



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



# **ANÁLISE DA PULSAÇÃO TÉRMICA DO PROCESSO TIG NA SOLDAGEM DA LIGA AA6063T6**

**VANDERLEI GUILHERME DE MACEDO FILHO**

**BAURU - SP  
2014**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



# **ANÁLISE DA PULSAÇÃO TÉRMICA DO PROCESSO TIG NA SOLDAGEM DA LIGA AA6063T6**

**VANDERLEI GUILHERME DE MACEDO FILHO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista – Câmpus de Bauru, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves.

Área de concentração: Processos de Fabricação Soldagem

**BAURU - SP  
2014**

Macedo Filho, Vanderlei Guilherme de.

Análise da pulsação térmica do processo TIG na soldagem da liga AA6063-T6 / Vanderlei Guilherme de Macedo Filho, 2014, 73p.

Orientador: Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Soldagem TIG-CA. 2. Alumínio. 3. Pulsação térmica. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Análise da pulsação térmica do processo TIG na soldagem da liga AA6063T6.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE VANDERLEI GUILHERME DE MACEDO FILHO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 17 dias do mês de dezembro do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro do S.T.I. da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. YUKIO KOBAYASHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Profa. Dra. FERNANDA RAIMUNDA DE ABREU do(a) Departamento de Automação Industrial/FATEC/Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de VANDERLEI GUILHERME DE MACEDO FILHO, intitulado "ANÁLISE PULSAÇÃO TÉRMICA DO PROCESSO TIG NA SOLDAGEM DA LIGA AA6063T6". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES



Prof. Dr. YUKIO KOBAYASHI



Profa. Dra. FERNANDA RAIMUNDA DE ABREU

## **AGRADECIMENTOS**

À Faculdade de Engenharia de Bauru – Departamento de Engenharia Mecânica pela oportunidade oferecida em integrar o corpo docente do curso de Mestrado oferecido pelo seu Programa de Pós Graduação.

Ao Professor Doutor Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves pela orientação e pela amizade estabelecida durante a execução deste trabalho, colaborando para que sua conclusão fosse possível.

Ao professor Doutor Yukio Kobayashi pelo grande incentivo e colaboração.

Aos servidores técnicos dos laboratórios de pesquisa do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru, e dos laboratórios de pesquisa do Departamento de Química da Faculdade de Ciências de Bauru, em especial ao tecnólogo Cristiano Angélico, pelo grande apoio como amigo.

## RESUMO

Em algumas ligas de alumínio, em especial as da série 6xxx (Al-Si-Mg), a maior suscetibilidade no desenvolvimento de trincas de solidificação é uma preocupação constante na soldagem TIG CA autógena. No âmbito operacional a minimização dessa ocorrência, ou mesmo sua eliminação, têm sido feita pela utilização de métodos que fundamentalmente procuram modificar a estrutura bruta de fusão refinando o metal na zona fundida e na zona termicamente afetada através da agitação da poça de fusão.

No processo TIG CA, recursos utilizados para a agitação da poça de fusão, e conseqüente refinamento da microestrutura, são a freqüência de inversão de polaridade do eletrodo e a freqüência de período de pulso térmico. Certamente o conhecimento de tais recursos e sua adequada aplicação na minimização das trincas de solidificação despertam interesse no campo da engenharia de fabricação e constitui-se em importante informação técnica a ser disponibilizada.

Nesse trabalho foi utilizada a soldagem TIG CA autógena com pulsação térmica na liga de alumínio AA6063T6 avaliando-se as freqüências de inversão de polaridade do eletrodo em 50, 100 e 200 Hz, combinadas com freqüências de período de pulso térmico de 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 Hz. O teste de Houldcroft foi amplamente utilizado como importante ferramenta nessa avaliação, em conjunto com análise macro e microestrutural da zona fundida e termicamente afetada.

Embora não tenha sido eliminada completamente a formação de trincas de solidificação, foi possível verificar a diminuição das mesmas em função do aumento da freqüência de inversão de polaridade do eletrodo e do aumento da freqüência do período de pulso térmico, acompanhado de um refinamento dos grãos na zona fundida e na zona termicamente afetada.

## ABSTRACT

For some aluminum alloys, especially 6xxx (Al-Mg-Si) series, the ability to develop solidification cracking in AC-GTAW welding is a constant preoccupation. In operation, the minimal incidence of this, or even its elimination, has been done by methods that are able to modify the microstructure in the melted pool zone and the thermally affected zone by agitation of the melted pool.

In AC-GTAW welding process, techniques applied for agitation of the melted pool, and following microstructural development, are the electro polarity inversion frequency and the thermic pulse cycle frequency. Be sure that this knowledge and its correct application for decreasing solidification cracking is important to the process engineering and it constitutes an important technical information for available.

On this work, the AC-GTAW thermic pulse welding on plate was used on AA6063T6 aluminum alloy. Analysis results for 50, 100 and 200Hz electro polarity inversion frequency, in agreement with 0,5; 1,0; 1,7 and 5,0Hz thermic pulse cycle frequency. The Houldcroft weldability test was enlarged used as an important tool for this analysis, in agreement with macro and microstructural analysis of the melted pool zone and the thermally affected zone.

Although the solidification cracking formation has not been eliminated, it was possible to verify its decreasing due to the increase of the electro polarity inversion frequency and the increase of the thermic pulse cycle frequency, followed by grain development in the melted pool zone and the thermally affected zone.

## ÍNDICE

|       |  |    |
|-------|--|----|
|       | Lista de figuras.....  | ii |
|       | Lista de tabelas.....  | iv |
|       | Lista de abreviaturas e siglas.....  | v  |
| 1     | Introdução.....  | 1  |
| 2     | Objetivo.....  | 2  |
| 3     | Revisão bibliográfica.....   | 2  |
| 3.1   | Características do processo TIG.....   | 2  |
| 3.2   | Propriedades das ligas de Alumínio AA6063T6.....                                   | 7  |
| 3.3   | Metalurgia na solidificação das ligas de alumínio.....                             | 12 |
| 4     | Materiais e métodos.....   | 18 |
| 4.1   | Materiais.....   | 18 |
| 4.2   | Métodos.....   | 18 |
| 4.2.1 | Análises químicas.....   | 18 |
| 4.2.2 | Procedimentos de soldagem.....   | 18 |
| 4.2.3 | Avaliação macroestrutural.....   | 22 |
| 4.2.4 | Avaliação microestrutural.....   | 24 |
| 5     | Resultados e discussão.....  | 26 |
| 5.1   | Análises químicas e caracterização do metal base.....                              | 26 |
| 5.2   | Potência.....  | 26 |
| 5.3   | Fator de forma.....  | 27 |
| 5.4   | Comprimento de trinca.....   | 29 |
| 5.5   | Tamanho médio linear de grão na ZTA.....   | 36 |
| 5.6   | Efeitos da frequência do período de pulso térmico na microestrutura.....           | 38 |
| 5.6.1 | Efeito da frequência do período de pulso térmico na geração de trincas.....        | 38 |
| 5.6.2 | Efeito da frequência do período de pulso térmico no gradiente extração de calor... | 39 |
| 6     | Conclusões.....  | 41 |
| 7     | Sugestões para trabalhos futuros.....  | 41 |
| 8     | Bibliografia.....  | 42 |
|       | Apêndices.....   | 45 |



## Lista de figuras

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 3.1  | Componentes básicos de uma fonte inversora.....   | 4  |
| Figura 3.2  | Parâmetros de ajuste da onda retangular.....  | 6  |
| Figura 3.3  | Efeito da velocidade de soldagem no crescimento granular.....   | 7  |
| Figura 3.4  | Dimensões para o corpo de prova Houldcroft.....   | 10 |
| Figura 3.5  | Três tipos de trincas em corpos de prova sob tensão.....  | 10 |
| Figura 3.6  | Exemplos de modos básicos de solidificação.....   | 12 |
| Figura 3.7  | Efeito do superresfriamento constitucional e crescimento das dentritas.....   | 13 |
| Figura 3.8  | Efeito do gradiente de temperatura G e da razão de crescimento R na morfologia e tamanho da microestrutura de solidificação.....                              | 14 |
| Figura 3.9  | Crescimento epitaxial e crescimento competitivo.....  | 15 |
| Figura 3.10 | Influência do ciclo térmico de soldagem na largura do grão solidificado.....  | 15 |
| Figura 3.11 | Microestrutura de sólido mais líquido ao redor da poça de fusão.....  | 16 |
| Figura 3.12 | Mecanismos de nucleação durante a soldagem.....   | 17 |
| Figura 3.13 | Nucleação e formação de grãos equiaxiais no metal fundido.....  | 17 |
| Figura 4.1  | Equipamentos e acessórios para soldagem e aquisição de dados.....   | 19 |
| Figura 4.2  | Representação esquemática da onda retangular alternada pulsada mostrando o significado de seus principais parâmetros característicos.....                     | 21 |
| Figura 4.3  | Estereoscópio Carl-Zeiss Citoval 2 e amostras embutidas.....  | 22 |
| Figura 4.4  | Esquema mostrando como foram feitas as leituras das dimensões de largura, L, e penetração, P, no cordão de solda.....   | 23 |
| Figura 4.5  | Equipamentos utilizados para polimento eletrolítico.....  | 24 |
| Figura 4.6  | Processo de anodização e detalhe mostrando a amostra dentro da cuba.....  | 25 |
| Figura 4.7  | Equipamentos e acessórios utilizados para aquisição de imagem microestrutural: Microscópio ótico, câmera CCD e micro computador.....                          | 25 |
| Figura 5.1  | Potência média instantânea em função da frequência do período de pulso térmico para as frequências de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz e 100Hz..... | 27 |
| Figura 5.2  | Fator de forma P/L em função da frequência do período de pulso térmico para as frequências de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz e 100Hz.             | 28 |
| Figura 5.3  | Esquema para mostrar a influência do fator de forma P/L na geração de trincas.....  | 28 |
| Figura 5.4  | Comprimento de trinca em função da frequência de inversão de polaridade do eletrodo.....  | 29 |
| Figura 5.5  | Comprimento de trinca em função da frequência do período de pulso térmico.....  | 30 |
| Figura 5.6  | Comprimento de trinca em função da frequência do período de pulso térmico.....  | 30 |
| Figura 5.7  | Foto da trinca: Frequência de inversão de polaridade do eletrodo 50Hz e sem período de pulso térmico.....   | 31 |
| Figura 5.8  | Foto da trinca: Frequência de inversão de polaridade do eletrodo 50Hz e período de pulso térmico 0,5Hz.....   | 31 |
| Figura 5.9  | Foto da trinca: Frequência de inversão de polaridade do eletrodo 50Hz e período de pulso térmico 1,0Hz.....   | 32 |
| Figura 5.10 | Foto da trinca: Frequência de inversão de polaridade do eletrodo 50Hz e período de pulso térmico 1,7Hz.....   | 32 |
| Figura 5.11 | Foto da trinca: Frequência de inversão de polaridade do eletrodo 50Hz e período de pulso térmico 5,0Hz.....   | 33 |
| Figura 5.12 | Foto da trinca: Frequência de inversão de polaridade do eletrodo 100Hz e sem período de pulso térmico.....  | 33 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 5.13 | Foto da trinca: Freqüência de inversão de polaridade do eletrodo 100Hz e período de pulso térmico 0,5Hz.....  | 34 |
| Figura 5.14 | Foto da trinca: Freqüência de inversão de polaridade do eletrodo 100Hz e período de pulso térmico 1,0Hz.....  | 34 |
| Figura 5.15 | Foto da trinca: Freqüência de inversão de polaridade do eletrodo 100Hz e período de pulso térmico 1,7Hz.....  | 35 |
| Figura 5.16 | Foto da trinca: Freqüência de inversão de polaridade do eletrodo 100Hz e período de pulso térmico 5,0Hz.....  | 35 |
| Figura 5.17 | Tamanho médio linear de grão na ZTA para a freqüência de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz.....  | 37 |
| Figura 5.18 | Tamanho médio linear de grão na ZTA, secção transversal, em função da freqüência do período de pulso térmico para a freqüência de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz..... | 37 |
| Figura 5.19 | Esquema mostrando, na poça de fusão, como o gradiente G muda de tendência radial para tendência transversal em função da distância entre pulsos térmicos.....                     | 39 |
| Figura 5.20 | Formação de trincas do tipo radiante e com pontes.....  | 40 |

## Lista de tabelas

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabela 3.1 | Principais características padronizadas nos eletrodos de Tungstênio para o processo TIG conforme a norma ANSI-AWS A5.12..... | 3  |
| Tabela 3.2 | Designação por grupos das ligas trabalháveis de Alumínio.....  | 8  |
| Tabela 3.3 | Nomenclatura das têmperas.....   | 8  |
| Tabela 4.1 | Características da fonte de soldagem Digiplus Multiprocesso A7.....  | 18 |
| Tabela 4.2 | Características de medição do sistema SAPV4.19s.....   | 18 |
| Tabela 4.3 | Condições para a soldagem dos corpos de prova.....   | 22 |
| Tabela 5.1 | Teores dos principais elementos químicos da amostra de Alumínio AA6063T6 analisada.....                                      | 26 |
| Tabela 5.2 | Valores de potência para frequência de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz.....                                       | 26 |
| Tabela 5.3 | Valores de potência para frequência de inversão de polaridade do eletrodo de 100Hz.....                                      | 26 |
| Tabela 5.4 | Valores para o fator de forma.....   | 27 |
| Tabela 5.5 | Valores para comprimento médio de trinca.....  | 29 |

## Lista de abreviaturas e símbolos

|                   |   |
|-------------------|---|
| +/-               | Representação para afastamento acima ou abaixo da dimensão nominal  |
| %                 | Porcentagem   |
| °C                | Unidade de temperatura: grau Celcius  |
| µm                | Unidade de comprimento: micrometro ( $10^{-6}$ m)   |
| 1xxx              | Representação da série 1000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| 2xxx              | Representação da série 2000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| 3xxx              | Representação da série 3000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| 4xxx              | Representação da série 4000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| 5xxx              | Representação da série 5000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| 6xxx              | Representação da série 6000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| 7xxx              | Representação da série 7000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| 8xxx              | Representação da série 8000 na classificação das ligas de Alumínio  |
| A                 | Unidade de corrente elétrica: Ampére. Comprimento de trinca ou Razão de marginalidade de plasticidade   |
| A7                | Sigla de nomenclatura da fonte de soldagem Digiplus   |
| AXY               | Nomenclatura para identificação das amostras. A: freqüência de inversão de polaridade de 50Hz. X: 1 a 5: freqüência do período de pulso térmico ( sem, 0,5; 1,0; 1,7; 5,0 respectivamente ). Y: sequencial  |
| BXY               | Nomenclatura para identificação das amostras. B: freqüência de inversão de polaridade de 100Hz. X: 1 a 5: freqüência do período de pulso térmico ( sem, 0,5; 1,0; 1,7; 5,0 respectivamente ). Y: sequencial |
| CXY               | Nomenclatura para identificação das amostras. C: freqüência de inversão de polaridade de 167Hz. X: 1 a 5: freqüência do período de pulso térmico ( sem, 0,5; 1,0; 1,7; 5,0 respectivamente ). Y: sequencial |
| A/cm <sup>2</sup> | Unidade de densidade de corrente: Ampére por centímetro quadrado  |
| AA                | American Aluminium  |
| AA5083            | Sigla da American Aluminium para a liga de Alumínio ao Mag  |
| AA6063T6          | Sigla da American Aluminium para a liga de Alumínio ao Mg e Si  |
| Al                | Símbolo do elemento químico Alumínio  |
| Al-Mg-Si          | Representação para as ligas de Alumínio ao Magnésio e Silício   |
| ANSI              | Americal National Standards Institute   |
| ASM               | American society of Materials   |
| AWS               | American Welding Society  |
| AZ 91E            | Sigla na norma europeia para a liga de Alumínio ao Zinco  |
| BX51M             | Nomenclatura do Microscópio Olympus   |
| CA                | Corrente alternada  |
| CC                | Corrente contínua   |
| CC <sup>+</sup>   | Corrente contínua com polaridade do eletrodo positiva   |
| CC <sup>-</sup>   | Corrente contínua com polaridade do eletrodo negativa   |
| CCD               | Nomenclatura da câmera digital  |
| Cu                | Símbolo do elemento químico Cobre   |
| CP                | Corpo de prova  |
| cm/min            | Unidade de velocidade: centímetro por minuto  |
| EP <sup>+</sup>   | Eletrodo com polaridade positiva  |
| EP <sup>-</sup>   | Eletrodo com polaridade negativa  |
| Fe                | Símbolo do elemento químico ferro   |
| G                 | Gradiente de extração de temperatura  |
| GTAW              | Gas Tungsten Arc Welding  |
| HCl               | Fórmula química do Ácido Clorídrico   |
| HClO <sub>4</sub> | Fórmula química do Ácido Perclórico   |

|                     |   |
|---------------------|---|
| HF                  | Fórmula química do Ácido Fluorídrico                                |
| HNO <sub>3</sub>    | Fórmula química do Ácido Nítrico                                    |
| Hz                  | Unidade de frequência: Hertz (ciclo/segundo)                        |
| I                   | Corrente  |
| I <sup>+</sup>      | Amplitude de corrente positiva                                      |
| I <sup>-</sup>      | Amplitude de corrente negativa                                      |
| I <sub>p</sub> (PT) | Corrente positiva no pulso térmico                                  |
| I <sub>n</sub> (PT) | Corrente negativa no pulso térmico                                  |
| I <sub>p</sub> (BT) | Corrente positiva na base térmica                                   |
| I <sub>n</sub> (BT) | Corrente negativa na base térmica                                   |
| I <sub>cc</sub>     | Corrente contínua para abertura do arco                             |
| I <sub>ef</sub>     | Corrente eficaz   |
| IGBT                | Insulated Gate Bipolar Transistor                                   |
| IMC                 | Nomenclatura do fabricante da Fonte Digiplus                        |
| L                   | Média linear do tamanho de grão                                     |
| L/min               | Unidade de vazão: litros por minuto                                 |
| LABMAT              | Nome comercial de Laboratório de Análises de Materiais              |
| LAS-EZ              | Nomenclatura para o software aquisitor de imagens                   |
| MEV                 | Microscopia eletrônica por varredura                                |
| Mg                  | Símbolo do elemento químico Magnésio                                |
| ml                  | Unidade de volume: mililitro  |
| Mn                  | Símbolo do elemento químico Manganês                                |
| MIG/MAG             | Metal Inert Gas/ Metal Active Gas                                   |
| M                   | Unidade de comprimento: metro                                       |
| Mm                  | Unidade de comprimento: milímetro                                   |
| mm/s                | Unidade de velocidade: milímetro por segundo                        |
| MPa                 | Unidade de tensão: Mega Pascal (10 <sup>6</sup> .N/m <sup>2</sup> ) |
| NBR                 | Norma Brasileira  |
| P                   | Potência  |
| PMC                 | Parâmetro do modo de crescimento                                    |
| P/L                 | Fator de forma: Profundidade pela Largura da poça de fusão          |
| PET                 | Polietileno teraftalato   |
| PVC                 | Cloreto de polivinil  |
| R                   | Razão de crescimento do grão em função do tempo                     |
| S                   | Unidade de tempo: segundo   |
| SAPV4.19s           | Sigla de nomenclatura para o aquisitor de sinais                    |
| Si                  | Símbolo do elemento químico Silício                                 |
| T6                  | Nomenclatura de têmpera: Solubilizado e envelhecido artificialmente |
| t <sup>+</sup>      | Tempo do eletrodo com polaridade positiva                           |
| t <sup>-</sup>      | Tempo do eletrodo com polaridade negativa                           |
| t <sub>p</sub>      | Tempo do eletrodo com polaridade positiva                           |
| t <sub>n</sub>      | Tempo do eletrodo com polaridade negativa                           |
| T <sub>s</sub>      | Período de subida da amplitude de corrente                          |
| T <sub>d</sub>      | Período de descida da amplitude de corrente                         |
| T <sub>bT</sub>     | Período da base térmica   |
| T <sub>pT</sub>     | Período do pulso térmico  |
| TIG                 | Tungsten Inert Gas  |
| TIG CA              | Tungsten Inert Gas em Corrente Alternada                            |
| U                   | Tensão  |
| V <sub>cc</sub>     | Tensão em corrente contínua   |
| ZAF                 | Zona afetada pelo calor ou termicamente afetada                     |
| ZF                  | Zona fundida  |

ZTA Zona termicamente afetada ou afetada pelo calor  
Zn Símbolo do elemento químico Zinco

## 1. Introdução

A liga de alumínio AA6063T6 tem sido muito usada nas construções mecânicas em estruturas soldáveis, em aplicação na indústria de transportes e construções em geral. É uma liga trabalhável tratável termicamente ao Magnésio e Silício (0,7% Mg e 0,4% Si) de média resistência mecânica (90 a 241MPa) A trinca de solidificação é uma característica inerente às ligas da série 6xxx, notadamente a liga AA6063T6. Nas construções mecânicas, muitas vezes é necessário, a soldagem da liga sem o material de adição, situação esta, propensa ao aparecimento das trincas.

Por outro lado, a evolução das fontes de soldagem TIG, tem tornado cada vez mais acessível recursos como o controle avançado da onda CA, o controle nos tempos de inversão de polaridade e a pulsação térmica. Essa tecnologia deve ser utilizada com o propósito de se otimizar o processo de soldagem TIG dessas ligas de alumínio, tanto em qualidade quanto em produtividade.

Assim torna-se necessário entender como esses parâmetros podem alterar a microestrutura da zona fundida e da região termicamente afetada, influenciando diretamente as propriedades mecânicas da solda.

O estudo da geração de trincas é uma ferramenta importante para se compreender as modificações microestruturais decorrente da solidificação, já que a morfologia da trinca é um indicador fiel das alterações ocorridas na microestrutura durante a solidificação.

Nesse contexto, esse trabalho procura analisar a influência dos parâmetros de frequência de inversão da polaridade e frequência do período de pulso térmico da soldagem TIG CA autógena em ligas de alumínio AA6063T6 através de corpos de prova Houldcroft.

Foram organizados ensaios de soldagem em 3 condições com diferentes frequências de inversão de polaridade do eletrodo e 5 condições com diferentes frequências de período de pulso térmico, totalizando 15 amostras de soldagem. Corpos de prova Houldcroft foram utilizados para se avaliar as trincas. A avaliação da relação entre a minimização das trincas e os parâmetros de soldagem TIG fundamentou-se no estudo macroestrutural e microestrutural da solidificação na zona fundida e na zona termicamente afetada.

## **2. Objetivo**

O objetivo deste trabalho foi a avaliação das relações entre os parâmetros dos diversos períodos de pulso térmico no processo TIG CA autógeno com pulsação térmica e onda retangular com tempos desbalanceados e os efeitos na microestrutura através do estudo da geração de trincas de solidificação na soldagem da liga de alumínio AA6063T6, sistema Al-Mg-Si.

## **3. Revisão bibliográfica**

A revisão bibliográfica apresenta-se sob três eixos principais: o processo TIG CA, a soldabilidade das ligas de alumínio, e os processos metalúrgicos envolvidos na solidificação dessas ligas.

Na primeira parte, que trata do processo TIG CA, é apresentado o processo convencional, incluindo equipamentos, acessórios, vantagens e desvantagens e o processo TIG CA com recursos de variação na inversão de polaridade e no período de pulso térmico.

Na segunda parte, sobre a soldabilidade das ligas de alumínio, apresenta-se a classificação e características das ligas de alumínio, uma abordagem sobre o teste Houldcroft como instrumento para avaliação do comprimento de trinca assim como as teorias envolvidas na geração das trincas de solidificação.

Finalmente, na terceira parte, procura se revisar a metalurgia na solidificação das ligas de alumínio, onde são apresentados os mecanismos de solidificação.

Essa seqüência visa subsidiar os argumentos empregados na discussão dos resultados.

### **3.1 Características do processo TIG: As variáveis período de pulso térmico e inversão de polaridade**

Por definição o processo TIG ou GTAW é aquele onde a poça de fusão decorre da ação térmica do arco elétrico que se estabelece entre o eletrodo não consumível de tungstênio e o material a ser soldado, sob a ação de um gás inerte. No processo TIG autógeno não há a adição de material.

Na seqüência deste tópico, a maior parte dos aspectos apresentados, como vantagens, desvantagens e limitações do processo, são revisões das publicações Welding Handbook (1991), The Procedure Handbook of Arc Welding (2000) e TIG Handbook (2002).

Uma das vantagens mais interessantes do processo TIG em relação aos outros processos de soldagem é justamente a ação constricta do arco elétrico, ou seja, a alta concentração de calor do arco produz uma pequena e estreita zona termicamente afetada (ZTA), dependendo do tratamento térmico do material, que por sua vez, é importante na soldagem de metais com elevada condutividade térmica, como por exemplo, nas ligas de alumínio.

O processo também gera pouco ruído e fumos e é adequado para a soldagem de ligas e metais não ferrosos.

São quatro os componentes básicos presentes na configuração convencional: Fonte de energia, eletrodo de tungstênio, gás de proteção e tocha. Dada a sua importância na execução da solda, cada um desses componentes será apresentado com mais detalhes a seguir.

A norma ANSI-AWS A5.12 especifica os tipos existentes de eletrodos de tungstênio em eletrodos puros ou ligados, como indicado na tabela 3.1. Comercialmente os eletrodos costumam ser identificados por um código de cores que os diferencia de acordo com os elementos de liga presentes em sua constituição. O comprimento de 150mm é o mais comum de ser encontrado no mercado. A formulação da constituição do eletrodo, assim como seu diâmetro e a natureza da corrente empregada, alternada (CA) ou constante (CC<sup>+</sup> ou CC), determinam sua capacidade de condução de corrente e sua durabilidade.



Tabela 3.1- Principais características padronizadas dos eletrodos de Tungstênio para o processo TIG conforme norma ANSI-AWS A5.12.

| Classificação AWS     | Cor      | Elemento de liga | Óxido agregado                 |           |
|-----------------------|----------|------------------|--------------------------------|-----------|
|                       |          |                  | Tipo                           | % em peso |
| EWP                   | Verde    | ---              | ---                            | ---       |
| EWCe-2                | Laranja  | Ce               | CeO <sub>2</sub>               | 2         |
| EWL <sub>a</sub> -1   | Preto    | La               | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1         |
| EWL <sub>a</sub> -1,5 | Ouro     | La               | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,5       |
| EWL <sub>a</sub> -2   | Azul     | La               | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2         |
| EWTh-1                | Amarelo  | Th               | ThO <sub>2</sub>               | 1         |
| EWTh-2                | Vermelho | Th               | ThO <sub>2</sub>               | 2         |
| EWZr-0,3              | Marrom   | Zr               | ZrO <sub>2</sub>               | 0,3       |
| EWZr-1                | Marrom   | Zr               | ZrO <sub>2</sub>               | 0,25      |
| EWG <sup>(a)</sup>    | Cinza    | ---              | ---                            | ---       |

(a) – Não especificado: o fabricante deve identificar o tipo e a quantidade de óxido de terras-raras empregadas no eletrodo.

Em corrente CA é mais utilizado o eletrodo puro, que em geral possui um mínimo de 99,5% em peso de Tungstênio e 0,5% em peso de outros elementos, e é adequado para a soldagem das ligas de alumínio. No entanto, devido ao seu desgaste acentuado, pode incorrer em contaminação da poça de fusão.

Para maiores capacidades de condução de corrente elétrica, são utilizados os eletrodos ligados ao Tório, Cério, Lantânio ou Zircônio que se desgastam menos e estabilizam melhor o arco, comparativamente aos eletrodos puros de igual diâmetro. Os eletrodos ligados ao Zircônio são superiores em CA e, portanto, ideais para a soldagem das ligas de alumínio enquanto os demais são mais indicados para uso em CC.

A largura e a penetração do cordão de solda, assim como o comportamento elétrico do arco são especialmente determinados pela preparação da ponta do eletrodo. A preparação da ponta deve levar em conta a natureza da corrente elétrica a ser utilizada e a polaridade escolhida em corrente contínua. Há várias maneiras de se preparar a ponta do eletrodo.

