de propriedades por parte do alumínio, já que é um alumínio tratado termicamente e, como foi sujeito a temperaturas elevadas, ocorreu alteração na estrutura e densidade dos precipitados endurecedores. No caso do aço carbono, a dureza na interface aumenta como nos restantes ensaios. A dureza média da placa voadora é de  $120,19HV_{0,2}$  e no caso da placa base é de  $125,86HV_{0,2}$ , o que corresponde a um aumento de 20,78% na placa base e 17,67% na placa voadora em relação aos materiais base.

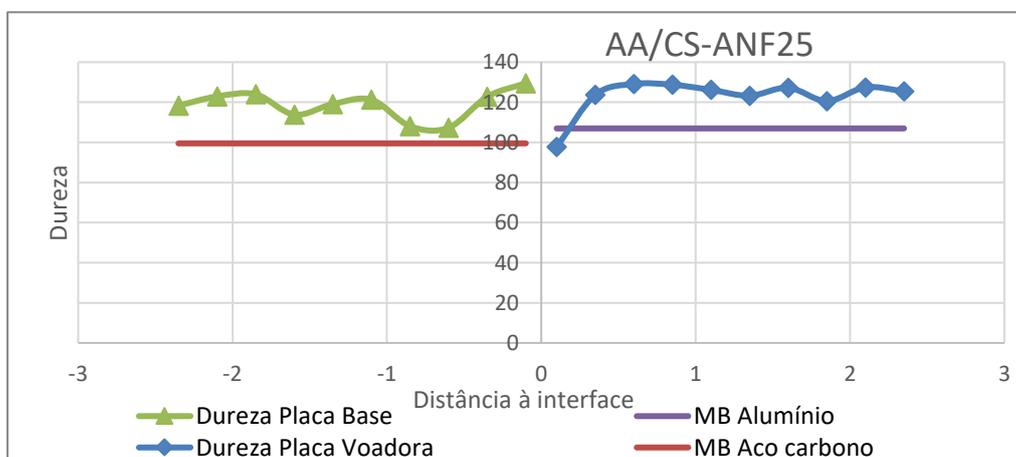


Figura 4.23. Perfil de dureza ensaio AA/CS-ANF25

#### 4.4.4. AA/AA/CS-ANF25

Nesta figura 4.24, podemos observar o perfil de microdureza deste ensaio. Como se pode constatar, existem três materiais distintos nesta soldadura sendo que, o alumínio AA1050 possui uma dureza muito inferior em relação aos restantes materiais. Neste caso e ao contrário dos anteriores, o aço carbono não possui um valor máximo perto da interface. Para este caso, a dureza média da placa base é de 113,12HV<sub>0,2</sub>, a dureza da placa intermédia é de 45,6HV<sub>0,2</sub> e a dureza média do alumínio AA6082 é de 122,85HV<sub>0,2</sub>, o que corresponde a um aumento de 13,67% na placa base, 20,25% na placa intermédia e 14,85% na placa voadora em relação aos materiais base.

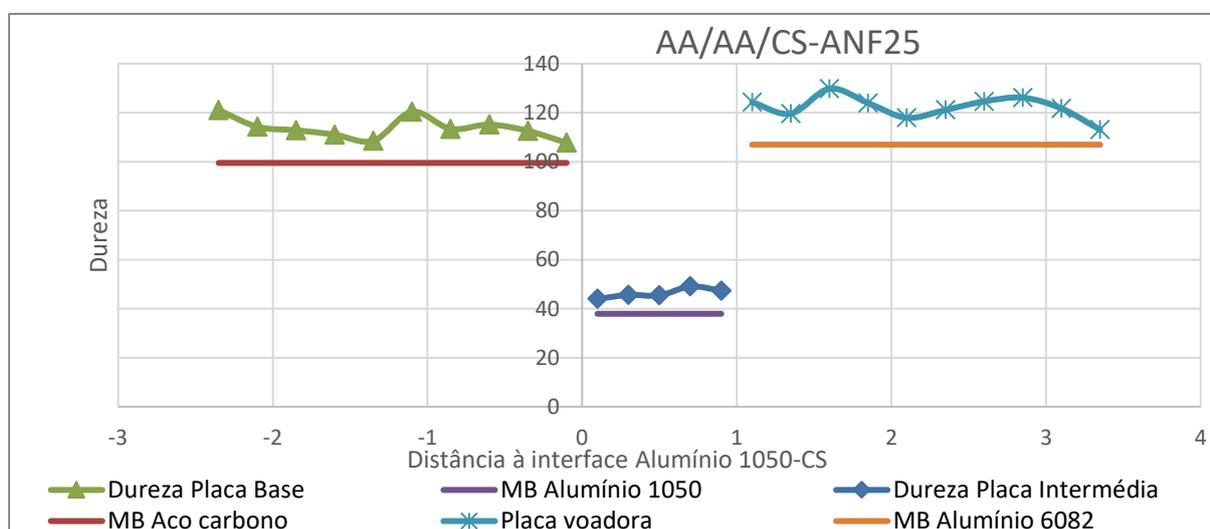


Figura 4.24. Perfil de dureza ensaio AA/AA/CS-ANF25

#### 4.4.5. AA/AA/CS-PRI15

Na figura 4.25, observa-se que a dureza da placa voadora e da placa base apresenta um valor máximo na interface. A dureza do alumínio AA1050 não varia muito ao longo da espessura, tendo, porém, um valor superior à dureza do material base. A dureza média para o alumínio AA1050 é de 45,59HV<sub>0,2</sub>, para a placa base é de 110,28HV<sub>0,2</sub> e para a placa voadora 122,85HV<sub>0,2</sub>, o que corresponde a um aumento de 10,82% na placa base, de 7,12% para a placa intermédia e 15,72% na placa voadora em relação aos materiais base.

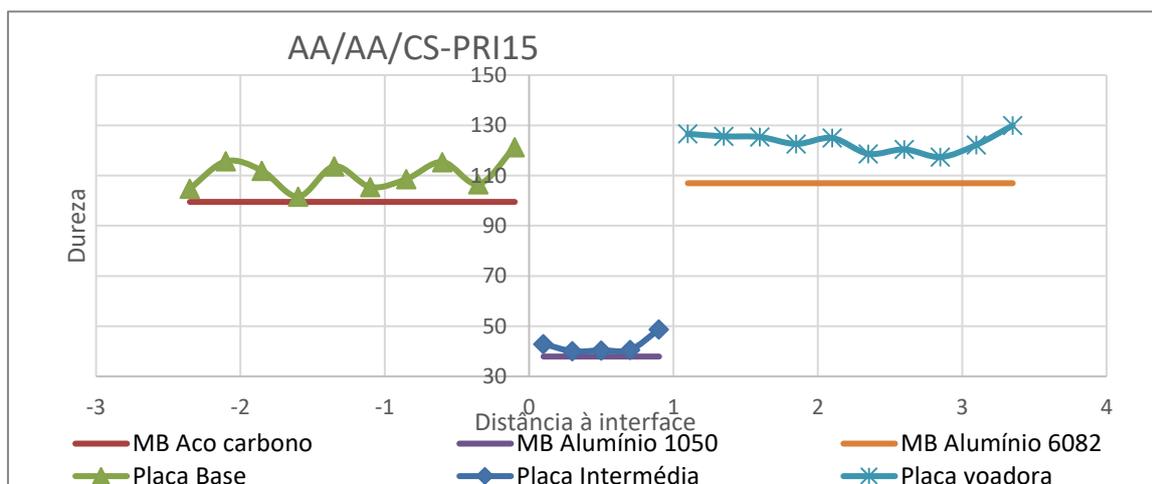


Figura 4.25. Perfil de dureza ensaio AA/AA/CS-PRI15

## 4.5. Ensaios de tração-corte

O ensaio de tração-corte é utilizado para medir a resistência mecânica da ligação. Foram realizados ensaios de tração-corte em doze provetes, três para cada ensaio, sendo que no ensaio AA/CS-ANF20 não foi possível retirar nenhum provete de tração, por falta de ligação. O ensaio AA/CS-ANF25 foi o único em que a zona que fraturou não foi a zona de soldadura. Neste ensaio, dois dos provetes fraturaram na zona de entalhe do alumínio (figura 4.26a) e o outro na zona de ligação (4.26b). A força máxima obtida neste ensaio foi a força mais elevada em comparação com os outros provetes, cerca de 8700N. O gráfico de força-alongamento deste ensaio (4.27b) bem como o mapa de deformações segundo a tensão de *Von Mises* do provete que fraturou pela zona de entalhe (4.27a) e do provete que fraturou na de soldadura (4.27c) podem ser observados na figura 4.27.

