

CARACTERIZAÇÃO DE SOLDAS Al 6082 – Cu A1 REALIZADAS  
POR SOLDAGEM POR MISTURA POR FRICÇÃO (FRICTION STIR  
WELDING)

Rafael Levy Martins

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO  
DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO DE MATERIAIS.

Examinada por:

---

Prof. João da Cruz Payão Filho

---

Dra. Helena Marques da Silva

---

Prof. Luiz Carlos Pereira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO de 2010

Martins, Rafael Levy

Caracterização de soldas Al 6082 – Cu Al realizadas por Soldagem por Mistura por Fricção (Friction Stir Welding)/ Rafael Levy Martins. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2010.

viii, 49 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador : João da Cruz Payão Filho

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/  
Curso de Engenharia de Materiais, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 38.

1. Friction Stir Welding 2. Intermetálicos

## **Agradecimentos**

Agradeço ao meu orientador de projeto, João da Cruz Payão Filho, por sua dedicação, ajuda e orientação. Agradeço aos meus pais e irmãos por todo o apoio durante a minha graduação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Engenheiro de Materiais.

Caracterização de Soldas Al 6082 – Cu A1 Realizadas por Soldagem por Mistura por Fricção (Friction Stir Welding)

Rafael Levy Martins

Maio/ 2010

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Curso: Engenharia de Materiais

A soldagem por Friction Stir Welding (FSW) é realizada a temperaturas abaixo da temperatura de fusão dos metais envolvidos diminuindo os efeitos do aquecimento em relação às outras técnicas tradicionais. Soldas entre Alumínio e Cobre tem aplicações importantes em equipamentos elétricos.

O projeto realizado consiste em analisar chapas de Al 6082 – Cu A1 soldadas pela técnica FSW. As amostras foram soldadas sob as seguintes condições: velocidade de rotação da ferramenta de soldagem ( $\omega$ ) de 800 rpm, velocidade de soldagem ( $V_s$ ) de 750mm/min, carga aplicada de 1500Kg, velocidade de penetração da ferramenta de 25mm/min, 5 mm a espessura das chapas, lado de avanço sendo o do Cu e com juntas de topo I. A única condição variável foi o posicionamento da ferramenta: sobre a junta, deslocada para o lado do Al e deslocada para o lado do Cu. As amostras foram cortadas transversalmente em relação à direção de soldagem para a melhor caracterização.

A caracterização foi feita por inspeção visual, microscopia ótica, Difração de raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura e Microdureza com o intuito de compreender a morfologia, determinar os intermetálicos e resistência mecânica das soldas.

*Palavras-chave:* Friction Stir Welding, intermetálicos, Al 6082, Cu A1.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## Al 6082 – Cu Al Friction Stir Welding Characterization

Rafael Levy Martins

May/2010

Advisor: João da Cruz Payão Filho

Course: Materials Science Engineering

Friction Stir Welding (FSW) temperatures process are below melting temperature of the metals involved reducing the effects of heating in comparison to other traditional techniques. Aluminium – Cooper welds have applications on electrical equipments.

This project is an analyses of Al 6082 – Cu Al sheets welded by FSW. Samples were welded under the conditions: welding tool rotation speed ( $\omega$ ) of 800 rpm, weld speed ( $V_s$ ) of 750 mm/min, charge applied of 1500 Kg, welding tool penetration speed of 25 mm/min, 5 mm thick sheets, advancing side on Cooper and butt joints. The only variable condition was the position of the welding tool: above the joint, above Al and above Cu. Samples have been cut perpendicularly to the welding direction for better characterization.

Characterization have been done by visual inspection, optical microscopy, X-Ray Diffraction, Scannign Electron Microscopy and Microhardness for the understanding of morphology, determination of intermetalics, and mechanical resistance.

*Keywords:* Friction Stir Welding, intermetalics, Al 6082, Cu Al.

## Sumário

1. Introdução .....	1
2. O Processo de Friction Stir Welding .....	2
3. Procedimento experimental .....	5
3.1 Parâmetros de soldagem .....	5
3.2 Microscopia ótica .....	7
3.3 Difração de raios X .....	8
3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	8
3.5 Microdureza Vickers .....	8
4. Análise de resultados .....	9
4.1 Análise morfológica .....	9
4.2 Composição química .....	21
4.3 Parâmetros de malha .....	27
4.4 Microdureza Vickers .....	30
5. Conclusão .....	35
Bibliografia .....	37
Anexos .....	38

## 1 - Introdução

O projeto consiste em caracterizar soldas entre Alumínio 6082 e Cu A1 realizadas pela técnica de Friction Stir Welding. As soldas foram realizadas em três condições distintas como representado na figura 1.1. variando o posicionamento da ferramenta de solda em relação à interface entre as placas de Alumínio e Cobre. As três condições são: ferramenta sobre a interface, deslocada para o lado do Alumínio e deslocada para o lado do Cobre.

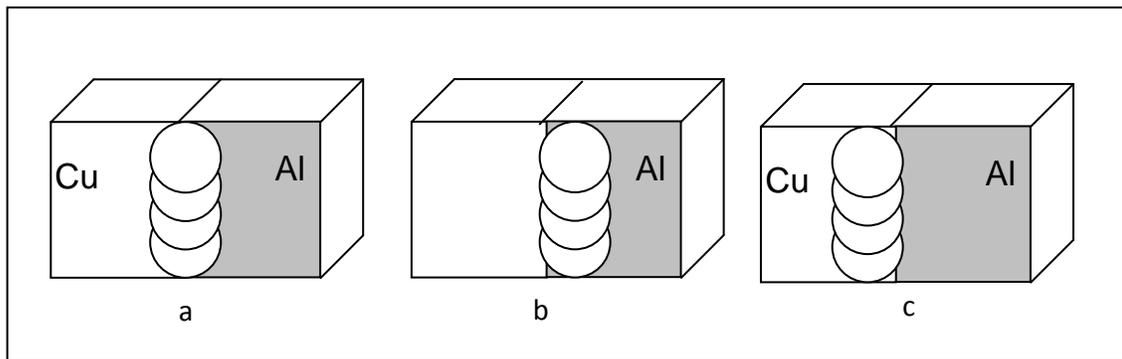


Figura 1.1: a) ferramenta sobre a interface, b) deslocada para o lado do Al e c) deslocada para o lado do Cu.

A caracterização das soldas foi baseada em análises macroscópica, em microscopia ótica, difração de raios X, microscopia eletrônica de varrimento e microdureza Vickers. Os resultados obtidos permitirão aumentar a compreensão sobre os intermetálicos presentes, o deslocamento de matéria na junta soldada e as propriedades mecânicas da solda.

## 2 - O processo de Friction Stir Welding

### 1) Descrição do processo

Esta técnica de soldagem foi desenvolvida em 1991 no *The Welding Institute* na Inglaterra. A principal vantagem desta técnica está em realizar a solda abaixo da temperatura de fusão, diminuindo os problemas devido ao aquecimento em comparação com as outras técnicas de soldagem.

A técnica consiste em introduzir uma ferramenta de solda com formato semelhante a um parafuso, girando em alta velocidade na região de interface entre as placas a serem soldadas e a deslocar ao longo da interface. O atrito com a ferramenta provoca o aquecimento dos metais de base que se tornam mais maleáveis e se misturam formando o cordão de solda. O início do cordão de solda, onde a ferramenta é introduzida e o final onde ela é retirada devem ser eliminados.

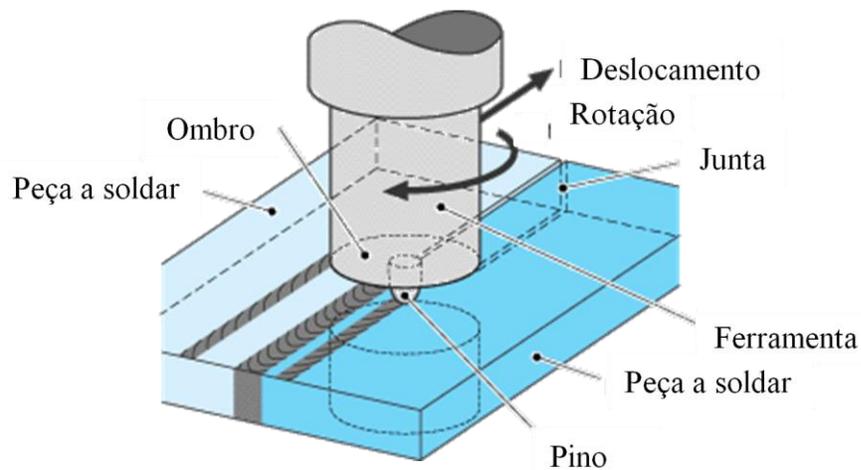


Figura 2.1: Princípio da técnica e ferramenta de solda [13].

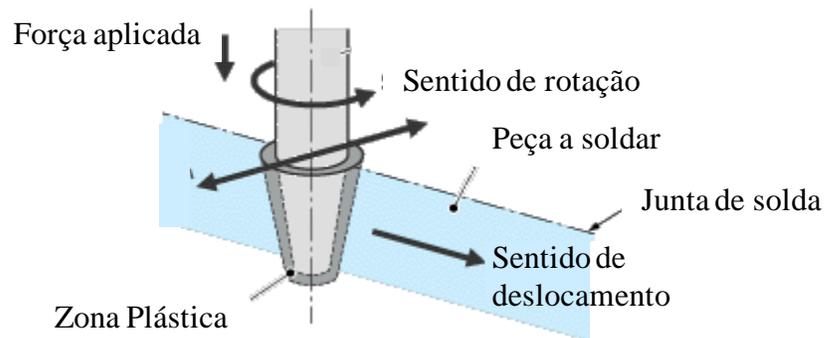


Figura 2.2: Formação do cordão de solda [13].

O corte transversal esquemático de um cordão de solda apresenta as distintas zonas da solda de acordo com seu histórico termomecânico, figura 2.3.

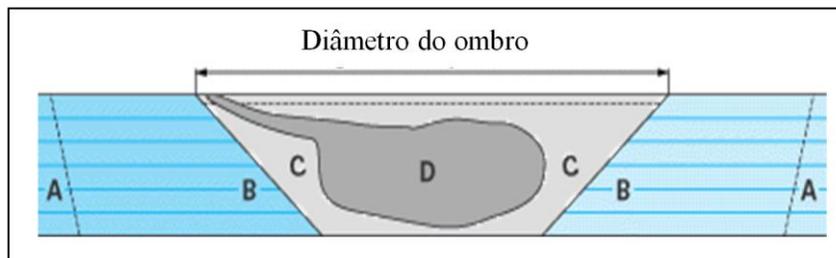


Figura 2.3: Corte transversal e esquemático de um cordão de solda [13].

As quatro zonas do cordão de solda:

- A: Metal de base.
- B: Zona afetada termicamente (ZAT). Nesta zona ocorreu o aumento de temperatura.
- C: Zona afetada termomecanicamente (ZATM). Nesta zona ocorreu aumento de temperatura e deformação mecânica do metal.
- D: Núcleo da solda. Zona submetida ao atrito e à brasagem da ferramenta de solda.

## 2) Parâmetros de soldagem

- Ferramenta de soldagem (forma e dimensões).
- Velocidade de rotação da ferramenta.
- Velocidade de soldagem.
- Foça axial.
- Espessura das placas.

## 3) Operação

A técnica pode ser realizada em todas as posições de soldagem e com diferentes tipos de juntas. Os chanfros e decapagens não são necessários na preparação da peça mesmo no caso de metais que formem uma camada de óxido superficial.

A soldagem de diversos metais é possível como no caso das ligas de Al, Cu, Pb, Ti, Mg, Zn e até mesmo plásticos. As espessuras das peças a serem soldadas não são geralmente muito grandes mas já é possível soldar placas de 100mm de Alumínio, podendo-se realizar dois passes opostos.

## 4) Vantagens e limitações

As vantagens desta técnica está nas boas características mecânicas da solda, ausência de metal de adição, de proteção gasosa, de respingos e de emissão de gases tóxicos.

Porém a técnica tem velocidade de soldagem relativamente baixa e não é aplicável a metais de elevada dureza devido ao desgaste da ferramenta de solda. A soldagem de aços ainda não tem aplicações industriais significativas.

## 5) Aplicações

Atualmente a soldagem por fricção é utilizada principalmente na indústria aeronáutica mas seu desenvolvimento levará a novas aplicações nas indústrias automobilística, naval e ferroviária.

## **3 – Procedimento experimental**

### **3.1 Parâmetros de soldagem**

A soldagem foi realizada sob as seguintes condições:

- Velocidade de rotação: 800 rpm
- Velocidade de soldagem: 750 mm/min
- Força axial: 15000 N
- Velocidade de penetração: 25 mm/min
- Espessura das chapas: 5 mm

A ferramenta de solda tem um ombro com diâmetro de 15 mm, um pino cônico rosqueado de 10 mm de diâmetro. O movimento de rotação é de tal forma que a rosca empurra o metal contra a superfície de apoio e o lado de avanço é sempre o do Cobre.

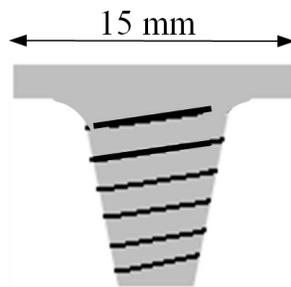


Figura 3.1: Representação da ferramenta de solda.

Tabela 3.1: Composição química da liga Al 6082

Al 6082	
Elemento químico	% Presente na liga
Si	0,7 à 1,3
Fe	0,5
Cu	0,1
Mn	0,4à1,0
Mg	0,6à1,2
Zn	0,2
Ti	0,1
Cr	0,25

As propriedades físicas e mecânicas da liga Al 6082 são apresentadas no anexo 1.

A análise das amostras foi feita de maneira a observar o cordão de solda no sentido longitudinal ao cordão e no sentido transversal. Para isto as peças soldadas foram cortadas paralelamente ao cordão, dando origem a duas amostras, uma do lado do Al e outra do Cu além da amostra cortada transversalmente.

As amostras foram cortadas em serra de disco automática de corte lento e com resfriamento para evitar o aquecimento e possíveis fenômenos de difusão ou transformação de fase. A perda de material devido ao corte corresponde a aproximadamente 2 mm.