Para CA com onda senoidal, basta abrir o arco elétrico fora da região de solda em um postigo, a ponta do eletrodo naturalmente assumirá a forma semi-esférica. Para CC (corrente contínua com eletrodo negativo) deve-se adotar uma ponta aguda para a soldagem de metais com espessura entre 0,1 e 1,0mm ou uma ponta truncada para a soldagem de espessuras maiores.

Para CA com onda quadrada e desbalanceamento com maiores tempos negativos na polaridade do eletrodo, admite-se a mesma preparação de ponta para CC, devido à forma de onda semelhante.

Quanto ao gás inerte, assim como em qualquer outro processo de soldagem à arco, este deve impedir a reação da poça de fusão com os gases presentes no ambiente, evitando principalmente que o Hidrogênio gere porosidade no metal fundido. Argônio, Hélio ou a mistura de ambos são as opções mais comuns.

Comparativamente, o Argônio propicia melhor estabilidade, constrição e abertura do arco; enquanto o Hélio propicia maior penetração e, portanto, maiores velocidades de soldagem.

Essas diferenças de comportamento se explicam, em parte, devido à diferença de condutividade térmica entre eles, ou seja, baixa para o Argônio e alta para o Hélio. Desse modo, o Argônio propicia um arco mais compacto e mais denso, resultando numa maior concentração de energia, enquanto o Hélio, propicia uma coluna do arco mais larga e menos densa, abrangendo uma área superficial maior e transmitindo mais rapidamente a energia através da espessura do metal de base. Do ponto de vista econômico, no Brasil, o Argônio é mais interessante, pois custa menos e necessita de menos vazão que o Hélio para proteger a poça de fusão.

Recursos como o pré-fluxo, o pós-fluxo, e a abertura do arco denominada “lift-arc” são de grande praticidade, desenvolvidos e incorporados ao longo do tempo ao equipamento convencional TIG.

O objetivo do pré-fluxo é evitar a condensação de ar dentro da mangueira, o que poderia contaminar a solda. Para isso, recorre-se ao escoamento do gás de proteção um pouco antes da abertura do arco, denominado pré-fluxo. O pós-fluxo, por sua vez tem o objetivo de evitar a oxidação tanto do eletrodo como da poça de fusão ao final da soldagem. Para isso, recorre-se ao escoamento do gás de proteção até um pouco depois do fechamento do arco, denominado pós-fluxo.

O “lift-arc” procura facilitar a abertura do arco introduzindo uma corrente elétrica de pouca intensidade no instante em que o eletrodo toca a peça. Dessa maneira, o eletrodo é aquecido melhorando a emissão de elétrons e facilitando a abertura do arco. Após a estabilização, a corrente volta ao valor nominal para a soldagem.

Para os ciclos de trabalho muito intensos, de elevada produção ou de alta intensidade de corrente, um recurso desenvolvido naturalmente foi a tocha refrigerada à água.

Outro avanço histórico que trouxe benefícios imediatos no aumento da taxa de deposição no processo TIG foi a utilização de metal de adição inserido à frio e automatizado em um sistema adaptado à tocha de soldagem [Richardson (1995); Fotain, Rimano e Vaidya (2008)].

Com o objetivo de se conseguir um fluxo laminar do gás de proteção e conseqüentemente uma melhor proteção da poça fundida e do eletrodo, foi desenvolvido o bocal com “gás-lens”, que é simplesmente uma tela metálica fina colocada internamente ao bocal.

Quanto às fontes convencionais de energia para a soldagem TIG, é importante observar que elas operam com uma curva estática do tipo “corrente tombante”, essa é uma característica importante na soldagem manual, porque minimiza a variação na corrente de soldagem que pode ocorrer devido às modificações no comprimento do arco elétrico em função das inevitáveis oscilações da tocha. Nestas fontes, a corrente de soldagem fornecida pode ser CA ou CC.

A evolução das fontes de soldagem e o surgimento das fontes inversoras vieram permitir a realização de soldas com recursos como o controle avançado de onda CA, o controle nos tempos de inversão de polaridade e a pulsação térmica. O conceito básico de uma fonte inversora é mostrado na Figura 3.1, extraída de Destefan (1995).

O seu funcionamento consiste em retificar a onda CA recebida da rede pública, enviá-la ao inversor que a converterá para onda CA de alta frequência com alto grau de linearidade e modulação para soldagem CC, ou então, fazer a inversão final para soldagem CA com onda retangular desbalanceada. [Destefan (1995)].

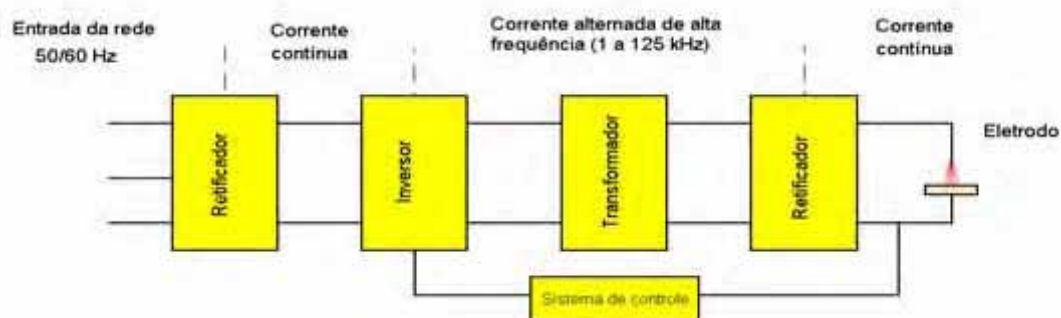


Figura 3.1- Componentes básicos de uma fonte inversora. (Adaptado de Destefan ,1995)

A variável período do pulso térmico está diretamente relacionada com a pulsação de corrente. Note que a expressão “pulsação de corrente”, adotada por muitos autores, refere-se ao parâmetro amplitude da corrente. Quanto maior o valor da corrente, maior o aporte térmico, ou seja, o período da corrente pulsada implica necessariamente no período do aporte

térmico, ou em outras palavras, pulsação térmica. Neste trabalho utilizaremos a expressão “período de pulso térmico” para nos referirmos ao período de corrente com maior amplitude.

Dutra et al (2010), avaliando a soldagem do alumínio nos processos TIG CA pulsado e constante define que os parâmetros de corrente caracterizam a amplitude e o tempo da corrente no período de pulso (alta energia) e no período de base (baixa energia). Onde, durante o período de pulso uma alta energia produz a fusão do material (ponto de solda), enquanto no período de base, com baixa energia ocorre a solidificação da poça de fusão e a não extinção do arco. A pulsação de corrente resulta em cordões de solda escamados devido a sobreposição dos vários pontos de solda.

A principal vantagem da técnica de pulsação de corrente é propiciar o refino estrutural na zona fundida sem afetar negativamente sua sub-estrutura. Esse refino estrutural utilizando a pulsação de corrente pode ser conseguido através do controle da taxa de resfriamento da poça.

Barra, (2003), pesquisando sobre a influência do processo MIG e MAG pulsado sobre a microestrutura e geometria da zona fundida em liga de alumínio explica que a pulsação de corrente além de propiciar o controle do refinamento de grão na zona fundida pode também ajudar a controlar a transição do modo de crescimento colunar para equiaxial, explicado em detalhes por Schempp et al (2014).

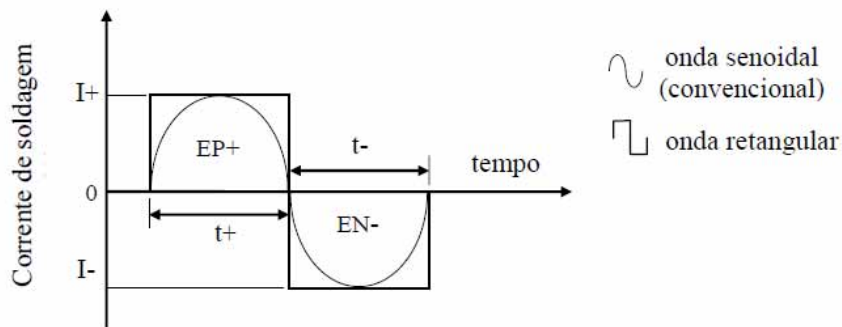
A pulsação de corrente influi na taxa do calor aportado. Como a pulsação de corrente altera a distribuição do calor aportado, então altera-se também a taxa de resfriamento. Com isso ocorre uma diminuição dos espaços entre os ramos dendríticos e conseqüente prevalectimento do crescimento dendrítico no lugar do crescimento colunar, o qual chama-se de refinamento estrutural. A pulsação de corrente também influi no grau de agitação da poça de fusão. A oscilação entre pulso e base da corrente influencia a força eletromagnética. Quando a força magnética varia, também varia a pressão sobre a poça fundida, dessa maneira aumenta o grau de agitação da poça [Schempp et al (2014)]. Conseqüentemente aumenta a fragmentação das dendritas e o destacamento de grãos favorecendo a nucleação heterogênea que é fator para o refinamento de grãos. A macrosegregação ao centro da poça de fusão também é diminuída, prevalecendo uma segregação melhor distribuída.

Muitos pesquisadores convergem na opinião de que a técnica de pulsação de corrente com imposição de modulação (pulsação térmica) é efetiva no processo de refinamento estrutural [Street (1990), Dutra et al (1995), Sundaresan et al (1999) e Madhusudhan et al (2000)]. Entende-se como “pulsação de corrente com imposição de modulação” as pulsações com freqüência de 1 a 10Hz, às quais são chamadas de pulsação térmica. Entre 20 e 500Hz são as chamadas correntes de pulsação convencional e de 1 a 10kHz temos as chamadas pulsação de corrente em alta freqüência.

Já a variável inversão de polaridade que é determinante nas propriedades do cordão de solda como penetração e largura, passou a ser melhor aproveitada com a evolução dos recursos eletrônicos aplicados às fontes.

Nas fontes convencionais TIG com onda senoidal, toda vez que era invertida a polaridade eletrodo peça, ocorriam instabilidades decorrentes da passagem dos valores de corrente de soldagem próximos à zero, tendência de retificação do arco e reignição do mesmo [Stava (1999)]. A ajustagem das chamadas ondas retangulares assimétricas em CA foi possível devido à evolução na eletrônica de potência embarcada [Sammons (2000) e Cary (2002)]. Desse modo, tempo maior com o eletrodo na polaridade negativa produz mais calor e favorece a penetração da solda; enquanto tempo maior com o eletrodo na polaridade positiva favorece melhor limpeza superficial em torno da solda. Quando esses tempos não são simétricos, dizemos que a onda é CA desbalanceada. Os dispositivos IGBT, utilizados nas fontes inversoras CC/CA, possibilitou ainda um incremento na utilização da onda retangular ao permitir também ajustes na freqüência do ciclo e na amplitude da corrente de soldagem. Dentre as vantagens, tem-se, por exemplo, a possibilidade de se combinar penetração e ação de limpeza com o

aumento na velocidade de soldagem [TIG Handbook (2002)]. A Figura 3.2 mostra os principais parâmetros de uma onda retangular.



EP+ e EN-, respectivamente, eletrodo com polaridade positiva e negativa  
 $t_+$  e  $t_-$ , respectivamente, tempos de eletrodo com polaridade positiva e negativa  
 $I_+$  e  $I_-$ , respectivamente, amplitudes de corrente positiva e negativa

Figura 3.2- Parâmetros de ajuste da onda retangular.

O mais comum é o emprego de maior tempo na polaridade negativa em relação à polaridade positiva para se alcançar características desejáveis como remoção da camada de óxido e aumento da vida útil do eletrodo [Dutra et al (2010)].

Entretanto, contrariamente, Scotti, Dutra e Ferraresi (2000) utilizando solda TIG autógena com onda retangular sobre alumínio comercialmente puro avaliam a influência da amplitude de corrente, da velocidade de soldagem e do tempo de polaridade na capacidade da retirada da camada superficial de óxido e concluem que um curto tempo de eletrodo positivo e o aumento da velocidade de soldagem intensificam a função auto-limpante no cátodo em decorrência do fenômeno da emissão de campo.

Emissão de campo, de acordo com Pang et al (1994) e Fuerschbach (1998), é o mecanismo responsável pela retirada dos elétrons do metal de base na condição catódica, por meio da atração na superfície de óxido carregada positivamente com íons oriundos do eletrodo. A limpeza catódica é efetuada a partir do rompimento dielétrico e explosivo da camada de óxido.

Em concordância, Yarmuch e Patchett (2007), estudando a interferência da inversão de polaridade em onda retangular nas características da região fundida de soldas TIG autógenas na liga Al-Mg AA5083, indicam que largura e penetração dos cordões são maiores com o aumento do tempo positivo no eletrodo. A explicação consiste na admissão que uma maior fusão do cátodo deriva do acréscimo de energia requisitado para extração dos elétrons do alumínio, via emissão de campo, além das inerentes contribuições dos choques de íons positivos e o aquecimento por convecção e radiação gerado pelo arco elétrico

Importante notar também que o aumento da frequência de inversão de polaridade, assim como a pulsação da amplitude da corrente, muda as forças envolvidas no arco elétrico e conseqüentemente a agitação da poça de fusão. Por isso, ambas, pulsação da amplitude e inversão de polaridade estão diretamente ligadas à suscetibilidade à trinca, uma vez que a agitação da poça promove o refinamento dos grãos através de mecanismos como a fragmentação dentrítica, o destacamento de grãos e os modos de nucleação heterogênea e superficial.

De fato, Kumar, Dilthey, Dwivedi e Ghosh (2009) ao estudarem o nível de porosidade na soldagem de chapas finas de alumínio AA6082 por MIG e MAG AC e TIG AC pulsados explicam que durante a soldagem a polaridade do eletrodo se alterna continuamente entre positivo e negativo e, essa alternância de polaridade muda as forças no arco, as quais causam a agitação

da poça de fusão. A agitação da poça de fusão por sua vez facilita o escape do hidrogênio absorvido, diminuindo ou mesmo eliminando o nível de porosidade do metal fundido.

Outra variável importante do processo TIG é a velocidade de soldagem.

Muitos pesquisadores convergem na opinião já consolidada de que altas velocidades de soldagem formam poças de fusão no formato de gota, enquanto baixas velocidades de soldagem formam poças de fusão no formato elíptico.

Na poça de formato elíptico o rastro da poça é curvado, o que faz com que o crescimento colunar dos grãos se curve em busca da direção perpendicular aos limites da poça. Isso ocorre devido ao crescimento ser mais fácil em direção à menor barreira de energia, que é sempre perpendicular das bordas em direção ao centro da poça, ou seja, maior gradiente de extração de energia [G], conforme mostrado na Figura 3.3.b. Na poça em formato de gota não ocorre esse curvamento, pois não há necessidade da busca dessa direção perpendicular, uma vez que o rastro da gota já é praticamente perpendicular ao crescimento colunar dos grãos; Figura 3.3.a. Devido a esse mecanismo, pode ocorrer crescimento colunar axial de grão no início da solda e se desenvolver ao longo do cordão de solda, podendo gerar uma faixa de crescimento colunar de grão axial maior como em 3.3d ou menor como em 3.3c.

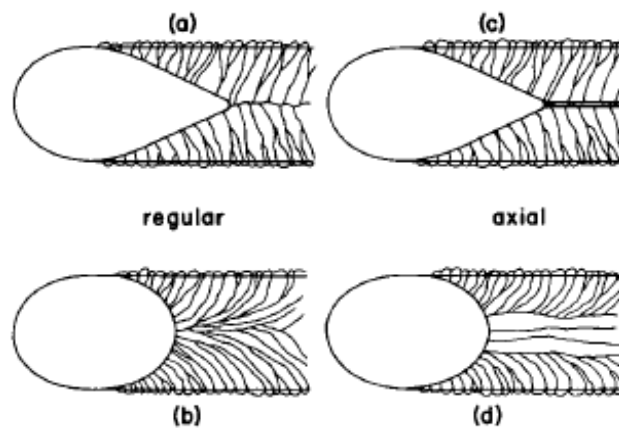


Figura 3.3- Efeito da velocidade de soldagem no crescimento granular .  
( Extraído de Kou, 2007).

### 3.2 Propriedades das ligas de alumínio AA6063T6

Ao contrário do alumínio puro, que apresenta baixa resistência mecânica em aplicações estruturais, as ligas de alumínio apresentam melhores propriedades de resistência mecânica. A maior parte das ligas de alumínio são soluções sólidas do elemento ligante dissolvido na matriz de alumínio, e apresentam suas propriedades mecânicas melhoradas por deformação plástica, encruamento, ou por tratamento térmico. Elementos de liga mais comuns são o Cobre (Cu), o Magnésio (Mg), o Mangânes (Mn), o Silício (Si) e o Zinco (Zn).

Ao longo dos anos fez-se necessária uma classificação devido à enorme quantidade de ligas desenvolvidas. A classificação criada pela "Aluminium Association" (AA) é uma classificação bem aceita. No Brasil, a norma que classifica as ligas de alumínio é a NBR 6834, que segue a AA. As ligas de alumínio são divididas em dois grupos que dependem do processo de fabricação empregado: Ligas trabalháveis e Ligas fundidas.

Nessa revisão apenas as ligas trabalháveis serão conceituadas em maiores detalhes, por ser o material empregado nessa pesquisa.

Ligas trabalháveis são as ligas utilizadas na fabricação de produtos cujo processo de transformação se utiliza de um semimanufaturado como por exemplo lâminas, chapas ou perfis. Os semimanufaturados de alumínio, por sua vez, podem ser obtidos através de processos a quente ou a frio de laminação, extrusão, trefilação ou forjamento.

A Tabela 3.2, extraída do Welding Handbook AWS (1991) apresenta a classificação das ligas de alumínio:

Tabela 3.2- Designação por grupos das ligas trabalháveis de alumínio.

| Liga | Principal elemento químico da liga            |
|------|---|
| 1XXX | Alumínio não ligado ( mínimo de 99,99% puro ) |
| 2XXX | Cobre   |
| 3XXX | Manganês                                      |
| 4XXX | Silício                                       |
| 5XXX | Magnésio                                      |
| 6XXX | Magnésio e Silício                            |
| 7XXX | Zinco   |
| 8XXX | Outros elementos                              |
| 9XXX | Série não utilizada                           |

No grupo 1XXX o segundo dígito indica alteração nos limites de impureza (0 indica os limites naturais de impureza: máximo 0,01%) os dois últimos dígitos indicam a pureza do alumínio. Por exemplo : 1080: Alumínio não ligado com 99,80% de pureza.

Nos grupos 2XXX até 8XXX o segundo dígito indica modificações na liga, por exemplo: o algarismo 0 indica a liga natural, enquanto os algarismos de 1 a 9 indica alterações na liga natural. Por exemplo: 2017 é uma liga de alumínio ao cobre e 2117 é uma modificação dessa liga. Os dois últimos dígitos são arbitrários, utilizados para se diferenciar as ligas.

As ligas trabalháveis não tratáveis termicamente, de um modo geral, são as ligas das séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX. Nessas ligas, a única maneira de se conseguir o aumento das propriedades mecânicas é por deformação à frio, como laminação ou trefilação. Essas ligas quando submetidas a um posterior aquecimento, como por exemplo, no processo de soldagem, têm suas propriedades mecânicas reduzidas. A única maneira de restaurar essas propriedades mecânicas é através de um novo processo de deformação à frio, o que muitas vezes não é viável.

Por sua vez, as ligas trabalháveis tratáveis termicamente são as ligas da série 2XXX, 6XXX e 7XXX. Nessas ligas, através de tratamentos térmicos, consegue-se um aumento da resistência mecânica. Essas ligas quando submetidas a um posterior aquecimento podem ter suas propriedades mecânicas reduzidas.

Entretanto, essas ligas podem ser retratadas termicamente. Os tratamentos térmicos que reconduzem ao aumento da resistência mecânica dessas ligas são o envelhecimento e a solubilização.

Em ligas de alumínio, o termo têmpera indica o estado que a liga atinge decorrente da ação do trabalho a frio ou a quente, ou por tratamentos térmicos, ou ainda pela combinação de ambos. A Tabela 3.3, extraída do Welding Handbook AWS (1991) apresenta a nomenclatura das têmperas:

Tabela 3.3- Nomenclatura das têmperas.

| Tipo de tempera  | Definição  |
|--|--|
| F – Ligas não tratáveis e tratáveis ( como fabricado ) | Indica ligas onde não houve controle sobre as condições térmicas ou nível de encruamento |
| O - Ligas não tratáveis e tratáveis ( recozido )       | Indica as ligas com o estado de menor valor de resistência mecânica                      |
| H – ligas não tratáveis ( encruado )                   | Indica que o aumento de resistência mecânica pode ser alcançado por deformação a frio    |
| H1 – Ligas não tratáveis ( apenas encruado )           | Indica que as propriedades mecânicas são obtidas somente pelo trabalho a frio            |

|  |   |
|--|---|
| H2 – Ligas não tratáveis<br>( encruado e recozido parcialmente ) | Indica que a propriedade mecânica obtida pelo trabalho a frio pode ser diminuída pelo recozimento   |
| H3 – Ligas não tratáveis<br>( encruado e solubilizado )          | Indica ligas que amolecem com o passar do tempo após serem encruadas. O amolecimento pode ser acelerado e estabilizado com tratamento térmico |
| W – Ligas tratáveis<br>( solubilizado )                          | Indica ligas que envelhecem naturalmente após o tratamento de solubilização   |
| T 1 – Ligas tratáveis  | Resfriado à temperatura elevada e envelhecido naturalmente  |
| T2 – Ligas tratáveis   | Resfriado à temperatura elevada, deformado plasticamente a frio e envelhecido naturalmente  |
| T3 – ligas tratáveis   | Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido naturalmente   |
| T4 – Ligas tratáveis   | Solubilizado e envelhecido naturalmente   |
| T5 – Ligas tratáveis   | Resfriado à temperatura elevada e envelhecido artificialmente   |
| T6 – Ligas tratáveis   | Solubilizado e envelhecido artificialmente  |
| T7 – Ligas tratáveis   | Solubilizado e estabilizado ( superenvelhecimento )   |
| T8 – Ligas tratáveis   | Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido artificialmente  |
| T9   | Solubilizado, envelhecido artificialmente e deformado plasticamente a frio  |
| T10  | Resfriado a temperatura elevada, deformado plasticamente e envelhecido artificialmente  |

Uma das propriedades mais importantes no emprego das ligas de alumínio é a sua soldabilidade, ou seja, a capacidade da liga se fundir durante o processo de soldagem e formar um cordão de solda com características mecânicas uniformes. A geração de trincas de solidificação imprevistas representa a maior dificuldade na obtenção de uma soldagem de qualidade.

Diversos testes têm sido desenvolvidos para se determinar a suscetibilidade à trinca nas ligas de alumínio. O teste mais conhecido para espessuras finas é o teste de Houldcroft, ou espinha de peixe. O teste pode ser conduzido com ou sem material de adição. O corpo de prova consiste de uma chapa retangular com 8 ou 9 ranhuras com diferentes comprimentos nos dois lados [Krügger,(1994) apud European Aluminium Association - Talat 4202, Kou, (2007)].

As dimensões da amostra, assim como as distâncias entre as ranhuras dependem da espessura. Próximo do término da soldagem, as trincas podem começar a se formar e crescer em função da existência de tensões. As ranhuras reduzem as tensões gradativamente, assim as trincas param de crescer. O comprimento da trinca formada, A, expresso em porcentagem do comprimento de solda, é uma indicação da suscetibilidade à trinca da liga. O limite economicamente viável para soldagem sem metal de adição está em torno de 35% [Krügger, apud European Aluminium Association - Talat 4202 (1994)].

A Figura 3.4 mostra as dimensões normalmente utilizadas no ensaio Houldcroft.

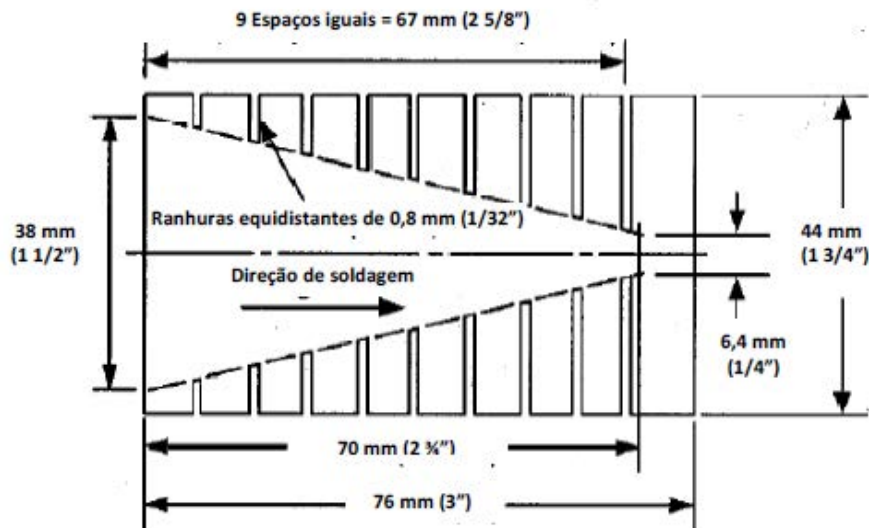


Figura 3.4- Dimensões para o corpo de prova Houldcroft. (Adaptado de Kou, 2007)

O corpo de prova livre de restrições e com ranhuras de comprimentos progressivos ao longo de seu comprimento permite a dissipação de tensões internas. Dessa maneira, no teste, a trinca de solidificação se inicia na borda do corpo de prova e se propaga ao longo do centro do cordão de solda. À medida em que a fonte de calor movimenta-se ao longo de seu comprimento, a solidificação se inicia e a estrutura de solidificação na cauda da gota se separa, porque a borda do corpo de prova continua a se expandir como resultado da contínua descarga de calor. Kou (2007) explica muito didaticamente a razão para o uso das ranhuras com a ajuda dos corpos de prova trincados sob tensão, como mostrado na Figura 3.5: A trinca precisa desenvolver-se plenamente ao longo do corpo de prova, (Figura 3.5a). Ao se reduzir a largura do corpo de prova consegue-se reduzir a tensão resultante ao longo do comprimento e fazer com que a trinca pare de se propagar, (Figura 3.5b). Na seqüência, uma mudança dramática da condição do fluxo de calor ao longo do comprimento da solda, mas com o material próximo à ranhura não extraído, (Figura 3.5c).

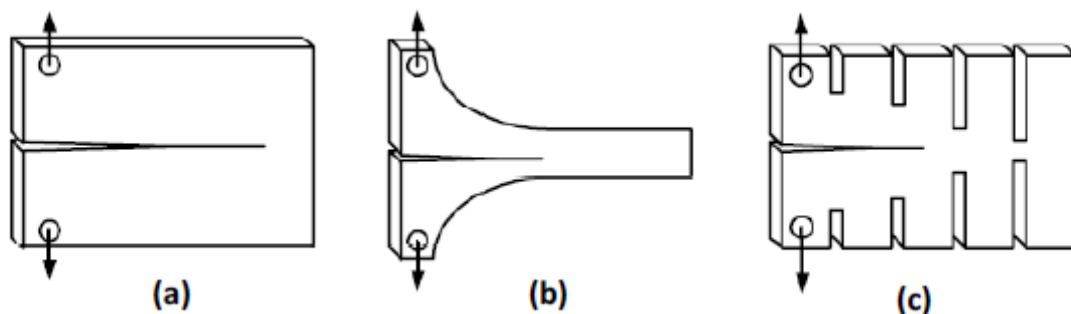


Figura 3.5- Três tipos de trincas em corpos de prova sob tensão. (Adaptado de Kou, 2007)

O teste de Houldcroft quando avalia a soldabilidade de uma liga de alumínio, o faz de maneira qualitativa, ou seja, determina se uma liga tem maior ou menor soldabilidade comparativamente à outra liga ou à outro processo de soldagem unicamente em função do comprimento da trinca gerada.

Para a melhor determinação dos parâmetros no processo de soldagem TIG CA de uma liga, se faz necessário uma maior compreensão dos mecanismos de solidificação envolvidos na geração das trincas.