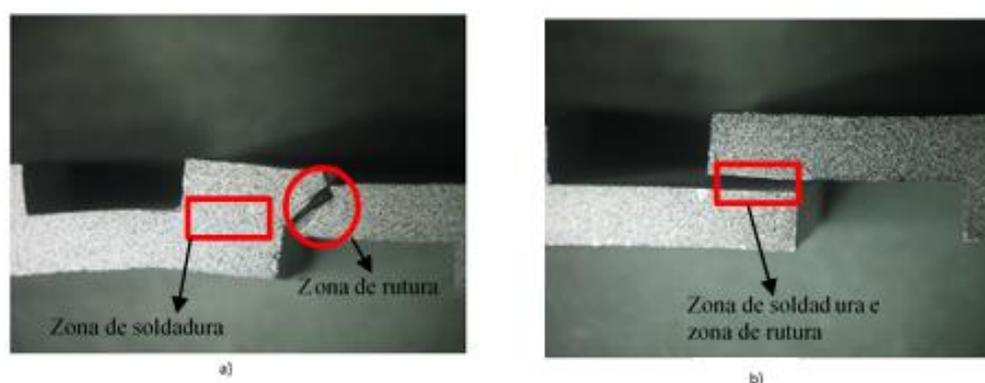


Figura 4.26. Zona de rutura a) na soldadura (proвете AA/CS-ANF25-T1), b) no alumínio (proвете AA/CS-ANF25-T3)

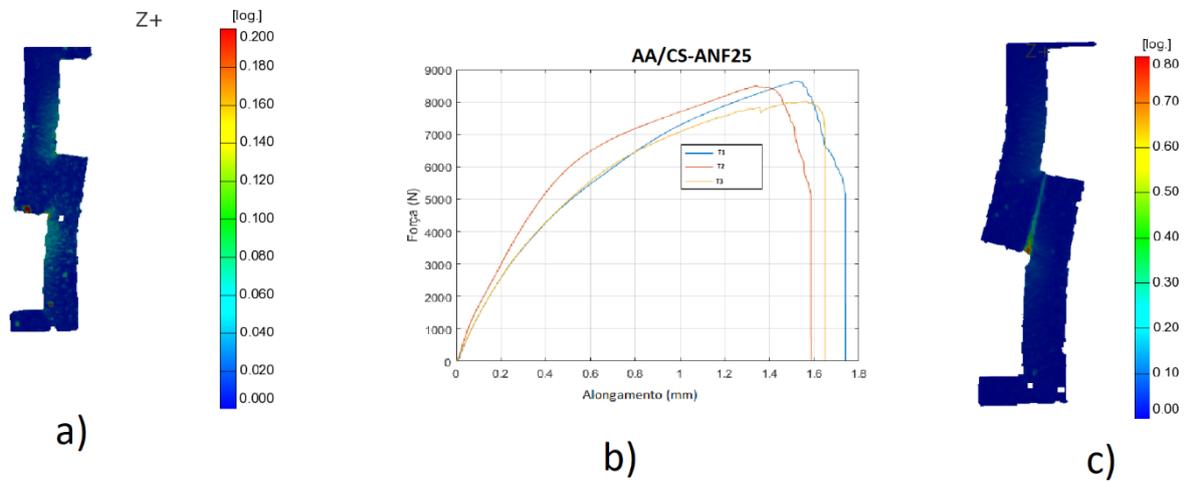


Figura 4.27. a) Mapa de deformações provete AA/CS-ANF25-T1, b) Curvas força-alongamento AA/CS-ANF25, c) Mapa de deformações provete AA/CS-ANF25-T3

Na figura 4.28 estão representadas as curvas força-alongamento e o mapa de deformações do ensaio AA/CS-PRI15. Como se pode observar, as curvas foram semelhantes entre si, sendo que o ensaio AA/CS-ANF2-T3 tem uma força máxima e um alongamento maior que os restantes ensaios.

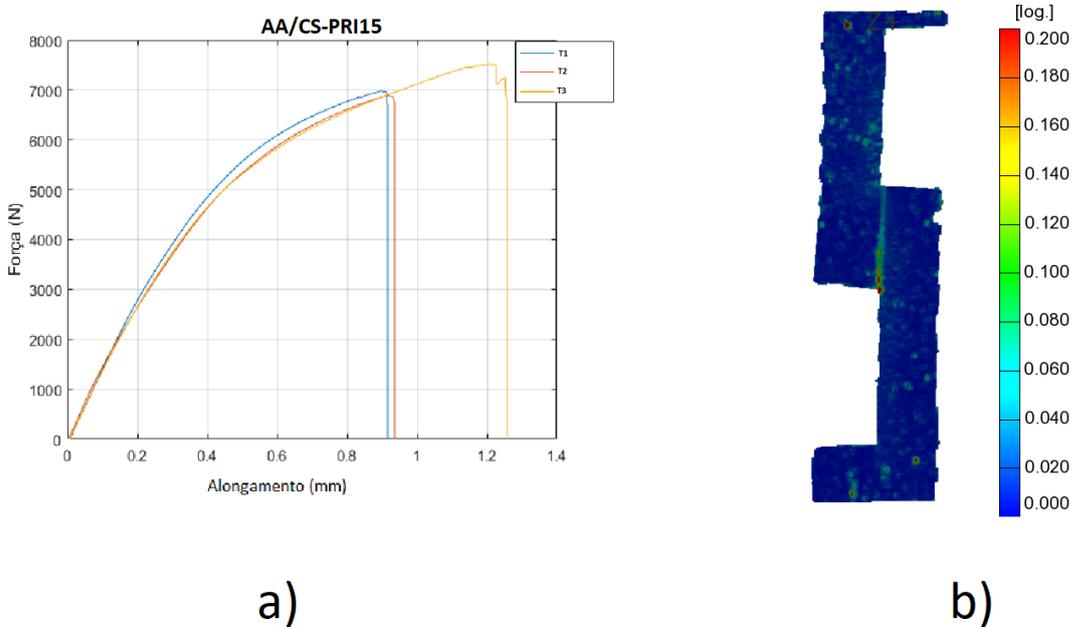


Figura 4.28. a) Curvas força-alongamento AA/CS-PRI15, b) Mapa de deformações provete AA/CS-PRI15-T2

Nos ensaios com placa intermédia, AA/AA/CS-ANF25 e AA/AA/CS-PRI15, a força máxima foi inferior ensaios sem placa intermédia, mas houve um maior alongamento dos provetes. Em ambos os ensaios, os provetes partiram na zona de soldadura e com muita deformação, tudo apontando para que as propriedades do alumínio AA1050 tenha sido a causa desta rutura. Na figura 4.29 e 4.30 observam-se as curvas de força-alongamento e os mapas de deformação do ensaio AA/AA/CS-PRI15 e do ensaio AA/AA/CS-ANF25, respetivamente.

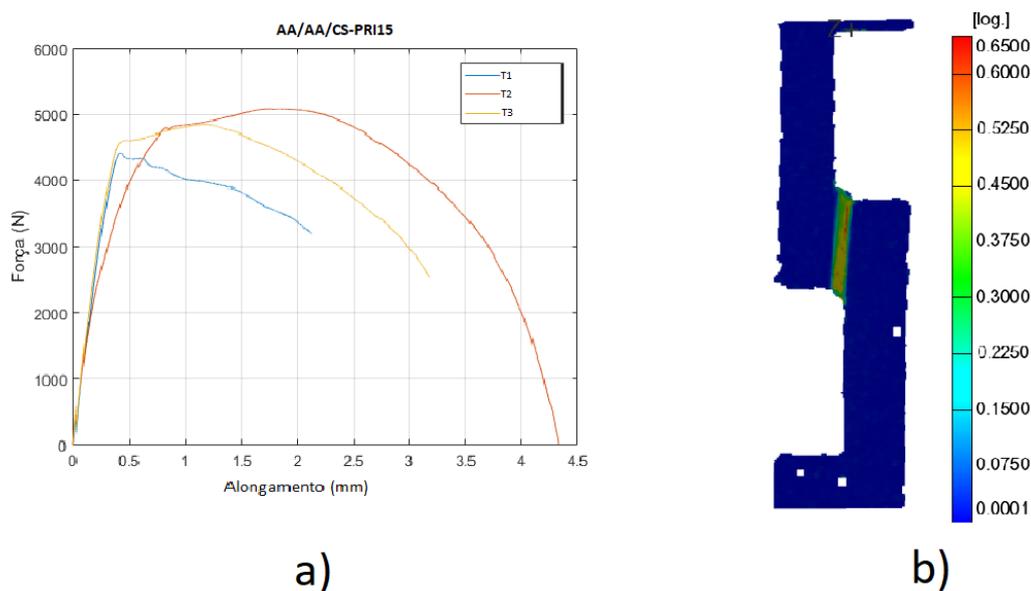


Figura 4.29. a) Curvas força-alongamento AA/AA/CS-PRI15, b) Mapa de deformações provete AA/AA/CS-PRI15-T2

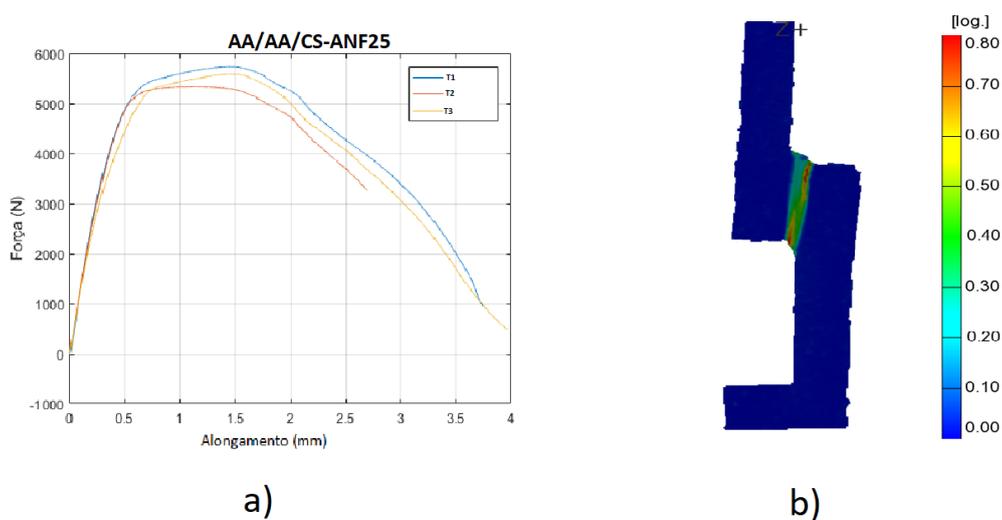


Figura 4.30. a) Curvas força-alongamento AA/AA/CS-ANF25, b) Mapa de deformações provete AA/AA/CS-ANF25-T3

Como se pode observar, as curvas do ensaio AA/AA/CS-ANF25 são muito idênticas, contrariamente ao que acontece com as curvas do ensaio AA/AA/CS-PRI15 que são diferentes entre si. Os mapas de deformação dos provetes AA/AA/CS-ANF25 são muito semelhantes entre si, tal como acontece para o caso do AA/AA/CS-PRI15 apesar de as curvas serem dissemelhantes.