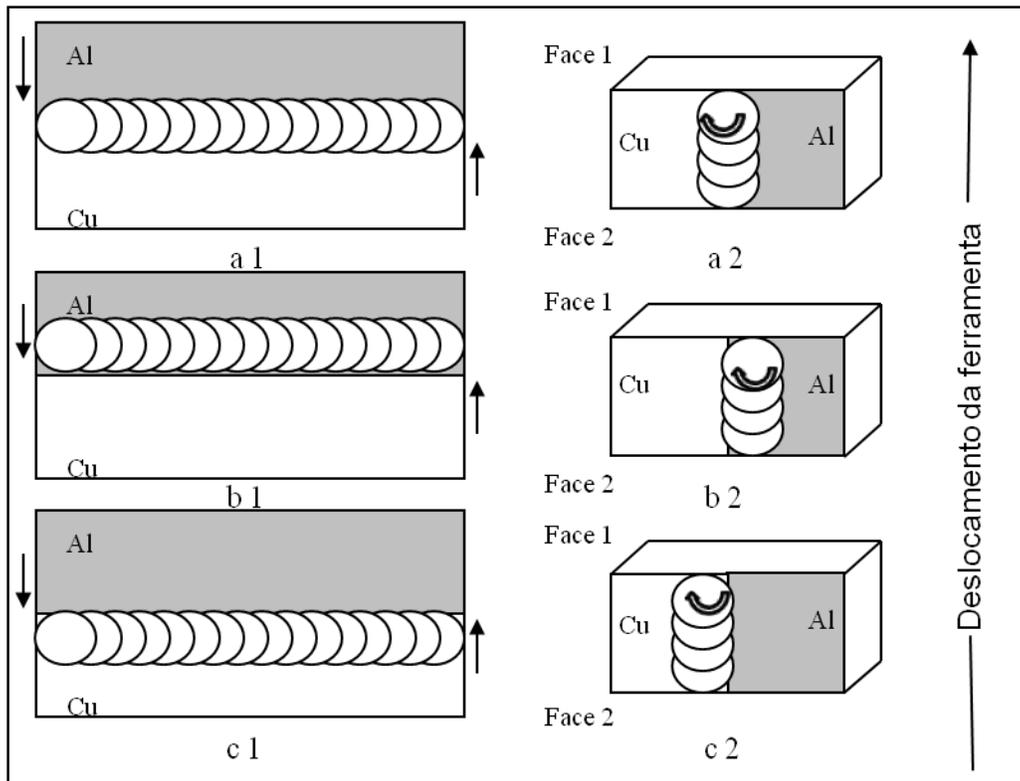


Figura 3.2: a) ferramenta sobre o eixo, 1) sentido longitudinal e 2) sentido trasversal, face 1 e 2, b) ferramenta sobre o Al e c) ferramenta sobre o Cu.

### 3.2 Microscopia ótica

A preparação das amostras para a microscopia ótica foi realizada com os métodos habituais de polimento começando pela lixa de 220, 400, 800, 1200, 2400, 4000 e por fim com OP-S.

A distância entre os Flashs e os deslocamentos transversais a junta de solda do Al e do Cu foram medidos sobre as imagens de microscopia ótica. As medidas de deslocamento foram realizadas em três regiões diferentes como pode ser visto na figura 3.3.

- 1- Região entre a superfície de usinagem até 1 mm de profundidade.
- 2- Região entre 1 mm e 4 mm de profundidade.
- 3- Região entre 4 mm de profundidade e a superfície de apoio.



Figura 3.3: Esquema de medida do deslocamento de matéria e Flash.

### 3.3 Difração de Raios X

Para cada posicionamento da ferramenta de solda foi realizada uma análise de difração de raios X nas amostras longitudinais do lado do Al, do Cu e em uma das faces transversais. Estes resultados tem como objetivo determinar os elementos químicos e intermetálicos presentes além de calcular o parâmetro de malha. No entanto esta técnica não permite a determinação das posições de cada elemento.

### 3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O equipamento utilizado foi um microscópio FEI QUANTA 400 com detectores de elétrons secundários, retrodifundidos e um detector EDS. Análises químicas localizadas foram realizadas e comparadas com os resultados da difração de raios X. As superfícies das amostras também foram analisadas para auxiliar no entendimento da morfologia da solda.

### 3.5 Microdureza Vickers

As medidas de dureza foram realizadas em 1 superfície das amostras transversais para cada posicionamento da ferramenta de solda. Em cada amostra foi traçado um perfil de durezas medidas em linhas a 1 mm, 2 mm e 3 mm de distância em relação a superfície de solda. A distância entre as medidas foi de 0,25 mm e a carga aplicada de 50 g.

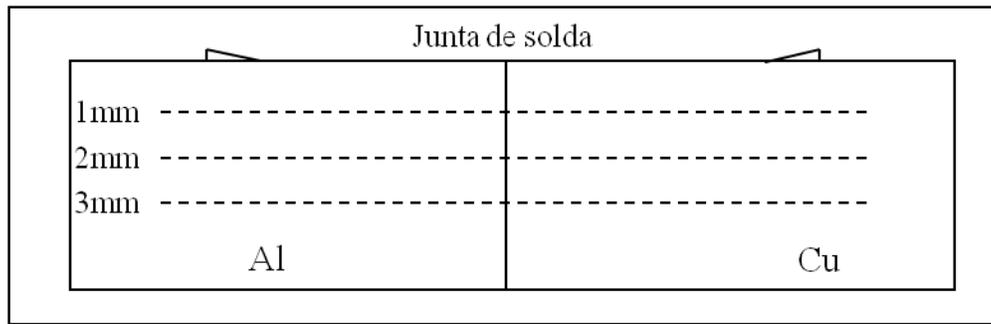


Figura 3.4: Esquema do posicionamento das medidas de microdureza.

## **4 – Análise de resultados**

### **4.1 Análise morfológica**

#### 4.1.1 Análise macroscópica

A observação macroscópica das juntas de solda, figura 4.1, indicam que o Alumínio foi deslocado superficialmente pela ferramenta de solda formando uma fina camada superficial visível a olho nu. Isto ocorre devido ao aquecimento que levou a diminuição da resistência mecânica dos metais, principalmente do Alumínio que tem limite de escoamento menor do que o Cobre.

Observa-se também que o acabamento da solda é de pior qualidade, com mais imperfeições quando a ferramenta é posicionada sobre o Cobre pois nesta situação o aquecimento devido ao atrito é maior, devido à maior resistência mecânica deste metal.

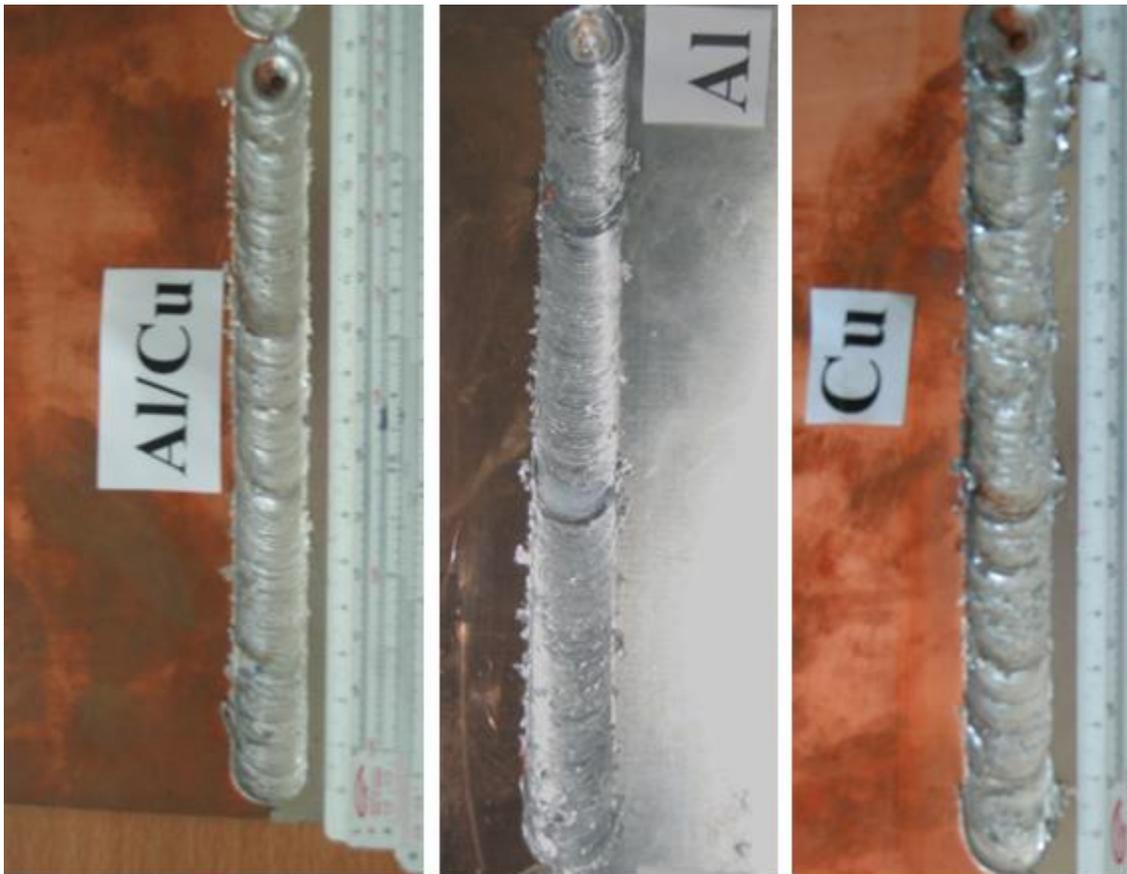


Figura 4.1: Observação macroscópica a) ferramenta sobre a junta de solda, b) sobre o Al e c) sobre o Cu.

#### 4.1.2 Análise em microscopia ótica

A observação em microscopia ótica foi efetuada de maneira a medir os deslocamentos máximos do Alumínio e do Cobre. As figuras seguintes e as tabelas resumem estes dados.

Ferramenta sobre a junta de solda:

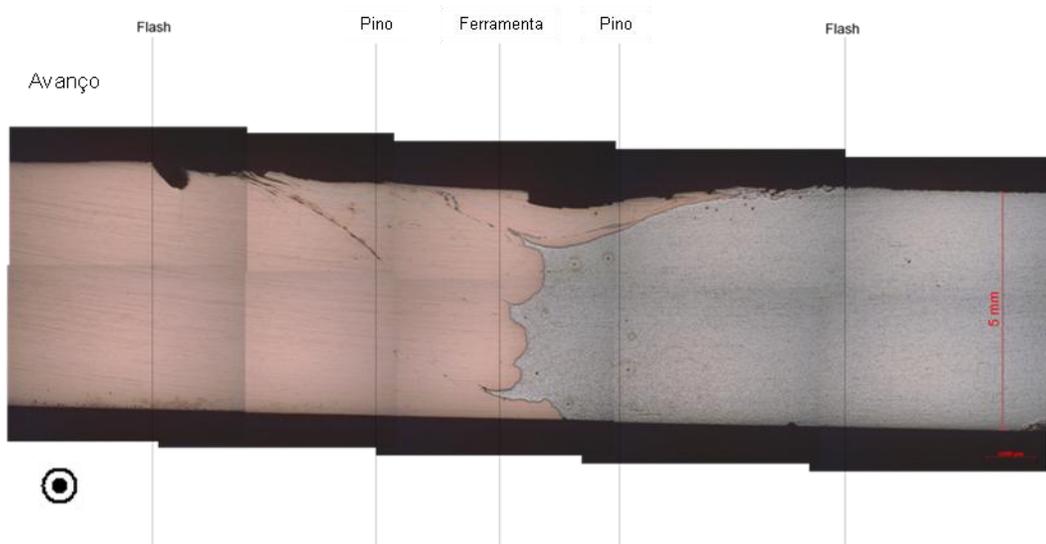


Figura 4.2: Ferramenta sobre a junta, face 1, corte transversal.

Distancia entre os Flashes = 14,6 mm.

Tabela 4.1: Deslocamento máximo de matéria. Ferramenta sobre a junta, face 1.

Região	Deslocamento do Al (mm)	Deslocamento do Cu (mm)
1	1,3	Até o Flash
2	2,7	2,6
3	0,5	1,3

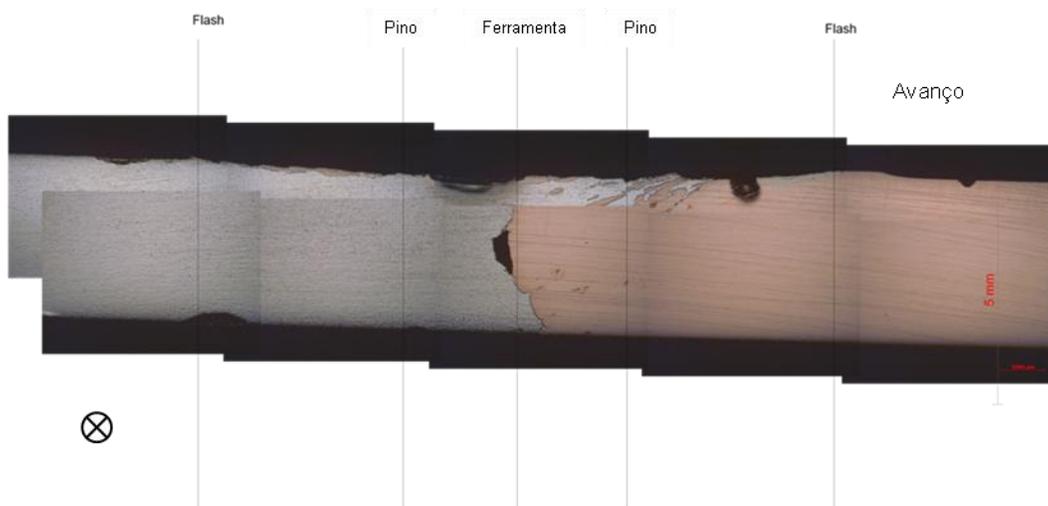


Figura 4.3: Ferramenta sobre a junta, face 2, corte transversal.

Distância entre os Flashes = 13,5 mm.

Tabela 4.2: Deslocamento máximo de matéria. Ferramenta sobre a junta, face 2.

Região	Deslocamento do Al (mm)	Deslocamento do Cu (mm)
1	Até o Flash	Até o Flash
2	3,2	0,5
3	0,5	0,2

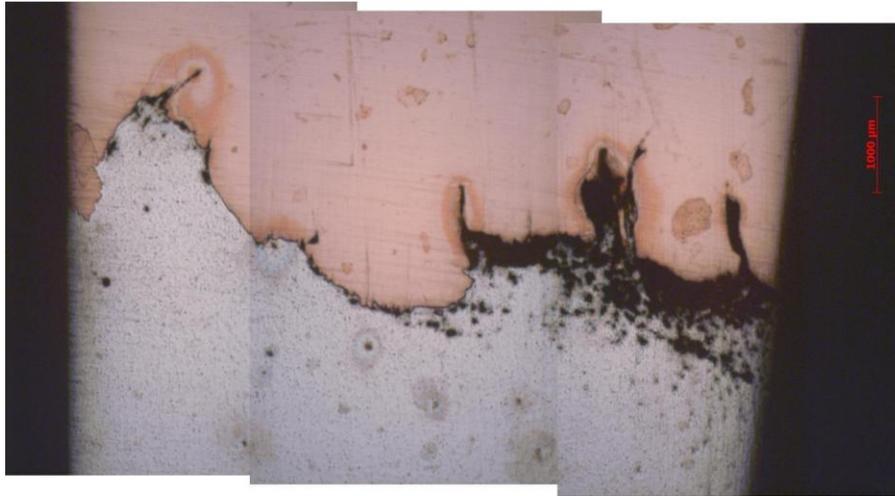


Figura 4.4: Ferramenta sobre a junta, superfície de apoio.