Kou (2007) explica que trincas de solidificação são intergranulares, ou seja, ocorrem na soldagem por fusão e se propagam ao longo dos contornos de grãos. As trincas de solidificação ocorrem próximo ao final da solidificação, pois as tensões exercidas pelos grãos vizinhos ultrapassam a resistência do metal de solda já quase solidificado. Essas tensões são resultantes da contração da peça durante o resfriamento ou da contração do metal de solda durante a solidificação, ou ambas. As tensões de contração rompem o filme fino de líquido que separa a estrutura já formada durante a solidificação. Quando não existe uma quantidade suficiente de líquido próximo para o preenchimento desse espaço, então, as trincas se abrem facilmente.

Na poça de fusão, é na zona intermediária ou de liquação que encontram-se simultaneamente os grãos já solidificados e o líquido ainda não solidificado entre os grãos, por isso essa zona é a área mais fraca e suscetível ao trincamento por solidificação.

Kolarik et al (2012) estudando o teste de soldabilidade Houldcroft para a liga de alumínio AA6082T6 explica que largos intervalos de temperatura de solidificação tornam o material mais suscetível às trincas, principalmente quando o volume eutético é pequeno e não é o suficiente entre os espaços interdendríticos. É necessário de 15 a 20% da fase eutética em volume para se evitar completamente a trinca de solidificação.

Em concordância, Kou (2007) explica que em determinadas ligas de Alumínio com menos de 6% em peso de soluto, o líquido intergranular forma uma camada muito fina, tornando essas ligas suscetíveis ao trincamento. O alumínio puro, por exemplo, não é suscetível ao trincamento por solidificação, porque não existe o líquido eutético de baixo ponto de fusão entre os grãos. Já o alumínio altamente ligado também não é suscetível ao trincamento porque existe bastante líquido eutético entre os grãos.

Prokhorow (1960) apud Adamiec (2011) no estudo da influência dos fatores de construção na soldabilidade da liga de Al-Zn AZ91E descreve que a resistência às trincas de solidificação são também caracterizadas pela chamada razão "A" de marginalidade de plasticidade. Essa quantidade é associada com a intensidade da temperatura crítica de tensão (CST), assim como ao range de fragilidade à alta temperatura e depende principalmente da construção e de fatores metalúrgicos, ou seja, condições térmicas durante a soldagem, conforme a equação  $A = CST \cdot HTBR$ , onde, A é a reserva de plasticidade (%), CST é a intensidade da temperatura crítica de tensão (%/o.C) e HTBR é o range de fragilidade à alta temperatura. A principal medida da suscetibilidade às trincas de solidificação é a plasticidade da liga na condição sólido-líquido (zona intermediária ou de liquação). A trinca ocorrerá se a solicitação na solda exceder essa plasticidade.

Ainda, segundo Kou (2007) quanto à tensão superficial do líquido sobre o contorno do grão, duas situações devem ser consideradas: quando a tensão superficial entre o grão e o líquido é baixa, forma-se um filme fino de líquido. Nesse caso é maior a suscetibilidade à trinca. Quando a tensão superficial entre o grão e o líquido é alta, formam-se glóbulos de líquido entre os grãos. Nesse caso é menor a suscetibilidade à trinca.

Na soldagem por fusão, quando o objetivo é se evitar a formação de trincas de solidificação, a obtenção de grãos equiaxiais finos é sempre mais vantajosa que a obtenção de grãos colunares grossos, visto que: grãos axiais finos deformam-se mais facilmente e portanto absorvem melhor as deformações de contração; grãos axiais finos tem área de contorno maior e portanto evita-se a concentração de segregados, os quais podem se distribuir melhor ao longo dos contornos de grão e, finalmente, grãos axiais finos facilitam o preenchimento das trincas pelo líquido intergranular.

Também o formato da poça de fusão deve ser considerado quando o objetivo é se evitar a formação de trincas de solidificação. Na poça de fusão com formato de gota os grãos colunares crescem em direção à cauda da gota, ou seja com menor inclinação. Essa condição de menor inclinação favorece a concentração do líquido e também dos segregados na frente dos grãos, o que resulta no trincamento na linha central devido às tensões de contração. Já a poça de fusão em formato de elipse é preferível, visto que o crescimento mais inclinado das colunas de grãos

em direção á elipse diminui esse efeito. Poças de fusão com formato de elipse são obtidas com menor velocidade de soldagem.

Kolarik et al (2012) estudando o teste de soldabilidade Houldcroft para a liga de alumínio AA6082T6 também citam a alta afinidade do Oxigênio em originar uma camada de Óxido de Alumínio ( $Al_2O_3$ ) à qual em altas temperaturas de fusão ( $2050^{\circ}C$ ) e densidade maior que a do metal base ( $3,96g/cm^2$ , no caso do EN AW 6082T6) obstrui a formação de uma base metálica compatível. Assim como a alta sensibilidade ao calor em algumas ligas de alumínio têm causado precipitações na zona termicamente afetada (ZTA) diminuindo as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão, também a presença de impurezas origina um baixo ponto de fusão eutético que resulta em sensibilidade à trinca de solidificação.

Ainda Kolarik et al (2012) e também Kou (2007) citam o alto coeficiente de expansão térmica e de encolhimento das ligas de Alumínio que originarão tensões devidas às contrações térmicas, as quais atuarão nos grãos vizinhos durante a solidificação, resultando em trincas.

O tipo de fixação da peça, ou seja, fixação durante a soldagem com maior ou menor liberdade de expansão e contração, influencia a probabilidade de ocorrer trincas na medida em que pode alterar as tensões devidas às expansões e contrações do Alumínio.

### 3.3 Metalurgia na solidificação das ligas de alumínio

Assim como já foi mencionado, para a melhor determinação dos parâmetros de fusão no processo de soldagem TIG CA, se faz necessário a compreensão dos modos de solidificação nas ligas, uma vez que estes determinam o tipo de formação do grão. A obtenção de uma microestrutura refinada, isto é, a obtenção de grãos equiaxiais finos no lugar de grãos colunares grossos é fundamental no processo de minimização das trincas de solidificação.

Durante a solidificação de um metal puro, a interface sólido/líquido normalmente é planar, a não ser que seja imposto um subresfriamento térmico severo. Durante a solidificação de uma liga, entretanto, a interface sólido/líquido e conseqüentemente o modo de solidificação podem ser planar, celular ou dendrítico dependendo da condição de solidificação e do material envolvido. A Figura 3.6 mostra muito bem esses modos de solidificação.

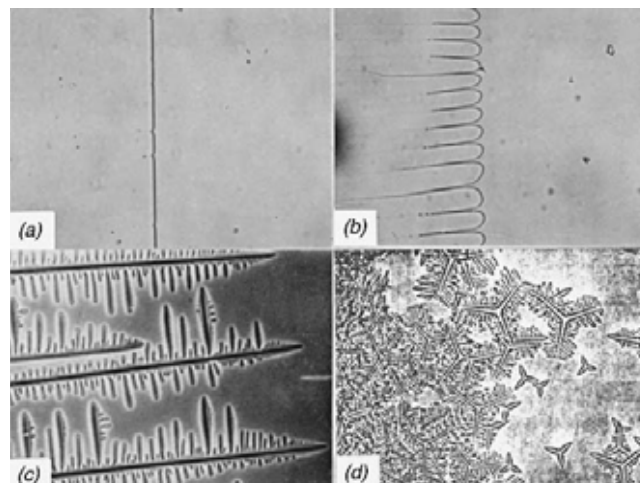


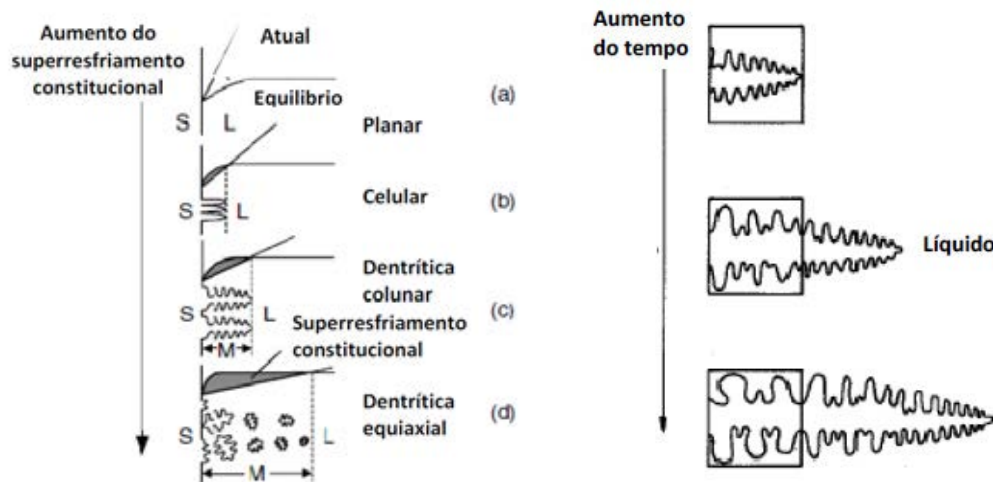
Figura 3.6- Exemplos de Modos básicos de solidificação. a-) solidificação planar, b-) solidificação celular, c-) solidificação colunar dendrítica, d-) solidificação equiaxial dendrítica. (extraído de Kou,2007)

Savage (1980) apud Pereira (1992) estudando as trincas de solidificação através do teste de Houldcroft em ligas de Al-Mg-Si, explica que o crescimento planar ocorre para gradientes térmicos  $G$  elevados e superresfriamento constitucional tendendo a zero, quando então, a interface sólido/líquido é plana e o crescimento é competitivo. No crescimento celular, por sua

vez, o gradiente térmico é menor que no planar, enquanto que o superresfriamento constitucional é pouca coisa maior, quando, então, a interface sólido/líquido apresenta a formação de protuberâncias que darão origem à forma celular. No crescimento celular dendrítico, o gradiente térmico é menor que no planar e no celular enquanto que o superresfriamento constitucional é o suficiente para ocorrer ramificações ainda não dendríticas. No crescimento dendrítico, com gradiente menor e elevado superresfriamento constitucional ocorre o crescimento por ramificação.

As duas principais teorias que tem sido propostas para descrever quantitativamente o bloqueio da interface sólido/líquido planar durante a solidificação são a teoria do superresfriamento constitucional proposta por Chalmer et al (1953) apud Kou (2007), que considera somente o aspecto termodinâmico, e a teoria da estabilidade da interface proposta por Mullins e Sekerka (1964, 1967) que incorpora conceitos da interface cinética e da transferência de calor. Neste estudo consideraremos somente a teoria do superresfriamento constitucional. Para se evitar o superresfriamento constitucional, ou seja, para uma liga estar apta ao modo de solidificação com um crescimento planar, a razão  $G/R$  precisa ser maior ou igual a  $\Delta t/D_L$ . este é o chamado critério para o crescimento planar. Onde  $G$  é o gradiente de temperatura,  $R$  é razão do crescimento estrutural,  $\Delta t$  é a diferença entre as temperaturas líquida e sólida através da linha fronteira líquido-sólido ( $T_L - T_s$ ) e  $D_L$  é coeficiente de difusão.

Schempp et al ( 2014 ) explica que o modo de solidificação pode mudar de planar para celular, dendrítica colunar ou dendrítica equiaxial em função do aumento do superresfriamento constitucional. A região onde as dendritas e a fase líquida coexistem é chamada de zona intermediária ou de liquação. É interessante notar que um alto grau de superresfriamento constitucional na zona pastosa pode vir a ser tão amplo que é mais fácil a nucleação das dendritas equiaxiais do que das dendritas colunares, conforme mostra a Figura 3.7.



Efeito do superresfriamento constitucional no modo de solidificação; a-) planar, b-) celular, c-) dendrítica colunar, d-) dendrítica equiaxial.

Esquema mostrando o crescimento das dendritas de uma liga em um ponto fixo em vários estágios de solidificação

Figura 3.7- Efeito do superresfriamento constitucional e crescimento das dendritas. ( Adaptado de Kou, 2007)

Aumentando-se a razão de resfriamento, ou seja, diminuindo o tempo de solidificação, acontece o refinamento da estrutura celular ou dendrítica. O espaçamento entre os ramos das dendritas é uma função da razão de resfriamento, ou do tempo de solidificação. A relação pode ser expressa por  $d = at_f^n = b(\epsilon)^{-n}$ . Onde:  $d$  é o espaçamento secundário entre os ramos de dendrita,  $T_f$  é o tempo local de solidificação,  $\epsilon$  é a razão de resfriamento,  $a$ ,  $b$  são constantes de

proporcionalidade. A Figura 3.7 mostra os vários estágios do crescimento das dendritas em uma liga.

Por sua vez, Davies (1975) apud Pereira, M. (1992) estudando as trincas de solidificação através do teste de Houldcroft em ligas de Al-Mg-Si, analisa que o espaçamento entre ramos de dendritas em depósitos com penetração parcial está diretamente relacionado com a raiz quadrada do aporte de energia, portanto a diminuição da energia de soldagem favorece a formação de uma estrutura mais fina.  $L^2 = Q/V$ . Onde: L é o espaçamento entre os ramos das dendritas, Q é a quantidade de calor, V é a velocidade de soldagem.

O efeito do gradiente de temperatura G e da razão de crescimento R na microestrutura da solidificação das ligas é mostrado na Figura 3.8. Juntos, G e R dominam a microestrutura de solidificação. A razão G/R determina o modo de solidificação, enquanto o produto G.R governa o tamanho da estrutura de solidificação.

O gradiente de temperatura G está relacionado às condições térmicas da poça de fusão enquanto a razão de crescimento R é proporcional ao superresfriamento constitucional. Aumentando-se G ocorrerá a diminuição de R, ou seja, a relação entre G e R é inversamente proporcional [ Pereira (1992)]

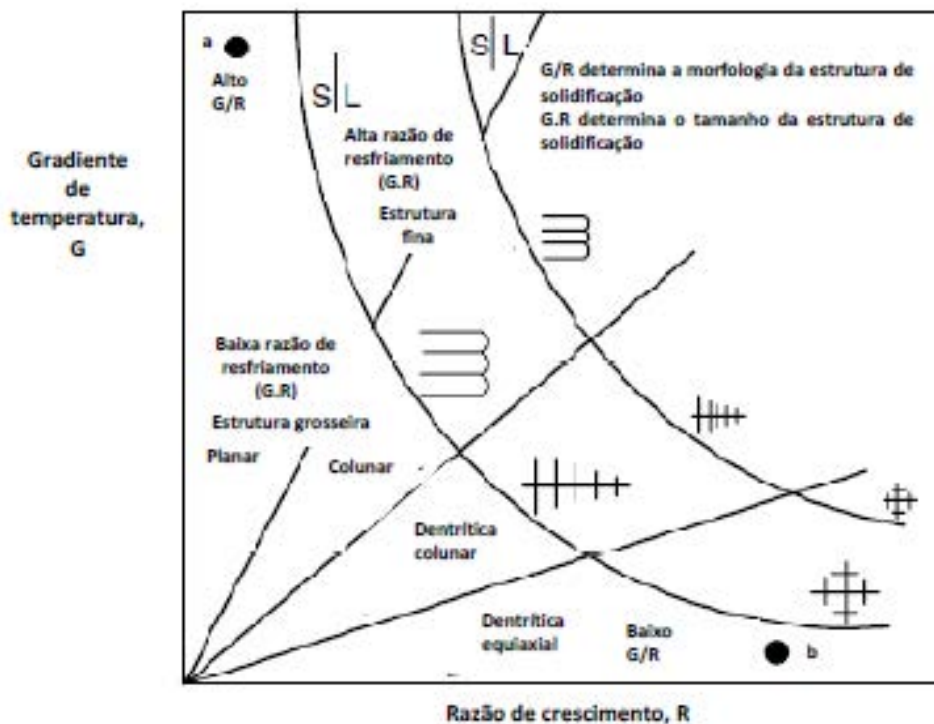


Figura 3.8- Efeito do gradiente de temperatura G e da razão de crescimento R na morfologia e tamanho da microestrutura de solidificação. (Adaptado de Kou , 2007)

Savage (1980) e Davies (1975) apud Pereira, M. (1992) analisando a ocorrência de trincas de solidificação através do teste de Houldcroft em liga de Al-Mg-Si explica que devido à concentração diferenciada de soluto, na zona parcialmente fundida, ocorre a existência de regiões onde a temperatura de fusão é menor que a temperatura de fusão da liga. A diferença entre a temperatura local de fusão e a temperatura nominal de fusão da liga ocasiona uma fusão parcial dos grãos na zona parcialmente fundida. Esses grãos servirão de núcleos para o crescimento na poça de fusão. Esse crescimento que se dá com a mesma orientação cristalina e com o mesmo tamanho de grão é chamado crescimento epitaxial.

Conforme a teoria da nucleação, um cristal pode crescer num substrato líquido desde que não exista uma barreira de energia. Barreira de energia pode ser a inexistência de uma fase líquida (zona fundida) ou uma fase líquida que não molhe suficientemente a fase sólida (zona

parcialmente fundida insuficiente). Na soldagem por fusão esse substrato são os grãos do metal base na linha de fusão. Na soldagem do alumínio irá ocorrer nucleação a partir desses grãos em direção ao centro da poça de fusão, que é a direção com menor barreira de energia. Na soldagem autógena, onde não há adição de material, a nucleação se dá pelo rearranjo dos átomos na parte líquida seguindo a mesma orientação cristalográfica do substrato, ou seja, a orientação cristalográfica dos grãos do metal de base. Para ligas de Alumínio, a direção epitaxial de crescimento mais fácil é a direção  $\langle 100 \rangle$ . A Figura 3.9 mostra o crescimento epitaxial e o crescimento competitivo.

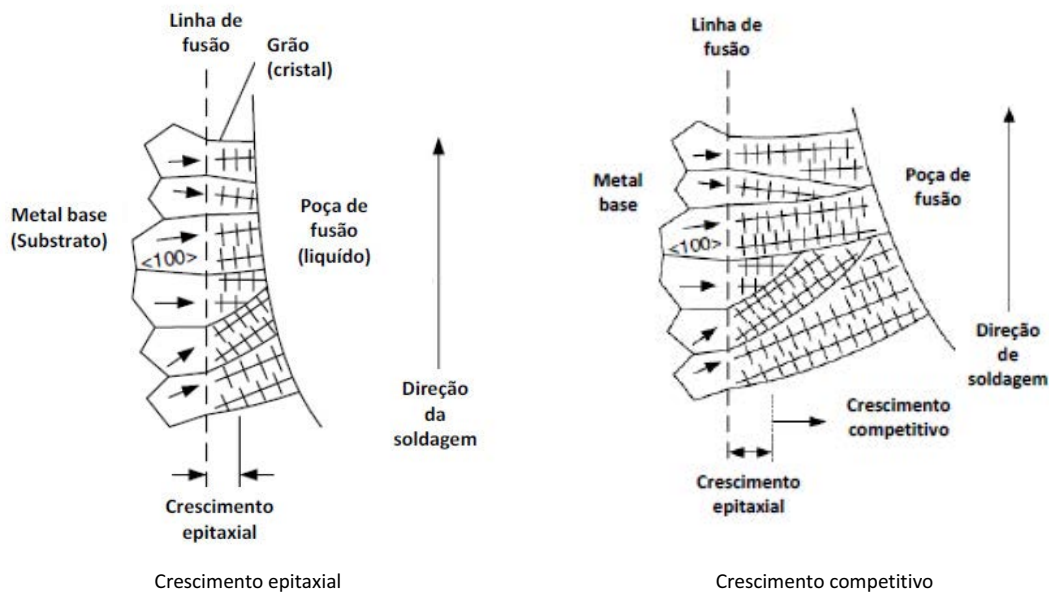


Figura 3.9- Crescimento epitaxial e crescimento competitivo. ( Adaptado de Kou ,2007).

O ciclo térmico, assim como as características do metal base são fatores determinantes para o crescimento dos grãos parcialmente fundidos na zona parcialmente fundida. Grãos maiores decorrem de um maior tempo em temperaturas elevadas na zona de ligação. A Figura 3.10 mostra a influência do ciclo térmico de soldagem na largura do grão solidificado.

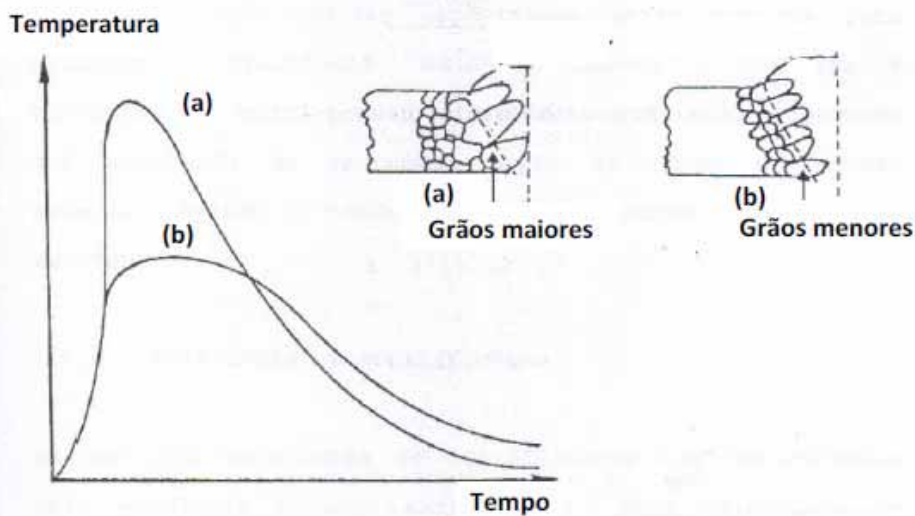


Figura 3.10- Influência do ciclo térmico de soldagem na largura do grão solidificado. (Adaptado de Pereira ,1992)

Pereira (1992) explica que o crescimento competitivo decorre do crescimento de grãos vizinhos que competem para crescer no sentido da maior extração de calor. O grão que possuir uma orientação cristalina paralela ou coincidente com o sentido de maior extração de calor crescerá mais. A solidificação, geralmente, é naturalmente dominada pelo crescimento colunar.

E Kou (2007), por sua vez, cita que na zona fundida, ao contrário da zona de ligação, o crescimento do grão ocorre tanto pelo crescimento epitaxial como também pelo crescimento na direção de menor barreira de energia, ou seja, maior gradiente de extração de energia  $G$ , que é a direção sempre perpendicular à linha de fusão. Esse mecanismo recebe o nome de crescimento competitivo.

Outro aspecto importante a ser compreendido, para a melhor determinação dos parâmetros de fusão no processo de soldagem TIG CA e a conseqüente minimização das trincas de solidificação, são os mecanismos de nucleação do metal fundido que são também significativos no processo de obtenção da microestrutura refinada.

Kou (2007) descreve uma poça de fusão TIG em uma liga de alumínio da seguinte maneira: A região sólido + líquido ao redor da poça de fusão consiste de 2 partes: o material parcialmente fundido associado com a fronteira da porção principal e a zona mais “pastosa” associada com a porção de arrasto. Na Figura 3.11, a zona intermediária atrás da porção de arrasto da fronteira da poça consiste de dentritas sólidas (S) e de dentritas líquidas (L). O material parcialmente fundido ao redor da porção principal da fronteira da poça, por outro lado, consiste de grãos sólidos (S) que estão parcialmente fundidos e de líquido intergranular (L). Em resumo, esta é uma região de mistura sólido-líquido ao redor da poça de fusão.

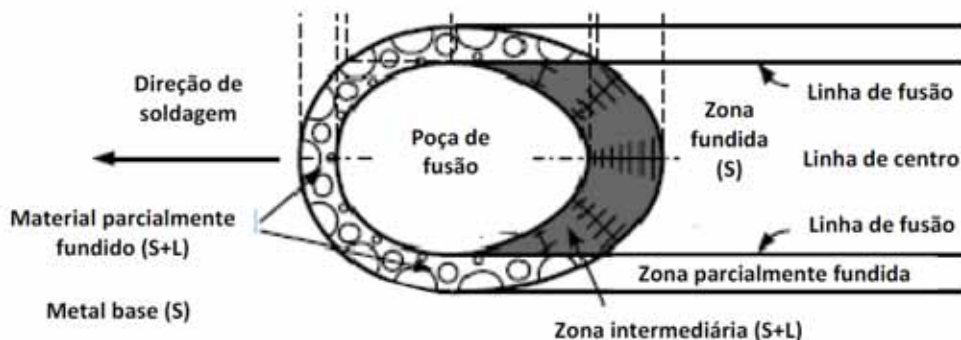


Figura 3.11- Microestrutura de sólido mais líquido ao redor da poça de fusão.  
(Adaptado de Kou ,2007)

Relaciona se 4 possíveis mecanismos para novos grãos nuclearem durante a soldagem; fragmentação das dentritas, destacamento de grãos, nucleação heterogênea e nucleação superficial.

No mecanismo de fragmentação dentritica, correntes convectivas na poça de fusão podem em princípio causar fragmentação das colunas de dentritas na zona intermediária como ilustrado na Figura 3.12a. Esses fragmentos de dentritas são carregados para a região central da poça de fusão e funcionam como núcleos para novos grãos se formarem, caso eles sobrevivam à temperatura da poça de fusão. Este é um típico mecanismo de refinamento de grãos em soldagem por fusão.

No mecanismo de destacamento de grãos, correntes convectivas na poça de fusão podem causar também o auto-destacamento de grãos parcialmente fundidos da mistura solido-líquido ao redor da poça de fusão, como é mostrado na Figura 3.12a. Caso sobrevivam na poça de fusão poderão funcionar como núcleos para a formação de novos grãos.

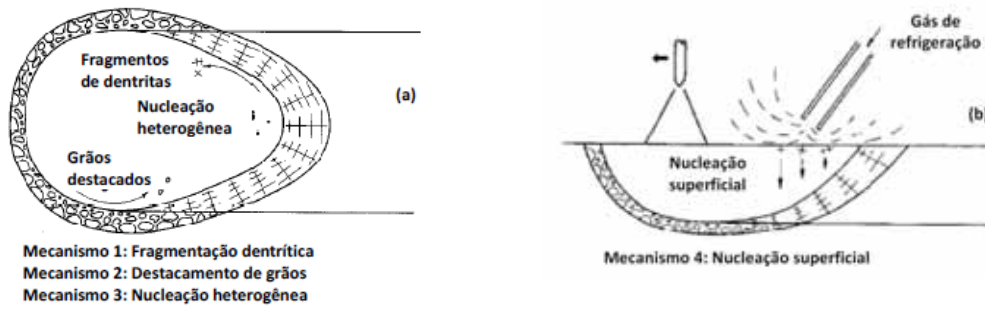
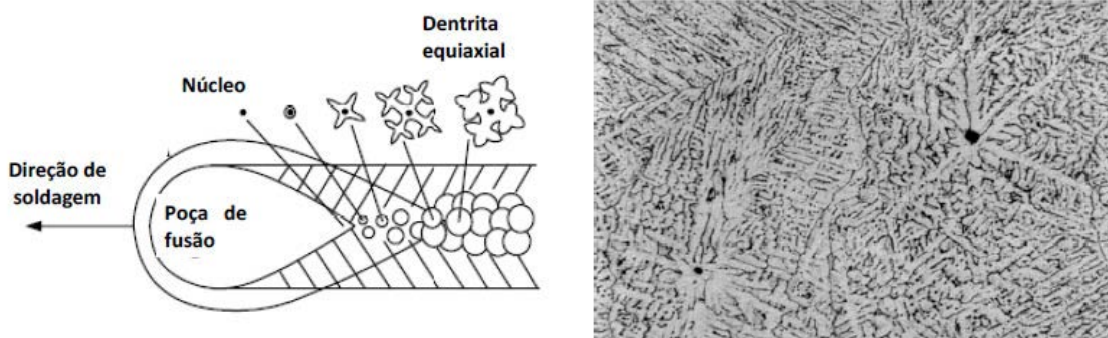


Figura 3.12- mecanismos de nucleação durante a soldagem: a-) Vista de topo, b-) vista de lado. ( Adaptado de Kou , 2007).