Na análise SEM para a zona de fratura dos provetes de tração, observou-se que para os ensaios com placa intermédia, a fratura nos dois ensaios foi semelhante, sendo que teve um comportamento dúctil, tal como se pode observar na figura 4.31.

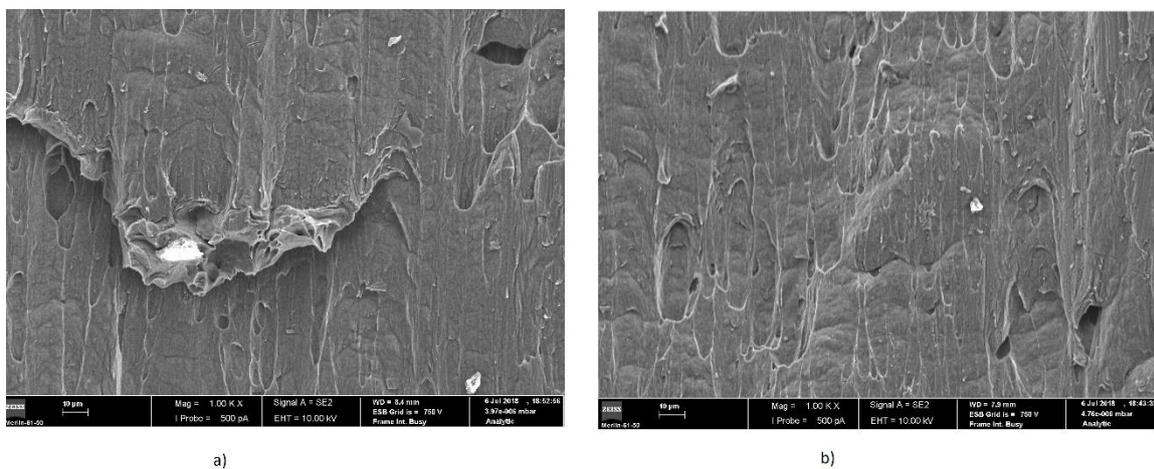


Figura 4.31. Zona de rutura a) AA/AA/CS-ANF25, b) AA/AA/CS-PRI15, ampliação 1000x

No ensaio AA/CS-PRI15, a fratura foi frágil tal como se pode observar na figura 4.32a). A figura 4.32b) apresenta a zona de fratura do provete de tração que fraturou na zona de soldadura do ensaio AA/CS-ANF25.

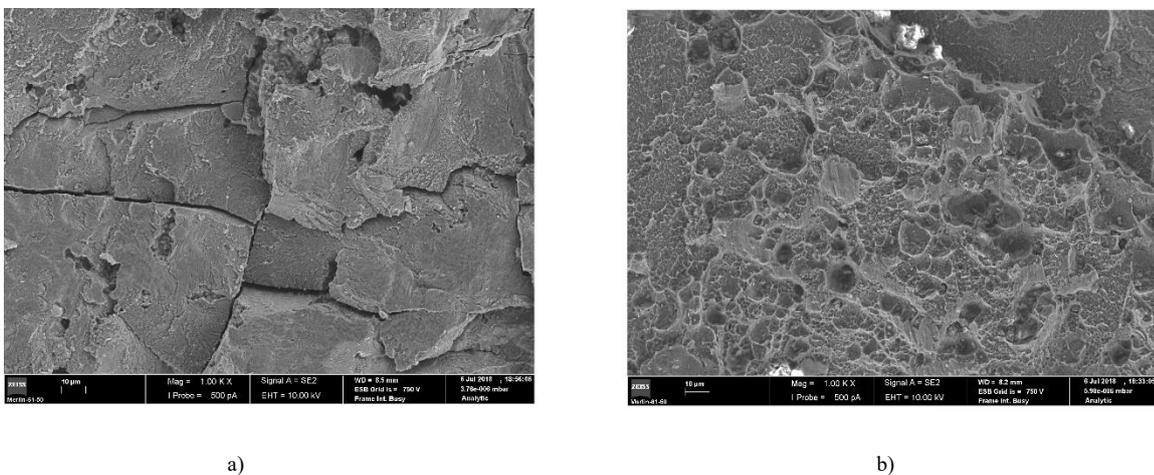


Figura 4.32. Zona de rutura a) AA/CS-PRI15 b) AA/CS-ANF25, ampliação 1000x

## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Apesar de os ensaios AA/CS-ANF25 e AA/AA/CS-ANF25 terem tido uma boa zona de soldadura, não se pode ignorar o facto que existiram zonas com diferentes velocidades de detonação pois, como se pode observar nas figuras 4.6 e 4.7, o explosivo não detonou uniformemente ao longo da placa.

No estado de arte, constatou-se que normalmente com o uso de placa intermédia o tamanho da camada de transição presente na interface diminui (Manikandan et al., 2006), o que aconteceu nestes ensaios como se pode comprovar na tabela 5.1.

**Tabela 5.1. Espessura e dureza camada intermédia**

|  | AA/CS<br>-PRI15 | AA/CS-<br>ANF20 | AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS-<br>PRI15 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Dureza média da<br>camada intermédia<br>(HV)     | 284,84          | 516,33          | 511,23          | 589,23             | 354,93             |
| Espessura camada<br>intermédia ( $\mu\text{m}$ ) | 31,72           | 68,566          | 68,75           | 45,38              | 18,06              |
| Dureza Máxima (HV)                               | 345,1           | 879,22          | 832,89          | 827,325            | 463,1              |
| Dureza Mínima (HV)                               | 209,04          | 236,40          | 237,17          | 410,61             | 275,82             |

Como se pode retirar da tabela 5.1, o tamanho de intermetálicos diminui tal como era inicialmente previsto, porém, a dureza aumentou apesar de o material que colide diretamente com o aço ter menor dureza que nos ensaios sem placa intermédia (107HV para o alumínio AA6082 e 37,9HV para o alumínio AA1050). Uma das possíveis razões é o facto de ocorrer uma maior deformação das placas quando se utiliza placa intermédia o que, por sua vez, aumenta a dureza dos materiais. Ainda se pode recorrer à análise EDS para comparar a razão entre alumínio e ferro, que pode indicar o tipo de material existente na interface. Na tabela 5.2 estão alguns valores da composição da interface de alguns ensaios:

Tabela 5.2. Composição da interface

|                | Espectro | Alumínio (%) | Al/Fe |
|----------------|----------|--------------|-------|
| AA/CS-PRI15    | A        | 86,93        | 6,65  |
|                | B        | 77,91        | 3,62  |
|                | C        | 76,67        | 3,53  |
|                | D        | 81,73        | 4,85  |
| AA/CS-ANF25    | E        | 85,27        | 6,41  |
|                | G        | 81,3         | 4,74  |
| AA/AA/CS-ANF25 | H        | 72,54        | 2,68  |
|                | I        | 65,71        | 1,92  |
|                | J        | 63,97        | 1,78  |
|                | K        | 66,22        | 1,96  |
|                | L        | 78,7         | 3,69  |
|                | M        | 73,77        | 2,81  |
| AA/AA/CS-PRI15 | N        | 88,92        | 8,03  |
|                | O        | 89,24        | 8,30  |

Com estas comparações entre o ferro e alumínio é possível estimar os compostos que se encontram na interface (Tricarico et al., 2009). No ensaio AA/CS-PRI15, os intermetálicos que se encontram na interface são principalmente  $FeAl_3$ , sendo que o composto que possui 86,93% de alumínio não é possível de identificar. Pela dureza que se tem na interface deste ensaio, para valores entre 250-350HV temos  $FeAl_3$  logo, pode-se chegar à conclusão que a camada intermédia é predominantemente  $FeAl_3$ . No ensaio AA/CS-ANF25 não é possível detetar que tipo de intermetálicos se encontram na interface já que, para compostos com percentagem de alumínio maiores que 76%, é considerado apenas alumínio pelo diagrama Fe-Al. Na análise pelas durezas, os únicos intermetálicos que têm esta dureza (aproximadamente 520HV) são os intermetálicos  $FeAl$ , compostos com 50% de alumínio, o que não acontece neste caso. Para o ensaio AA/AA/CS-ANF25, os compostos que mais se enquadram na composição da camada intermédia são o  $FeAl_2$  e o  $Fe_2Al_5$ . As durezas destes compostos são de cerca de 1000HV, valores que não foi possível obter na microdureza deste ensaio, porém houveram valores próximos. Para o ensaio AA/AA/CS-

PRI15 não foi possível detetar que intermetálicos se encontravam na interface, já que a percentagem de alumínio na camada intermédia é maior que 76%.