Ferramenta sobre Al:

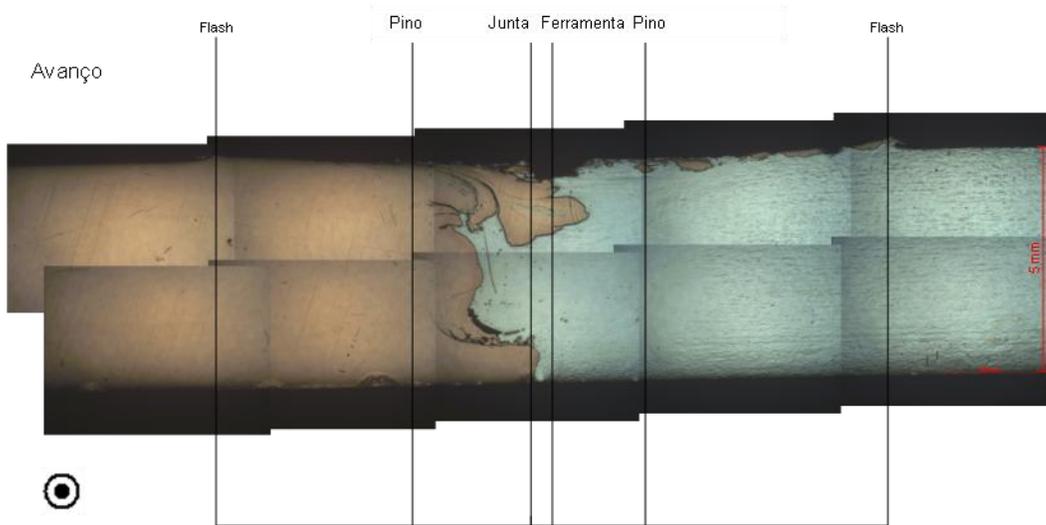


Figura 4.5: Ferramenta sobre Al, face 1, corte transversal.

Distância entre os Flashes = 15,0 mm.

Tabela 4.4: Deslocamento máximo de matéria. Ferramenta sobre Al, face 1.

Região	Deslocamento do Al (mm)	Deslocamento do Cu (mm)
1	2,9	Até o Flash
2	2,4	0,8
3	0,4	-0,3

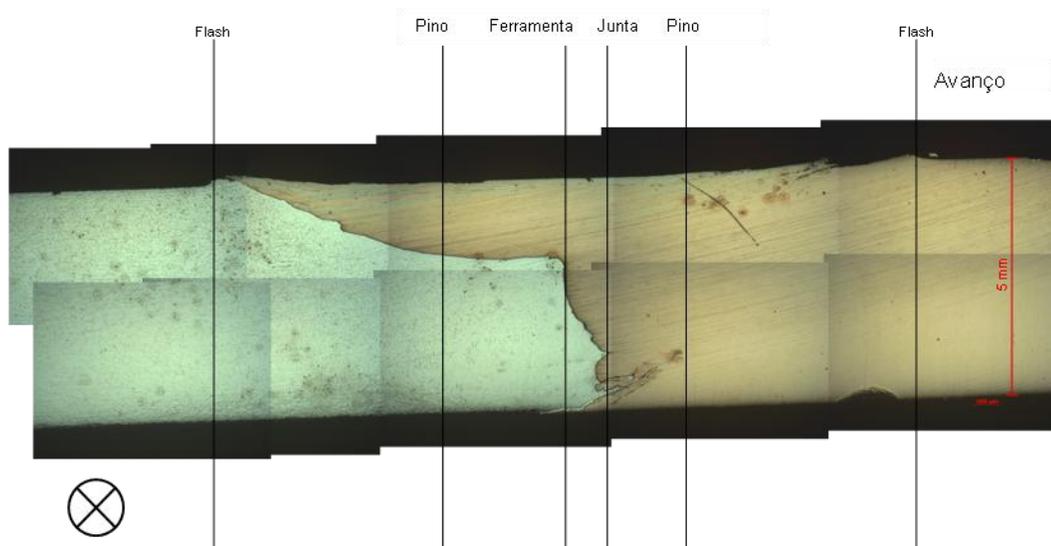


Figura 4.6: Ferramenta sobre Al, face 2, corte transversal.

Distância entre os Flashes = 15,0 mm.

Tabela 4.4: Deslocamento máximo de matéria. Ferramenta sobre Al, face 2.

Região	Deslocamento do Al (mm)	Deslocamento do Cu (mm)
1	5,6	Até o Flash
2	1,0	5,0
3	1,5	1,0

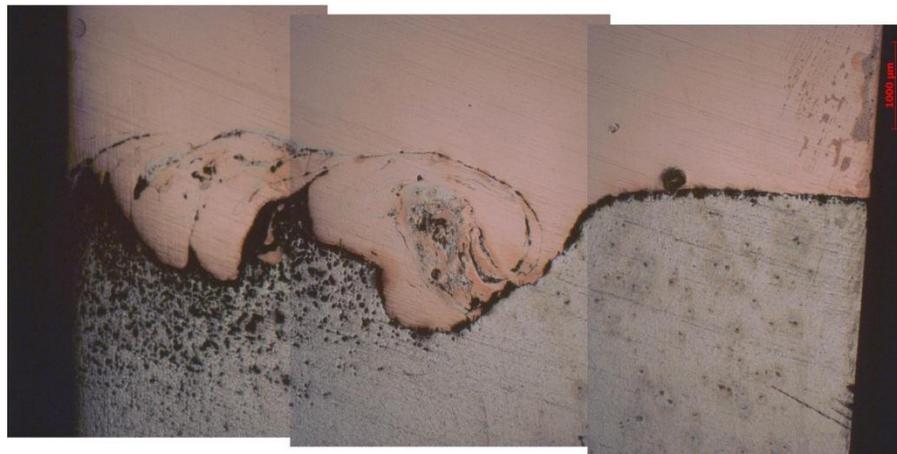


Figura 4.7: Ferramenta sobre Al, superfície de apoio.

### Ferramenta sobre Cu:

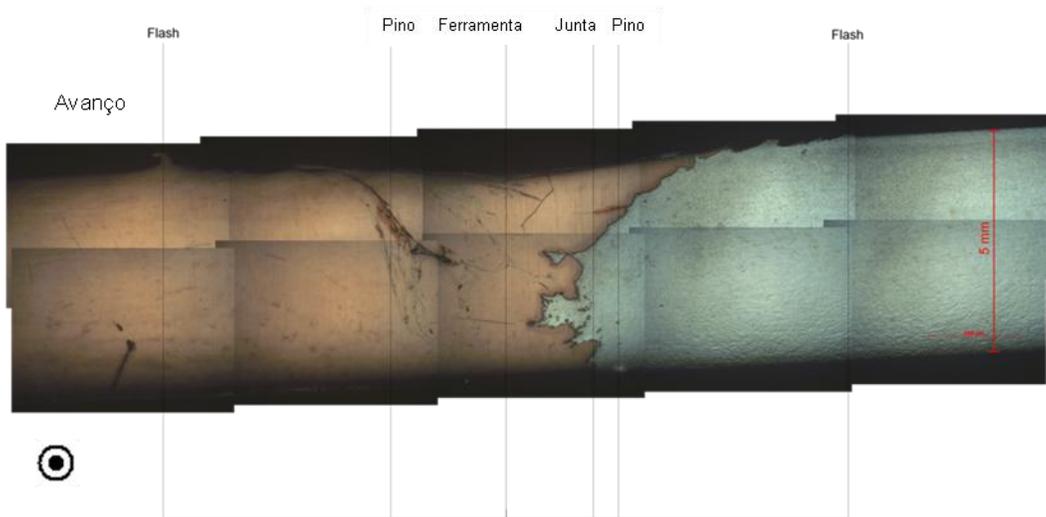


Figura 4.8: Ferramenta sobre Cu, face 1, corte transversal.

Distância entre Flashes = 14,8 mm.

Tabela 4.5: Deslocamento máximo de matéria. Ferramenta sobre Cu, face 1.

Região	Deslocamento do Al (mm)	Deslocamento do Cu (mm)
1	3,3	7,0
2	2,7	3,1
3	-1,3	2,1

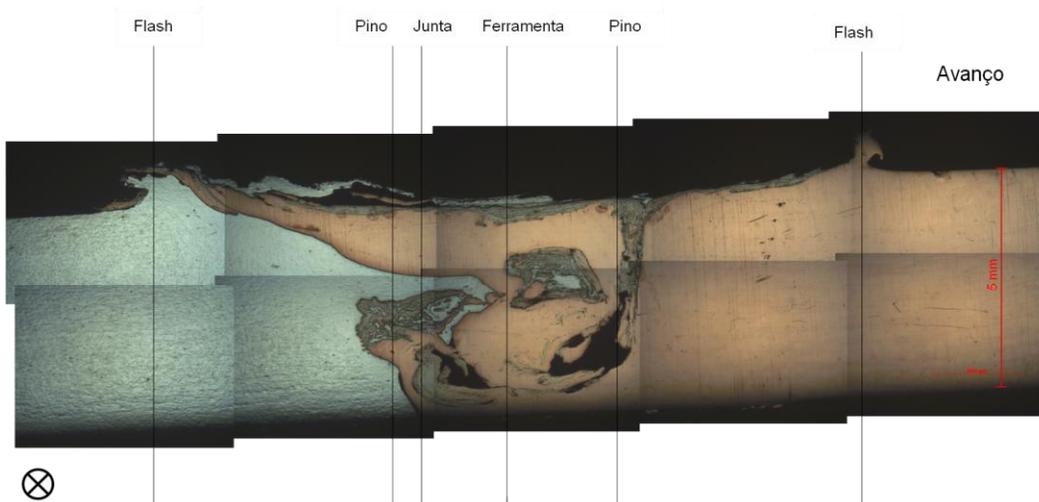


Figura 4.9: Ferramenta sobre Cu, face 2, corte transversal.

Tabela 4.5: Deslocamento máximo de matéria. Ferramenta sobre Cu, face 2.

Região	Deslocamento do Al (mm)	Deslocamento do Cu (mm)
1	7,0	Até o Flash
2	2,6	4,1
3	2,0	2,4



Figura 4.10: Ferramenta sobre Cu, superfície de apoio.

A partir da análise das figuras anteriores pode-se calcular a distância média entre os flashes que foi de 14,75 mm. Este valor corresponde aproximadamente ao diâmetro do ombro da ferramenta de solda enquanto o pino tem um diâmetro de 10 mm.

Durante o processo de soldagem há um aporte de calor significativo sobre a peça que é mais evidente na superfície em contato com o ombro da ferramenta devido a maior área de contato. A face oposta é portanto mais fria pois se situa mais longe da fonte de calor e é resfriada pela superfície de apoio que está a temperatura ambiente. Este gradiente de temperatura leva a um gradiente de resistência mecânica dos materiais, quanto mais quente o metal, menor sua resistência mecânica logo a tendência de deslocamento de matéria é maior na região 1 e menor na região 3, estando a região 2 em uma condição intermediária. Os valores médios dos deslocamentos máximos do Alumínio e do Cobre estão listados na tabela 4.6.

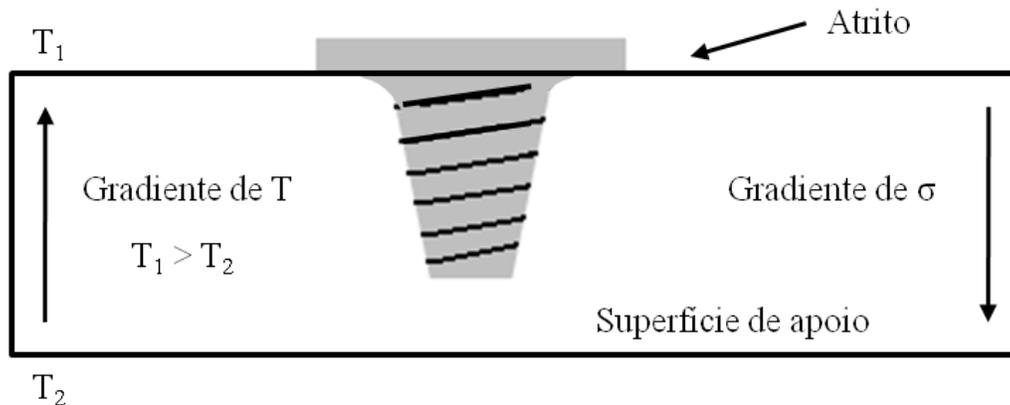


Figura 4.11: Esquema de variação da temperatura e da resistência mecânica em corte transversal.

Tabela 4.6: Média dos deslocamento máximos de matéria.

Região	Média dos deslocamentos máximos do Al (mm)	Média dos deslocamentos máximos do Cu (mm)
1	4,6	7,4
2	2,4	2,7
3	0,6	1,1

Outro ponto importante que se pode observar da tabela 4.6 é o deslocamento maior por parte do Cobre em relação ao Alumínio. Isto ocorre porque Alumínio, com menor resistência mecânica, oferece menos resistência à movimentação do Cobre. Já o Alumínio encontra mais resistência ao seu movimento e desloca-se menos.

#### 4.1.2 Análise em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens foram feitas a partir de Elétrons secundários e retroespalhados. As imagens obtidas são compostas por duas fases sendo a mais clara o Cobre pois seu número atômico ( $Z_{Cu}=29$ ) é maior que o do Alumínio ( $Z_{Al}=13$ ) e portanto os elétrons incidentes interagem de forma mais intensa com os átomos de Cobre e como consequência a resposta recebida pelo microscópio é mais intensa.

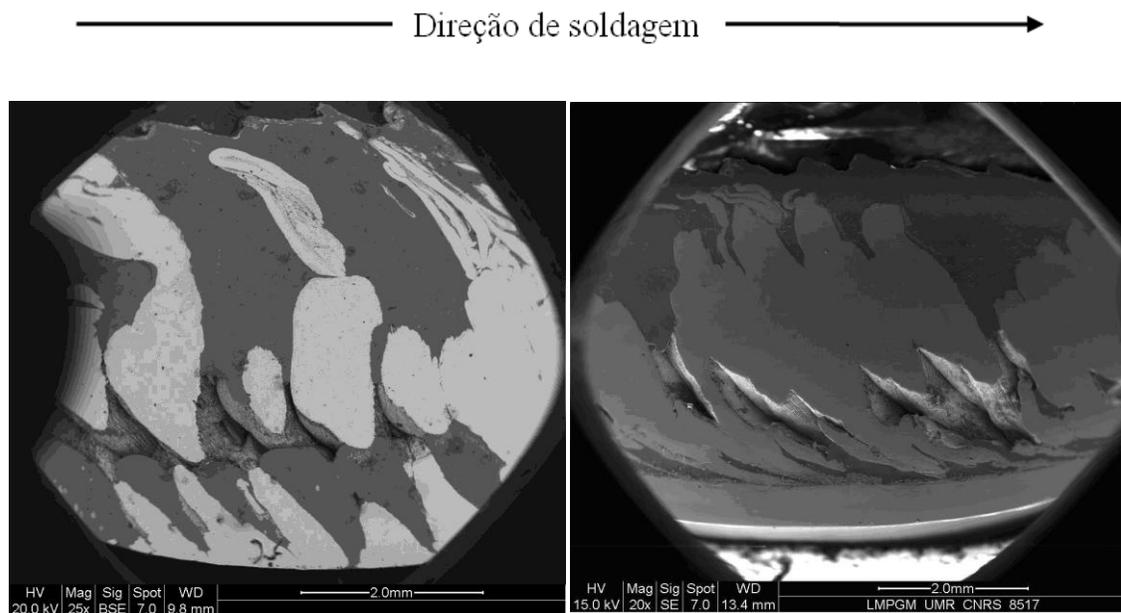


Figura 4.12: a) defeito de soldagem em corte longitudinal, observação do lado do Cu de amostra soldada com ferramenta sobre o Cu (imagem de elétrons retroespalhados). b) defeito de soldagem em corte longitudinal, observação do lado do Cu de amostra soldada com ferramenta sobre Al.