No mecanismo de nucleação heterogênea, partículas estranhas presentes na poça de fusão, das quais os átomos no metal líquido podem ser arranjados numa forma cristalina podem gerar núcleos heterogêneos. A Figura 3.13a representa nucleação heterogênea e o crescimento de novos grãos no metal de soldagem e a Figura 3.13b mostra 2 núcleos heterogêneos ao centro de dois grãos numa solda autógena TIG da liga 6061 contendo 0,043% de Titânio.



a- Nucleação heterogênea e formação de grãos equiaxiais no metal de solda.

b- Nucleação heterogênea na soldagem TIG da liga de alumínio 6061

Figura 3.13- Nucleação e formação de grãos equiaxiais no metal fundido. (Adaptado de Kou, 2007)

Finalmente, no mecanismo de nucleação superficial, a superfície da poça fundida a qual pode estar termicamente menos resfriada induz a nucleação superficial por exposição ao fluxo de gás frio. Quando isso ocorre, núcleos sólidos podem se formar na superfície da poça de fusão. Esses núcleos sólidos crescem em novos grãos que afundam da superfície da poça de fusão, devido à sua alta densidade, em direção ao metal líquido na fronteira inferior da poça de fusão, como mostrado na Figura 13.12b.

## 4. Materiais e métodos

### 4.1 Materiais

O metal base utilizado para os experimentos foi a liga de alumínio do sistema Al-Mg-Si, AA 6063, na condição microestrutural de envelhecimento artificial T6, na forma de barras chatas extrudadas de 6m de comprimento e com secção transversal de 102mm x 3,2mm (4"x1/8"). Não foram utilizados metais de adição. A necessidade de utilização de um eletrodo não consumível que oferecesse alta resistência à contaminação na poça de fusão, e fosse adequado para o uso em CA e ligas de alumínio, levou à escolha do eletrodo consumível de Tungstênio ligado com 0,3% de Zircônio, diâmetro 3,2mm e comprimento 150mm ( AWS EWZr-03 )

### 4.2 Métodos

#### 4.2.1 Análises químicas

A composição química do metal de base foi atestada por análise executada pelo LABMAT Análise e Ensaio de Materiais Ltda, em Piracicaba, SP. Foram feitas análises por espectrometria de emissão ótica em três amostras retiradas do lote de barras adquirido.

#### 4.2.2 Procedimentos de soldagem

Para a execução das soldas TIG autógena nos corpos de prova do tipo Houldcroft foi utilizada uma fonte inversora CC/CA multiprocesso modelo Digiplus A7, de fabricação da IMC Soldagem, equipada com unidade portátil de refrigeração à água da tocha de soldagem. Para o registro dos valores instantâneos de corrente e tensão foi utilizado o sistema de aquisição de dados e processamento computacional SAP V4.19s também desenvolvido pela IMC Soldagem. As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram as características técnicas dos equipamentos conforme o manual de instruções do fabricante.

Tabela 4.1- Características da fonte de soldagem Digiplus Multiprocesso A7.

|  |                 |
|--|-----------------|
| Características                                      | Capacidade 450A |
| Tensão de alimentação trifásica                      | 220/380/440V    |
| Tensão em vazio ( configurável de fábrica )          | 50/68/85V       |
| Corrente à 100% de fator de carga                    | 280A            |
| Potência nominal                                     | 10kVA           |
| Faixa de corrente                                    | 5-450A          |
| Corrente de entrada nominal por fase ( 220/380/440 ) | 26/15/13A       |
| Ripple de corrente                                   | 8A              |
| Fator de potência                                    | 0,94            |

Tabela 4.2- Características de medição do sistema SAPV4.19s.

| Variável                               | Faixa         | Resolução |
|--|---------------|-----------|
| Corrente                               | -600 a 600A   | 0,8A      |
| Tensão                                 | -100 a 100V   | 0,1V      |
| Vazão de gás                           | 0 a 20,0L/min | 0,1L/min  |
| Velocidade do arame                    | 0 a 500m/min  | 0,1m/min  |
| Taxa de amostragem sinais instantâneos | 5000Hz        | --        |



Também foi utilizada uma bancada equipada com uma mesa de soldagem com anteparo de cobre e fixadores do tipo alavancas e um carrinho de oxicorte adaptado para o avanço da tocha com regulador de velocidade.

Foram utilizados todos os equipamentos de proteção individuais e coletivos, assim como procedimentos de segurança adequados conforme recomendações dos fabricantes.

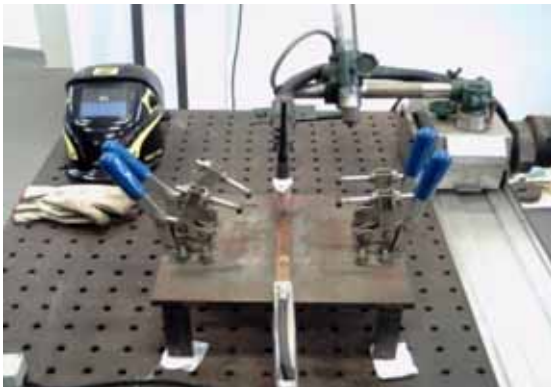
A Figura 4.1 mostra os equipamentos e acessórios utilizados.



(a) Fonte de soldagem inversora CC/CA Digiplus A7 – IMC Soldagem.



(b) Detalhe da montagem para automatização do movimento da tocha.



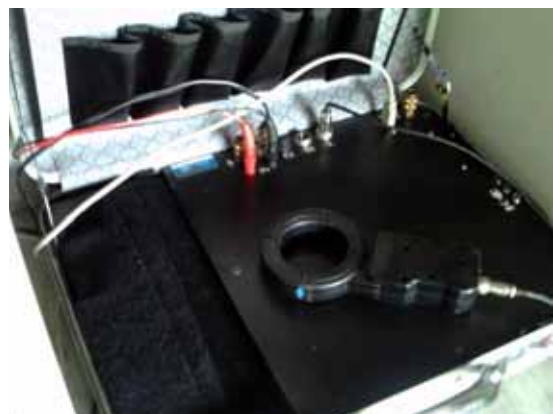
(c) Mesa de soldagem com anteparo de cobre e fixadores tipo alavanca.



(d) Carrinho de oxicorte adaptado para avanço da tocha com regulação de velocidade.



(e) Sistema de aquisição SAPV4.19s.



(b) Detalhe do sistema de aquisição SAPV4.19s.

Figura 4.1- Equipamentos e acessórios para soldagem e aquisição de dados.

Os corpos de prova do tipo Houldcroft foram extraídos de chapas extrudadas de alumínio AA6063T6, espessura 3,2mm. O sentido longitudinal do corpo de prova acompanha o sentido de extrusão da chapa. Foram adotadas dimensões padrões para os corpos de prova em concordância com a espessura, conforme a literatura e mostrado na Figura 3.4. Não foram feitos entalhes sobre o corpo de prova para o cordão de solda. Justaposto ao corpo de prova, no início do cordão, foi utilizado um postigo de comprimento 30mm, espessura 3,2mm, mesmo material, para dar a abertura do arco. Os corpos de prova foram limpos e desengordurados com álcool. Foi utilizado Argônio puro comercial como gás de proteção, com vazão de 16L/min.

Foi fixada velocidade de soldagem constante de 20cm/min, valor médio encontrado na literatura para esse tipo de ensaio e também próximo do habitual na prática. A regulagem de velocidade foi feita no equipamento e aferida através da cronometragem do deslocamento. A vazão de gás escolhida de 16L/min, com bocal cerâmico nº 8 e distância bocal-peça de 8mm, são valores recomendados pelo fabricante do equipamento para que se mantenha fluxo laminar. Utilizou-se distância eletrodo-peça de 3mm.

Os valores das variáveis corrente positiva no pulso térmico,  $I_p(PT)=220A$ ; corrente negativa no pulso térmico,  $I_n(PT)=-220A$ ; corrente positiva na base térmica,  $I_p(BT)=30A$ ; e corrente negativa na base térmica  $I_n(BT)= -30A$ ; foram determinados através de ensaios práticos com vista a se obter a melhor penetração possível da zona fundida.

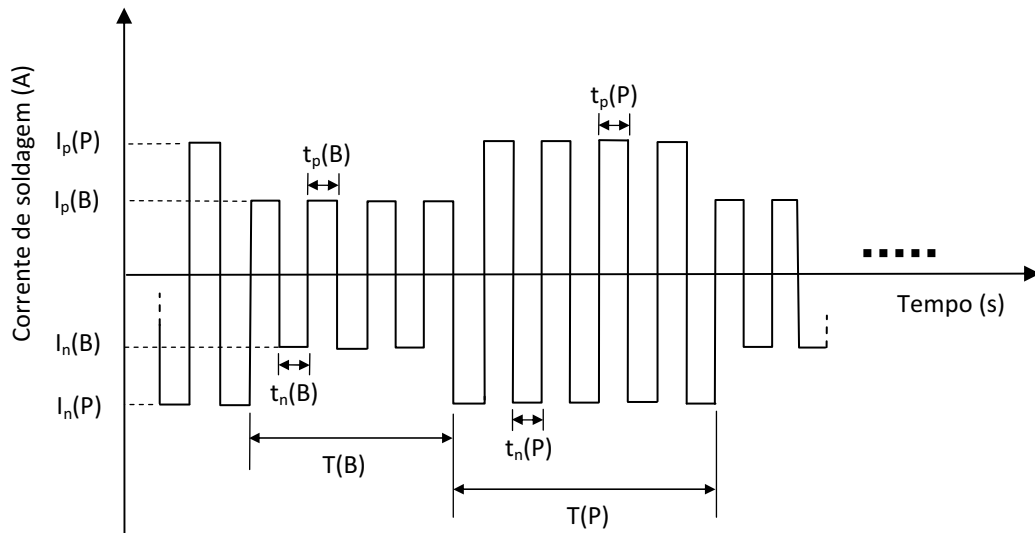
$I_{cc}$  é a corrente contínua direta necessária para facilitar a abertura do arco.  $I_{nBT}$  e  $I_{nPT}$  são respectivamente a corrente direta (negativa) da base térmica e do pulso térmico, assim como  $I_{pBT}$  e  $I_{pPT}$  são a corrente inversa (positiva) da base e do pulso térmico. A corrente alternada só é estabelecida após o término do período de rampa.  $t_p$  é o tempo de polaridade positivo no eletrodo e  $t_n$  é o tempo de polaridade negativo no eletrodo. Escolhendo-se valores adequados para  $t_p$  e  $t_n$ , podemos fixar a freqüência de inversão de polaridade.

Para se obter as freqüências de inversão de polaridade de 50, 100 e 200Hz foram adotadas os seguintes valores para  $t_p$  e  $t_n$ : Fazendo-se  $t_p=0,002s$  e  $t_n=0,018s$  obtemos um ciclo de 0,020s que corresponde à uma freqüência de inversão de polaridade de 50Hz (1/0,020). Da mesma maneira, para  $t_p=0,001s$  e  $t_n=0,009s$  obtemos um ciclo de 0,010s que corresponde à uma freqüência de 100Hz (1/0,010). A freqüência de 200Hz seria obtida com  $t_p=0,0005s$  e  $t_n=0,0045s$ , no entanto, devido à resolução da máquina, no painel esses valores foram aproximados para  $t_p=0,001s$  e  $t_n=0,005s$  resultando numa freqüência de 167Hz (1/0,006).

A relação entre  $t_p$  e  $t_n$ , de 2 para 18, foi estabelecida após vários ensaios de penetração e também segundo a recomendação do fabricante do equipamento de 1,5 para 9.

$T_s$  é o período de subida,  $T_{bT}$  é o período da base térmica,  $T_{pT}$  é o período do pulso térmico e  $T_d$  é o período de descida.  $T_s$  e  $T_d$  foram fixados em 2s, sendo que  $T_s$  ocorre totalmente fora do corpo de prova, ainda sobre o anteparo. Escolhendo-se valores adequados para  $T_{bT}$  e  $T_{pT}$ , podemos fixar a freqüência do período de pulso térmico.

Para se obter os pulsos térmicos de 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0Hz foram adotadas os seguintes valores para os períodos: Fazendo-se  $T_{bT}$ , assim como  $T_{pT}$  igual a 1,0s; obtemos um ciclo de 2s, ou seja, uma freqüência de pulso térmico de 0,5Hz (1/2). Para  $T_{bT}$  e  $T_{pT}$  iguais à 0,5s, obtemos um ciclo de 1,0s, ou seja, uma freqüência de 1Hz (1/1). A freqüência de 2Hz seria obtida com  $T_{bT}$  e  $T_{pT}$  iguais a 0,25s, no entanto, devido à resolução da máquina, esses valores foram aproximados para 0,3s resultando numa freqüência de 1,7Hz (1/0,6). Pelo mesmo motivo a freqüência de 4Hz foi aproximada para 5Hz (1/0,2). A Figura 4.2 mostra esses valores.



$t_p(B)$  e  $t_p(P)$ , respectivamente, tempo de polaridade positiva do eletrodo na fase de base e fase pulso

$t_n(B)$  e  $t_n(P)$ , respectivamente, tempo de polaridade negativa do eletrodo na fase de base e fase pulso

Fig

$I_p(B)$  e  $I_p(P)$ , respectivamente, amplitude da corrente positiva na fase de base e fase pulso

Figura 4.2- Representação esquemática da onda retangular alternada pulsada mostrando o significado dos seus principais parâmetros característicos (adaptado de IMC - Soldagem, 2011).

A corrente eficaz,  $I_{ef}=157A$  (com e sem pulsação térmica), foi determinada segundo a expressão dada pela equação (1), onde se fixou o tempo de polaridade positiva do eletrodo,  $t_p$ , igual à 10% do tempo total,  $t_p + t_n$ ; determinados também experimentalmente para se obter uma boa relação entre penetração da zona fundida e limpeza superficial.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_p^2 \cdot T_p + I_n^2 \cdot T_n}{T_p + T_n}} \quad (1)$$

Os corpos de prova foram soldados segundo a adoção de três freqüências de inversão de polaridade, e para cada uma dessas freqüências foram adotadas mais quatro freqüências de períodos de pulsação térmica e uma sem pulsação, totalizando 15 condições diferentes e um total de 45 corpos-de-prova soldados. Para a freqüência de inversão de polaridade de 167Hz, não foram obtidos resultados satisfatórios na amplitude da corrente no tempo de polaridade positiva do eletrodo devido às características construtivas da fonte, por isso as amostras referentes à essa freqüência de inversão de polaridade não serão consideradas. A Tabela 4.3 mostra as condições de soldagem.

Tabela 4.3- Condições para a soldagem dos corpos de prova.

| Frequência do período de pulso térmico              | Frequência de inversão de polaridade do eletrodo |  |
|---|--|--|
|   | A: 50 Hz $t_n = 0,018$ s<br>$t_p = 0,002$ s      | B: 100 Hz $t_n = 0,009$ s<br>$t_p = 0,001$ s |
| 1: Sem pulso térmico                                | 3 corpos de prova:<br>A11, A12, A13              | 3 corpos de prova:<br>B11, B12, B13          |
| 2: Pulso térmico 0,5Hz<br>$T_{pt} = T_{bt} = 1,0$ s | 3 corpos de prova:<br>A21, A22, A23              | 3 corpos de prova:<br>B21, B22, B23          |
| 3: Pulso térmico 1,0Hz<br>$T_{pt} = T_{bt} = 0,5$ s | 3 corpos de prova:<br>A31, A32, A33              | 3 corpos de prova:<br>B31, B32, B33          |
| 4: pulso térmico 1,7Hz<br>$T_{pt} = T_{bt} = 0,3$ s | 3 corpos de prova:<br>A41, A42, A43              | 3 corpos de prova:<br>B41, B42, B43          |
| 5: pulso térmico 5,0Hz<br>$T_{pt} = T_{bt} = 0,1$ s | 3 corpos de prova:<br>A51, A52, A53              | 3 corpos de prova:<br>B51, B52, B53          |

As soldas foram executadas em passe único, sem adição de material, concordante com a direção de extrusão das chapas de alumínio, no centro do corpo de prova, no sentido da menor restrição (entalhe menor) para a maior restrição (entalhe maior). Os corpos de prova foram limpos e desengordurados com álcool antes dos ensaios e fixados somente por um lado, para se garantir 1 grau de liberdade nas dilatações e contrações.

#### 4.2.3 Avaliação Macroestrutural

##### Preparação das amostras

Para a realização das análises macroestruturais foi utilizada a técnica de fotografia convencional. Empregou-se 1 amostra da secção transversal do cordão de solda extraída à 30mm do início do cordão de uma única repetição de cada condição de soldagem, totalizando 15 amostras.

A preparação metalográfica se iniciou com o embutimento a frio das amostras em resina poliéster e o lixamento na seqüência 320, 400, 600, 1000 e 1500 mesh, polimento com pasta de diamante  $3\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$  e  $0,25\mu\text{m}$  e sílica coloidal  $0,03\mu\text{m}$ . Em seguida foi feito ataque por imersão utilizando o reagente de Tucker, na proporção 45ml de HCl, 15ml de  $\text{HNO}_3$ , 15ml de HF e 25ml de água destilada, em temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ , durante 60s, conforme receita do Apêndice Metalográfico ASM International (1988).

As fotomicrografias foram obtidas através da aquisição de imagem com uma câmera CCD acoplada a um estereoscópio Carl-Zeiss Citoval 2. O software usado no processo de medição da largura e da penetração do cordão de solda, L e P respectivamente, foi o Leica Application Suite (LAS-EZ). A Figura 4.3 mostra o estereoscópio e um exemplo de amostra embutida com haste metálica de alumínio para o posterior eletropolimento e anodização.



(a) Estereoscópio.



(b) Amostra embutida.

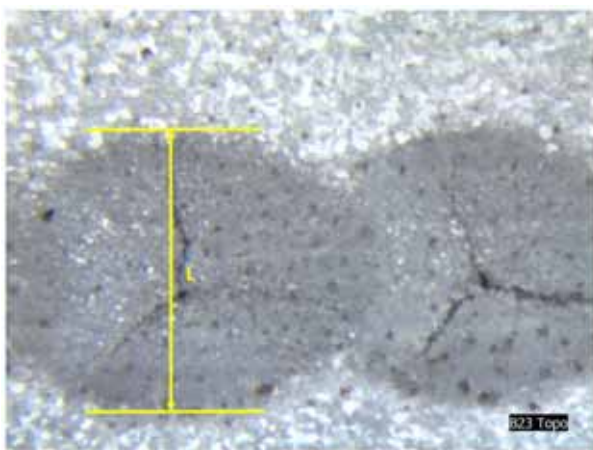
Figura 4.3- Estereoscópio Carl-Zeiss Citoval 2 e amostras embutidas.

### Determinação do coeficiente de forma

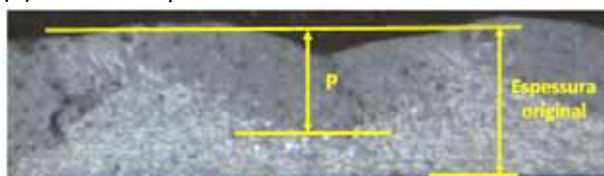
O coeficiente de forma ou fator de forma ou ainda, índice de esbeltez dos cordões, segundo foi determinado pela razão entre a dimensão da profundidade do cordão ( $P$ ) e da largura ( $L$ ),

Foram feitas 5 medições da largura do cordão na macrografia de topo em 1 amostra de cada condição de soldagem, sendo que para as baixas frequências de período de pulso térmico, foi considerada a região ao centro da poça de fusão. Do mesmo modo, foram feitas 5 medições de profundidade na macrografia longitudinal na mesma amostra de cada condição de soldagem, sendo que para as baixas frequências de período de pulso térmico, também foi considerada a região ao centro da poça de fusão. Para cada amostra foi descartada uma leitura mais desfavorável que eventualmente poderia conter um erro aleatório e calculada a média de 4 leituras.

A Figura 4.4 mostra como foram feitas as leituras no aquisitor de imagens Leica Application Suíte (LAS-EZ) para a amostra na condição de soldagem 50Hz de inversão de polaridade do eletrodo e 0,5Hz de período de pulso térmico.



(a) Vista de topo



(b) vista da secção longitudinal

Figura 4.4- Esquema mostrando como foram feitas as leituras das dimensões de largura,  $L$ , e profundidade,  $P$ , do cordão de solda.

### Medidas do comprimento de trinca

Para a avaliação do comprimento da trinca gerada em cada amostra, a superfície do corpo de prova contendo a solda foi lixada e polida para realçar todo o percurso do cordão de solda. Em seguida, essas superfícies, assim preparadas, foram analisadas no Estereoscópio Carl-Zeiss Citoval 2, e o comprimento da trinca foi medido, a partir do ponto de início do cordão de solda, utilizando, novamente, o software Leica Application Suíte (LAS-EZ).

Após a obtenção dos comprimentos de trinca para três amostras de cada condição de soldagem, compilou-se uma tabela com o comprimento médio de duas leituras, descartando-se a leitura mais desfavorável, que eventualmente poderia conter um erro aleatório. O critério adotado foi o de se considerar o menor desvio padrão.

#### 4.2.4 Avaliação microestrutural

##### Preparação das amostras

Para a realização das análises microestruturais foram utilizadas as técnicas de microscopia ótica. Foi empregada 1 amostra da secção transversal do cordão de solda extraída à 30mm do início do cordão em uma única repetição de cada condição de soldagem, totalizando 15 amostras. As amostras para a condição de soldagem de 167Hz de inversão de polaridade não foram aproveitadas, totalizando finalmente 10 amostras.

A preparação metalográfica se iniciou com o embutimento das amostras a frio em resina poliéster e o lixamento na seqüência 320, 400, 600, 1000 e 1500 mesh, polimento com pasta de diamante 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m e 0,25 $\mu$ m e sílica coloidal 0,03 $\mu$ m.

Em seguida foi feito polimento eletrolítico com eletrólito composto por ácido perclórico HClO<sub>4</sub> e álcool na proporção 700ml de etanol, 120ml de água destilada, 100ml de glicerol, 80ml de HClO<sub>4</sub> (60%), com temperatura ambiente entre 18 e 38°C, cátodo de aço inox martensítico, tensão entre 30 e 65Vcc, densidade de corrente de 0,2A/cm<sup>2</sup>, tempo de exposição entre 15 e 60s com leve agitação, conforme receita do Apêndice Metalográfico ASM International (1988) e Vander Voort (1999).

A Figura 4.5 mostra a montagem da cuba em PVC para o polimento eletrolítico.



(a) Cuba com a solução em agitação.



(b) Detalhe da amostra e do agitador.

Figura 4.5- Equipamentos utilizados para o polimento eletrolítico.

Para se conseguir melhor contraste entre os grãos, na seqüência, foi feita a anodização das amostras utilizando-se a solução de Barker na proporção de 1,8% de ácido fluorbórico em água destilada, cátodo de Al, 130mm de imersão, 10mm de distância, com temperatura ambiente em torno de 20°C, cátodo de alumínio série 1000, tensão entre 30 e 45 Vcc, densidade de corrente de 0,7A/cm<sup>2</sup>, tempo de exposição de 20s, sem agitação, conforme receita do Apêndice Metalográfico ASM International (1988) e Vander Voot (1999).

O método propicia a deposição de camadas anodizadas de diferentes espessuras conforme a orientação cristalográfica dos grãos.

Sob luz polarizada, no microscópio ótico, é possível obter contraste de cor entre os grãos em função das diferentes orientações. Por fim as amostras foram atacadas com solução de HF (48%) por imersão com tempos entre 60 e 120s.

A Figura 4.6 mostra a montagem da cuba em PET para a anodização.



(a) Cuba PET e fonte utilizadas na anodização



(b) detalhe da anodização mostrando Cátodo e amostra

Figura 4.6- Processo de anodização e detalhe mostrando amostra dentro da cuba.

Para a aquisição das imagens foi utilizado o microscópio Olympus BX51M acoplado à uma câmera digital Leica e o software Leica Application Suite (LAS-EZ). A Figura 4.7 mostra a montagem com o microscópio óptico, a câmera e o microcomputador.



Figura 4.7- Equipamentos e acessórios utilizados para aquisição de imagem microestrutural: microscópio óptico, câmera CCD e microcomputador.

### Medição do tamanho médio de grão

Para a obtenção do tamanho médio de grão na zona termicamente afetada das amostras da secção transversal do cordão de solda, foi utilizado o método prático para o processo manual, preparado pelo Subcomitê para Metalografia Quantitativa do Comitê de Metalografia da Sociedade Alemã de Materiais, publicado em *Praktische Metallografie*, 1993. O método define a média linear de tamanho de grão ( $L$ ) como a média do espaçamento dos limites de grão, obtido a partir do valor da média aritmética de todos os comprimentos de semi-retas formadas por uma ou mais linhas retas que interceptem os grãos na superfície polida.

O método recomenda o uso de duas retas paralelas com comprimento que intercepte ao menos 25 grãos, as duas retas devem estar afastadas à um intervalo entre 25% e 75% da altura da imagem e serem aplicadas em dez posições diferentes na imagem. Pode-se utilizar uma película transparente com o traçado de duas retas paralelas para facilitar as contagens. O comprimento médio do grão é obtido dividindo-se o comprimento em escala verdadeira das duas retas pelo número de grãos interceptados. O erro deve ser calculado para 95% de confiança. Tal método foi adotado justamente pela sua praticidade.

## 5. Resultados e discussão

### 5.1 Análises químicas e caracterização do metal de base

A Tabela 5.1 apresenta os valores encontrados para cada um dos componentes presentes na amostra da liga AA6063T6 utilizada, em comparação com os valores padronizados. Extraídos de Schackelford, James F. et al (2001) apud ASM Metals reference handbook, second edition, American society for metals, Metals Park, Ohio - USA, 1984.

Tabela 5.1- Teores dos principais elementos químicos da amostra de alumínio AA6063T6.

|                      | Elementos químicos ( % em peso ) |      |      |       |       |      |      |
|----------------------|----------------------------------|------|------|-------|-------|------|------|
|                      | Si                               | Fe   | Cu   | Mn    | Mg    | Zn   | Al   |
| Valores padronizados | 0,4                              | ---  | ---  | ---   | 0,7   | ---  | Bal. |
| Valores encontrados  | 0,50                             | 0,22 | 0,01 | 0,027 | 0,474 | 0,01 | Bal. |

### 5.2 Potência

As Tabelas 5.2 e 5.3 mostram os valores instantâneos de corrente e tensão obtidos com o aquisitor de sinais SAPV4.19s compilados para as diferentes condições de freqüências de pulso térmico. O sistema já apresenta os valores calculados da Potência média na base térmica assim como no pulso térmico. A Tabela 5.2 mostra os valores de potência para freqüência de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz enquanto a Tabela 5.3 mostra os valores de potência para freqüência de inversão de polaridade do eletrodo de 100Hz.

Tabela 5.2- Valores de potência par freqüência de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz.

|  | CP A23<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>0,5Hz | CP A33<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>1,0Hz | CP A43<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>1,7Hz | CP A53<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>5,0Hz | CP A13<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>sem |
|--|---|---|---|---|---|
| $U_{\text{médio}} [V]^*$               | -8,1  | -7,7  | -8,2  | -7,0  | -7,7  |
| $I_{\text{médio}} [A]^*$               | -9,9  | -9,9  | -101  | -100  | -175  |
| $P_{\text{médio}} [W]^*$               | 1424  | 1426  | 1436  | 1489  | 2519  |
| $P_{\text{média base térmica}} [W]**$  | 252   | 344   | 351   | 271   |   |
| $P_{\text{média pulso térmico}} [W]**$ | 2505  | 2505  | 2508  | 2548  |   |
| $I_{\text{eficaz}} [A]^*$              | 150   | 150   | 147   | 151   | 211   |

\* medida em um período térmico ( base térmica + pulso térmico )

\*\* medida em um período elétrico (  $t_p=0,02s + t_n=0,018s$  )

Tabela 5.3- Valores de potência para freqüência de inversão de polaridade do eletrodo de 100Hz.

|  | CP B23<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>0,5Hz | CP B33<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>1,0Hz | CP B43<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>1,7Hz | CP B53<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>5,0Hz | CP B13<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>sem |
|--|---|---|---|---|---|
| $U_{\text{médio}} [V]^*$               | -8,4  | -8,7  | -8,1  | -7,7  | -8  |
| $I_{\text{médio}} [A]^*$               | -100  | -100  | -101  | 103   | -178  |
| $P_{\text{médio}} [W]^*$               | 1357  | 1466  | 1431  | 1465  | 2439  |
| $P_{\text{média base térmica}} [W]**$  | 333   | 337   | 338   | 309   |   |
| $P_{\text{média pulso térmico}} [W]**$ | 2376  | 2386  | 2442  | 2413  |   |
| $I_{\text{eficaz}} [A]^*$              | 146   | 146   | 146   | 148   | 204   |

\* medida em um período térmico ( base térmica + pulso térmico )



\*medida em um período elétrico (  $t_p=0,02s + t_n=0,018s$  )

A Figura 5.1 mostra os valores de Potência Média Instantânea calculados pelo SAPV4.19s. Importante notar que a frequência do período de pulso térmico não altera a quantidade de potência aportada, mas tão somente a distribuição do aporte dessa potência no período.