O ensaio AA/AA/CS-PRI15 teve uma velocidade de detonação muito próxima da velocidade de detonação do ANFO, mas muito menos peso de explosivo. Nos ensaios com Primer houve muitos menos intermetálicos que nos restantes ensaios e a dureza destes também foi muito menor que nos ensaios com ANFO. Pode-se associar este facto ao uso de um rácio de explosivo maior (Gulenc, 2008) que como se pode observar na tabela 5.3, os ensaios em que se usou o ANFO chegam a ter um rácio quase três vezes superior ao rácio dos ensaios com Primer. O aparecimento de ondas foi favorecido por um rácio maior de explosivo, sendo que para rácios menores, tem-se um comprimento de onda e uma amplitude menor. O rácio de explosivo implica uma velocidade de impacto maior, o que provocará uma deformação maior na interface. (Kahraman et al., 2005)

**Tabela 5.3. Rácio de explosivo e tamanho de onda**

|   | AA/CS-<br>PRI15 | AA/CS-<br>ANF20 | AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS-<br>PRI15 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Rácio   | 0,868           | 1,84            | 2,36            | 2,458              | 0,872              |
| Amplitude de onda entre alumínio[ $\mu\text{m}$ ] | -               | -               | -               | 467,52             | 1191,3             |
| Comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ]             | -               | -               | -               | 72,822             | 281                |

No microscópio ótico não foi possível observar corretamente as ondas dos ensaios sem placa intermédia, sendo que com o auxílio do microscópio eletrónico de varrimento as ondas são bem visíveis. A figura 5.1 apresenta a análise do microscópio eletrónico. Como se pode observar, as ondas do ensaio AA/CS-ANF25 são de amplitude superior ao ensaio AA/CS-PRI15, tendo maior comprimento de onda, tal como acontecia nos ensaios com placa intermédia para o mesmo explosivo.

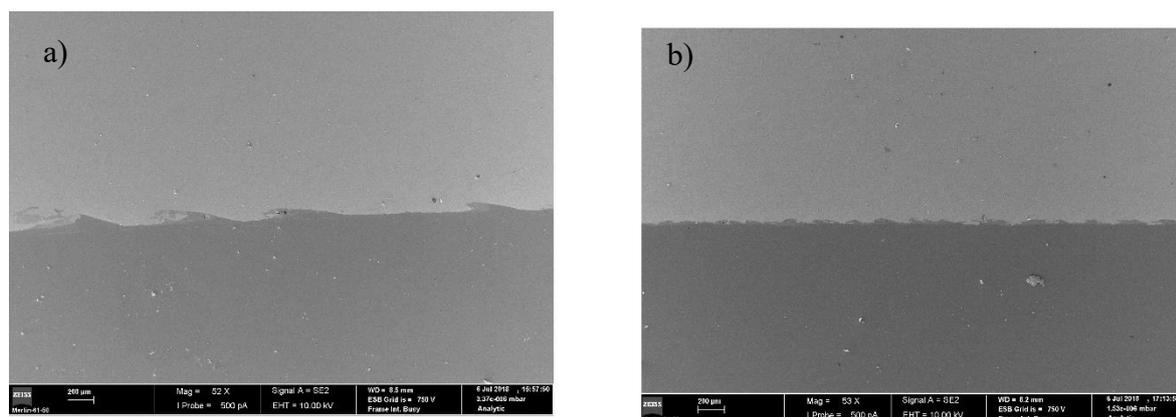


Figura 5.1. Ondas a) AA/CS-ANF25, b) AA/CS-PRI15, ampliação 53x

A força máxima varia bastante entre ensaios, já que nos sem placa intermédia a força máxima é maior que os ensaios com placa intermédia tendo, porém, um menor alongamento, tal como pode ser observado na figura 5.2. Os ensaios sem placa intermédia apresentam fratura frágil, e os com placa intermédia uma fratura dúctil, tal como se observa na análise SEM da zona de fratura destes ensaios. O comportamento dúctil na fratura pode-se dever ao facto de se ter usado AA1050 como placa intermédia, que é um material muito dúctil e que, analisadas as amostras, é possível concluir que foi este material que cedeu. O ensaio AA/CS-PRI15 teve uma menor resistência face ao ensaio AA/CS-ANF25 já que, apesar de ter uma espessura de camada intermédia menor, a camada era contínua ao longo de toda a interface. O ensaio AA/CS-ANF25 tinha alguns intermetálicos de grandes dimensões, mas como eram pontuais e não contínuos, levou esta ligação a ter uma maior resistência.

O ensaio AA/AA/CS-PRI15 foi o único ensaio em que as curvas força-alongamento foram dissemelhantes entre si, o que pode ter sido provocado por uma detonação não uniforme. Na amostra longitudinal deste ensaio observa-se, que as ondas começam a desaparecer ao longo da sua extensão, sendo as ondas mais deitadas no final da detonação, tal como se observa na figura 5.3.

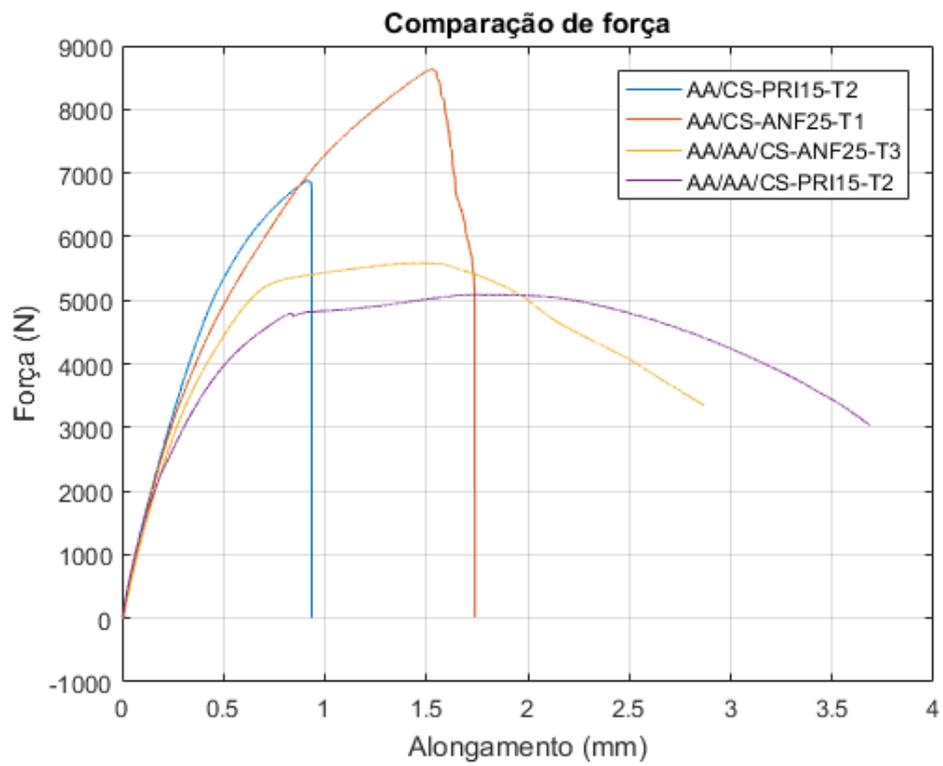


Figura 5.2. Comparação das curvas força-alongamento dos diferentes ensaios

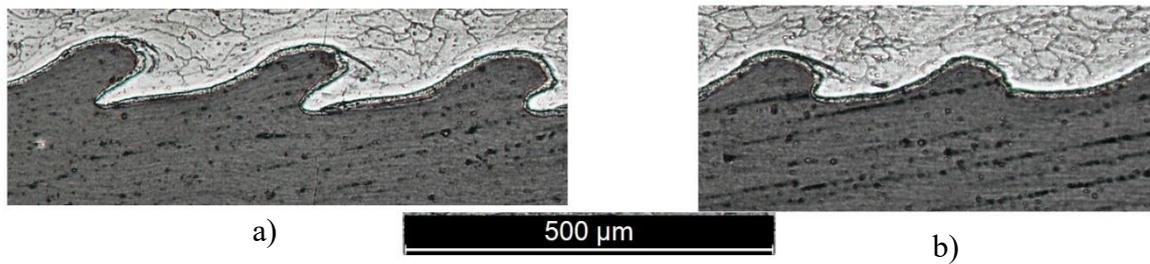


Figura 5.3. Ondas do ensaio AA/AA/CS-PRI15 a) início b) final



## 6. CONCLUSÃO

Com o trabalho realizado, podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- As ligações sem chapa intermédia apresentaram uma boa resistência, sendo que, se deve optar por usar um maior rácio de explosivo;
- Em todos os ensaios ocorre a formação de intermetálicos na zona da interface sendo que, o uso de um maior rácio de explosivo proporciona uma maior quantidade de intermetálicos e uma maior deformação dos grãos na interface;
- O tamanho da camada de transição entre as placas diminui com o uso de uma placa intermédia;
- Existem compostos na interface que não são possíveis de identificar, nomeadamente os compostos com percentagem de alumínio superior a 80% e de cerca de 10% de ferro;
- Os valores máximos de força são verificados para os ensaios sem placa intermédia, sendo que, a força máxima nos ensaios com placa intermédia foi condicionada pelo material dessa chapa.
- O uso de placa intermédia não vem acrescentar muito à ligação sem placa intermédia, sendo que as propriedades da ligação ficam condicionadas pelo uso de alumínio AA1050.



## 7. TRABALHOS PROPOSTOS

Proposta para trabalhos futuros:

Devem-se realizar trabalhos com um material de chapa intermédia diferente de modo a poder comprovar se as limitações das ligações com placa intermédia são totalmente provocadas pelo alumínio AA1050. Para isso deve-se usar como material de placa intermédia um material de afinidade baixa com o aço e com o alumínio AA6082 e com uma maior resistência, para assim a interface conter menos compostos intermetálicos e assim melhorar a ligação.