Nas figuras 4.12 a) e b) observamos na parte inferior a face da amostra em contato com a superfície de apoio grande quantidade de Cobre. Isto ocorre porque durante o corte perde-se cerca de 2 mm de espessura, o que significa que estamos observando aproximadamente 1 mm deslocados da interface dos metais de base. Como na região inferior o deslocamento de matéria é pequeno, vemos quase que exclusivamente Cobre.

No nível da ponta há ausência de matéria alternada com Alumínio ou Cobre. Estes defeitos são chamados de “Kiss Bonds” e se estendem por toda a amostra. Um motivo para a formação de “Kiss Bonds” é a falta de mistura entre os metais, uma vez que nesta região o deslocamento não é muito representativo. O outro seria o fato de a rosca do pino empurrar a matéria para baixo em toda sua extensão e a parte inferior desta coluna que está em contato com a superfície de apoio remonta deixando vazios.

No nível intermediário da amostra observamos lamelas alternadas de Alumínio e Cobre, mostrando que eles não se misturam totalmente nem mesmo nesta região por onde passou o pino. As lamelas estão voltadas para trás pois o pino ao se deslocar empurra a matéria para trás, o próprio formato do pino propicia este fenômeno. As lamelas repetem-se periodicamente e suas espessuras são de aproximadamente 1 mm o que corresponde ao “Weld Pitch”, deslocamento da ferramenta para uma volta completa da mesma.

$$Weld\ Pitch = \frac{V.\ de\ soldagem}{\omega} = \frac{750\ mm/min}{800\ rotações/min} \cong 0,94\ mm/rotação$$

Na figura 4.13 a) observamos os defeitos na superfície que teve contato com o ombro da ferramenta. Os degraus existentes evidenciam que o movimento da ferramenta de solda não é perfeitamente contínuo. Os metais de base resistem ao deslocamento da ferramenta, impedindo seu movimento por uns instantes e provocando o acúmulo de matéria na parte de trás. Ao ficar no mesmo local a ferramenta provoca um aquecimento excessivo, diminuindo a resistência mecânica do metal de base e provocando uma retomada de movimento brusca que faz a ferramenta escorregar, formando uma pequena descida até que a ferramenta seja novamente interrompida. Devido a este movimento brusco observam-se “Kiss-Bonds” logo abaixo da superfície uma vez que estes movimento rápidos não permitem que a matéria se misture

perfeitamente. Estes degraus também se repetem a cada 1 mm, demonstrando que estão relacionados ao “Weld-Pitch”. Estes degraus são concentradores de tensões, portanto indesejáveis. Também é possível observar riscos na superfície que ocorrem devido ao atrito entre a ferramenta de soldagem e o metal de base.

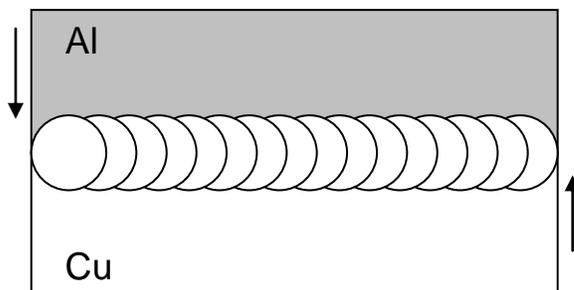
No anexo 5 estão exemplificados outros exemplos de defeitos.

#### 4.2 Composição Química

Os resultados obtidos pela Difração de raios X foram comparados com os resultados do EDS. Para a difração de raios X foram considerados os picos com intensidade relativa percentual maior que 0,7 e são apresentados da seguinte forma:  $Al_xCu_y$  [A,B]. Onde A é o número de picos encontrados para o intermetálico e B o número de picos deste intermetálico que são coincidentes com os picos de outros intermetálicos. Os resultados do EDS são apresentados da mesma maneira.

##### Ferramenta sobre a junta de solda:

##### Corte longitudinal



##### Intermetálicos no lado do Cu:

### Difração de raios X

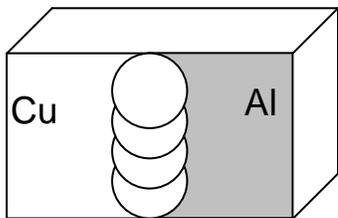
- Al Cu [1]
- Al<sub>2</sub> Cu<sub>3</sub> [1]
- Al Cu<sub>3</sub> [2]
- Al<sub>4</sub> Cu<sub>9</sub> [2]
- Al<sub>2</sub> Cu [1]
- Al<sub>4</sub> Si [1]
- Al<sub>9</sub> Fe<sub>0,84</sub> Mn<sub>2,16</sub> Si [3]
- Al<sub>8</sub> Si<sub>6</sub> Mg<sub>3</sub> Fe [3]

### Intermetálicos no lado do Al:

### Difração de raios X

- Al<sub>4</sub> Cu<sub>9</sub> [1]
- Al Cu [2, 1]

### Corte transversal



### Intermetálicos na face 1:

### Difração de raios X

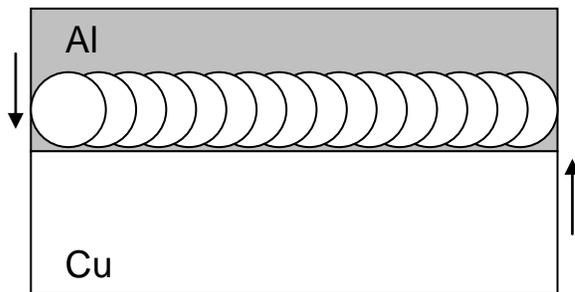
- Al Cu [2]
- Fe<sub>2</sub> Mn Si [1]
- Fe Si<sub>2</sub> [1]
- Al<sub>12</sub> Mg<sub>17</sub> [1]

## EDS

- Al Cu [7]
- Al<sub>2</sub> Cu [3]
- Al<sub>2</sub> Cu<sub>3</sub> [6]
- Al<sub>3</sub> Cu [9]

## Ferramenta sobre Al:

### Corte longitudinal



### Intermetálicos no lado do Cu:

#### Difração de raios X

- Al Cu [2,1]
- Al Cu<sub>4</sub> [1]
- Al<sub>4</sub> Cu<sub>9</sub> [1]
- Al<sub>2</sub> Cu [1]
- Al<sub>2</sub> Cu<sub>3</sub> [1]
- Fe Si<sub>2</sub> [1]
- Fe<sub>2</sub> Mn Si [1]
- Al<sub>1,9</sub> Cu Mg<sub>4,1</sub> Si<sub>3,3</sub> [1]
- Al<sub>8</sub> Si<sub>6</sub> Mg<sub>3</sub> Fe [1]

### Intermetálicos no lado do Al:

### Difração de raios X

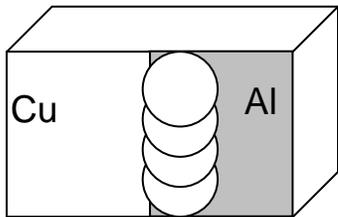
- Al Cu [1]

- Al<sub>4</sub> Cu<sub>9</sub> [2]

- Fe<sub>2</sub> Mn Si [1]

- Mg<sub>2</sub> Si [3]

### Corte transversal



### Intermetálicos na face 1:

### Difração de raios X

- Al Cu [1]

- Al<sub>4</sub> Cu<sub>9</sub> [1]

- Al<sub>1,9</sub> Cu Mg<sub>4,1</sub> Si<sub>3,3</sub> [1]

- Al<sub>85</sub> (Mn<sub>0,72</sub> Fe<sub>0,28</sub>)<sub>14</sub> Si [1]

### EDS

- Al Cu [1]

- Al<sub>2</sub> Cu<sub>3</sub> [1]

- Al<sub>4</sub> Cu [4]

- Al<sub>3</sub> Cu [5]

- Al<sub>6</sub> Cu [1]

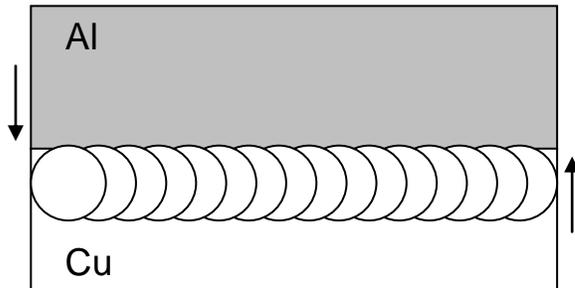
- Al Cu<sub>2</sub> [1]

- Al<sub>4</sub> Cu<sub>5</sub> Si [1]

- Fe Mn Si [1]

## Ferramenta sobre Cu:

### Corte longitudinal



### Intermetálicos no lado do Cu:

#### Difração de raios X

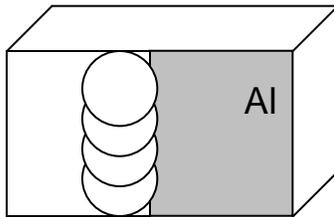
- Al Cu [1]
- Al<sub>2</sub> Cu [2]
- Al Cu<sub>4</sub> [1]
- Al<sub>4</sub> Cu<sub>9</sub> [1]
- Al<sub>12</sub> Mg<sub>17</sub> [3, 1]
- Fe Si<sub>2</sub> [2, 1]
- Al<sub>74</sub> Si<sub>6</sub> Mn<sub>20</sub> [2, 1]
- Fe<sub>2</sub> Mn Si [1]
- Al<sub>85</sub> (Mn<sub>0,72</sub> Fe<sub>0,28</sub>)<sub>14</sub> Si [1]
- Al<sub>1,9</sub> Cu Mg<sub>4,1</sub> Si<sub>3,3</sub> [1]
- Al<sub>9</sub> Fe<sub>0,84</sub> Mn<sub>2,16</sub> Si [3]
- Al<sub>8</sub> Si<sub>6</sub> Mg<sub>3</sub> Fe [2]

### Intermetálicos no lado do Al:

### Difração de raios X

- Al Cu [2, 1]
- Al Cu<sub>4</sub> [1]
- Al<sub>3,982</sub> Cu<sub>6,108</sub> [3]
- Fe<sub>2</sub> Mn Si [2]
- Al<sub>1,9</sub> Cu Mg<sub>4,1</sub> Si<sub>3,3</sub> [1]

### Corte transversal



### Intermetálicos na face 2:

#### Difração de raios X

- Al<sub>2</sub> Cu [2]
- Al Cu<sub>3</sub> [1]
- Al<sub>4</sub> Cu<sub>9</sub> [6]
- Al<sub>12</sub> Mg<sub>17</sub> [4]
- Fe Si<sub>2</sub> [1]
- Al<sub>12</sub> Mg<sub>17</sub> [4]
- Al<sub>65</sub> Cu<sub>20</sub> Fe<sub>6</sub> Mn<sub>9</sub> [4]
- Al<sub>85</sub> (Mn<sub>0,72</sub> Fe<sub>0,28</sub>)<sub>14</sub> Si [1]
- Al<sub>1,9</sub> Cu Mg<sub>4,1</sub> Si<sub>3,3</sub> [1]
- Al<sub>9</sub> Fe<sub>0,84</sub> Mn<sub>2,16</sub> Si [2]
- Al<sub>8</sub> Si<sub>6</sub> Mg<sub>3</sub> Fe [1]

## EDS:

- Al Cu [1]

- Al Cu<sub>3</sub> [9]

- Al<sub>2</sub> Cu [2]

- Al<sub>3</sub> Cu<sub>2</sub> [1]

- Al<sub>3</sub> Cu [2]

Os intermetálicos encontrados são dos tipos: Al<sub>x</sub>Cu<sub>y</sub>, Al<sub>x</sub>Cu<sub>y</sub> + elementos da liga Al6082 e intermetálicos da liga 6082. AlCu, Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>, Al<sub>2</sub>Cu e Al<sub>3</sub>Cu foram os intermetálicos mais frequentes, encontrados em todas as amostras.

Os resultados acima mostram que quase todos os intermetálicos estão presentes em todas as amostras com exceção do Al<sub>4</sub>Si, Mg<sub>2</sub>Si e Al<sub>3,982</sub>Cu<sub>6,108</sub> que aparecem apenas em uma amostra. Isto permite concluir que o posicionamento da ferramenta de soldagem não afeta a natureza dos intermetálicos.

### 4.3 Parâmetros de malha

Os parâmetros de malha do Alumínio e do Cobre foram medidos a partir das distâncias interreticulares para cada orientação cristalográfica como demonstrado a seguir.

$$a = d_{(h,k,l)} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $a$  é o parâmetro de malha,  $d_{hkl}$  a distância interreticular e  $h$ ,  $k$  e  $l$  os índices de Miller.

Pela extrapolação do parâmetro de malha em função de  $\theta$  para  $\theta = \pi/2$  é possível calcular de maneira mais precisa o parâmetro de malha [2]. O cálculo do erro começa pela derivação da Lei de Bragg em relação a  $\theta$ .

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad \text{Equação 2}$$

$$\frac{\Delta d}{d} = - \frac{1}{\sin \theta} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \Delta \theta \quad \text{Equação 3}$$

Utilizando a equação 1 no sistema cúbico temos :

$$\frac{\Delta a}{a} = -\frac{1}{\sin \theta} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \Delta \theta \quad \text{Equação 4}$$

$$\lim_{\theta \rightarrow \pi/2} \left( -\frac{1}{\sin \theta} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \Delta \theta \right) = 0 \quad \text{Equação 5}$$

O parâmetros de malha, as distâncias interreticulares e os resultados destes cálculo estão expostos nas tabelas a seguir.

Tabela 4.7: Parâmetros de malha da liga Al 6082 e do Cobre.

Al 6082		Cu	
(hkl)	d(hkl) (Å)	(hkl)	d(hkl) (Å)
(111)	2,33669	(111)	2,0871
(200)	2,02179	(200)	1,8075
(220)	1,43024	(220)	1,2781
(311)	1,22067	(311)	1,0899
(222)	-	(222)	1,043
a (Å)	4,0488	a (Å)	3,615

Tabela 4.8: Parâmetros de malha na amostra soldada com a ferramenta sobre a junta.