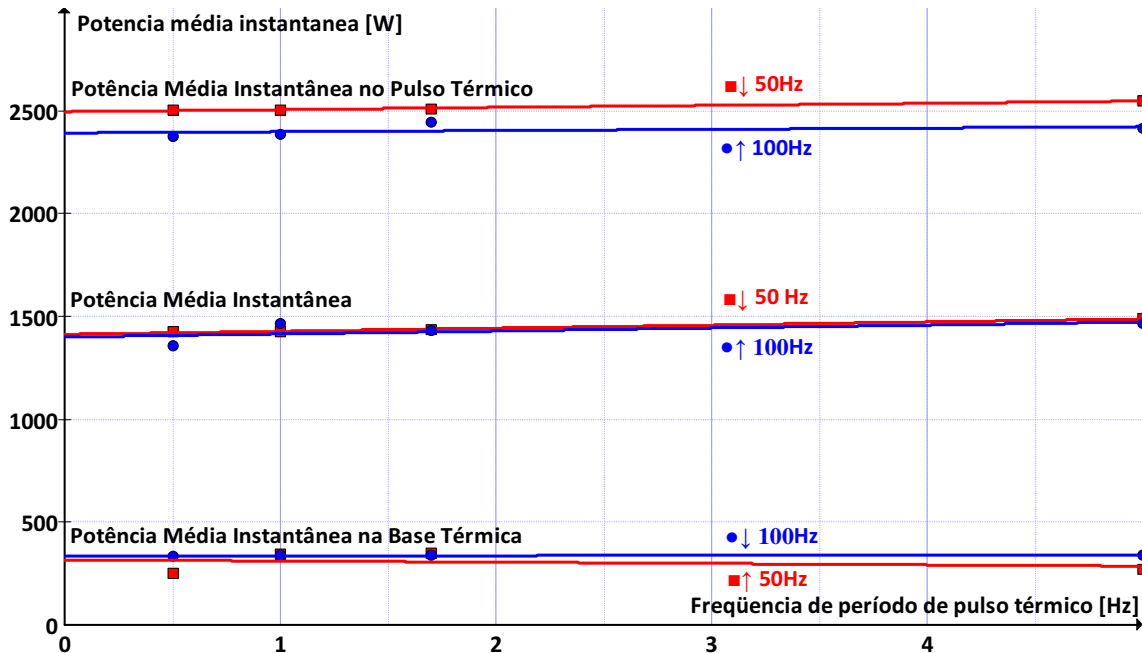


Figura 5.1- Potência média Instantânea em função da frequência do período de pulso térmico para as frequências de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz e 100Hz.

### 5.3 Fator de forma

O fator de forma foi calculado para a condição de máxima penetração, ou seja, ao centro do pulso térmico. Para a medição da largura do cordão de solda considerou-se o centro do pulso térmico, sobre as macros com vista de topo. Não foi feita sobre as macros das secções transversais, para se evitar imprecisão sobre sua posição em relação ao seu centro. Pelo mesmo motivo, para medição da profundidade do cordão de solda também considerou-se o centro do pulso térmico, sobre as macros da secção longitudinal, conforme mostra a Figura 4.4. Após o descarte de uma leitura mais desfavorável, foram calculadas as médias para 4 medições em 1 repetição de cada condição de soldagem. A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5.4- Valores para fator de forma.

| Fator de forma<br>Profundidade/Largura | Frequência inversão de<br>polaridade eletrodo 50Hz | Frequência inversão de<br>polaridade eletrodo 100Hz |
|--|--|---|
| Sem pulso térmico                      | 1,30/4,47=0,29                                     | 3,2/4,65=0,69                                       |
| Frequência de pulso térmico<br>0,5Hz   | 1,75/5,92=0,30                                     | 2,19/6,36=0,34                                      |
| Frequência de pulso térmico<br>1,0Hz   | 1,97/5,92=0,33                                     | 2,19/4,87=0,45                                      |
| Frequência de pulso térmico<br>1,7Hz   | 1,17/4,43=0,26                                     | 2,22/5,39=0,41                                      |
| Frequência de pulso térmico<br>5,0Hz   | 1,01/4,21=0,24                                     | 1,18/4,52=0,26                                      |

Na Figura 5.2, note que o aumento da freqüência de período de pulso térmico diminui a relação P/L, contribuindo assim para a diminuição à suscetibilidade na geração de trincas. Esse efeito é mais evidente para a freqüência de inversão de polaridade de 100Hz.

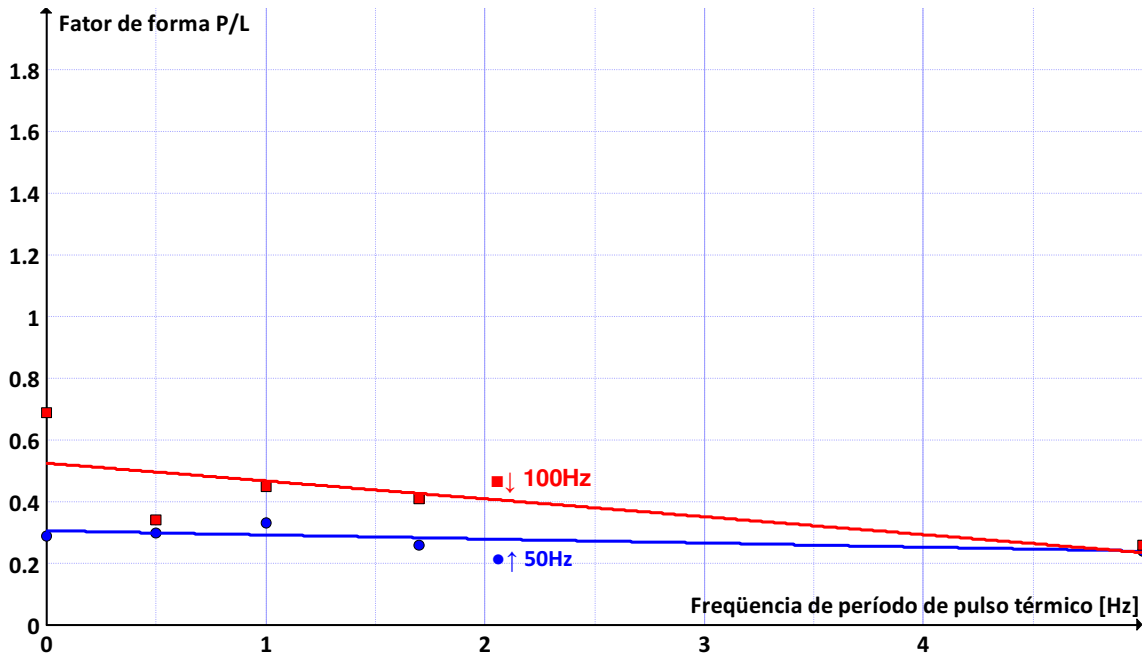


Figura 5.2. Fator de forma P/L em função da freqüência do período de pulso térmico para as freqüências de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz e 100Hz.

Poças de fusão profundas e estreitas, ou seja, maior P/L, favorecem o crescimento colunar mais horizontal em direção ao centro da poça. Tal direção de crescimento aumenta a segregação de fase líquida e de impurezas no centro da poça facilitando a geração de trincas. Por outro lado, poças de fusão menos profundas e mais largas, ou seja, menor P/L, favorecem o crescimento colunar vertical em direção também a superfície da poça. Tal direção concentra a fase líquida e as impurezas mais próximas da superfície, dificultando a geração de trincas.

Quanto maior o valor da relação P/L, ou seja, quanto mais profunda e menos estreita for a poça de fusão, maior será a tendência de geração de trinca. A Figura 5.3 mostra a influência do fator P/L na geração de trincas.

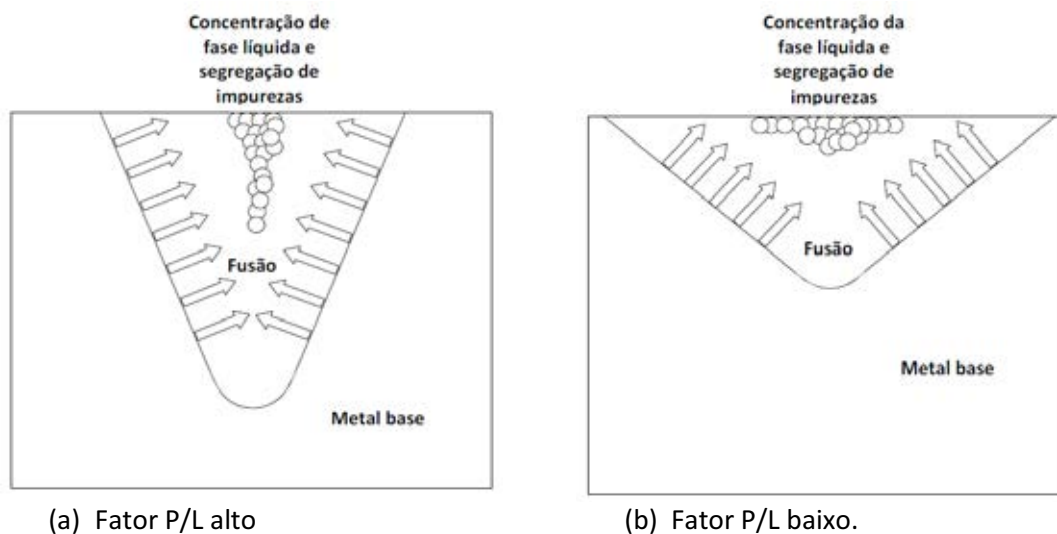


Figura 5.3- Esquema para mostrar a influência do fator P/L na geração de trincas

## 5.4 Comprimento de trinca

A tabela 5.5 Mostra o comprimento médio de trinca de duas leituras após o descarte de uma leitura desfavorável.

Tabela 5.5- Valores médios de comprimentos de trinca.

| Freqüência do período de pulso térmico | Freqüência de inversão de polaridade do eletrodo                              |   |
|--|---|---|
| 0,5 Hz                                 | Comprimento <sub>médio</sub> = 45 mm<br>Desvio <sub>(46 e 44)</sub> = 1,41 mm | Comprimento <sub>médio</sub> = 44,5 mm<br>Desvio <sub>(44 e 45)</sub> = 0,71 mm |
| 1,0 Hz                                 | Comprimento <sub>médio</sub> = 75 mm<br>Desvio <sub>(75 e 75)</sub> = 0       | Comprimento <sub>médio</sub> = 66 mm<br>Desvio <sub>(67 e 65)</sub> = 1,41 mm   |
| 1,7 Hz                                 | Comprimento <sub>médio</sub> = 76 mm<br>Desvio <sub>(76 e 76)</sub> = 0       | Comprimento <sub>médio</sub> = 69 mm<br>Desvio <sub>(68 e 70)</sub> = 1,41 mm   |
| 5,0 Hz                                 | Comprimento <sub>médio</sub> = 70 mm<br>Desvio <sub>(66 e 74)</sub> = 5,66 mm | Comprimento <sub>médio</sub> = 65 mm<br>Desvio <sub>(60 e 70)</sub> = 7,07 mm   |
| Sem pulso térmico                      | Comprimento <sub>médio</sub> = 53 mm<br>Desvio <sub>(53 e 53)</sub> = 0       | Comprimento <sub>médio</sub> = 17,5 mm<br>Desvio <sub>(22 e 13)</sub> = 6,36 mm |

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram o comprimento de trinca em função da freqüência de inversão de polaridade do eletrodo e da freqüência do período de pulso térmico, respectivamente.

A Figura 5.6 mostra o comprimento de trinca em função da freqüência do período de pulso térmico.

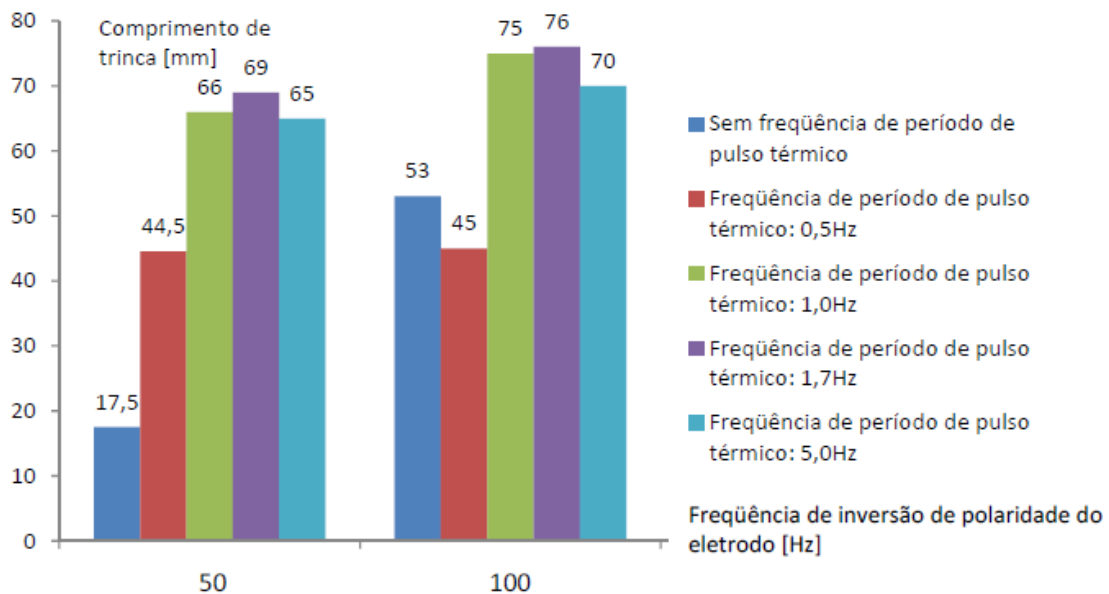


Figura 5.4- Comprimento de trinca em função da freqüência de inversão de polaridade do eletrodo.

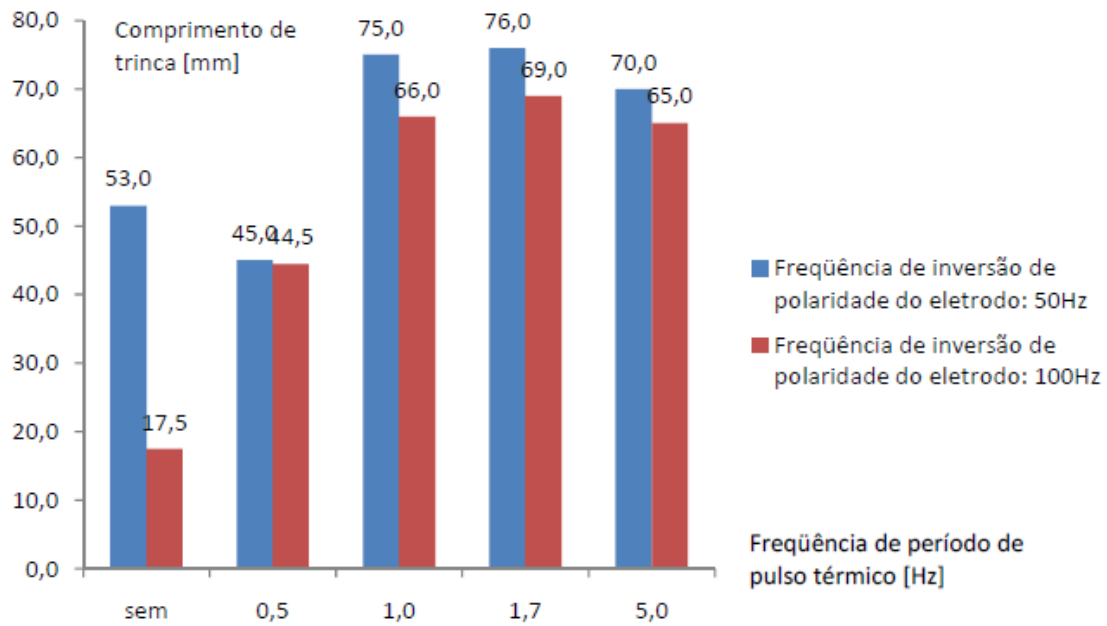


Figura 5.5- Comprimento de trinca em função da freqüência do período de pulso térmico.

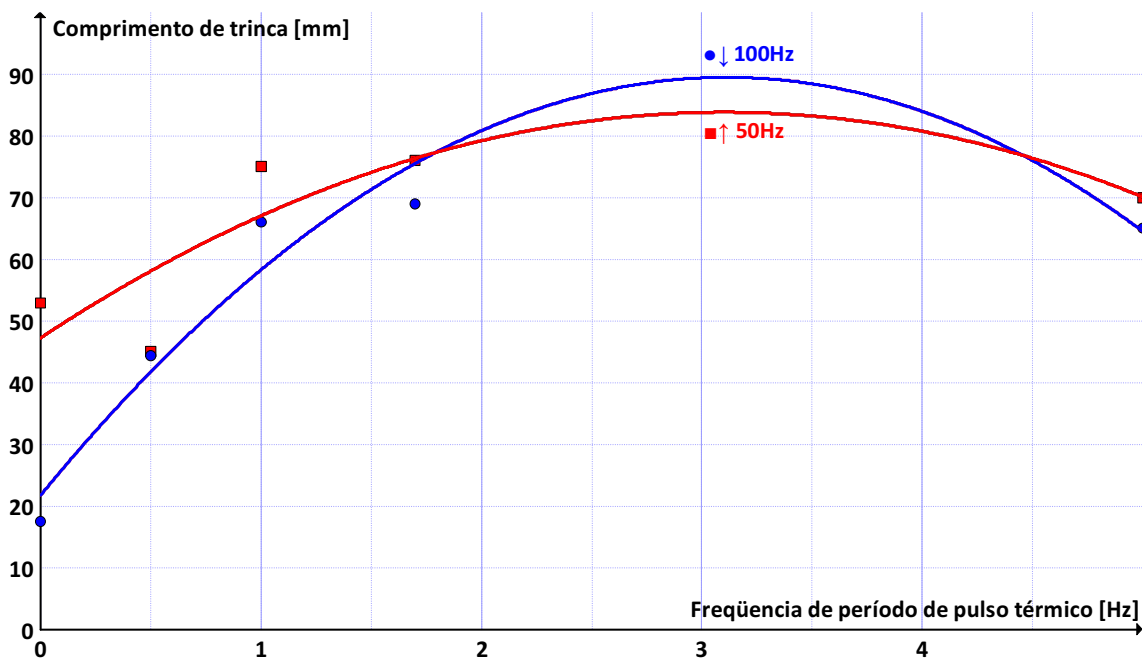


Figura 5.6- Comprimento de trinca em função da freqüência do período de pulso térmico.

As Figuras 5.7 a 5.11 mostram as fotos com as trincas para os corpos de prova na condição de freqüência de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz, enquanto as Figuras 5.12 a 5.16 mostram as trincas para os corpos de prova na condição de freqüência de inversão de polaridade de 100Hz. A régua demonstra apenas a grandeza.



Figura 5.7- Foto da trinca. Freqüência de inversão de polaridade de 50Hz e sem pulso térmico.



Figura 5.8- Foto da trinca. Freqüência de inversão de polaridade de 50Hz e pulso térmico de 0,5Hz.



Figura 5.9- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 50Hz e pulso térmico de 1,0Hz.



Figura 5.10- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 50Hz e pulso térmico de 1,7Hz.

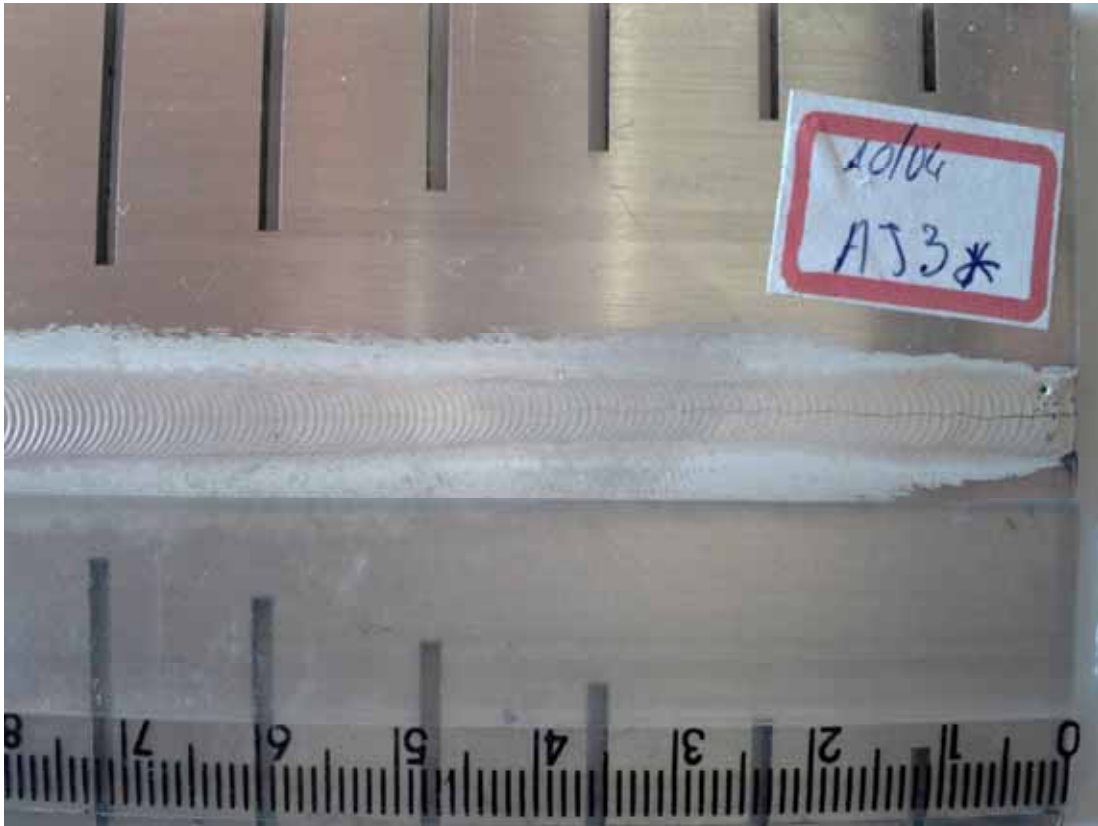


Figura 5.11- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 50Hz e pulso térmico de 5,0Hz.

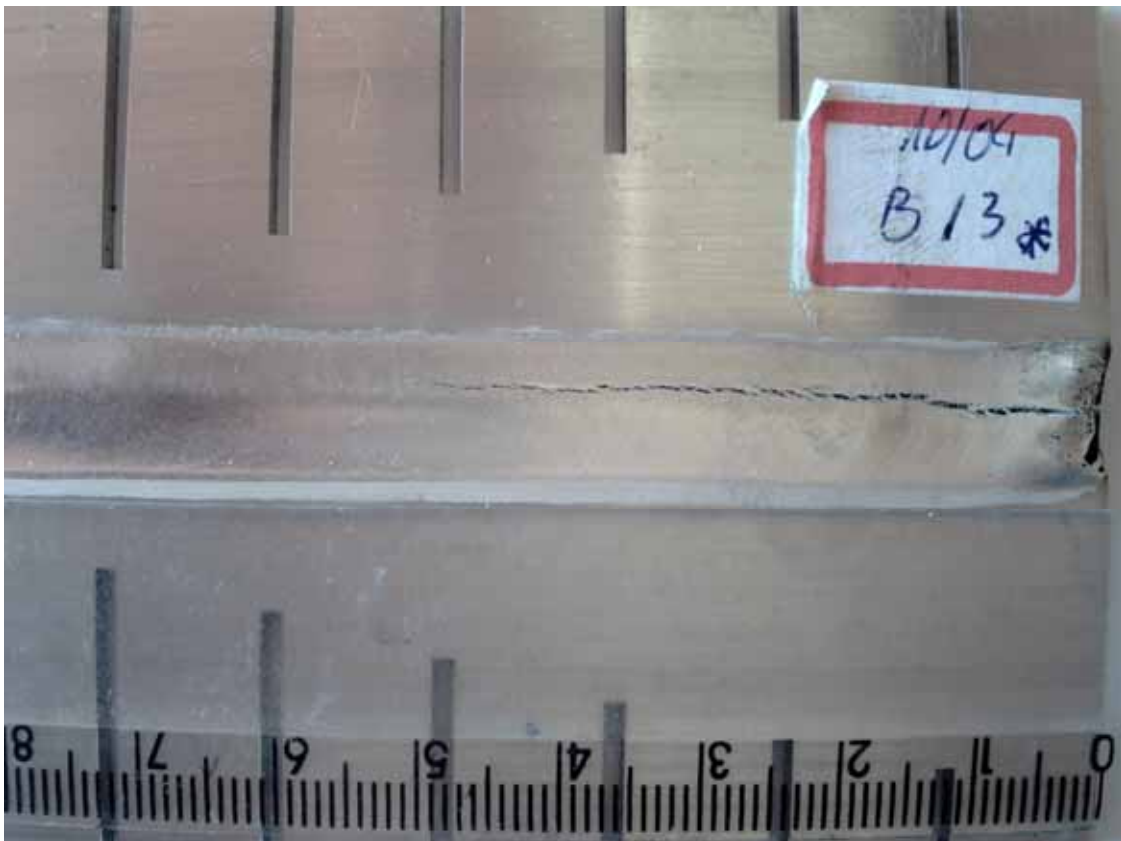


Figura 5.12- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e sem pulso térmico



Figura 5.13- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e pulso térmico de 0,5Hz.



Figura 5.14- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e pulso térmico de 1,0Hz.





Figura 5.15- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e pulso térmico de 1,7Hz.

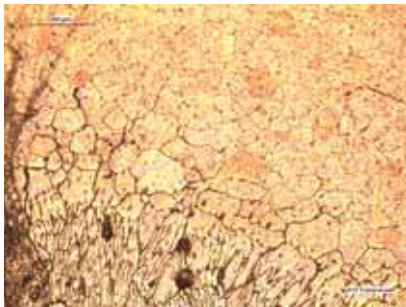


Figura 5.16- Foto da trinca. Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e pulso térmico de 5,0Hz.

## 5.5 Tamanho médio linear de grão na ZTA

A Figura 5.17 mostra os tamanhos médios lineares de grão na ZTA para a condição de freqüência de inversão de polaridade de 50Hz em função das freqüências de período de pulso térmico. Todas as medições foram feitas na secção transversal do cordão de solda afastada 30mm do início do cordão.

As micrografias da esquerda mostram o limite da zona fundida caracterizada pelo crescimento colunar dos grãos limítrofes sempre no sentido em relação ao centro da poça de fusão. Para o cálculo do erro foi considerada uma confiança de 95%.