Nos ensaios com Primer, pode-se tentar aumentar o rácio de explosivo de modo a poder comparar resultados com estes ensaios já que, como em anos anteriores se estudou bastante o ANFO, este era um explosivo diferente que se podia usar.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahamson, G., 1961. Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet. *J. Appl. Mech.* 519–528. <https://doi.org/10.1115/1.3641777>
- Aizawa, Y., Nishiwaki, J., Harada, Y., Muraishi, S., Kumai, S., 2016. Experimental and numerical analysis of the formation behavior of intermediate layers at explosive welded Al/Fe joint interfaces. *J. Manuf. Process.* 24, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.002>
- Alumicopper, 2009. Informações Técnicas Alumínio 1050 [WWW Document]. URL [http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi\\_aluminio\\_1050.pdf](http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_1050.pdf) (accessed 8.20.07).
- Carpenter, S., Wittman, R., 1975. Explosion Welding. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 177–200.
- Carton, E., 2004. Wave Forming Mechanisms in Explosive Welding. *Mater. Sci. Forum* 465–466, 219–224. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.465-466.219>
- Chou, P.C., Flis, W.J., 1986. Recent Developments in Shaped Charge Technology. *Propellants, Explos. Pyrotech.* 11, 99–114. <https://doi.org/10.1002/prop.19860110402>
- Cowan, G.R., Bergmann, O.R., Holtzman, A.H., 1971. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals. *Metall. Mater. Trans. B* 2, 3145–3155. <https://doi.org/10.1007/BF02814967>
- Cowan, G.R., Holtzman, A.H., 1963. Flow configurations in colliding plates: Explosive bonding. *J. Appl. Phys.* 34, 928–939. <https://doi.org/10.1063/1.1729565>
- Crossland, B., 1976. Review of the present state-of-the-art in explosive welding 8–20.
- da Silva, J., Costa, J.M., Loureiro, A., Ferreira, J.M., 2013. Fatigue behaviour of AA6082-T6 MIG welded butt joints improved by friction stir processing. *Mater. Des.* 51, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.026>
- De Rosset, W.S., 2006. Analysis of explosive bonding parameters. *Mater. Manuf. Process.* 21, 634–638. <https://doi.org/10.1080/10426910600611136>
- Durgutlu, A., Gülenç, B., Findik, F., 2005. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. *Mater. Des.* 26, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.07.021>
- Durgutlu, A., Okuyucu, H., Gulenc, B., 2008. Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel. *Mater. Des.* 29, 1480–1484. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.07.012>

- El-Sobky, H., 1983. Mechanics of Explosive Welding. *Explos. Welding, Form. Compact.* 189–217.
- Findik, F., 2011. Recent developments in explosive welding. *Mater. Des.* 32, 1081–1093. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.017>
- Gulenc, B., 2008. Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method. *Mater. Des.* 29, 275–278. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.001>
- Gurney, R.W., 1963. The initial velocities of fragments from bombs, shell, grenades. *Balistic Res. Lab.*
- Han, J.H., Ahn, J.P., Shin, M.C., 2003. Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding. *J. Mater. Sci.* 38, 13–18. <https://doi.org/10.1023/A:1021197328946>
- Hokamoto, K., Izuma, T., Fujita, M., 1993. New explosive welding technique to weld. *Metall. Trans. A* 24, 2289–2297. <https://doi.org/10.1007/BF02648602>
- Hunt, J.N., 1968. Wave formation in explosive welding. *Philos. Mag.* 17, 669–680. <https://doi.org/10.1080/14786436808223020>
- Industrial, P.M.&, 2018. Explosive Metal Welding: Technical Overview [WWW Document]. pacaero. URL <http://pacaero.com/products/explosive-bonded-metals/explosive-metal-welding-technical-overview/> (accessed 8.20.05).
- Kahraman, N., Gülenç, B., Findik, F., 2005. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface. *J. Mater. Process. Technol.* 169, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.045>
- Kennedy, J., Zukas, J., 1998. The Gurney model of explosive output for driving metal explosive effects and applications. Davison L, Hori Y, Ed. New York: Springer; 1998. p. 221–57.
- Maliutina, I.N., Bataev, A.A., Bataev, I.A., Skorokhod, K.A., Mali, V.I., 2014. Explosive welding of titanium with stainless steel using bronze - Tantalum as interlayer. 2014 9th Int. Forum Strateg. Technol. IFOST 2014 436–439. <https://doi.org/10.1109/IFOST.2014.6991157>
- Manikandan, P., Hokamoto, K., Deribas, A.A., Raghukandan, K., Tomoshige, R., 2006. Explosive Welding of Titanium/Stainless Steel by Controlling Energetic Conditions. *Mater. Trans.* 47, 2049–2055. <https://doi.org/10.2320/matertrans.47.2049>

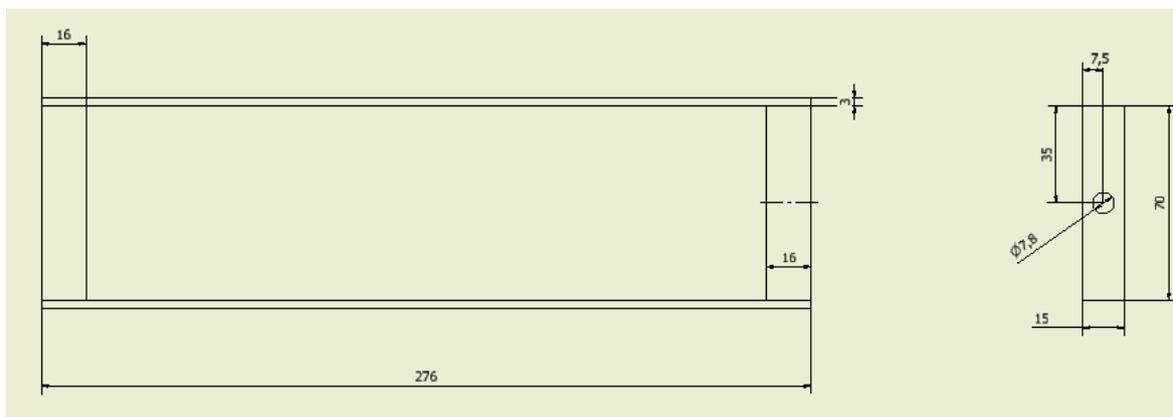
- Mendes, R., Ribeiro, J., Plaksin, I., Campos, J., Tavares, B., 2014. Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric micro-balloons. *J. Phys. Conf. Ser.* 500, 2–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/500/5/052030>
- Mendes, R., Ribeiro, J.B., Loureiro, A., 2013. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration. *Mater. Des.* 51, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.069>
- Mousavi, A.A.A., Al-Hassani, S.T.S., 2005. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding. *J. Mech. Phys. Solids* 53, 2501–2528. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.06.001>
- Prażmowski, M., Paul, H., 2012. The Effect of Stand-Off Distance on the Structure and Properties of Zirconium – Carbon Steel Bimetal Produced by Explosion Welding / Wpływ Odległości Blach Na Strukturę I Własności Bimetalu Cyrkon - Stal Wytworzonego Technologia Zgrzewania Wybuchowego. *Arch. Metall. Mater.* 57. <https://doi.org/10.2478/v10172-012-0134-0>
- Reid, S.R., 1974. A discussion of the mechanism of interface wave generation in explosive welding. *Int. J. Mech. Sci.* 16, 399–400. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(74\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0020-7403(74)90014-9)
- Ribeiro, J.B., Mendes, R., Loureiro, A., 2014. Review of the weldability window concept and equations for explosive welding. *J. Phys. Conf. Ser.* 500. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/500/5/052038>
- Saravanan, S., Raghukandan, K., 2013. Influence of interlayer in explosive cladding of dissimilar metals. *Mater. Manuf. Process.* 28, 589–594. <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.736665>
- Semimetais, 2018. <http://www.semimetais.com/portal/node/4> [WWW Document]. Aços laminados a frio. URL <http://www.semimetais.com/portal/node/4>
- Tricarico, L., Spina, R., Sorgente, D., Brandizzi, M., 2009. Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints. *Mater. Des.* 30, 2693–2700. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.010>
- Walsh, J.M., Shreffler, R.G., Willig, F.J., 1953. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions. *J. Appl. Phys.* 24, 349–359. <https://doi.org/10.1063/1.1721278>

Young, G., 2004. Explosion welding, technical growth and commercial history. *Stainl. Steel World* 2004.