Al (hkl)	d(hkl) (Å)	a (Å)	Cu (hkl)	d(hkl) (Å)	a (Å)
(111)	2,34062	4,0541	(111)	2,08786	3,6163
(200)	2,02725	4,0545	(200)	1,80878	3,6176
(220)	1,43287	4,0528	(220)	1,27874	3,6168
(311)	1,22183	4,0524	(311)	1,09043	3,6165
(222)	1,16993	4,0528	(222)	1,04391	3,6162
$\Delta a$ (Å)	0,0025	4,0513	$\Delta a$ (Å)	0,0013	3,6163

Tabela 4.9: Parâmetros de malha na amostra soldada com a ferramenta sobre Alumínio.

Al (hkl)	d(hkl) (Å)	a (Å)
(111)	2,33786	4,04930
(200)	2,02488	4,04980
(220)	1,43196	4,05200
(311)	1,22153	4,05140
(222)	1,16933	4,05070
$\Delta a$ (Å)	0,00390	4,05130

Cu (hkl)	d(hkl) (Å)	a (Å)
(111)	2,08448	3,61040
(200)	1,80649	3,61300
(220)	1,27773	3,61400
(311)	-	-
(222)	1,04380	3,61580
$\Delta a$ (Å)	0,00240	3,61740

Tabela 4.10: Parâmetros de malha na amostra soldada com a ferramenta sobre Cobre.

Al (hkl)	d(hkl) (Å)	a (Å)
(111)	2,3401	4,0532
(200)	2,0256	4,0513
(220)	-	-
(311)	1,2208	4,0490
(222)	1,1691	4,0499
$\Delta a$ (Å)	-0,0015	4,0473

Cu (hkl)	d(hkl) (Å)	a (Å)
(111)	2,08112	3,6046
(200)	-	-
(220)	1,27721	3,6125
(311)	-	-
(222)	1,04351	3,6148
$\Delta a$ (Å)	0,0039	3,6189

O aumento da distância interreticular no caso do Alumínio pode ser explicado pela formação de uma solução sólida com o Cobre que tem raio atômico maior do que o Alumínio e causou uma distorção da rede cristalina, como previsto pela Lei de Vegard[2]. No caso da ferramenta sobre o Cobre, onde este valor foi menor do que o padrão para a liga é possível que algum elemento como por exemplo o Silício tenha se dissolvido no Alumínio.

O aumento da distância interreticular no caso do Cobre pode ser explicado pela existência de tensões residuais na rede cristalina originadas durante o processo de soldagem.

#### 4.4 Microdureza Vickers

A chapa de Alumínio utilizada foi recebida no estado de tratamento térmico T6, envelhecida artificialmente. Foram realizadas medidas de dureza no Alumínio e no Cobre obtendo-se os valores de 98 HV e 105 HV respectivamente.

As figuras a seguir apresentam os resultados das durezas medidos como descrito anteriormente nos procedimentos experimentais.

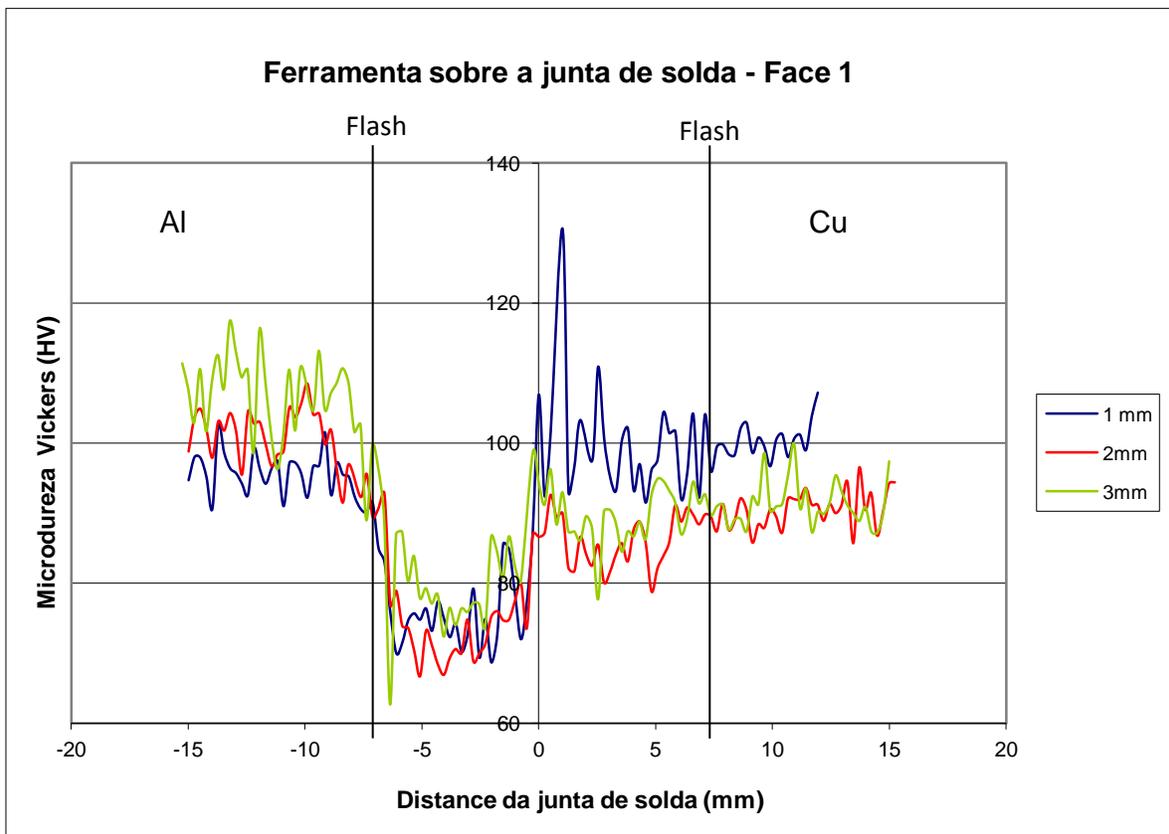


Figura 4.13: Microdureza Vickers na face 1 da amostra soldada com ferramenta sobre a junta.

A dureza do Alumínio próximo à junta de soldagem reduziu-se consideravelmente devido ao aquecimento a cerca de 550°C, temperatura de solubilização da liga Al 6082[5]. Ao atingir esta temperatura o  $Mg_2Si$  solubilizou-se na matriz de Alumínio, diminuindo a dureza para

aproximadamente 75 HV, 23% menos do que no metal de base. A ausência de matéria nesta região da junta de solda também pode ter levado à redução da dureza.

Mais afastado da junta de solda nota-se que a dureza ficou praticamente estável a 1 mm e 2 mm da superfície, indicando que a temperatura máxima atingida não foi suficiente para solubilizar o  $Mg_2Si$ , portanto sem efeitos significativos devido ao aquecimento. Como a 3 mm da superfície o resfriamento é mais lento esta região ficou por mais tempo a temperaturas acima de  $170^\circ C$  (temperatura de precipitação do tratamento térmico das ligas 6082[5]), ocorreu precipitação de  $Mg_2Si$ , aumentando a dureza do Alumínio. Constatou-se então que a liga Al 6082 envelhecida artificialmente ainda continha Magnésio e Silício em solução sólida, ou seja, não estava em seu estado de maior resistência mecânica.

No lado do Cobre observa-se uma pequena redução de dureza próximo à junta de solda devido a existência de Alumínio e ausência de matéria na matriz o que afeta as medidas de dureza.

Com o afastamento em relação à junta de solda a dureza continua abaixo da dureza do metal de base. Neste caso podemos citar o aumento do tamanho de grão devido ao aquecimento como responsável por esta redução de dureza. À 1 mm de profundidade a redução na dureza é menor pois apesar de aquecer mais por estar mais próxima do ombro da ferramenta esta região também resfria mais rapidamente por estar mais próxima a superfície resultando em um efeito menos intenso do aquecimento.

Os picos de dureza observados, chegando a cerca de 130 HV, são consequência de medidas realizadas sobre intermetálicos duros como o  $AlCu$ ,  $Al_2Cu$  e  $Al_4Cu_9$  ou intermetálicos da liga Al 6082.

Tabela 4.11: Tamanho de grão afastado da junta de solda na amostra soldada com ferramenta sobre a junta.

Amostra	F. sobre a junta	Metal de base
Diâmetro médio ( $\mu m$ )	27,3	24,5

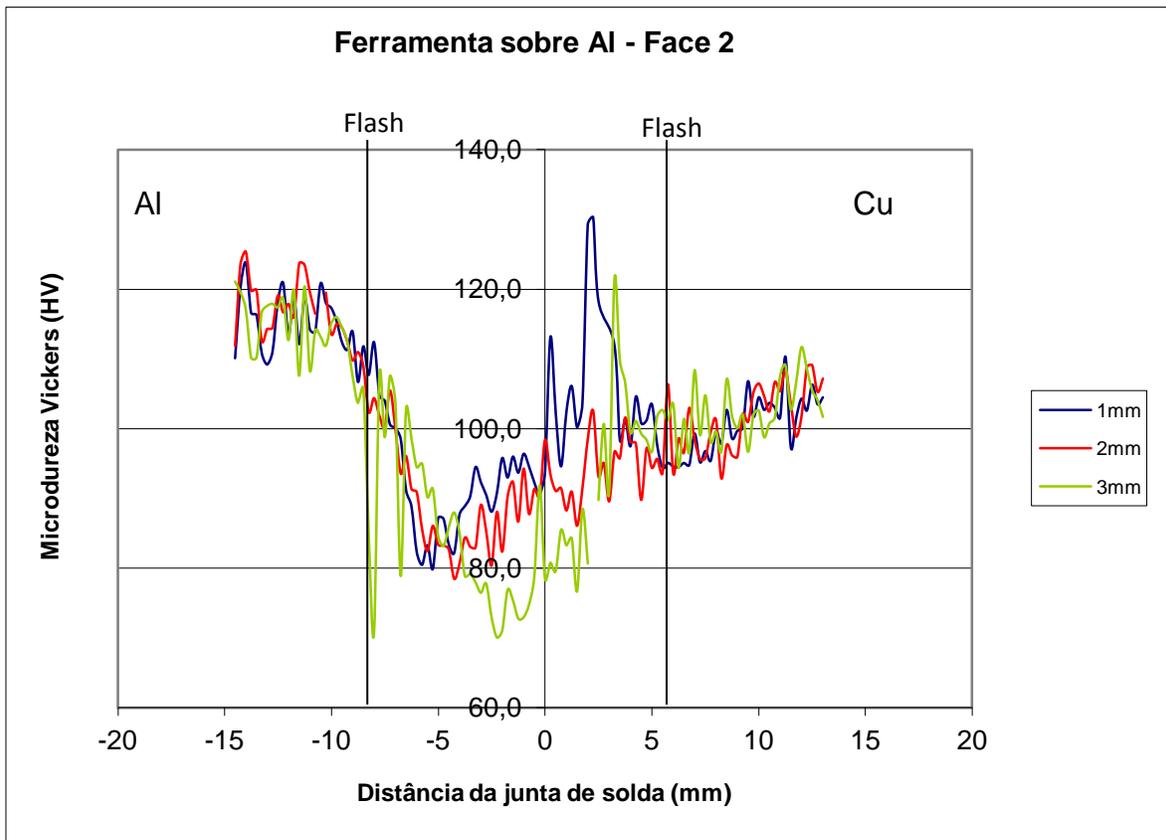


Figura 4.14: Microdureza Vickers na face 1 da amostra soldada com ferramenta sobre Al.

Com a ferramenta posicionada sobre o Alumínio observa-se efeito semelhante ao caso anterior. Próximo a junta a ausência de matéria provoca a redução da dureza. Longe da junta o mesmo incremento de dureza é observado, chegando a cerca de 115 HV, 17% a mais, porém desta vez a distância a superfície não gera diferenças. Isto pode ser explicado pela maior proximidade da ferramenta de soldagem que gerou calor suficiente para fazer precipitar  $Mg_2Si$  independentemente da distância à superfície.

Nota-se que a redução da dureza no lado do Cobre é menos intensa quando o posicionamento da ferramenta de soldagem é sobre o Alumínio. A redução da dureza pode ser explicada da mesma maneira que anteriormente porém neste caso há menos Alumínio na matriz pois o seu deslocamento é menor uma vez que a ferramenta encontra-se mais longe da junta de solda e o aquecimento é menor.

Com o afastamento em relação à junta de solda a dureza aumenta gradualmente até valores próximos ao metal de base pois o crescimento de grão não foi significativo devido ao menor aporte de calor nesta condição de soldagem.

Tabela 4.12: Tamanho de grão afastado da junta de solda na amostra soldada com ferramenta sobre Al.

Amostra	F. sobre Al	Metal de base
Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	25,1	24,5

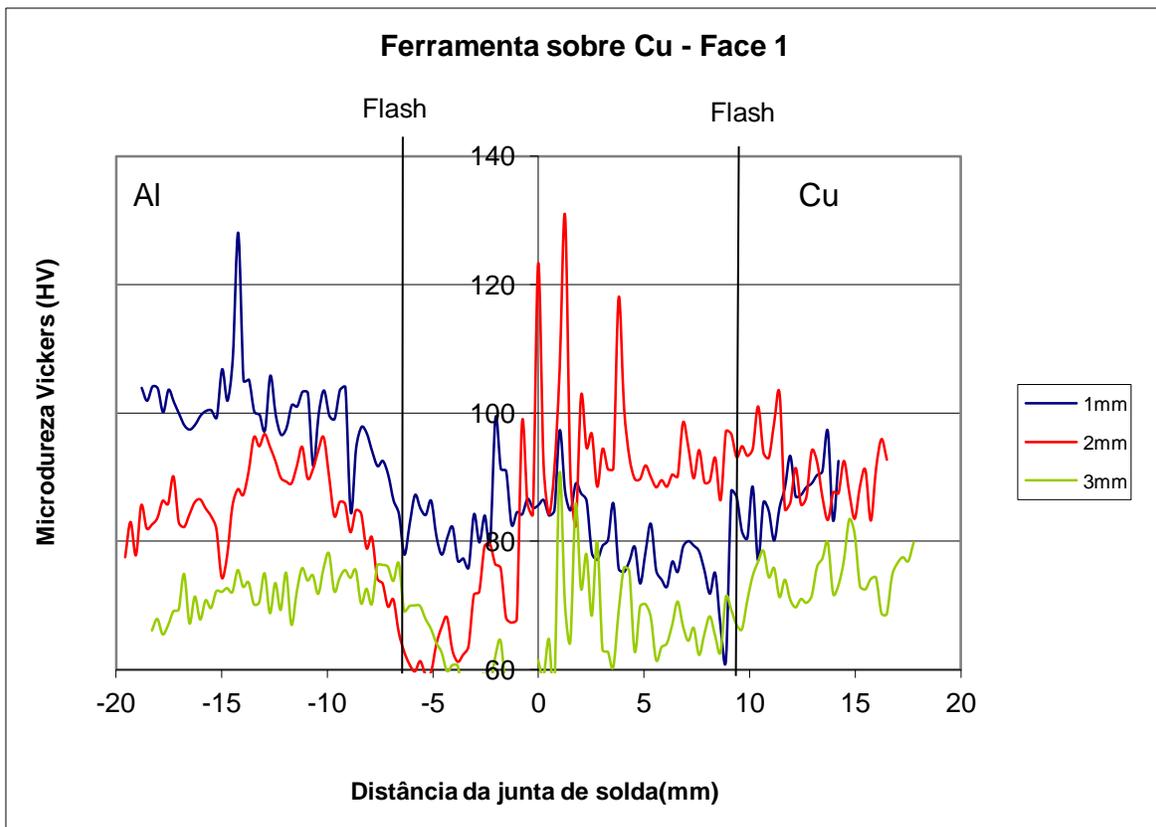


Figura 4.15: Microdureza Vickers na face 1 da amostra soldada com ferramenta sobre Cu.