### Condição A1

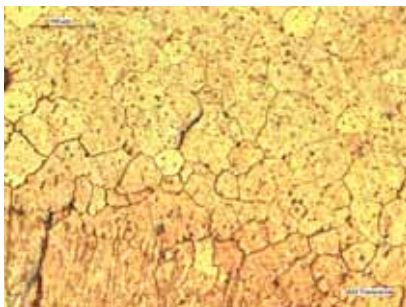
Freq. de inversão de polaridade: 50Hz

Freq. do período de pulso térmico: sem

Tamanho médio de grão na ZTA:  $72\mu\text{m} \pm 6\mu\text{m}$



Posição aproximada da micrografia



### Condição A2

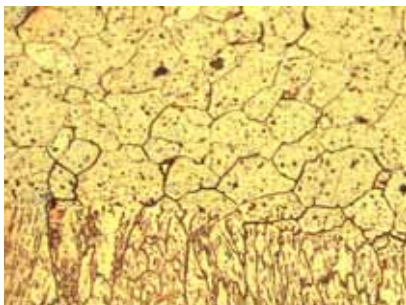
Freq. de inversão de polaridade: 50Hz

Freq. do período de pulso térmico: 0,5Hz

Tamanho médio de grão na ZTA:  $90\mu\text{m} \pm 8\mu\text{m}$



Posição aproximada da micrografia



### Condição A3

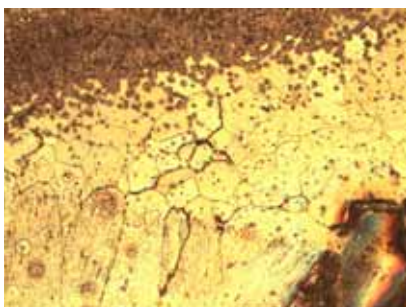
Freq. de inversão de polaridade: 50Hz

Freq. do período de pulso térmico: 1,0Hz

Tamanho médio de grão na ZTA:  $130\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$



Posição aproximada da micrografia



### Condição A4

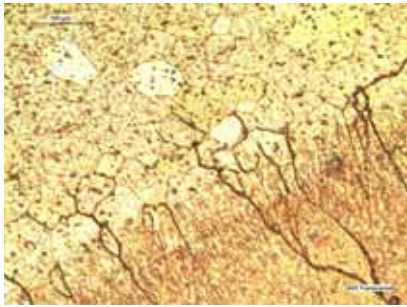
Freq. de inversão de polaridade: 50Hz

Freq. do período de pulso térmico: 1,7Hz.

Tamanho médio de grão na ZTA:  $108\mu\text{m} \pm 6\mu\text{m}$



Posição aproximada da micrografia



Condição A5

Freq. de inversão de polaridade: 50Hz

Freq. do período de pulso térmico: 5,0Hz.

Tamanho médio de grão na ZTA:  $110\mu\text{m} \pm 3\mu\text{m}$



Posição aproximada da micrografia

Figura 5.17- tamanho médio linear de grão na ZTA para a frequência de inversão de polaridade de 50Hz.

A Figura 5.18 mostra o tamanho de grão na ZTA e o comprimento de trinca em função da frequência de período de pulso térmico. A frequência de período de pulso térmico em torno de 3,0Hz define um ponto de inflexão em ambas as curvas, a partir desse ponto, aumentando-se ou diminuindo-se a frequência de pulso térmico, o comprimento de trinca tende a diminuir assim como o tamanho de grão na ZTA.

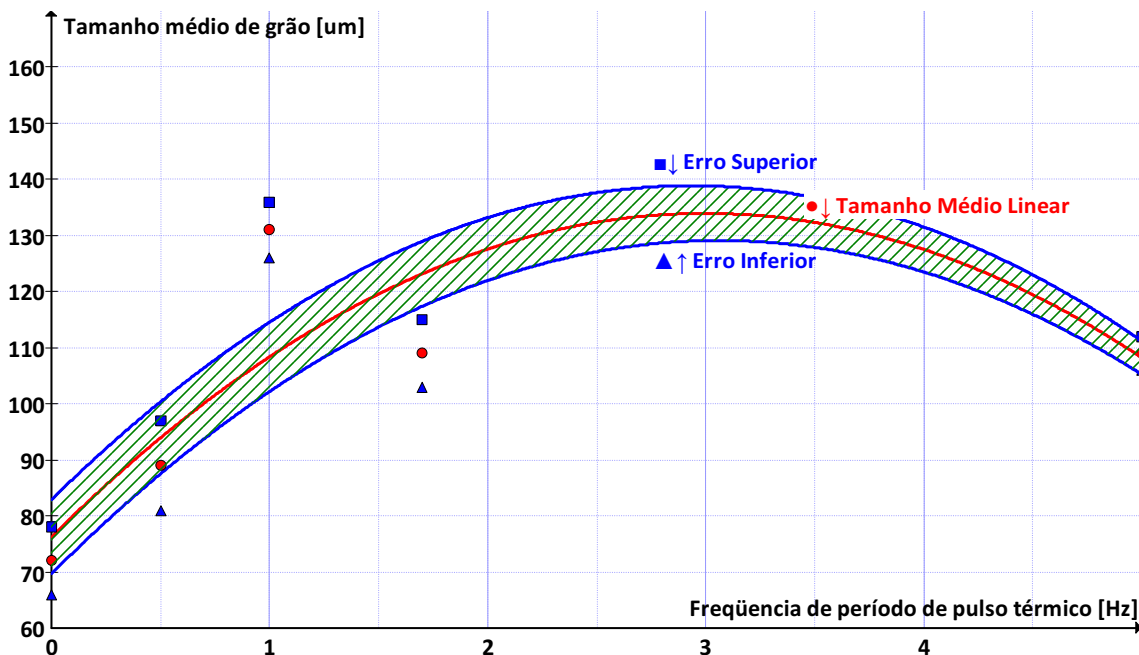


Figura 5.18- Tamanho médio de grão na ZTA, secção transversal, em função da frequência de pulso térmico para a frequências de inversão de polaridade de 50Hz.

Importante notar que o erro diminui com o aumento da frequência de período do pulso térmico, indicando maior homogeneidade na morfologia dos grãos. Notar também que a curva de comprimento de trinca (Figura 5.6) assim como a curva de tamanho de grão (Figura 5.8) são coerentes: em ambas o valor máximo de comprimento de trinca e o valor máximo de tamanho de grão correspondem à frequência de período de pulso térmico em torno de 3Hz. Para a frequência de período de pulso térmico de em torno de 1Hz, existe uma tendência para cima em ambas as curvas em ambas as frequências de inversão de polaridade. Há uma evidente correlação entre comprimento de trinca e tamanho de grão na ZTA.

A variação no tamanho de grão na ZTA, por sua vez, depende somente da forma como a potência aportada é distribuída na unidade de tempo, ou seja, da frequência do período de pulso térmico, não dependendo da intensidade de potência aportada, já que a potência média aportada é constante para todas as frequências de período de pulso térmico (Figura 5.1)

## 5.6 Efeitos da frequência do período de pulso térmico na microestrutura

### 5.6.1 Efeito da frequência do período de pulso térmico na geração de trincas

Aumentar a frequência do período de pulso térmico significa colocar maior número de pulsos térmicos por segundo, ou seja, para maiores frequência podemos entender que um número maior de pulsos térmicos mais curtos ficam bem distribuídos ao longo do comprimento do cordão, enquanto que para menores frequências, um número menor de pulsos térmicos mais longos ficam menos distribuídos ao longo do comprimento do cordão; sempre considerando a velocidade de soldagem constante. Um pulso térmico está associado à uma poça de fusão mais intensa, enquanto a base térmica está associada à uma poça de fusão menos intensa.

O aporte de calor, ou potência entregue, permanece constante. A Figura 5.1 mostra que a potência média permanece constante, não muda significativamente considerando que são valores médios instantâneos.

Quando a velocidade de soldagem é constante, podemos dizer que a principal influência da frequência do período de pulso térmico está somente na maneira como este calor é entregue, sendo que não se altera sua quantidade.

A frequência dos períodos de pulso térmico irá determinar, além do aspecto visual tipicamente escamado, o nível de agitação da poça de fusão.

De fato, Barra (2003) explica que a pulsação térmica infere a ocorrência de diferentes graus de agitação na poça de fusão, devido à mudança constante de fases de pulso térmico para base térmica; e que essa instabilidade constante pode gerar diferenças na microestrutura na zona fundida. O grau de agitação da poça de fusão varia do pulso para base em função da força eletromagnética, da força devido ao gradiente de tensão superficial, da força devido à convecção com fluxo líquido e da pressão do arco. Desse modo, a instabilidade, ou seja, o grau de agitação da poça será maior no pulso térmico.

O grau de agitação da poça está diretamente ligado à suscetibilidade à trinca, uma vez que a agitação da poça promove o refinamento dos grãos através de mecanismos como a fragmentação dentrítica, o destacamento de grãos e os modos de nucleação heterogênea e superficial. A zona fundida com o maior refinamento de grãos é, portanto, menos suscetível às trincas de solidificação, como mostra a Figura 5.17.

Quanto ao aspecto visual observa-se que na frequência de período de pulso térmico 0,5 Hz e velocidade de soldagem 3,33 mm/s; tem-se que, a cada 2s, um ciclo completo de uma base e um pulso térmico medirá o comprimento de 6,66mm, sendo 3,33mm do pulso e 3,33mm da base. Em outras palavras, as escamas ficam distanciadas 3,33mm uma das outras. Do mesmo modo, para a frequência térmica de 1 Hz temos que as escamas ficam distanciadas 1,67mm; para 1,7Hz, 0,84 mm, para 5Hz, 0,42 mm.

Para os efeitos da frequência térmica na microestrutura da zona fundida, Barra (2003) através de resultados experimentais demonstra que a frequência térmica tem influência sobre a microestrutura no tamanho e forma dos grãos. Estima-se que os mecanismos envolvidos nessas alterações estejam relacionados principalmente com o grau de agitação da poça de fusão e também com a quantidade de calor aportado. Considerando o PMC (parâmetro de modo de crescimento) tem-se que, para baixas frequências térmicas, o diâmetro médio é reduzido e há um alongamento do grão em torno de 1,5x na direção do crescimento ( $PMC > 1$ ). Para frequências térmicas maiores, o modo de crescimento tende para equiaxial ( $PMC > 1$  em 2,5 Hz).

De fato, em concordância, ao compararmos a curva dos comprimentos médios de trinca com a curva dos tamanhos médios de grão, verificamos que ambas apresentam uma inflexão para a frequência de pulsação em torno de 3Hz. Conforme mostram as Figuras 5.6 e 5.18.

Becker et al (1979) e Sundaresan (1999) apud Barra (2003) reforçam a idéia de que o crescimento radial dos grãos propiciado pela soldagem TIG com pulsação térmica é positivo do ponto de vista da suscetibilidade da ocorrência de trincas na zona fundida, ou seja, serve de barreira à propagação das trincas.

### 5.6.2 Efeito da frequência de período de pulso térmico no gradiente de extração de calor

Quanto aos efeitos da distância entre pulsos térmicos na microestrutura, temos que, em uma soldagem autógena de baixa frequência de pulsação térmica, os pulsos térmicos ficam mais distanciados uns dos outros, ou seja, as poças de fusão ficam afastadas. Aumentando-se a frequência de pulsação térmica, e mantendo-se a velocidade de soldagem constante, os pulsos térmicos aproximam-se, e as poças de fusão ficam mais próximas, chegando a sobrepor-se, em parte, umas sobre as outras. Essa proximidade das poças, uma em seguida da outra, acaba por formar o “cordão” de solda com o desenho característico “escamado”, conforme mostrado na Figura 5.19.

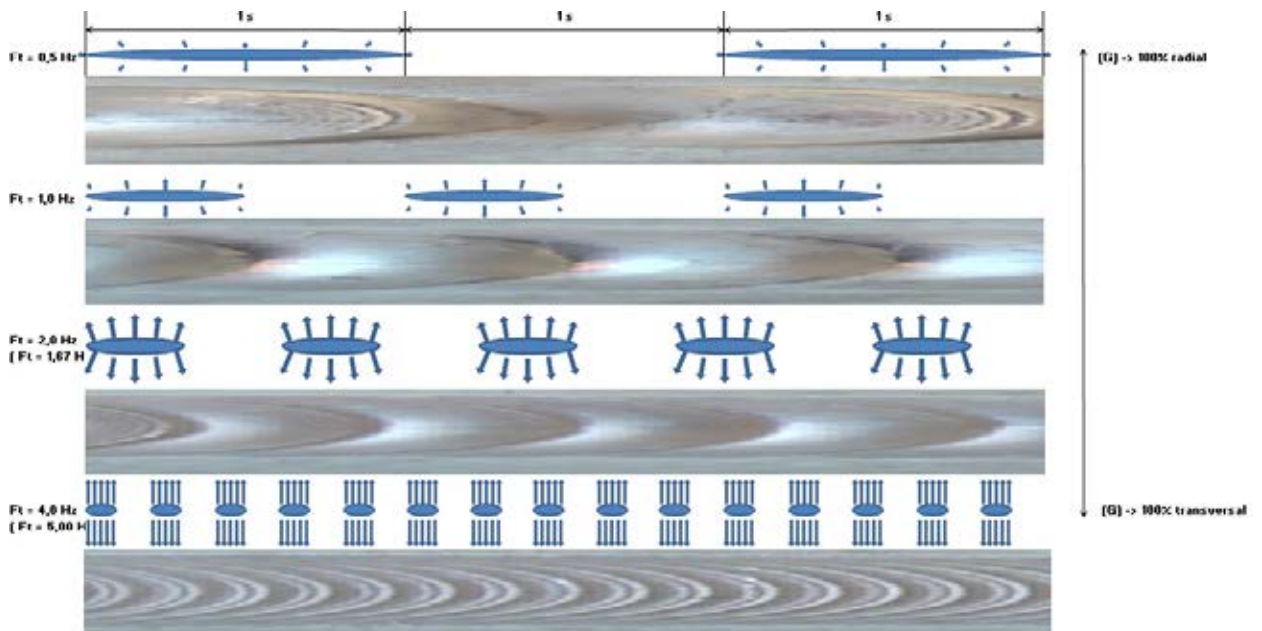


Figura 5.19- Esquema mostrando, na poça de fusão, como o gradiente G muda de tendência radial para tendência transversal em função da distância dos pulsos térmicos.

A frequência do período de pulso térmico pode então alterar o perfil do gradiente de extração de calor (G). Para poças de fusão afastadas (baixa frequência de pulsação térmica) o gradiente tende a manter-se uniforme em todas as direções do plano (direções radiais). Para poças de fusão mais próximas (aumento na frequência de pulsação térmica) o gradiente tende a diminuir na direção entre uma poça e a poça subsequente.

No limite, para poças de fusão muito próximas umas das outras, na formação do cordão, o gradiente entre uma poça e sua subsequente praticamente deixa de existir. Persiste, somente o gradiente na direção perpendicular ao cordão em formação. Nessa situação passa a ocorrer um crescimento competitivo entre as estruturas de solidificação. As estruturas com a mesma direção do gradiente maior, isto é, o gradiente perpendicular ao cordão em formação, crescem mais rapidamente prevalecendo sobre as estruturas com gradiente menor ou inexistente na direção do cordão.

Para frequências de pulsação térmicas maiores, quando poças de fusão ficam mais próximas umas das outras, a formação de trincas em formato radiante ou de cratera desaparece, prevalecendo então em cada poça de fusão, trincas orientadas na direção do cordão em formação. Após o resfriamento da zona fundida, essas trincas tendem a se expandir, chegando a emendarem-se umas com as outras formando a trinca característica de solidificação, sempre na direção do cordão de solda.

Para determinadas situações, podem persistir ainda as trincas com tendência à formação radiante ou de cratera. Nesses casos, quando a trinca tende a expandir-se após o resfriamento pode ocorrer de uma ponta da trinca radiante não se “emendar” com a radiante subsequente. Forma-se então uma trinca não contínua, com interrupções chamadas pontes, ao longo do cordão de solda, como mostrado na Figura 5.20 (a) e (b), respectivamente.



(a) Formação radiante ou de cratera.  
(condição A2)



(b) Formação de pontes.  
(condição A1)

Figura 5.20. Formação de trincas do tipo radiante e com pontes.

Barra (2003) através de resultados experimentais demonstra que a distância entre pulsos térmicos tem influência sobre a microestrutura da zona fundida, ou seja, tamanho e forma do grão. Barra estima que os mecanismos envolvidos nessas alterações estejam relacionados principalmente com a quantidade de calor aportado e também com o grau de agitação da poça. Para pequenas distâncias entre pulsos térmicos, o tamanho médio do grão na ZF é menor e o modo de crescimento que prevalece é o equiaxial ( $PMC = 1$ ). Para distâncias maiores, o modo de crescimento muda rapidamente para colunar ( $PMC = 3,5$ ). Até a distância de 5mm o tamanho médio do grão aumenta e, a partir de 5mm o tamanho do grão diminui. A variação no tamanho do grão tem relação direta com a mudança do modo de crescimento. A medida que a distância aumenta, o grão tende a ficar mais longo e menos largo.

Quanto ao efeito da pulsação térmica na subestrutura da zona fundida, Palma et al (1984), Brandi et al (1992) e Svensson (1994) apud Barra, S. (2003) observam que a variação do espaçamento nos ramos interdentríticos influi nas propriedades mecânicas do metal de solda, sendo que espaçamentos menores atuam de forma favorável sobre as propriedades mecânicas e requerem menor tempo para homogeneização dos cristais. Os ramos dentríticos são mais grosseiros no início do pulso térmico e mais refinados na base térmica. O pulso térmico apresenta um alto valor de corrente, portanto um maior calor aportado, sendo então esperada uma estrutura grosseira dos ramos dentríticos, ou seja, maior espaçamento dos braços dentríticos secundários. A base térmica apresenta um baixo valor de corrente, portanto um menor calor aportado, sendo então esperada uma estrutura refinada dos ramos dentríticos. O produto  $G.R$  que governa a escala da estrutura solidificada será maior na base térmica porque  $G$  aumenta devido à redução do calor aportado.

A redução na região grosseira pode ser alcançada com a redução no tempo de imposição da corrente no pulso térmico.

## **6- Conclusões**

A soldagem TIG com pulsação térmica, assim como a maior frequência de inversão de polaridade, na liga AA6063T6 se mostrou efetiva no refinamento dos grãos na região da ZTA e da ZF, e é positiva quanto à suscetibilidade da ocorrência de trincas na zona fundida, ou seja, serve de barreira à propagação de trincas, especialmente nas frequências acima de cerca de 3Hz.

## **7- Sugestões para trabalhos futuros**

Aprofundar o estudo sobre a influência da pulsação térmica na micro estrutura das ligas de alumínio utilizando chapas mais finas e MEV.

Utilizar recurso de termografia para analisar o fluxo de calor em função das diferentes frequências de pulsação térmica.

## 8. Bibliografia

- Anderson, T. How to avoid cracking in aluminum alloys. *Welding Journal*, v. 84, n.9, pp 25-27, sept 2005.
- Angélico, C. (2012) Soldagem TIG-AC onda retangular: efeitos da velocidade de soldagem sobre as propriedades mecânicas da liga AA 6063 T6. Dissertação de mestrado. Unesp – Bauru - SP, 2012
- AWS, (1991) Aluminium and aluminium alloys. *Welding Handbook* 8o. ed., v2, cp1, pp2-117
- AWS, (1991) Gas tungsten arc welding . *Welding Handbook* 8o. ed., v3, cp3, pp 74-106
- Adamiec, J. (2010) Influence og design factors on weldability of the AZ91E alloy. *Archives of foundry engineering / Issue special*, jan 2010, v10, pp 339-344, 2010.
- Adamiec, J. (2011) The influence of construction factors of the weldability of AZ91E alloy. *Archives of metallurgy and materials*, feb 2011, v56, pp 769-778, 2011.
- Adamiec, J. (2011) The assessment of impact of construction factors on weldability of MSRB Alloy. *Materials science forum – Trans tech publications Switzerland*, 2011, v690, pp 37-40, 2011.
- Balasubramanian, K.; Kesavand, V. B. (2011) Studies on the effect of vibration on hot cracking and grain size in AA7075 aluminium alloy welding. *International journal of engineering science and technology*, jan 2011, v.3, pp 681-686, 2011.
- Barra, S. R. Os efeitos da pulsação térmica na soldagem MIG/MAG. *Corte e Conformação*, out. 2008.
- Brandi, S. D.; Rigo, O. D.; Patinetti Fo., E. (1992) Efeitos dos parâmetros de soldagem do processo TIG autógeno no aparecimento de trincas de solidificação em liga de alumínio tipo 6063. II Congresso regional latino americano de soldagem do IIW, Rio de Janeiro - RJ, abril 1992.
- Cary, H. B. (2002) *Modern Welding technology*. Prentice Hall, 5o. ed, New Jersey, 2002.
- Cirino, L. M.; Dutra, J. C. (2009); A influencia do tempo de atuação da polaridade positiva na soldagem TIG CA do alumínio. *Soldagem inspeção*, SP, abr/jun 2009, v14, PP 131-139, 2009.
- Coniglio, N.; Cross, C. E.; Michael, T.; Lammers M. (2008) Defining a critical weld dilution to avoid solidification cracking in aluminium. *Welding Journal*, sep 2008, v.87, pp 237-247, 2008.
- Coraini, R. ( 2010 ) Soldagem GMAW robotizada de alumínio: influencia do tipo de chanfro, tecimento e sentido de laminação na distorção angular. III seminário de pós graduação em engenharia mecânica - UNESP – Bauru SP, 2010-
- Coutinho, T. A. (1980) *Análise e Prática Metalográfica de não Ferrosos*, Edgard Blücher, São Paulo, 1980
- Destefan, D. (1995) Basics to know when choosing a GTAW power source. *Welding Journal*, jan 1995, pp 67-72, 1995.
- Dike, J. J.; Brooks, J. A.; Bammann, D. J. (1997) Finite element modeling of weld solidification cracking in 6061-T6 aluminium – applicability of strain based criteria. The 2o. international symposium of thermal stresses and related topics, Rochester institute of technology, Rochester-NY, jun 1997.
- Dike, J. J.; Brooks, J. A.; Bammann, D. J.; Li, M.; Krafcik, J. S.; Yang, N. Y. C. (1997) Predicting weld solidification cracking using damage mechanics – LDRD summary report. Sandia national laboratories, Albuquerque -New Mexico for The United States Department of Energy, 1997.
- Dutra, J. C.; Cirino, L. M.; Silva, R. H. G. (2010) AC-GTAW of aluminium – new perspective for evaluation of role of positive polarity time. *Science and technology of welding and joining*, v 15, no.7, pp 632-637, 2010.
- Dvornak, M. J.; Frost, R. H.; Olson, D. L. Influence of solidification kinetics on aluminum weld grain refinement. *Welding Journal*, v.68, n. 10, pp 271s-276s, oct. 1991.
- Espósito, I. M.; Buso, S. J.; Monteiro, W. A.; (2006) Caracterização mecânica e microestrutural da liga Al 6063 após tratamentos termomecânicos. 17º Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais Foz do Iguaçu-PR, Nov 2006.



- Fortain, J. M.; Rimano, L. E. e Vaidya, V. (2008) Innovative process improves welding of sheet metal parts. *Welding Journal*, v.87, n.1, jan 2008.
- Fuerschbach, P. W. (1998) Cathodic cleaning and heat input in variable polarity plasma arc welding of aluminium. *Welding Journal*, v.77, n. 2, pp76-85, fev 1998.
- Ghosh, P. K.; Gupta, P. C.; Somani, R. (2002) Influence of pulse parameter on bead geometry and HAZ during bead on plate deposition by MIG welding process.
- Goodwin, G. M. (1990) Test methods for evaluating hot cracking: review and perspective. Office of fusion energy, US department of energy, 1990.
- Katoh, M.; Nishio, K.; Mukae, S. (1994) A comparison of the conventional and reverse Houldcroft type hot cracking test in A5052 aluminium alloy sheet. *Quarterly journal of Japan Welding society*, v12, pp 179-185, 1994.
- Kierzek, A., Adamiec, J. (2011) Evaluation of susceptibility to hot cracking on magnesium alloy joints in variable stiffness condition. *Archives of metallurgy and materials*, fev 2011, v56, pp759-767, 2011
- Kolarik, L.; Kovanda, K.; Vondrous, P.; Dunovsky, J. (2012) Houldcroft weldability test of aluminium alloy em AW 6082 T6. *Scientia agriculturae bohémica*, v43, no.1, pp 14-21, 2012
- Kolarik, L.; Kovanda, K.; Valova, M.; Vondrous, P.; Dunovsky, J. ( 2011 ) Weldability test of precipitation hardenable aluminium alloy en AW 6082 T6. *M. M. Science journal*, jul 2011, pp 242-247, 2011.
- Kolarik, L.; Vondrous, K. P.; Dunovsky, J. Houldcroft Weldability test of aluminum alloy en AW 6082T6. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 43, 2012 (1): 14-21.
- Kou, S.; Lee, Y. Grain structure and solidification cracking in oscillated arc welds of 5052 aluminum alloy. *A Metallurgical Transactions*, v.16A, pp 1345-1352, jul. 1985.
- Kou, S. (2007) *Welding Metallurgy*, A Wiley interscience publication, New Jersey, USA, 2007
- Krüger, U. (1994) *Weldability / Training in aluminium application technologies / lecture 4202*. EAA European Aluminium Association, 1994.
- Kumar, R.; Diltey, U.; Dwivedi, D. K.; Ghosh, P. K. (2009) Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding. *Materials and design, Elsevier Journal*, 2009, pp306-313, 2009.
- Lucas, R. P.; Dutra, J. C. (2010); Avaliação da soldagem do alumínio nos processos TIG CA pulsado e constante. XXXVI Consolda – Congresso nacional de Soldagem Recife-PE, 2010.
- Matsuda, F.; Nakata, K.; Tsukamoto, K.; Johgan, S. (1985) Combined effect of current pulsation and Zr addition on improvement of solidification cracking of Al-Zn-Mg alloy weld metal / effect of additional element on weld solidification crack susceptibility of Al-Zn-Mg alloy-report IV. JWRI / Welding Research Institute of Osaka university, 1985.
- Matsuda, F.; Nakata, K.; Harada, S. (1980) Moving characteristics of weld edges during solidification in relation to solidification cracking in GTA weld of aluminium alloy thin sheet. JWRI / Welding research institute of Osaka university, Osaka, Japan, sept 1980.
- Metallography appendix (1988) ASM International – The materials information society, New York, 1988
- Modesi, P. J.; Marques, P. V.; Santos, D. V. Introdução à Metalurgia da soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais - Dep. de Eng. Metalúrgica e Materiais- Belo horizonte, 2006.
- Nascimento, A. S. do; Batista, M. de A.; Nascimento, V. C. do; Scotti, A. (2006) Avaliação dos métodos de cálculo de potência elétrica em soldagem a arco. 16º PosMec – UFU – Uberlândia – MG, 2006.
- Pang, Q.; Pang, T.; McClure, J. C.; Nunes, A. C. (1994) Workpiece cleaning during variable polarity plasma arc welding of aluminium. *ASME Journal of engineering for industry*, v116, pp463-466.
- Pereira, M. (1992) Análise da ocorrência de trincas de solidificação através do teste de Houldcroft em liga de Al-Mg-Si do tipo 6351, soldado pelo processo TIG, com alta frequência de pulsação do arco. Dissertação de mestrado. USP-SP, 1992.

- Petzow, G. (1999) Techniques for Metallography Ceramography and plastography, ASM International the Materials Information Society, New York, 1999.
- Praktice metallography - Quantitative analysis of microestruure (1993) Metallography committee of the german society for materials, 1993
- Richardson, M. (1995) Semiautomatic could wire feedersystems increase GTA productivity. Welding Journal, v74, n. 1, jan 1995.
- Sammons, M. (2000) Inverter based GTA welding machines improve fabrication. Welding journal, v.79, n. 5, may 2000.
- Schempp, P.; Cross, C. E.; Pittner, A.; Oder, G.; Neumann, R. S.; Rooch, H.; Dörfel, I.; Österle, W. and Rethmeier, M. (2014) Solidification of GTA aluminium weld metal: part I – grain morphology dependent upon alloy composition and grain refiner content. Welding Journal, feb 2014, v. 93, pp 53-59, 2014.
- Schempp, P.; Cross, C. E.; Pittner, A.; Rethmeier, M. (2014) Solidification of GTA aluminium weld metal: part II Thermal conditions and model for columnar-to-equiaxed transition. Welding Journal, feb 2014, v. 93, pp 69-77, 2014.
- Schwedersky, M. B.; Dutra, J. C. (2010); Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. XXXVI Consolda – Congresso nacional de soldagem Recife-PE, 2010.
- Shackelford, J. F., Alexander, W. (2001) Materials science and engineering handbook, 3o. ed, CRC Press LCC, Boca Raton, 2001.
- Scotti, A.; Dutra, J. C.; sanches, H. A. (1998) O efeito dos parâmetros de ajuste na estabilidade e geometria de cordão de soldagem TIG com onde retangular. XXIV Encontro nacional de tecnologia da soldagem / XI Congresso latino americano e V Ibero americano de soldagem, Fortaleza-CE, 1998.
- Scotti, A.; Dutra, J. C.; Ferraresi, V. A. (2000); The influency of parameters setting on catodic self-etching during aluminium welding. Journal of materials processing technology, n. 100, pp 179-187, 2000.
- Shibahara, M.; Serizawa, H.; Murakawa, H. (2001) Finite element analisys of hot cracking under welding using temperature dependent interface element. The international society of offshore and polar engineers, sep 2001, vIV, 2001
- Shibahara, M.; Serizawa, H.; Murakawa, H. (2001) Finite element method for hot cracking using temperature dependent interface element ( report II ) mechanical study of houldcroft test. JWRI / Joining and welding research institute of Osaka university, Osaka, Japan, jul 1998, v29, 2000.
- Stava, E. K. (1999)The basics of GTA welding machines. Welding journal, v.78, n. 8,pp33-36, aug 1999.
- TIG Handbook (2002) TIG handbook for GTAW Gas Tungsten Arc Welding. Bohnart, E. R., Miller Eletric Mfg, 2002
- Tretyak, N. G.; Ishchenko, A. Y.;Yavorskaya, M. R.; (1995) Susceptibility of aluminium-lithium alloys to hot cracking in welding. Welding in the world / Le soudage dans le monde, v 35, no. 1, pp 44-47, 1995.
- Vander Voot,, G. F. (1999) Metallography – principles and Practice, ASM International the Materials Information Society, New York, 1999.
- Yarmuch, A. R.; Patchett, B. M. (2007) Variable Ac C polarity GTAW fusion behavior in 5083 aluminium. Welding Journal, v.86, n.7, pp196-200, jul 2007.