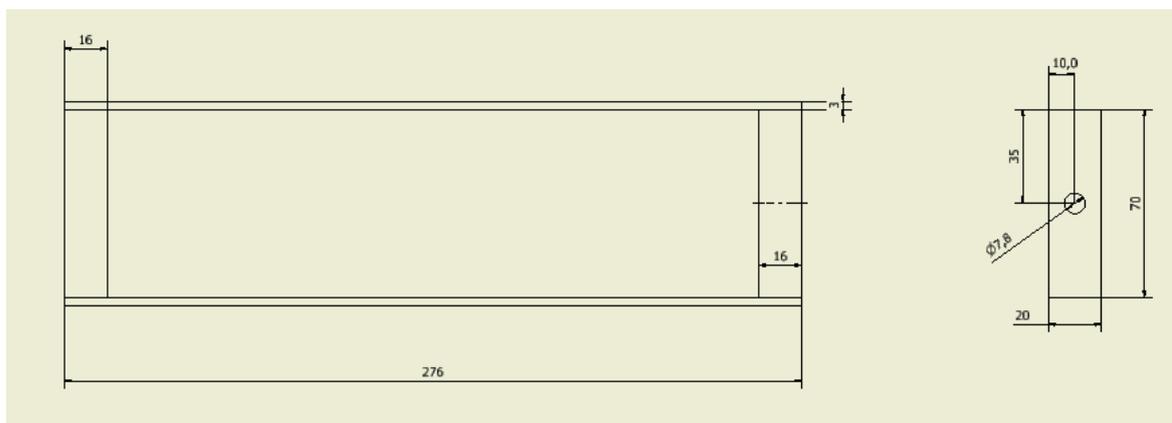
Zakharenko, I.D., Zlobin, B.S., 1983. Effect of the hardness of welded materials on the position of the lower limit of explosive welding. *Combust. Explos. Shock Waves* 19, 689–692. <https://doi.org/10.1007/BF00750461>

## APÊNDICE A

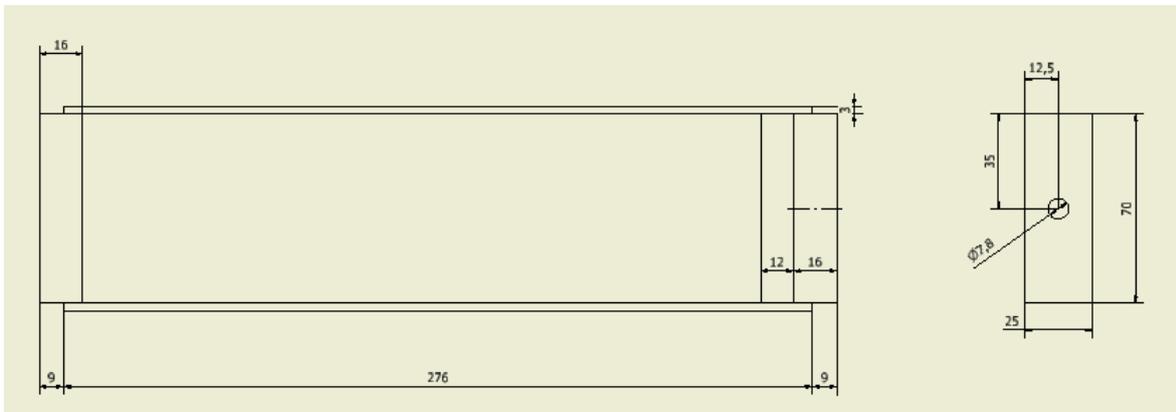
- Caixa ensaio AA/CS-PRI15



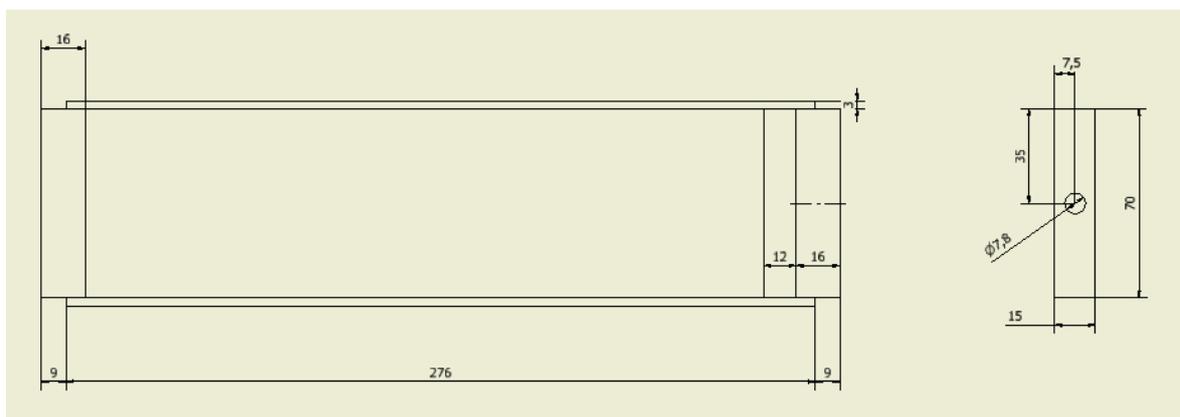
- Caixa ensaio AA/CS-ANF20



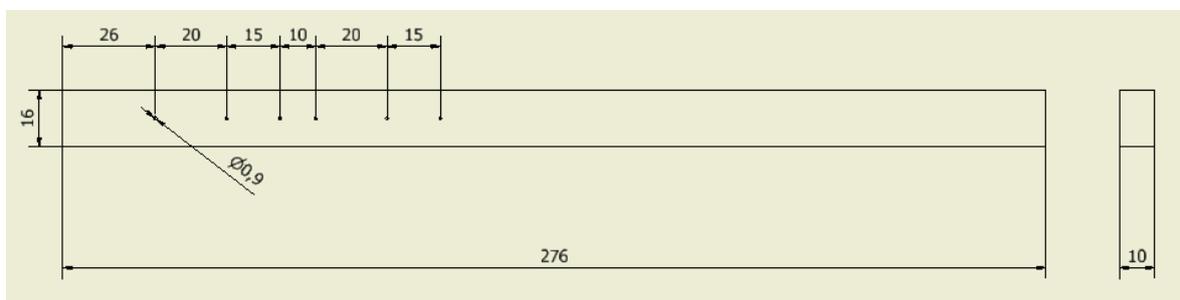
- Caixa ensaio AA/AA/CS-ANF25 e AA/CS-ANF25