Neste último caso a dureza do Alumínio próximo à junta de solda reuiu menos a dureza quanto mais próximo da superfície. A presença de mais Cobre, que neste caso deslocou-se mais gerou esta diferença, pois quanto mais próximo da superfície mais Cobre no lado do Alumínio.

Longe da junta de solda o efeito causado pela diferença de resfriamento devido a distância à superfície tornou-se mais notório uma vez que a ferramenta estava mais afastada desta região. No entanto as temperaturas atingidas foram mais altas, chegando a solubilizar o  $Mg_2Si$  mais intensamente quanto maior a profundidade.

A dureza no lado do Cobre é relativamente constante em relação a distância à junta de solda. Isto pode ser explicado por uma combinação dos efeitos do Alumínio e ausência de matéria nas proximidades da junta e da variação no tamanho de grão quando mais longe da mesma. Para este posicionamento da ferramenta de soldagem o aumento do tamanho de grão é o maior de todos devido ao maior aporte de calor. Os picos de dureza também estão presentes.

Tabela 4.13: Tamanho de grão afastado da junta de solda na amostra soldada com ferramenta sobre Cu.

Amostra	F. sobre Cu	Metal de base
Diâmetro médio ( $\mu m$ )	31,6	24,5

Uma observação importante é que os picos de dureza nos três casos chegaram a cerca de 130 HV e sempre próximo à junta de solda. Sendo os intermetálicos formados entre Alumínio e Cobre, ou com elementos da liga Al6082 este fato comprova que o Alumínio não se difundiu para o lado do Cobre para além da zona mecânicamente afetada.

## **5 – Conclusão**

- A morfologia da junta de solda está relacionada diretamente com o posicionamento da ferramenta. O deslocamento de matéria foi maior quando a ferramenta estava sobre o Cobre, levando à melhor mistura entre os metais de base porém resultou em uma maior quantidade de defeitos.
- A análise química comprovou a existência de AlCu e Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>, além de outros intermetálicos frágeis como previsto na literatura[1]. O posicionamento da ferramenta de soldagem não alterou a natureza dos intermetálicos existentes. O resfriamento acelerado, fora das condições de equilíbrio, devido ao contato com a superfície de apoio levou à formação do Al<sub>3</sub>Cu, intermetálico instável a temperatura ambiente.
- As microdureza evidenciam as variações dos efeitos causados pela passagem da ferramenta de soldagem em relação a distância à junta de solda e a profundidade em relação à superfície. Na região de passagem da ferramenta observou-se redução da dureza tanto no Alumínio devido à a solubilização do Mg<sub>2</sub>Si e no Cobre pela presença de Alumínio na matriz. A ausência de matéria é uma causa comum da redução de dureza nos dois metais de base.
- Longe da junta de solda a dureza do Alumínio aumentou em certos casos devido à precipitação de Mg<sub>2</sub>Si. No Cobre a dureza diminuiu tendo como causa o aumento do tamanho de grão.
- Tendo por vista as propriedades mecânicas espera-se que as soldas realizadas com a ferramenta sobre a junta e sobre o Alumínio sejam equivalentes e melhores do que sobre o Cobre. Isto pode ser explicado pela maior quantidade de defeitos e maior redução na dureza dos metais de base nesta última condição.

Para melhora das propriedades das soldas pode ser proposta a redução do “Weld-Pitch” reduzindo a espessura das lamelas presentes e melhorando a mistura entre os metais de base. Isto também levaria a redução do tamanho dos degraus concentradores de tensões existentes na superfície de soldagem.

A redução do “Weld-Pitch” pode ser obtida pelo aumento da velocidade de rotação da ferramenta ou pela redução da velocidade de soldagem. O aporte de calor à peça é proporcional a  $\omega^2/v$ . O aumento do “Weld-Pitch” através do aumento da rotação da ferramenta gera um aporte de calor mais intenso do que a redução da velocidade de soldagem. Tornam-se necessárias experimentações para obter o melhor resultado possível considerando que o maior aporte de calor leva à melhor mistura entre os metais porém promove mais a formação de intermetálicos. Por outro lado a redução da velocidade de soldagem diminui a produtividade desta técnica.

## **Bibliografia**

1. Ahmed ELREFAEY, Makoto TAKAHASHI, Kenji IKEUCHI, Microstructure of Aluminium/Copper Lap Joint by Friction Stir Welding and Its Performance. Journal of High Temperature Society Vol. 30 (2004) N° 5 pp 286-292.
2. B. D. CULLITY, Elements of X-Ray Diffraction, Chap. 11, Precise Parameter Measurements. ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, Inc. U.S.A. 1967.
3. B. D. CULLITY, Elements of X-Ray Diffraction, Chap. 12, Phase Diagram Determination. ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, Inc. U.S.A. 1967.
4. <http://aluminium.matter.org.uk>
5. [www.metalmundi.com](http://www.metalmundi.com)
6. Eneko San Sebastian, Cassiopée Delval, Caractérisation de la soudure d'échantillons. réalisées par friction malaxage FSW.
7. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and engineering, R 50 (2005) 1-78
8. C. J. Hsu, P. W. Kao, N. J. Ho, Ultrafine-grained Al-Al<sub>2</sub>Cu composite produced in situ by friction stir processing. Scripta Materialia 53 (2005) 341-345
9. Bekir S. Yilbas, Ahmet Z. Sahin, Nafiz Kahraman, Ahmed Z. Al-Garni, Friction welding of St-Al and Al-Cu Materials. Journal of Materials and Processing Technology 49 (1995) 431-443.
10. M. Abassi, A. Karimi Taheri, M. T. Salehi, Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. Journal of Alloys and Compounds 319 (2001) 233-241.
11. Abdollah-zadeh, T. Saeid, B. Sazgari, Microstructural and mechanical properties of friction stir welding aluminium/copper lap joints. Journal of Alloys and Compounds 460(2008)535-538.
12. Peng Liu, Qingyu Shi, Wei Wang, Xin Wang, Zenglei Zhang, Microstructure and XDR analysis of FSW joints for CopperT2/Aluminium5A06 dissimilar materials. Materials Letters 62 (2008) 4106-4108.
13. Cazes, Roland, Soudage par friction-malaxage. Techniques de l'ingénieur, Ref. BM7746.
14. [www.infomet.com.br](http://www.infomet.com.br)

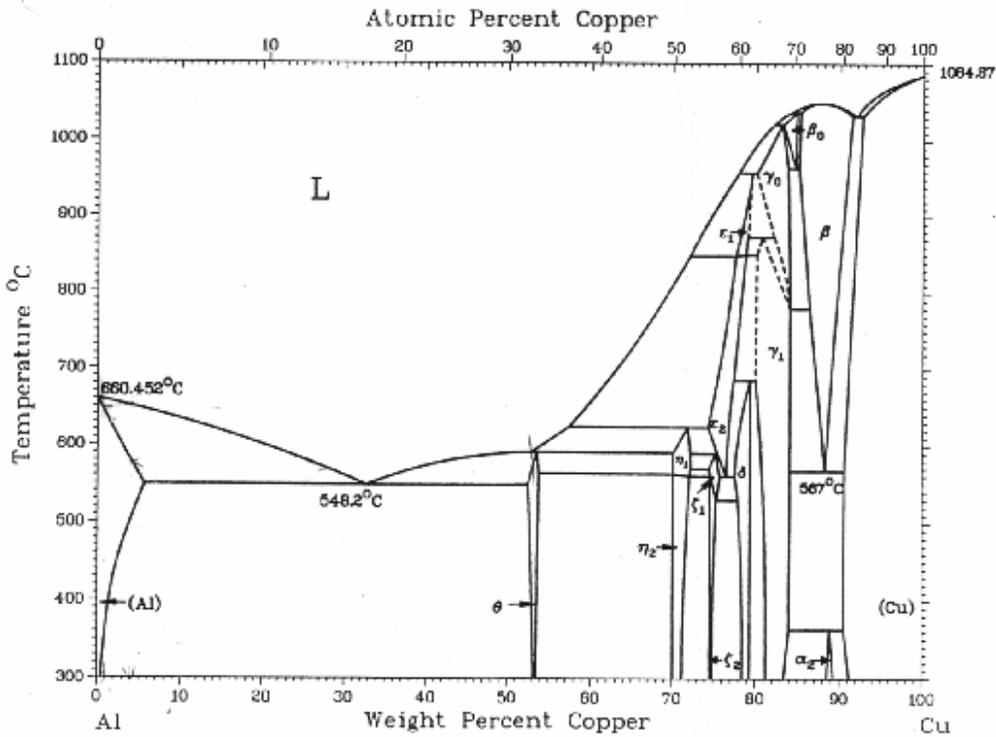
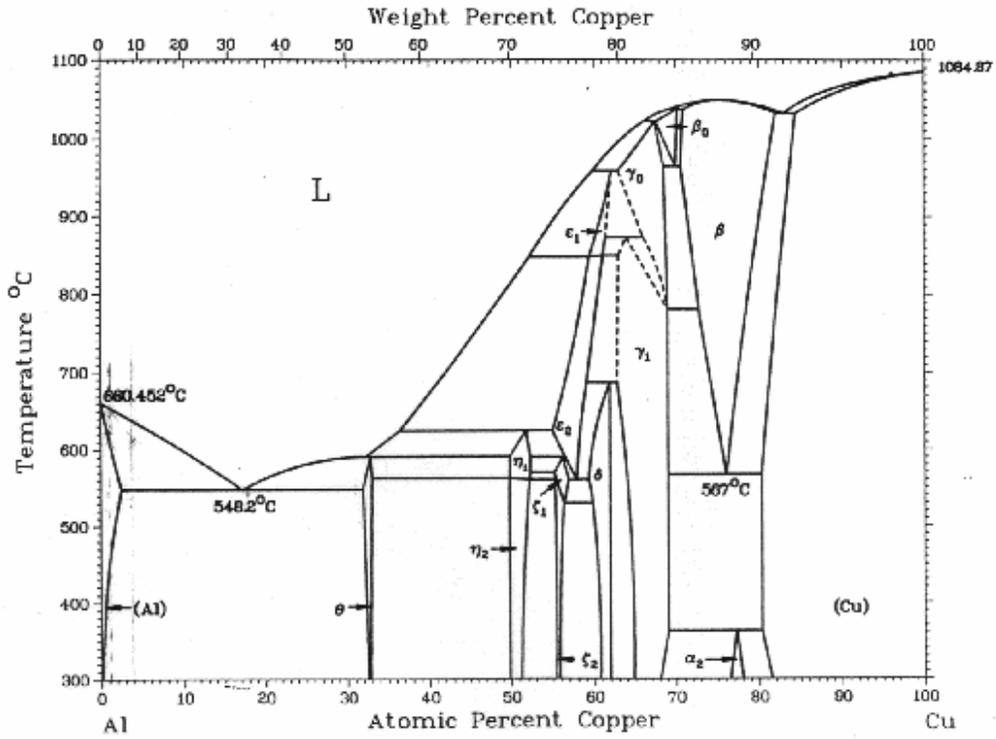
## Anexos

### 1- Propriedades físicas da liga Al 6082 e do Cu.

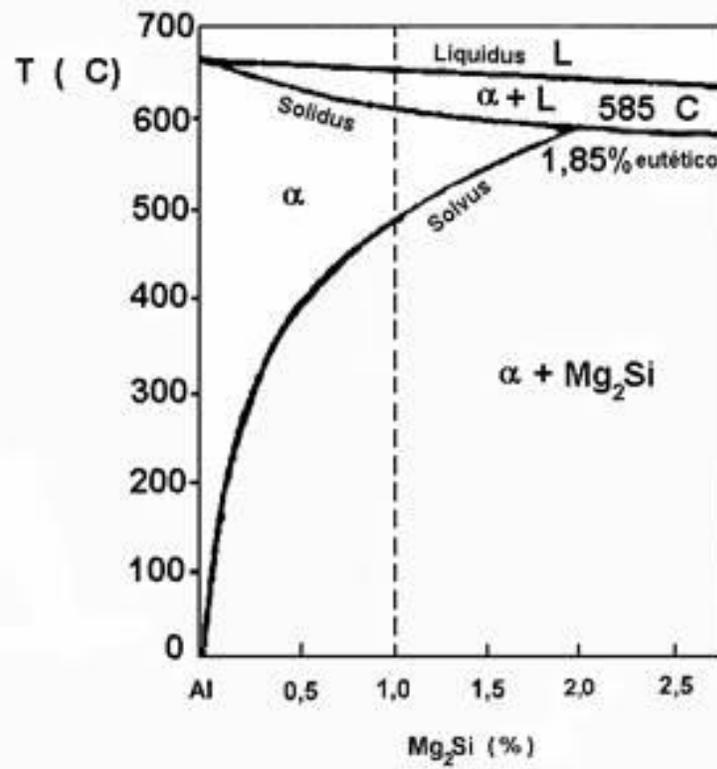
Al 6082	0	T6
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	
Temperatura de fusão (°C)	55	
Módulo de elasticidade (GPa)	70	
v	0,33	
Limite de escoamento 0,2% (MPa)	60	310
Limite de resistência à tração (MPa)	130	340
Limite de cisalhamento (MPa)	85	210
Dureza Vickers (HV)	35	100
Resistividade elétrica (Ω.m)	3,8 x 10 <sup>-6</sup>	
Condutividade térmica (W/m.K)	216	172

Cu	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	8,89
Temperatura de fusão (°C)	1084
Módulo de Elasticidade (GPa)	120
v	0,33
Limite de escoamento 0,2% (MPa)	60
Limite de resistência à tração (MPa)	200
Limite de cisalhamento (MPa)	130
Dureza Vickers (HV)	105
Resistividade elétrica (Ω.m)	1,7 x 10 <sup>-8</sup>
Condutividade térmica (W/m.K)	380

2 – Diagramas de fase Al – Cu [6]



3 – Diagrama de fase Al – Mg<sub>2</sub>Si [14]



#### 4 – Resultado experimentais da análise no MEV

Outil Al, sens long, côté Al

Princeton Gamma-Tech, Inc.