## APÊNDICE A: Aquisição de dados para frequência de inversão de polaridade do eletrodo de 50Hz

A Tabela A.1 mostra os valores médios de tensão, corrente, potência na base térmica, potência no pulso térmico e a corrente eficaz para a frequência de inversão de polaridade de 50Hz. Esses valores foram calculados pelo software SAPV4.19s para a região selecionada utilizando os valores instantâneos aquisitados.

As Figuras de A.1 a A.5 mostram os gráficos da tensão, corrente e potência instantâneo em função do tempo para as frequências de período de pulso térmico de, sem pulso; 1,0Hz; 2,0Hz; 1,7Hz e 5,0Hz respectivamente. Note que a frequência do período de pulso térmico corresponde ao inverso do período selecionado e esse por sua vez compreende metade do tempo na base térmica e metade do tempo no pulso térmico.

Tabela A.1- Resultados e gráficos obtidos com o aquisitor de sinais SAPV4.19s (referência selecionada)

| Freqüência de inversão de polaridade de 50Hz | de CP A23<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>0,5Hz | de CP A33<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>1,0Hz | de CP A43<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>1,7Hz | de CP A53<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>5,0Hz | de CP A13<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>sem |
|--|--|--|--|--|--|
| U <sub>médio</sub> [V]*                      | -8,1   | -7,7   | -8,2   | -7,0   | -7,7   |
| I <sub>médio</sub> [A]*                      | -9,9   | -9,9   | -101   | -100   | -175   |
| P <sub>médio</sub> [W]*                      | 1424   | 1426   | 1436   | 1489   | 2519   |
| P <sub>média base térmica</sub> [W]**        | 252  | 344  | 351  | 271  | Sem  |
| P <sub>média pulso térmico</sub> [W]**       | 2505   | 2505   | 2508   | 2548   | Sem  |
| I <sub>eficaz</sub> [A]*                     | 150  | 150  | 147  | 151  | 211  |

\* medida em um período térmico ( base térmica + pulso térmico )

\*\* medida em um período elétrico ( tp=0,02s + tn=0,018s )

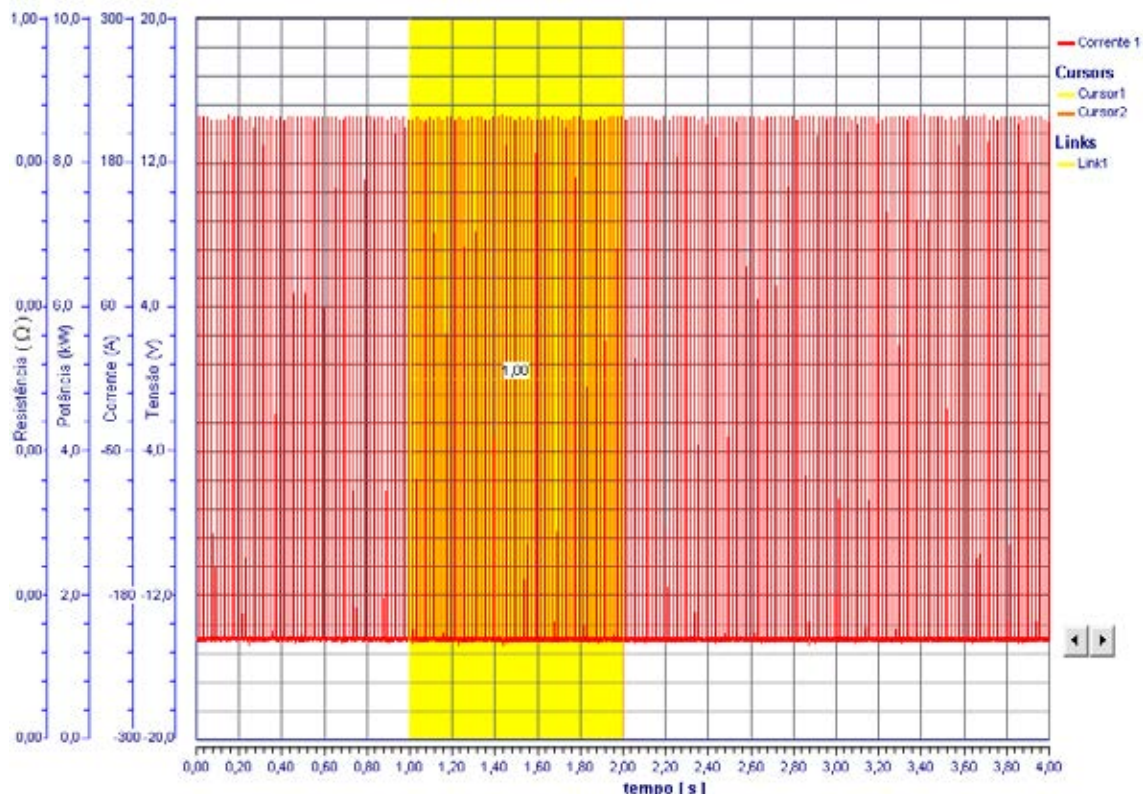


Figura A.1: CP A13- Frequência de inversão de polaridade de 50Hz e sem pulso térmico.

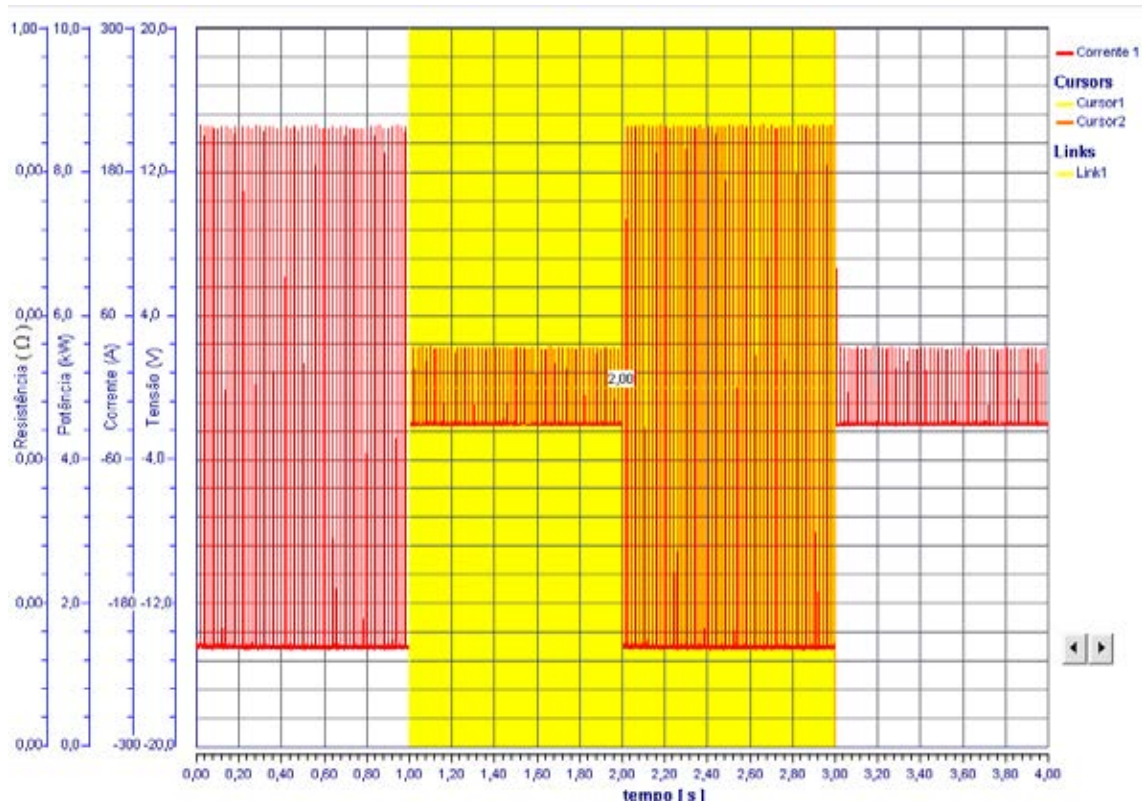


Figura A.2- CP A23: Frequência de inversão de polaridade de 50Hz e frequência de pulso térmico de 0,5Hz.

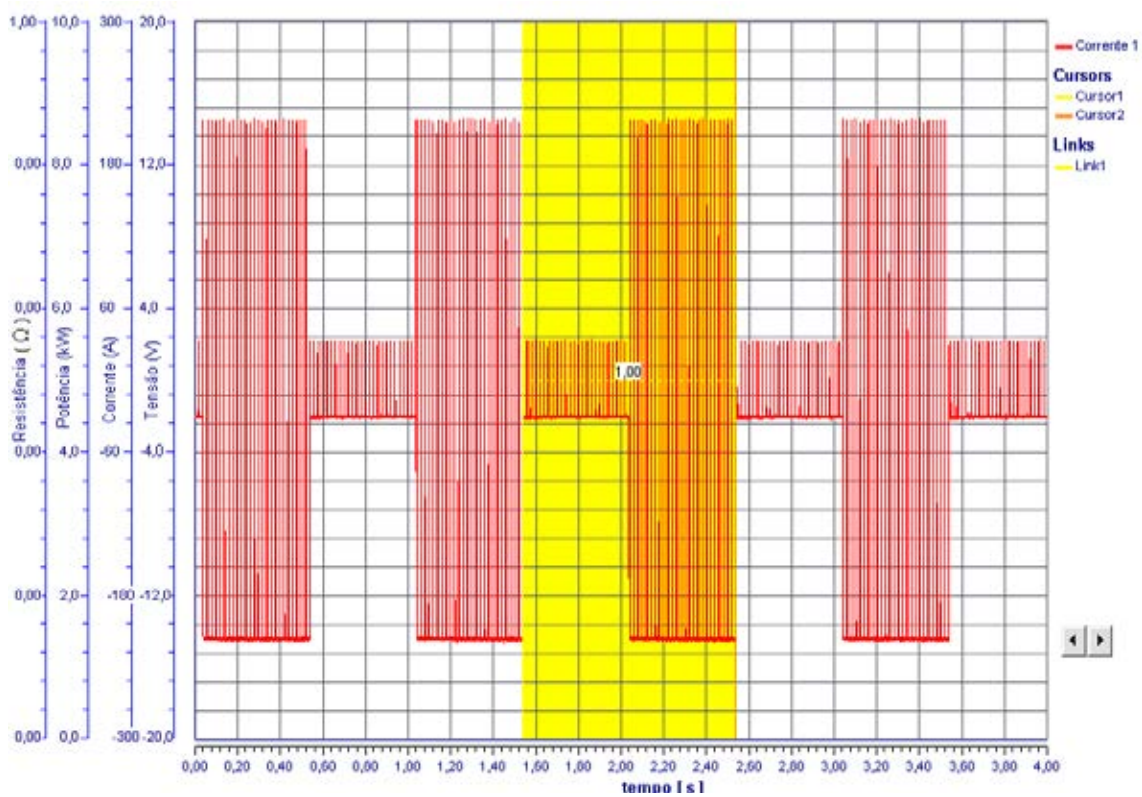


Figura A.3- CP A33: Frequência de inversão de polaridade de 50Hz e frequência de pulso térmico de 1,0Hz.

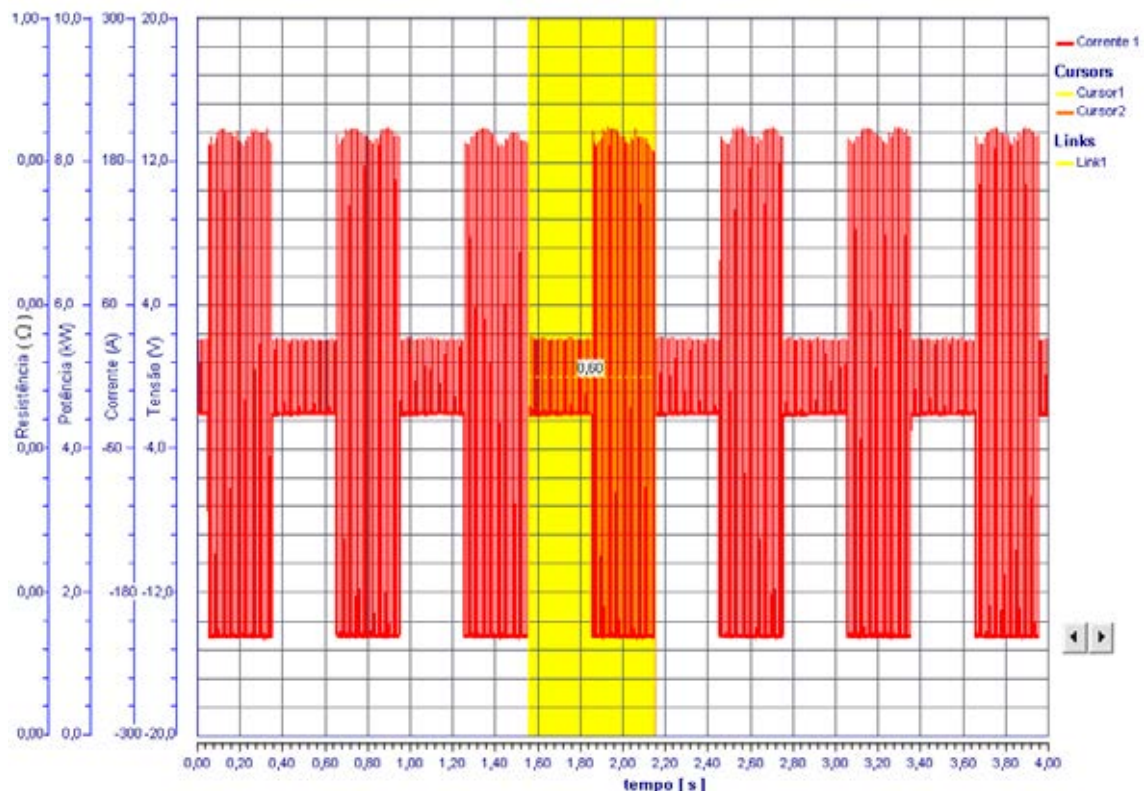


Figura A.4- CP A43: Freqüência de inversão de polaridade de 50Hz e freqüência de pulso térmico de 1,7Hz.

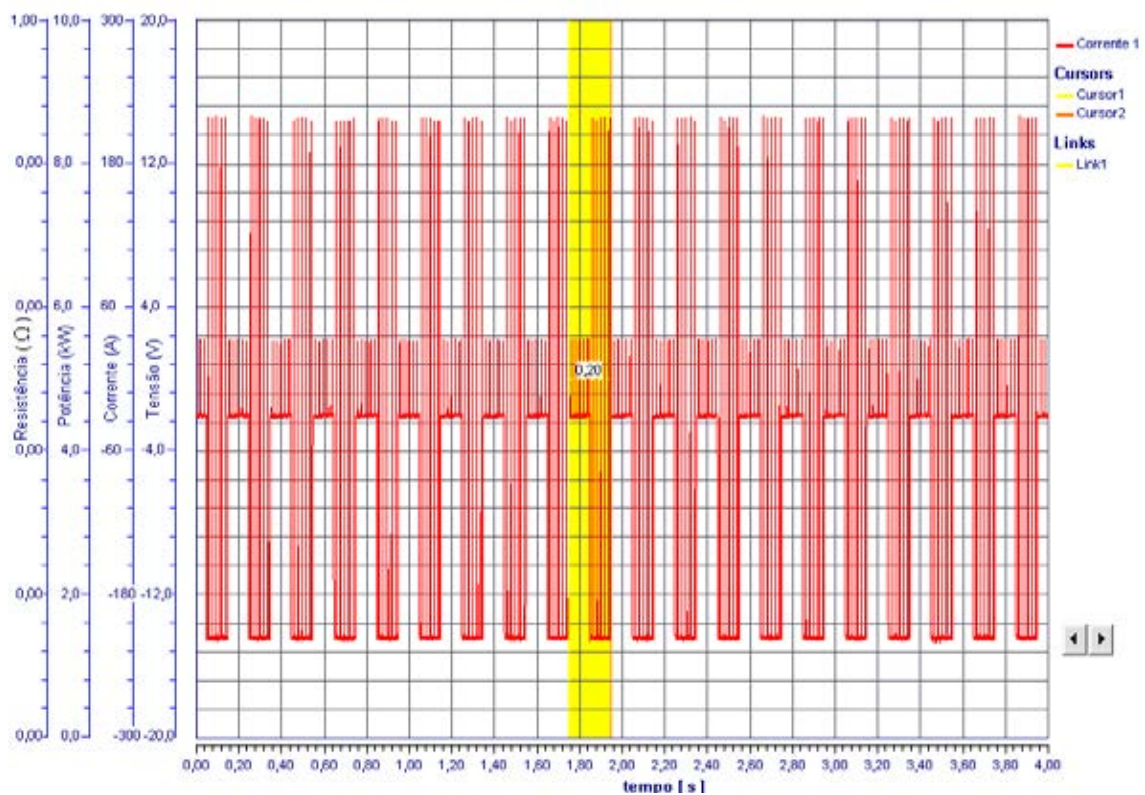


Figura A.5- CP A53: Freqüência de inversão de polaridade de 50Hz e freqüência de pulso térmico de 5,0Hz.

## APÊNDICE B: Aquisição de dados para frequência de inversão de polaridade do eletrodo de 100Hz

A tabela B.1 mostra os valores médios de tensão, corrente, potência na base térmica, potência no pulso térmico e a corrente eficaz para a frequência de inversão de polaridade de 100 Hz. Esses valores foram calculados pelo software SAPV4.19s para a região selecionada utilizando os valores instantâneos aquisitados.

As Figuras de B.1 a B.5 mostram os gráficos da tensão, corrente e potência instantâneo em função do tempo para as frequências de período de pulso térmico de, sem pulso; 1,0Hz; 2,0Hz; 1,7Hz e 5,0Hz respectivamente. Note que a frequência do período de pulso térmico corresponde ao inverso do período selecionado e esse por sua vez compreende metade do tempo na base térmica e metade do tempo no pulso térmico.

Tabela B.1- Resultados e gráficos obtidos com o aquisitor de sinais SAPV4.19s (referência selecionada).

| Freqüência de inversão de polaridade de 100Hz | CP B23<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>0,5Hz | CP B33<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>1,0Hz | CP B43<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>1,7Hz | CP B53<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>5,0Hz | CP B13<br>$f_{\text{pulsção térmica}}$<br>sem |
|---|---|---|---|---|---|
| $U_{\text{médio}} [V]^*$                      | -8,4  | -8,7  | -8,1  | -7,7  | -8  |
| $I_{\text{médio}} [A]^*$                      | -100  | -100  | -101  | 103   | -178  |
| $P_{\text{médio}} [W]^*$                      | 1357  | 1466  | 1431  | 1465  | 2439  |
| $P_{\text{média base térmica}} [W]**$         | 333   | 337   | 338   | 309   | sem   |
| $P_{\text{média pulso térmico}} [W]**$        | 2376  | 2386  | 2442  | 2413  | sem   |
| $I_{\text{eficaz}} [A]^*$                     | 146   | 146   | 146   | 148   | 204   |

\* medida em um período térmico ( base térmica + pulso térmico )

\*\* medida em um período elétrico (  $t_p=0,02s + t_n=0,018s$  )

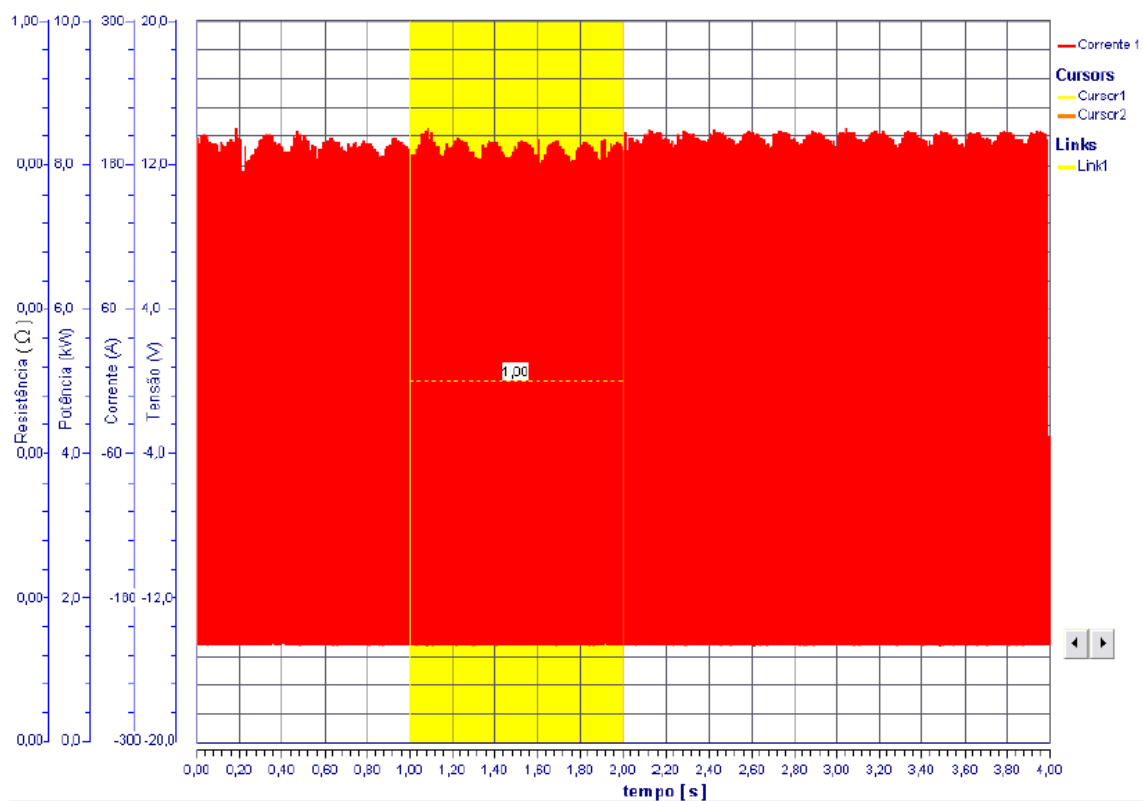


Figura B.1- CP B13: Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e sem pulso térmico.

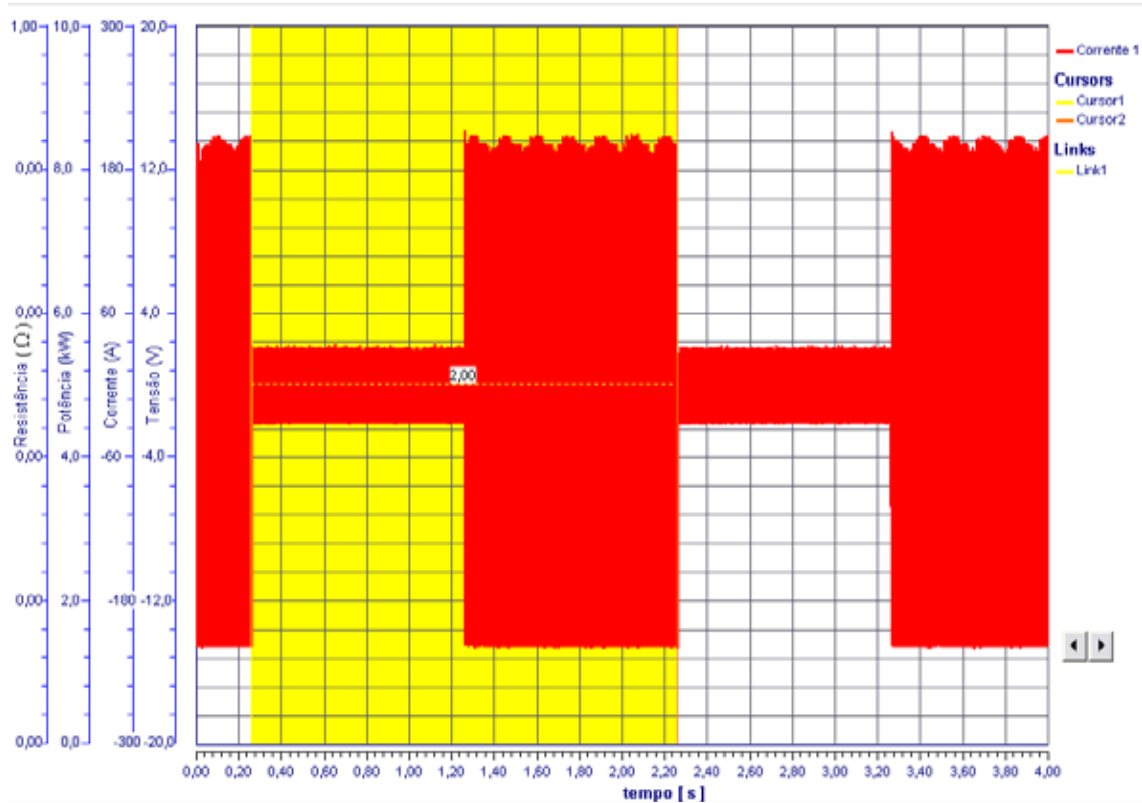


Figura B.2- CP B23: Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e freqüência de pulso térmico de 0,5Hz.

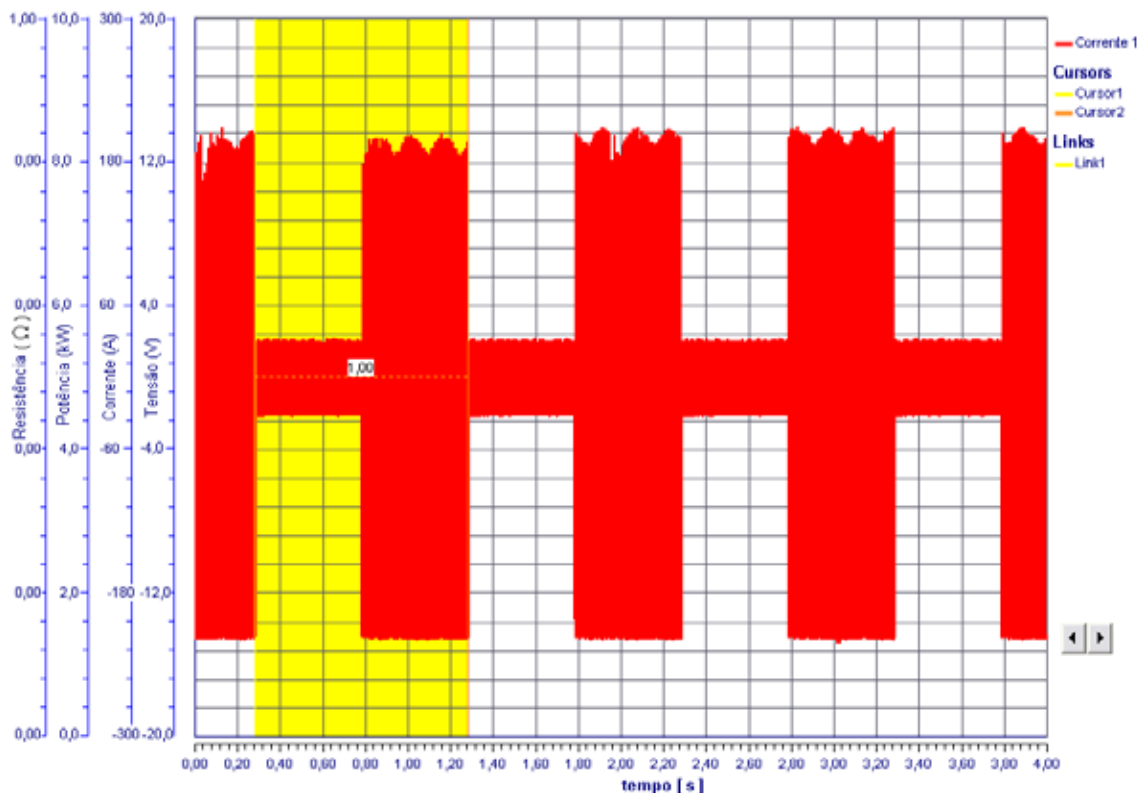


Figura B.3- CP B33: Frequência de inversão de polaridade de 100Hz e freqüência de pulso térmico de 1,0Hz.