- Caixa ensaio AA/AA/CS-PRI15

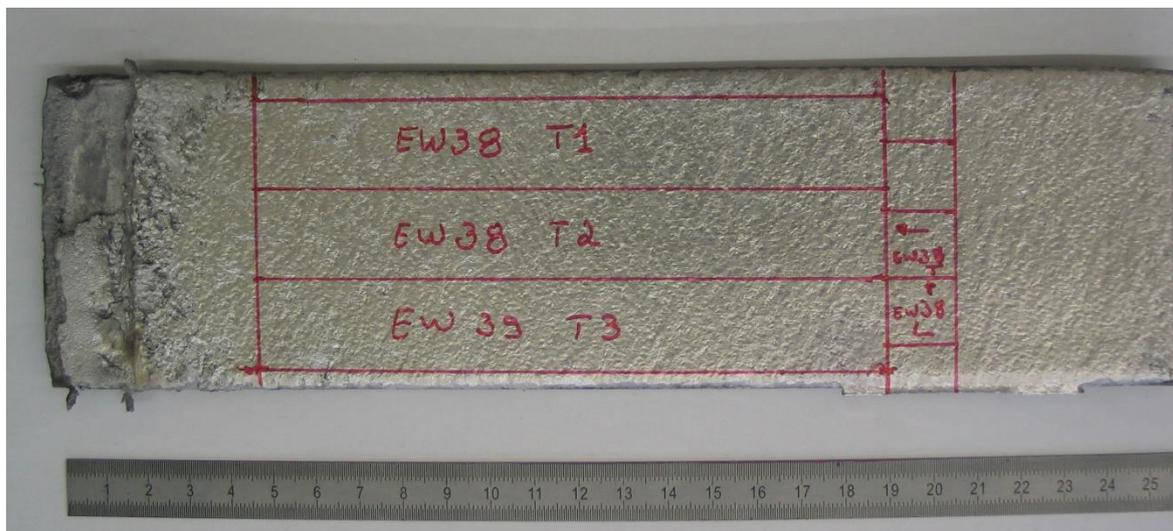


- Barra suporte sondas



## APÊNDICE B

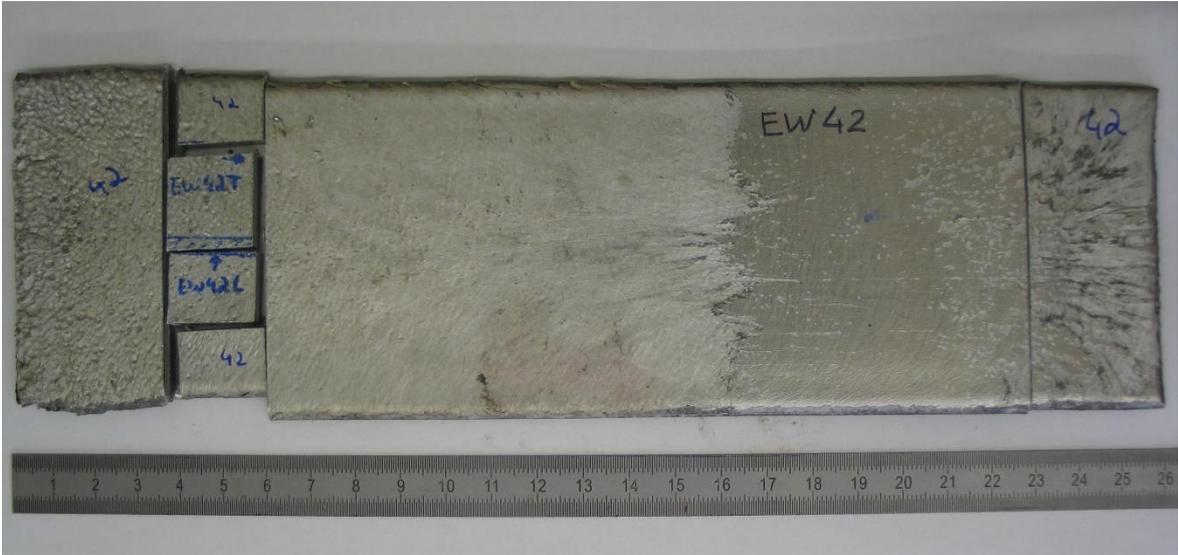
- Amostras AA/CS-PRI15



- Amostras AA/CS-ANF20



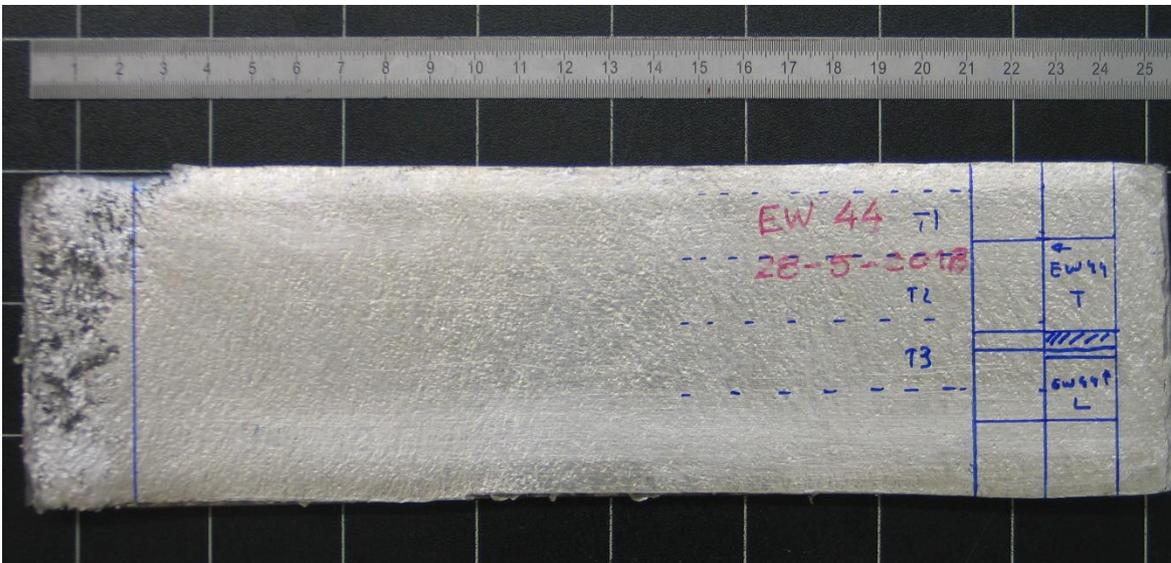
- Amostras AA/CS-ANF25



- Amostras AA/AA/CS-ANF25



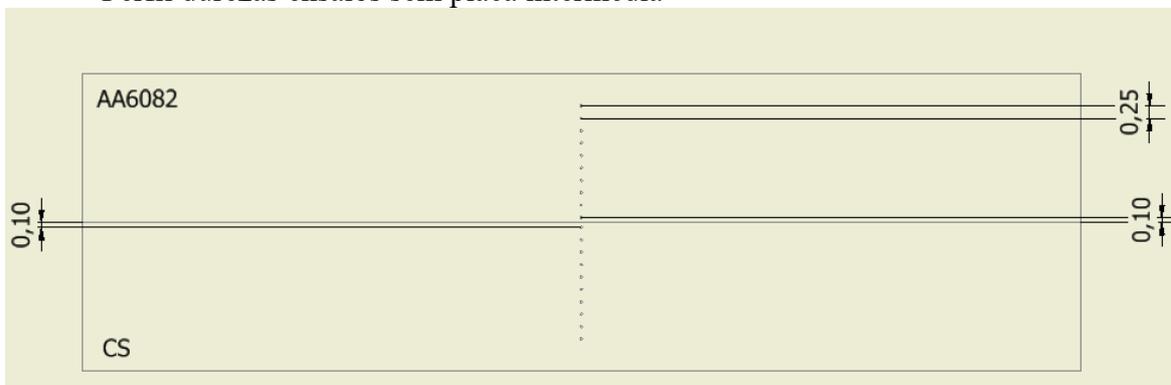
- Amostras AA/AA/CS-PRI15



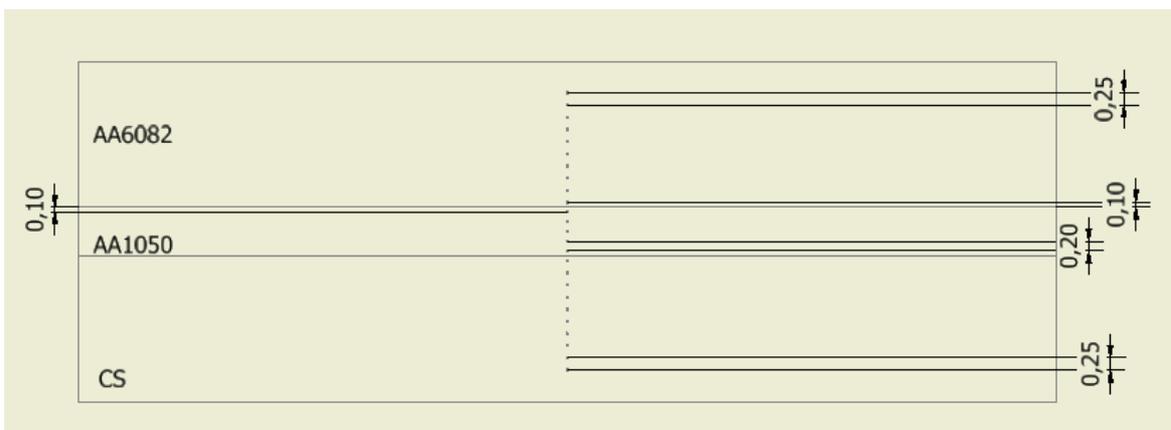


## APÊNDICE C

- Perfil durezas ensaios sem placa intermédia

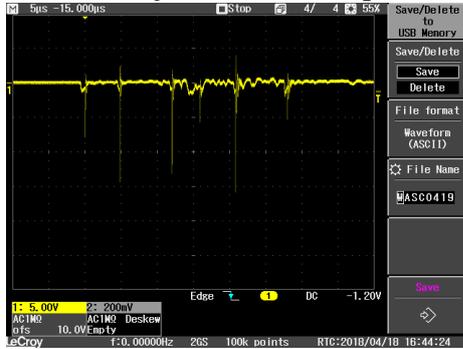


- Perfil durezas ensaios com placa intermédia



## APÊNDICE D

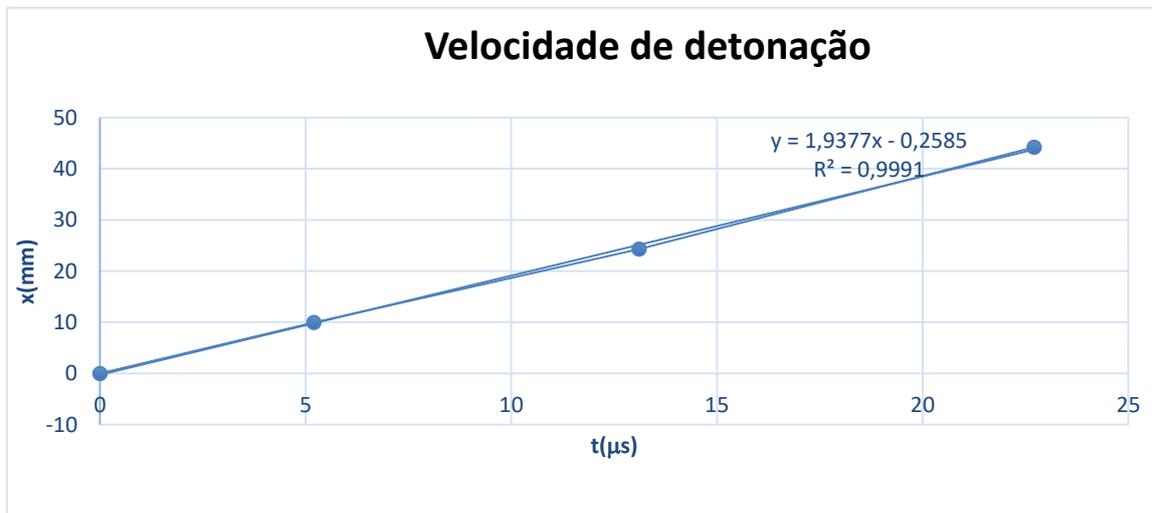
- Medição no osciloscópio AA/CS-PRI15 e gráfico de velocidade de detonação