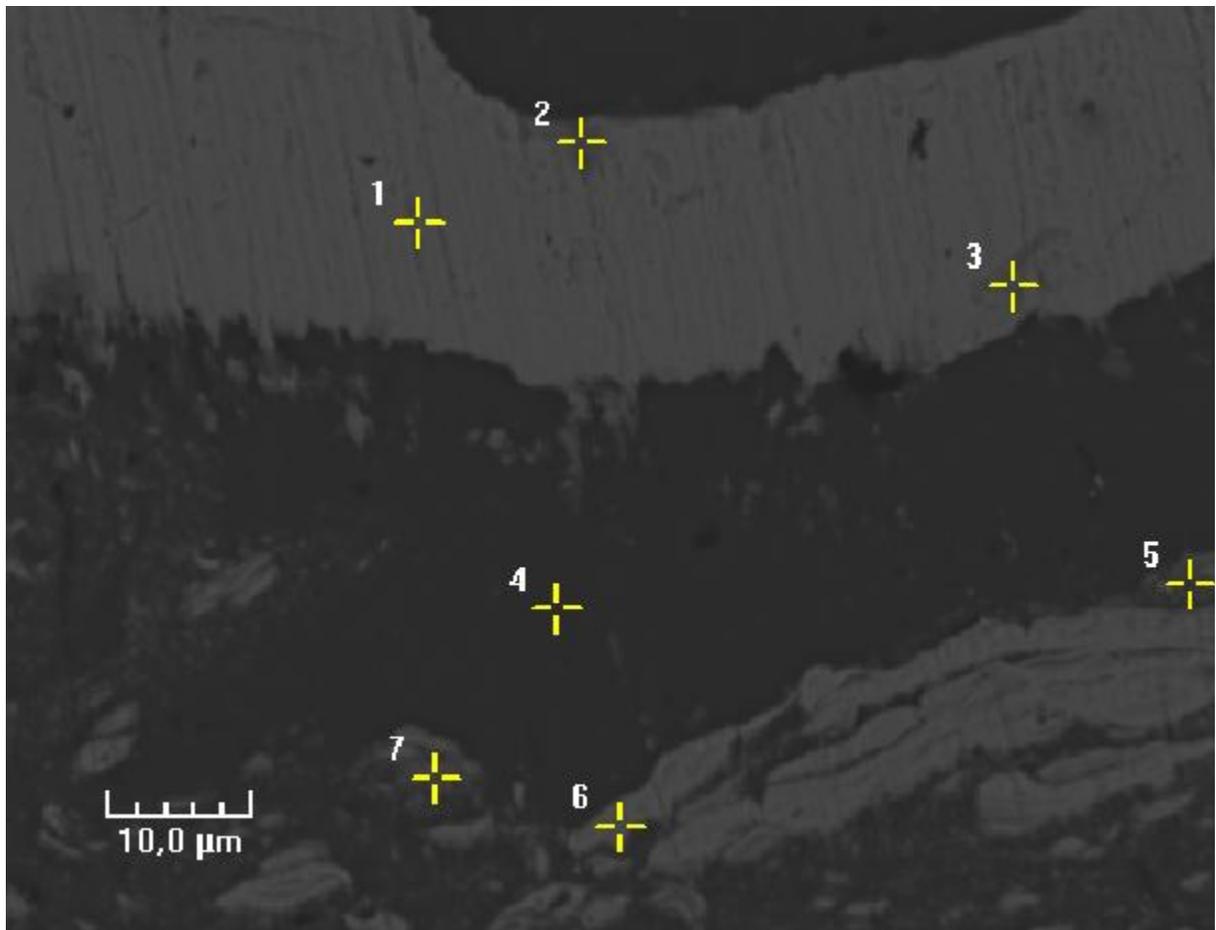
Image Set Report

lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\taillard\fsw alcu\Coté alu\ep ent\_27\_Img1\_BAN.bmp

Collecte novembre 17, 2008 17:29:10

d:



ep ent\_27\_Img1\_BAN

Width(µm): 87,21      Height(µm): 65,41      µm/pixel: 0,170

Scope magnification: 1500X

Princeton Gamma-Tech, Inc.

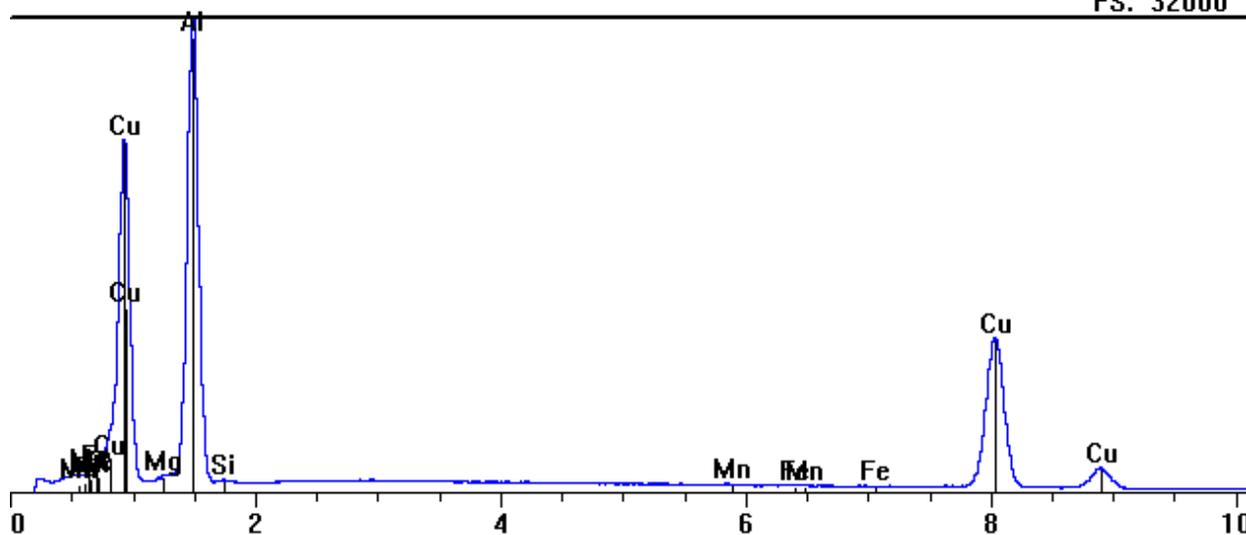
Spectrum Report  
lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\taillard\fsw alcu\Coté alu\ep ent\_27\_img1\_T007.pgt  
Collecte: novembre 04, 2008 14:36:02  
d:

Live	100,00	Count	13992	Dead	19,00 %
Time:		Rate:		Time:	
Beam	20,00	Beam	2,00	Takeoff	32,00
Voltage:		Current:		Angle:	

■ ep ent\_27\_img1\_T007.pgt

FS: 32000



Al<sub>3</sub>Cu

Element	keV	KRatio	Wt%	At%	ChiSquared
Al	1,487	0,1938	58,43	75,80	279,19
Cu	8,046	0,3770	39,91	21,98	7,03
Mn	5,898	0,0010	0,09	0,06	1,37
Si	1,740	0,0008	0,24	0,29	279,19
Mg	1,254	0,0030	1,28	1,84	279,19
Fe	6,403	0,0006	0,05	0,03	1,37
<b>Total</b>		<b>0,5763</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>178,67</b>

Element	Z Corr	A Corr	F Corr
Al	0,999	3,018	1,000
Cu	1,059	0,999	1,000
Mn	1,050	1,021	0,847
Si	0,967	3,059	1,000
Mg	0,972	4,430	0,993
Fe	1,028	1,012	0,788

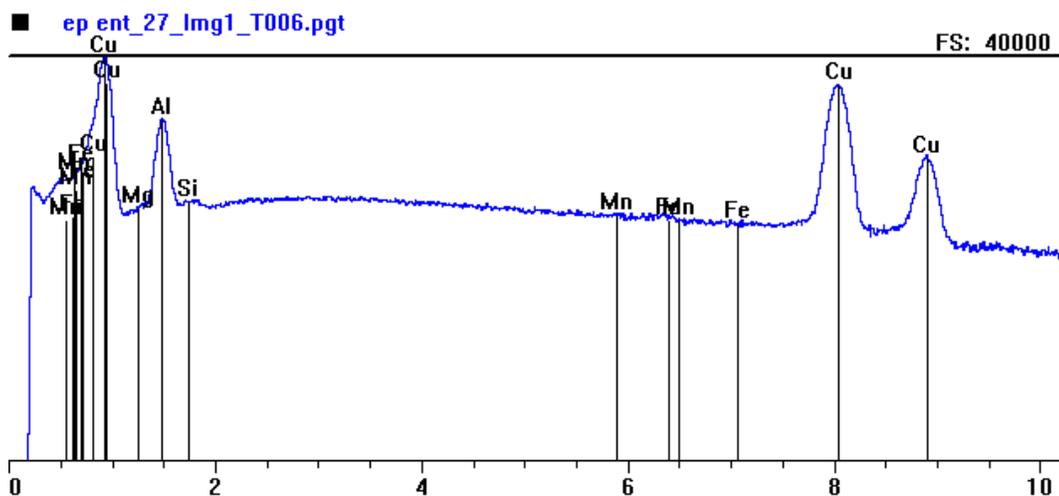
**Princeton Gamma-Tech, Inc.**

Spectrum Report

lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\t...d\fsw alcu\Coté alu\al coté A\ep ent\_27\_img1\_T006.pgt  
 Collecte novembre 04, 2008 14:36:02  
 d:

Live	100,00	Count	16475	Dead	22,20 %
Time:		Rate:		Time:	
Beam	20,00	Beam	2,00	Takeoff	32,00
Voltage:		Current:		Angle:	



**AlCu<sub>2</sub>**

Element	keV	KRatio	Wt%	At%	ChiSquared
Al	1,487	0,0496	19,96	36,72	60,58
Cu	8,046	0,7824	79,30	61,92	20,55
Mn	5,898	0,0000	0,00	0,00	
Si	1,740	0,0011	0,32	0,57	60,58
Mg	1,254	0,0006	0,37	0,75	60,58
Fe	6,403	0,0006	0,04	0,04	1,74
<b>Total</b>		<b>0,8343</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>330,72</b>

Element	Z Corr	A Corr	F Corr
Al	0,988	4,078	1,000
Cu	1,014	1,000	1,000
Mn	1,012	1,022	0,795
Si	0,955	3,025	1,000
Mg	0,962	6,230	0,999
Fe	0,989	1,014	0,723

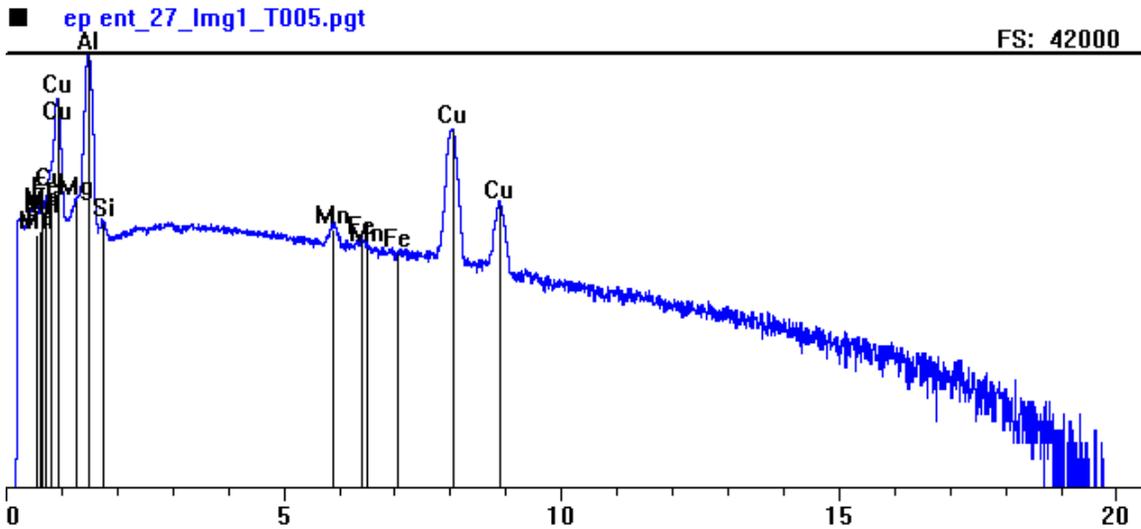
**Princeton Gamma-Tech, Inc.**

Spectrum Report

lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\t...d\fsw alcu\Coté alu\al coté Al\ep ent\_27\_img1\_T005.pgt  
 Collecte novembre 04, 2008 14:36:02  
 d:

Live	100,00	Count	11966	Dead	16,51 %
Time:		Rate:		Time:	
Beam	20,00	Beam	2,00	Takeoff	32,00
Voltage:		Current:		Angle:	



**Al<sub>6</sub>Cu**

Element	keV	KRatio	Wt%	At%	ChiSquared
Al	1,487	0,2845	68,78	82,65	296,79
Cu	8,046	0,2653	28,83	14,70	4,52
Mn	5,898	0,0055	0,54	0,32	1,39
Si	1,740	0,0010	0,30	0,34	296,79
Mg	1,254	0,0044	1,43	1,91	296,79
Fe	6,403	0,0015	0,14	0,08	1,39
<b>Total</b>		<b>0,5622</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>159,36</b>

Element	Z Corr	A Corr	F Corr
Al	1,005	2,405	1,000
Cu	1,086	1,000	1,000
Mn	1,073	1,020	0,886
Si	0,974	3,070	1,000
Mg	0,978	3,384	0,986
Fe	1,052	1,012	0,841

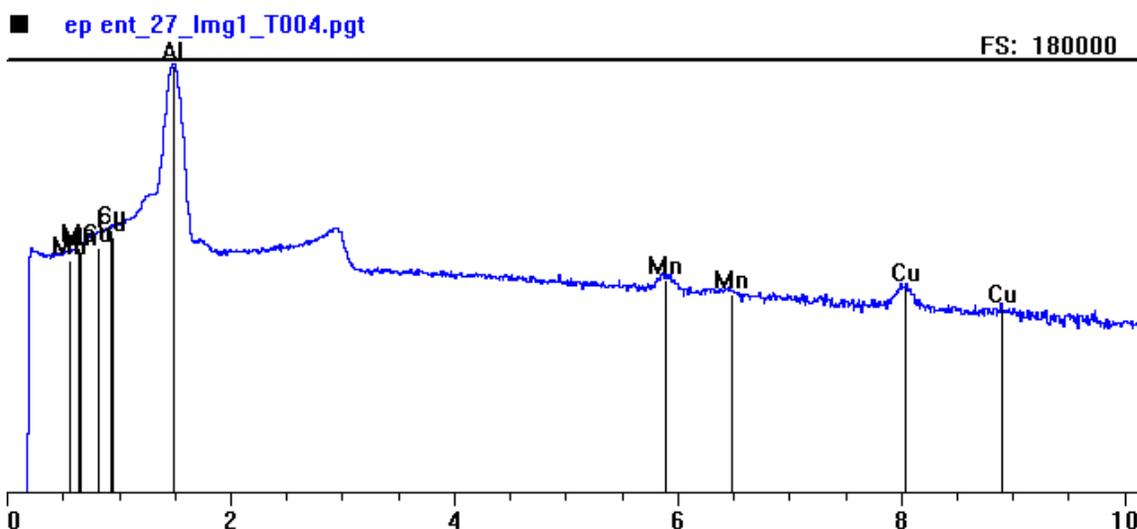
**Princeton Gamma-Tech, Inc.**

Spectrum Report

lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\t...d\fsw alcu\Coté alu\al coté Al\ep ent\_27\_img1\_T004.pgt  
 Collecte novembre 04, 2008 14:36:02  
 d:

Live	100,00	Count	23043	Dead	27,09 %
Time:		Rate:		Time:	
Beam	20,00	Beam	2,00	Takeoff	32,00
Voltage:		Current:		Angle:	



Al

Element	keV	KRatio	Wt%	At%	ChiSquared
Al	1,487	0,9558	99,12	99,60	1156,14
Cu	8,046	0,0048	0,55	0,24	1,02
Mn	5,898	0,0029	0,33	0,16	1,15
<b>Total</b>		<b>0,9634</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>962,25</b>

Element	Z	A	F
	Corr	Corr	Corr
Al	1,021	1,016	1,000
Cu	1,157	0,998	1,000
Mn	1,131	1,019	0,999

Princeton Gamma-Tech, Inc.