- Medição no osciloscópio AA/AA/CS-PRI15 e gráfico de velocidade de detonação



- Velocidade de detonação AA/CS-ANF25 e AA/CS-ANF25

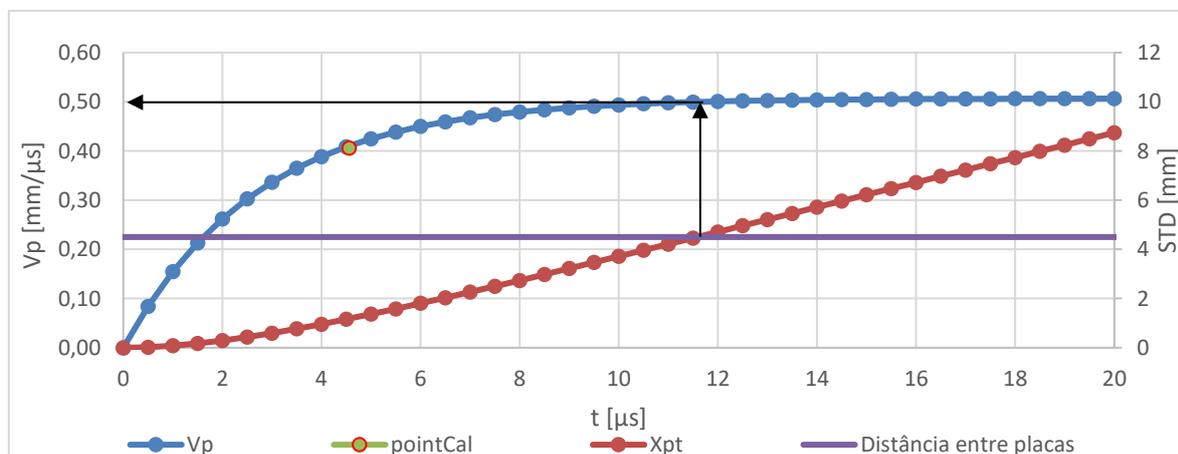




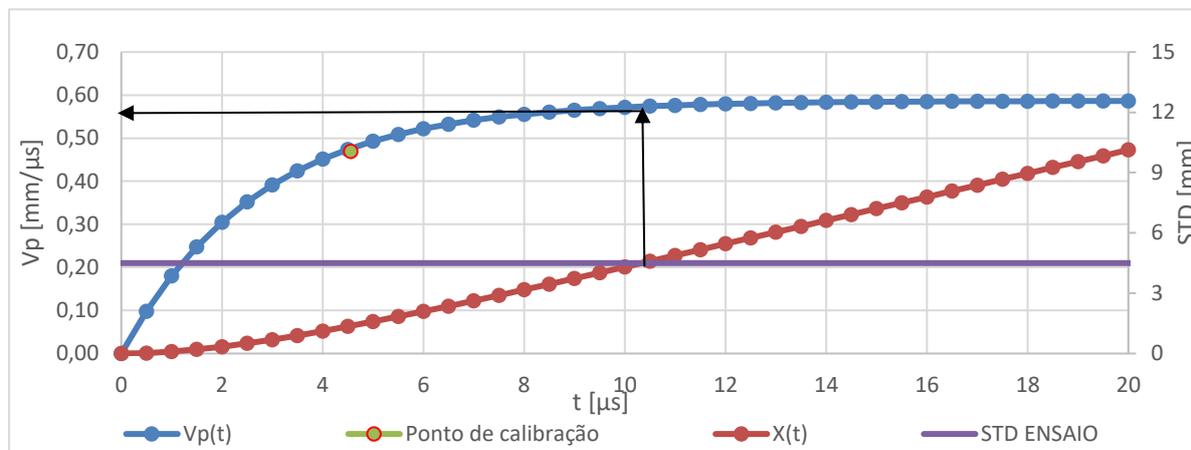
## APÊNDICE E

|                                     | AA/CS-<br>PRI15 | AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS-<br>ANF25 | AA/AA/CS-<br>PRI15 |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Rácio [C/M]                         | 0,95            | 2,45            | 2,4                | 0,9                |
| Rácio com placa intermédia          | -               | -               | 1,84               | 0,66               |
| C <sub>b</sub> placa voadora [m/s]  | 5265,9          | 5265,9          | 5265,9             | 5265,9             |
| V <sub>p</sub> Gurney [m/s]         | 505,32          | 586,73          | 586,73             | 348,34             |
| p <sub>cj</sub> [N/m <sup>2</sup> ] | 5               | 5               | 5                  | 5                  |
| √2E [m/s]                           | 955             | 652             | 652                | 691,25             |
| C1                                  | 1,4             | 1,4             | 1,4                | 1,6                |
| C2                                  | 1,6             | 1,4             | 1,4                | 1,8                |
| τ                                   | 2,750           | 2,731           | 2,731              | 2,7049             |
| τ c/placa intermédia                | -               | -               | 2,942              | 2,783              |
| V <sub>p</sub> [m/s]                | 500,57          | 574,18          | 504,82             | 284,37             |
| T <sub>vp</sub> [μs]                | 12              | 9               | 13,5               | 20,5               |

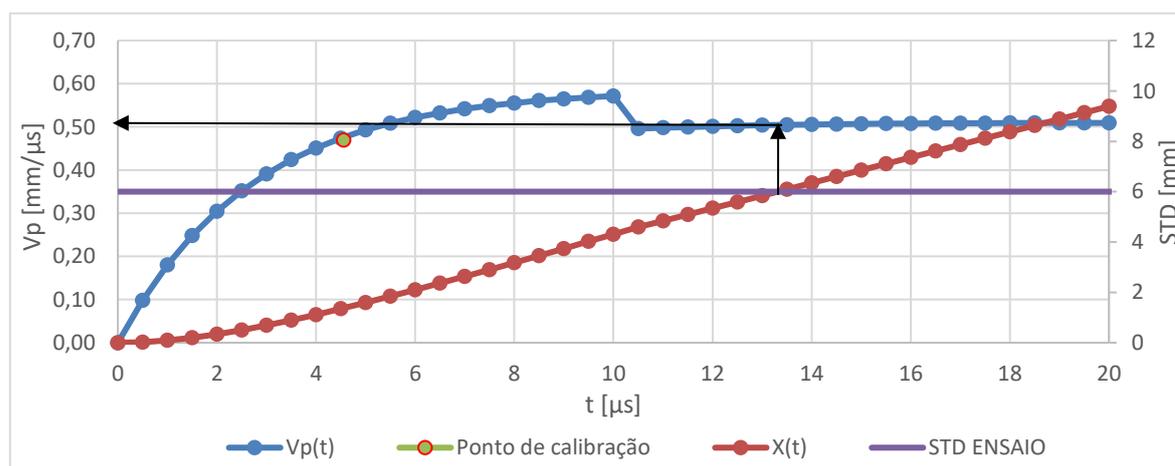
- Velocidade impacto AA/CS-PRI15



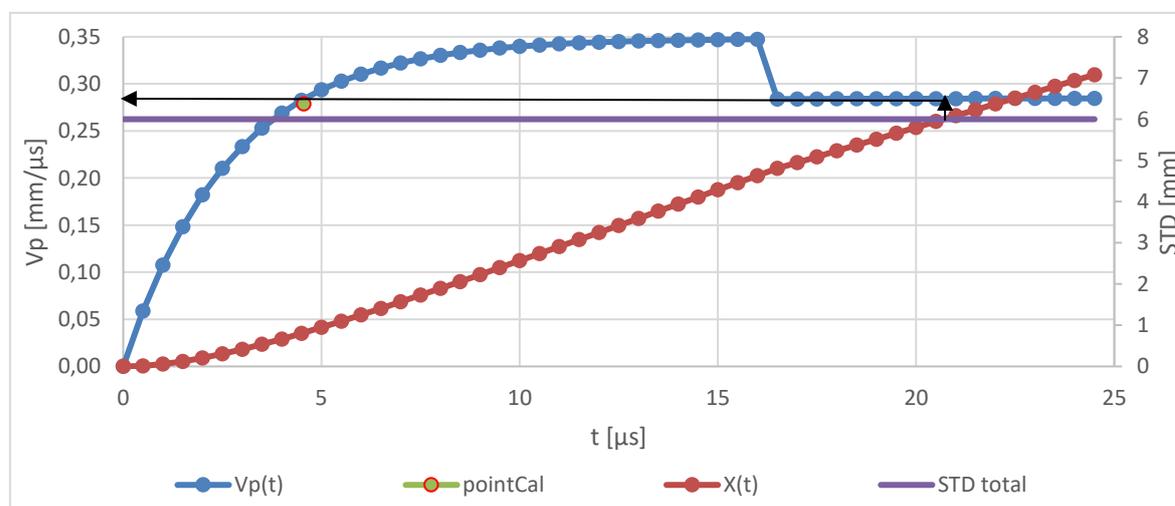
- Velocidade impacto AA/CS-ANF25



- Velocidade colisão AA/AA/CS-ANF25



- Velocidade impacto AA/AA/CS-PRI15



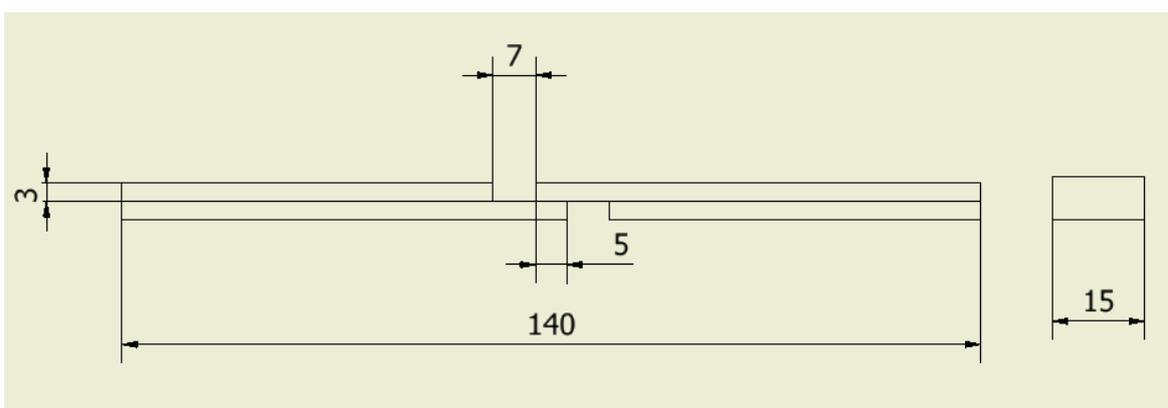


## APÊNDICE F

- Exemplo de provete de tração:



- Corte de provete sem placa intermédia



- Corte de provete com placa intermédia