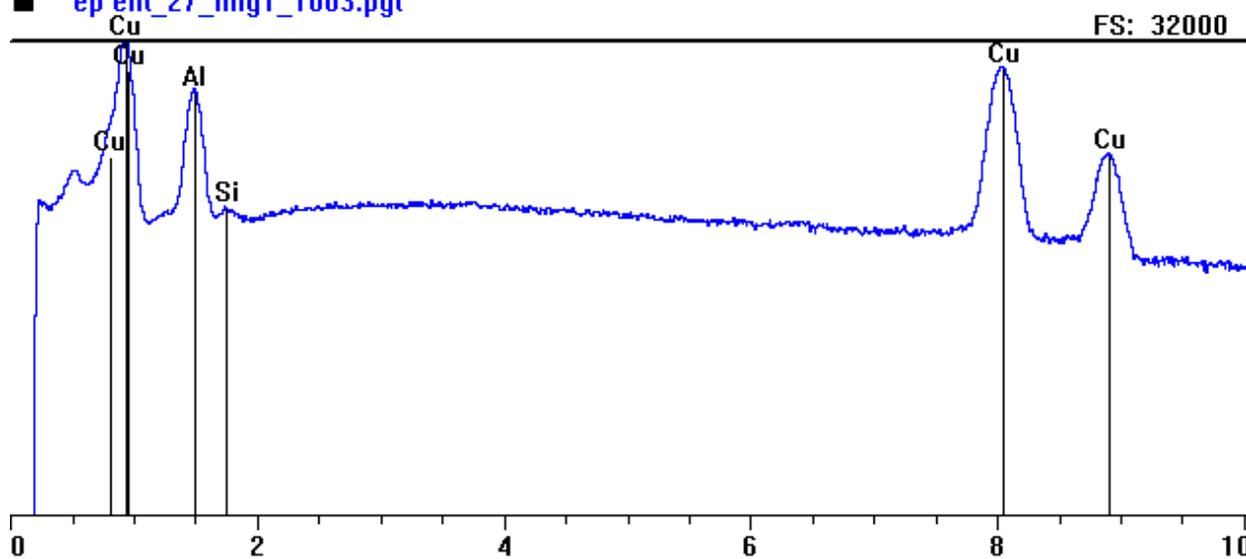
Spectrum Report

lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\t...d\fsw alcu\Coté alu\al coté Al\ep ent\_27\_img1\_T003.pgt  
 Collecte novembre 04, 2008 14:36:02  
 d:

Live 100,00 Count 15515 Dead 21,17 %  
 Time: Rate:  
 Beam 20,00 Beam 2,00 Takeoff 32,00  
 Voltage: Current: Angle:

■ ep ent\_27\_img1\_T003.pgt



Element	keV	KRatio	Wt%	At%	ChiSquared
Al	1,487	0,0717	24,07	42,65	113,73
Si	1,740	0,0009	0,26	0,44	113,73
Cu	8,046	0,7259	75,67	56,91	19,43
<b>Total</b>		<b>0,7984</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>257,76</b>

Element	Z Corr	A Corr	F Corr
Al	0,995	3,374	1,000
Si	0,963	3,046	1,000
Cu	1,043	0,999	1,000

Princeton Gamma-Tech, Inc.

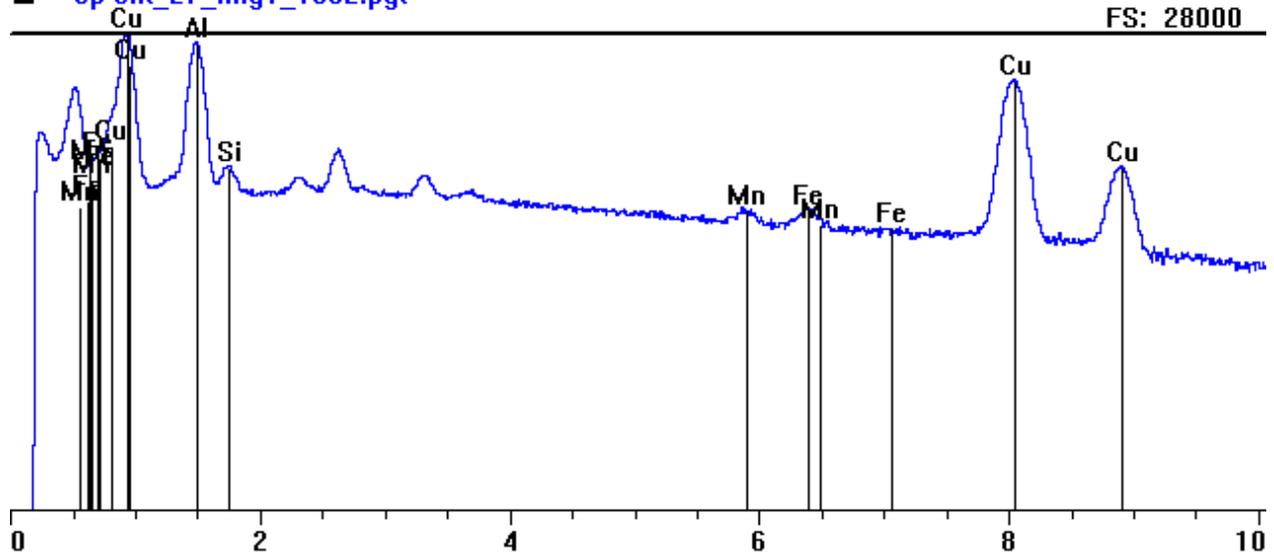
Spectrum Report

lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\t...\d\sw alcu\Coté alu\al coté Al\ep ent\_27\_img1\_T002.pgt  
 Collecte novembre 04, 2008 14:36:02  
 d:

Live 100,00 Count 15875 Dead 21,00 %  
 Time: Rate: Time:  
 Beam 20,00 Beam 2,00 Takeoff 32,00  
 Voltage: Current: Angle:

■ ep ent\_27\_img1\_T002.pgt



Al<sub>3</sub>Cu

Element	keV	KRatio	Wt%	At%	ChiSquared
Al	1,487	0,1606	52,10	71,14	185,29
Si	1,740	0,0049	1,44	1,88	185,29
Cu	8,046	0,4380	45,93	26,62	7,85
Fe	6,403	0,0041	0,33	0,22	1,41
Mn	5,898	0,0023	0,21	0,14	1,41
<b>Total</b>		<b>0,6100</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>559,87</b>

Element	Z Corr	A Corr	F Corr
Al	0,996	3,256	1,000
Si	0,964	3,027	1,000
Cu	1,048	1,000	1,000
Fe	1,019	1,013	0,777
Mn	1,041	1,021	0,838

Princeton Gamma-Tech, Inc.

Spectrum Report

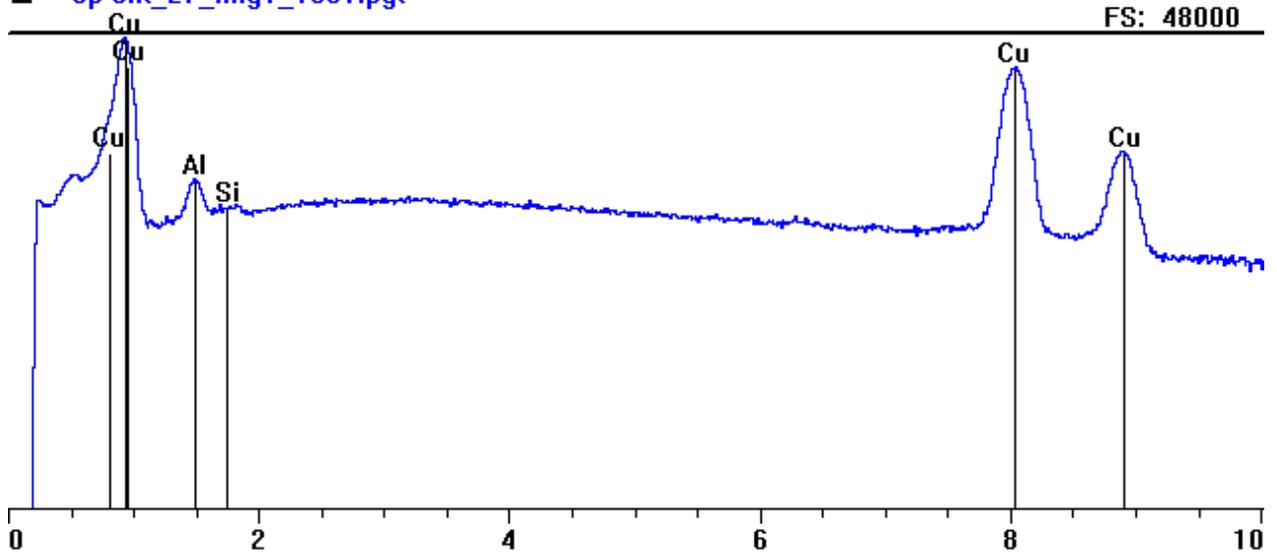
lundi 17 novembre 2008

File: C:\LMPGM\t...\d\sw alcu\Coté alu\al coté Al\ep ent\_27\_img1\_T001.pgt

Collecte d: novembre 04, 2008 14:36:02

Live Time:	100,00	Count Rate:	17901	Dead Time:	23,87 %
Beam Voltage:	20,00	Beam Current:	2,00	Takeoff Angle:	32,00

■ ep ent\_27\_img1\_T001.pgt



Element	keV	KRatio	Wt%	At%	ChiSquared
Al	1,487	0,0079	3,32	7,45	10,09
Si	1,740	0,0014	0,41	0,89	10,09
Cu	8,046	0,9578	96,27	91,67	32,41
<b>Total</b>		<b>0,9671</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>481,66</b>

Element	Z Corr	A Corr	F Corr
Al	0,986	4,282	1,000
Si	0,953	3,019	1,000
Cu	1,005	1,000	1,000

## 5 – Imagens MEB

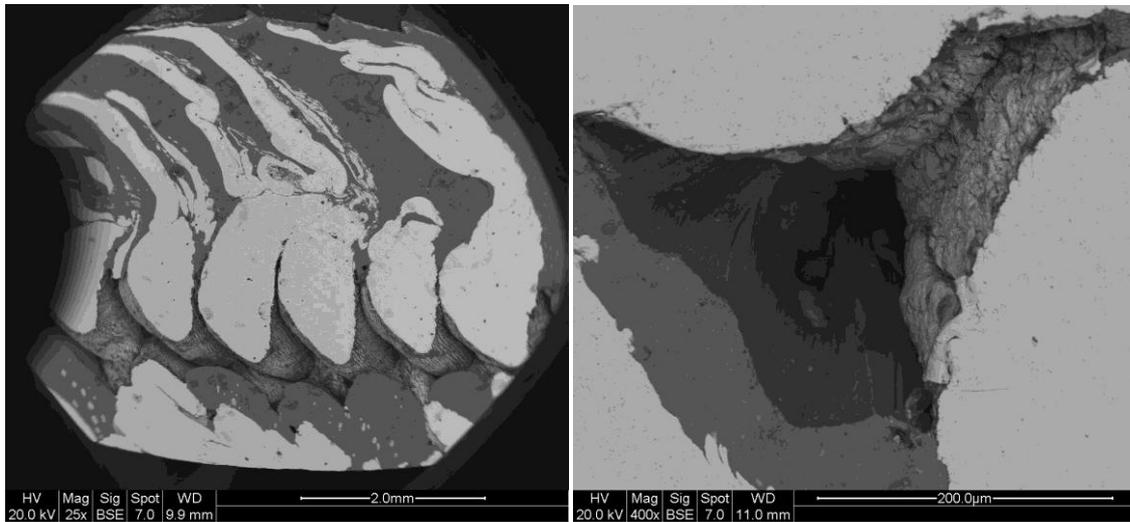


Figura 1: a) Ferramenta sobre a junta de solda, corte longitudinal, observação do lado do Cobre. b) detalhe do defeito.

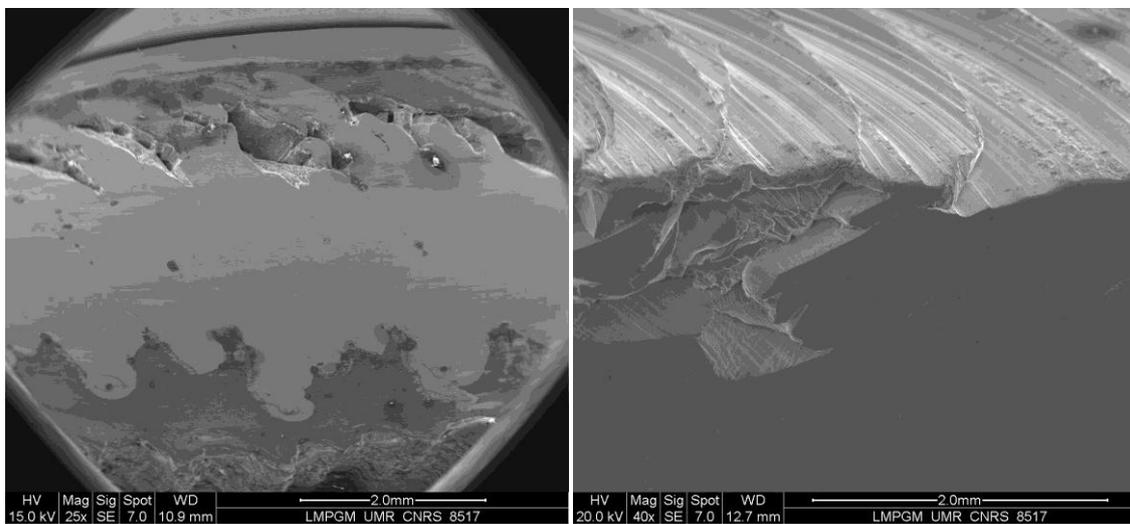


Figura 2: a) Ferramenta sobre o Alumínio, corte longitudinal, observação do lado do Cobre. b) Ferramenta sobre o Cobre, corte longitudinal superfície de soldagem.