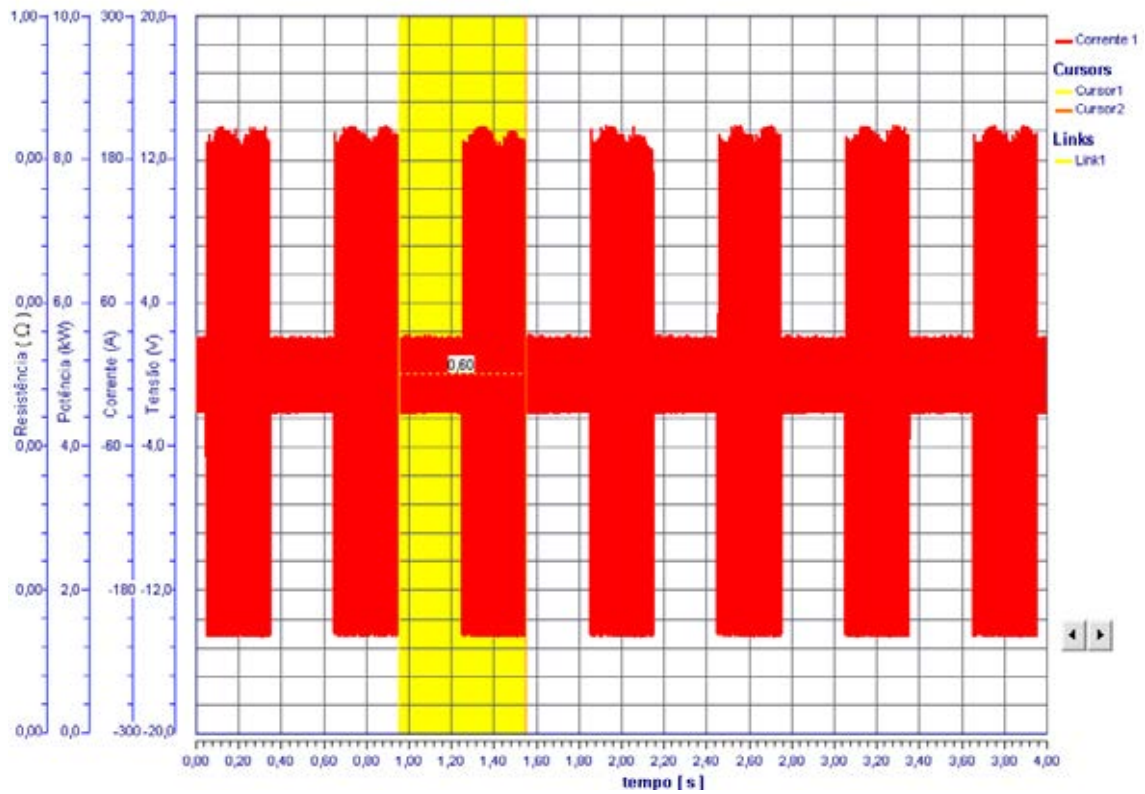


Figura B.4- CP B43: Freqüência de inversão de polaridade de 100Hz e freqüência de pulso térmico de 1,7Hz.

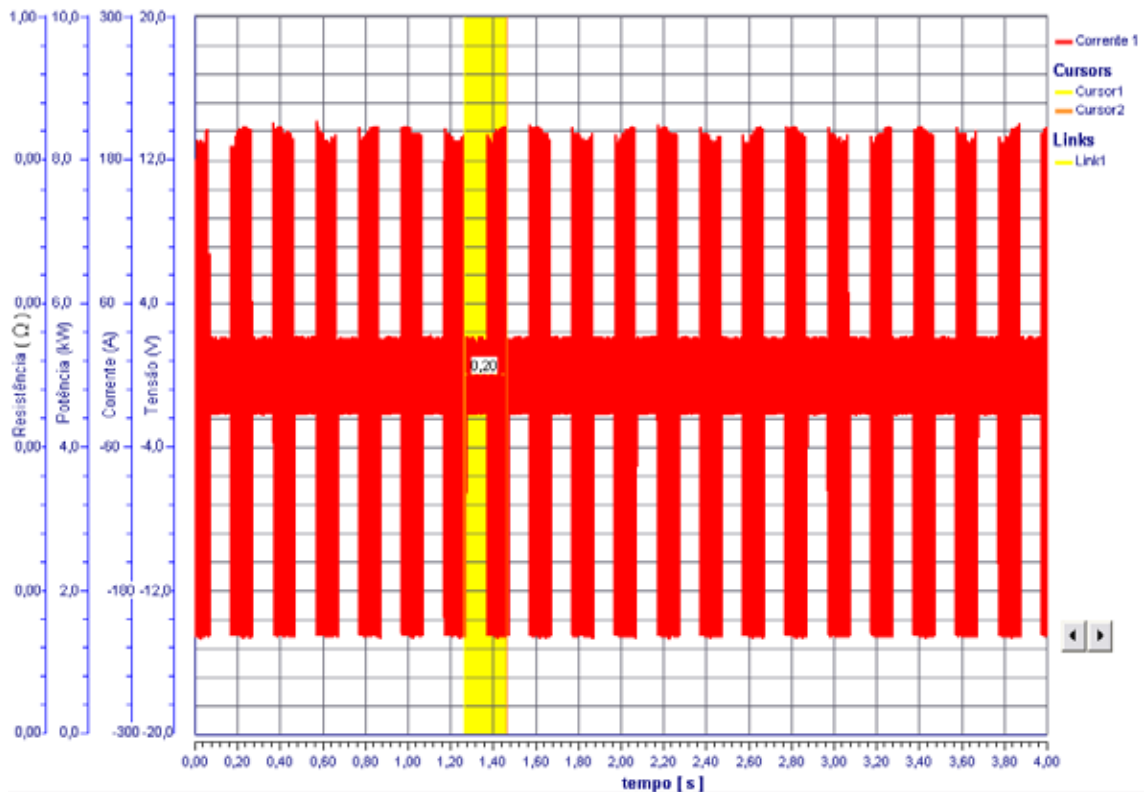


Figura B.5- CP B53: Freqüência de inversão de polaridade de 100Hz e freqüência de pulso térmico de 5,0Hz.



### APÊNDICE C: Aquisição de dados para frequência de inversão de polaridade do eletrodo e 167Hz

A tabela C.1 mostra os valores médios de tensão, corrente, potência na base térmica, potência no pulso térmico e a corrente eficaz para a frequência de inversão de polaridade de 167 Hz. Esses valores foram calculados pelo software SAPV4.19s para a região selecionada utilizando os valores instantâneos aqisitados.

As figuras de C.1 a C.5 mostram os gráficos da tensão, corrente e potência instantâneo em função do tempo para as frequências de período de pulso térmico de, sem pulso; 1,0Hz; 2,0Hz; 1,7Hz e 5,0Hz respectivamente. Note que a frequência do período de pulso térmico corresponde ao inverso do período selecionado e esse por sua vez compreende metade do tempo na base térmica e metade do tempo no pulso térmico.

Tabela C.1- Resultados e gráficos obtidos com o aqisitor de sinais SAPV4.19s (referência selecionada)

| Frequência de inversão de polaridade de 200Hz | CP C23<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>0,5Hz | CP C33<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>1,0Hz | CP C43<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>1,7Hz | CP 53<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>5,0Hz | CP C13<br>f <sub>pulsção térmica</sub><br>sem |
|---|---|---|---|--|---|
| U <sub>médio</sub> [V]*                       | -7,7  | -8,6  | -8,4  | -8,4   | -8,6  |
| I <sub>médio</sub> [A]*                       | -104  | -104  | -104  | -105   | -184  |
| P <sub>médio</sub> [W]*                       | 1123  | 1308  | 1312  | 1417   | 2132  |
| P <sub>média base térmica</sub> [W]**         | 311   | 293   | 314   | 248  | sem   |
| P <sub>média pulso térmico</sub> [W]**        | 2336  | 2326  | 2360  | 2313   | sem   |
| I <sub>eficaz</sub> [A]*                      | 141   | 141   | 141   | 142  | 198   |

\* medida em um período térmico ( base térmica + pulso térmico )

\*\* medida em um período elétrico ( tp=0,002s + tn=0,018s )

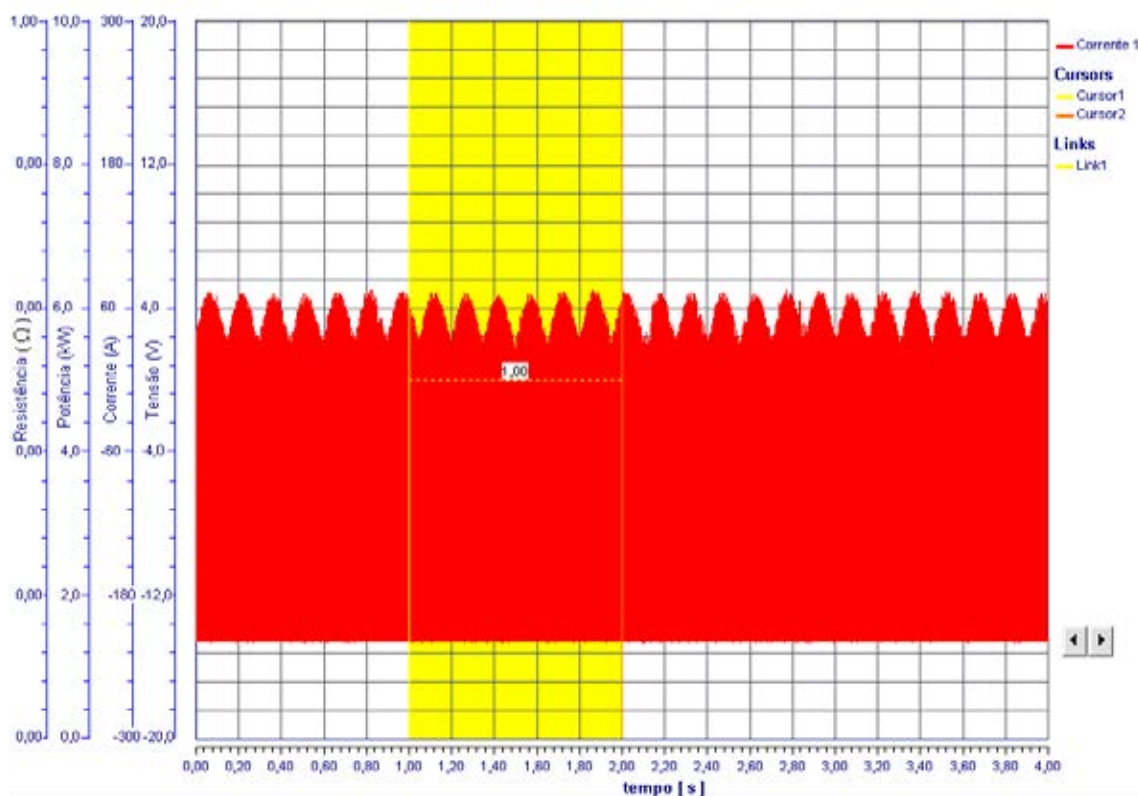


Figura C.1- CP C13: Frequência de inversão de polaridade de 200Hz e sem pulso térmico.

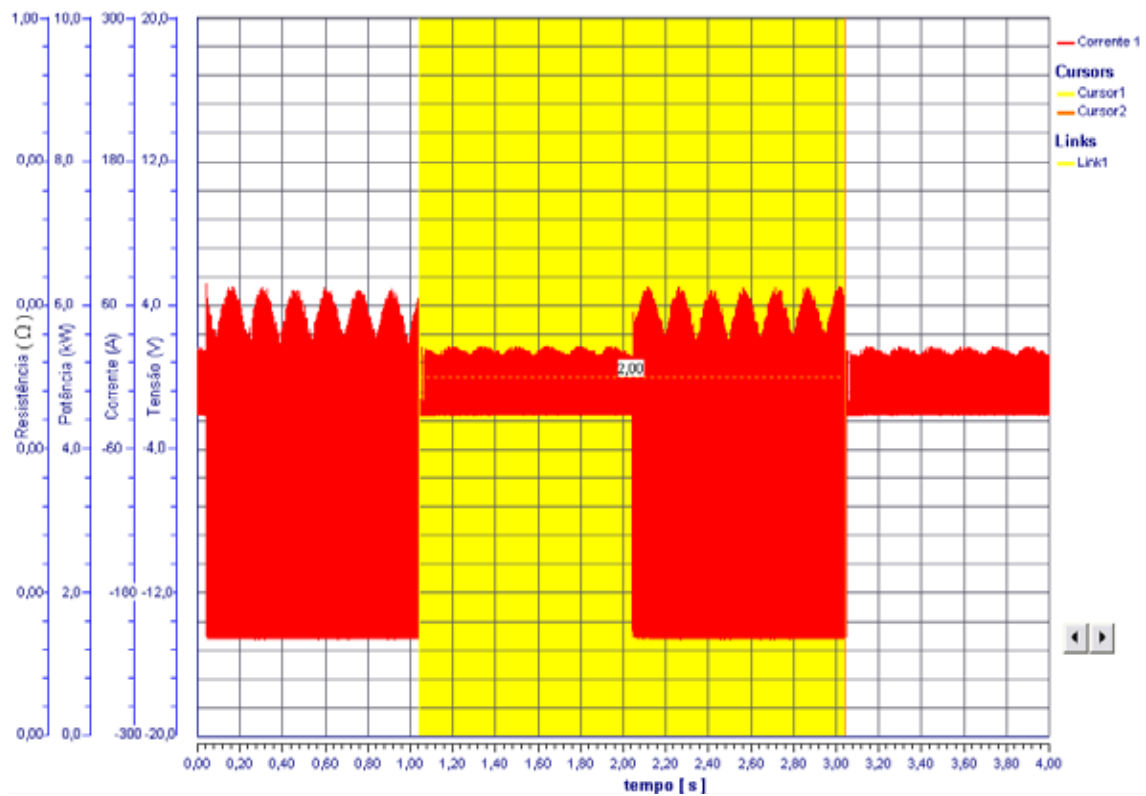


Figura C.2- CP C23: Frequência de inversão de polaridade de 200Hz e frequência de pulso térmico de 0,5Hz.

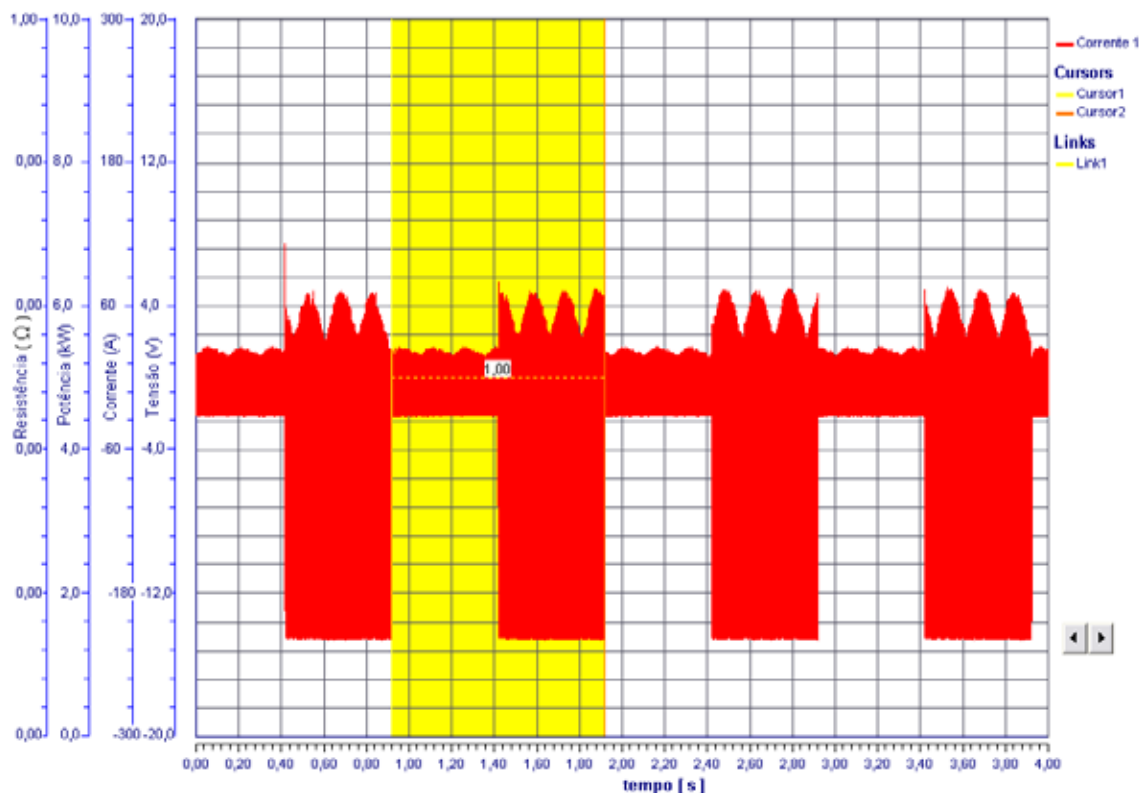


Figura C.3- CP C33: Frequência de onda elétrica de 200Hz e frequência de pulso térmico de 1,0Hz.

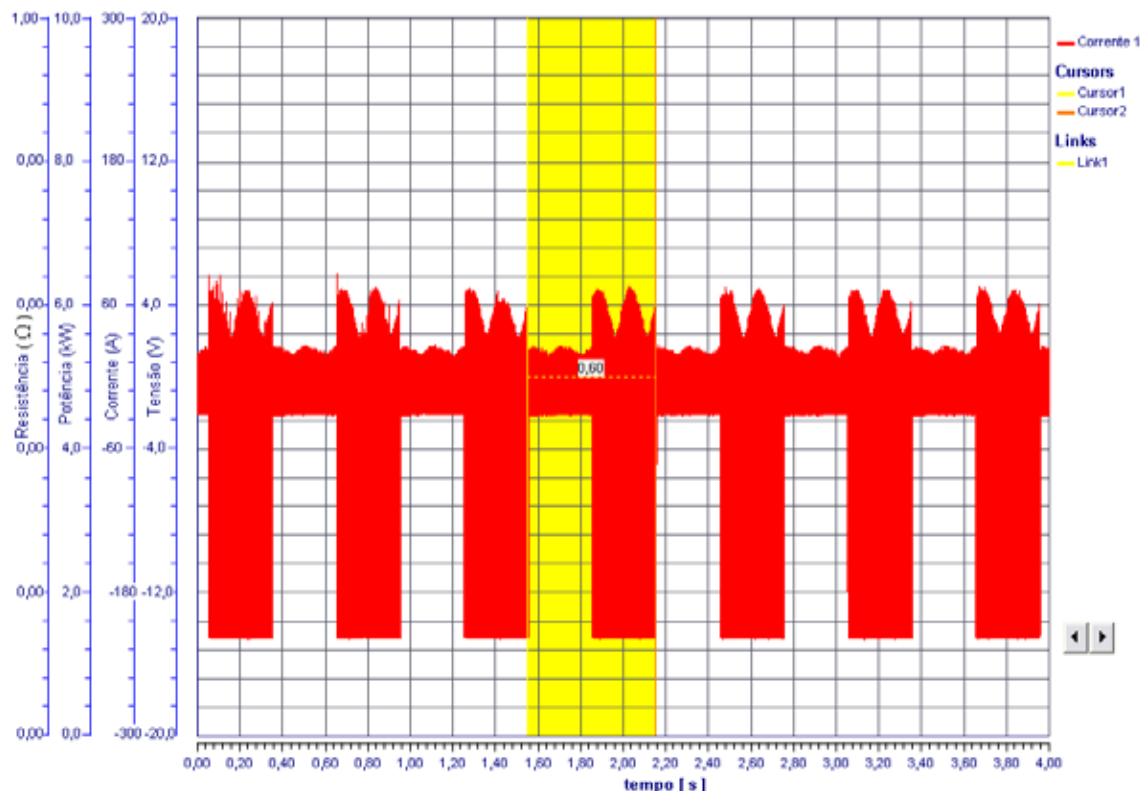


Figura C.4- CP C43: Freqüência de inversão de polaridade de 200Hz e freqüência de pulso térmico de 2,0Hz.

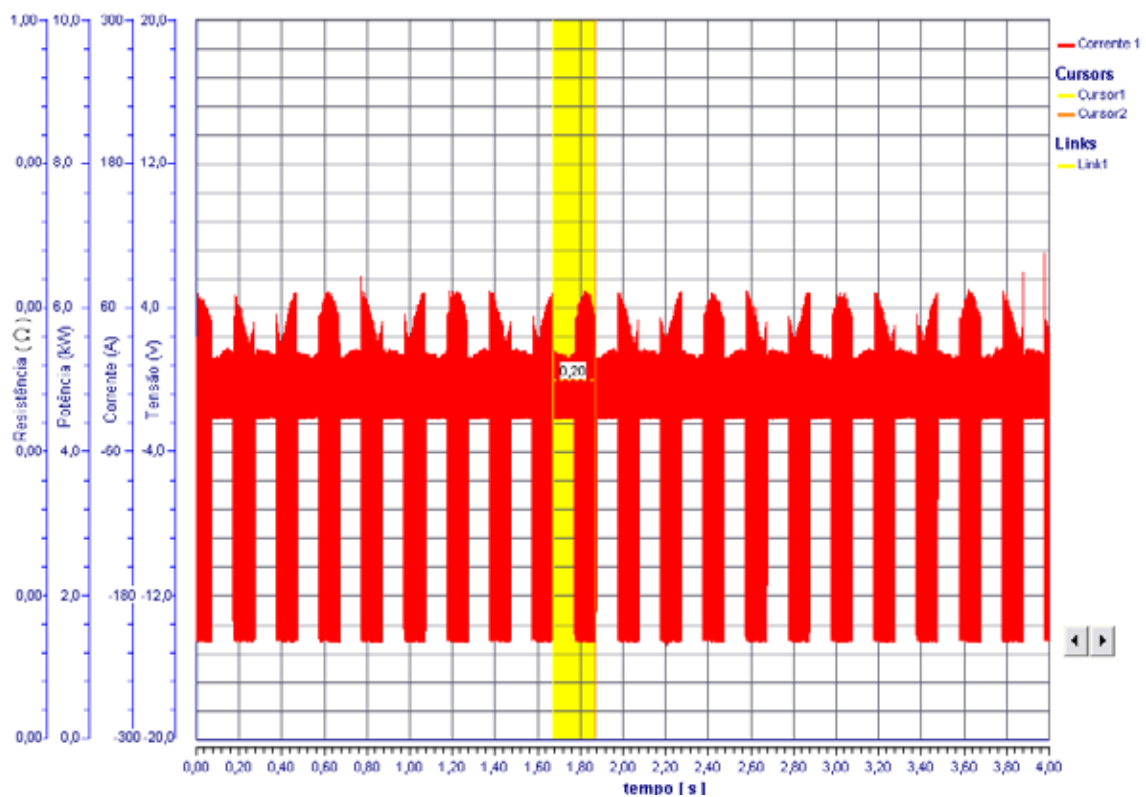


Figura C.5- CP C53: Freqüência de inversão de polaridade de 200Hz e freqüência de pulso térmico de 5,0Hz.

## APÊNDICE D: Efeito “Alising”

De acordo com o teorema de Nyquist, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada de taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que possa ser reproduzido integralmente sem erro de “alising”. A metade da frequência de amostragem é chamada de frequência de Nyquist e corresponde ao limite máximo de frequência do sinal que pode ser reproduzido. O termo em português para “alising” correspondente, pouco usado, seria frequências réplicas.

Conforme a Tabela 4.2, características do sistema de aquisição SAPV4.19s, verificamos que a taxa de amostragem é de 5000Hz, ou seja 5000 pontos por segundo, adequada para as frequências de inversão de polaridade do eletrodo. O tempo entre dois pontos consecutivos então é  $1s/5000 = 0,0002s$ , como pode ser visto na área marcada em amarelo na Figura D1.

A seqüência de figuras seguintes procura mostrar que existe um “delta t” de tempo para a corrente subir do máximo valor de polaridade negativa do eletrodo para o máximo valor de polaridade positiva, como o tempo de corrente positiva adotado é muito pequeno, não há certeza de que essa subida atingiu o seu valor máximo. O efeito “alising” ocorre então somente em parte do tempo de polaridade positiva do eletrodo, como mostra a Figura D1.

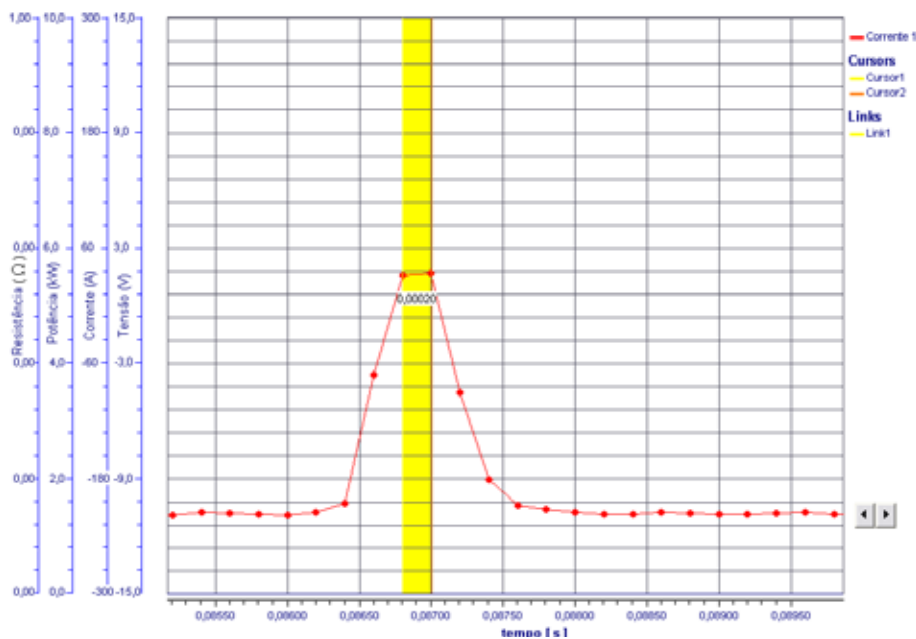


Figura D1- Taxa de amostragem dos sinais instantâneos. CP C23.

Na Figura D2, podemos ver a frequência de inversão de polaridade, nesse caso de 200Hz, ou seja, a cada 0,005s temos uma inversão de negativo para positivo, então  $1/0,005 = 200Hz$ . Importante observar, figuras D3 e D4, que os tempos positivo e negativo para cada ciclo deveriam ser respectivamente  $t_p=0,0005s$  e  $t_n=0,0045s$  guardando a proporção de 1 para 9 como nos demais ensaios; no entanto devido à resolução da máquina, esses valores foram aproximados para  $t_p=0,001$  e  $t_n=0,004$  resultando numa proporção de 1 para 4, mas conservando a frequência de 200Hz.

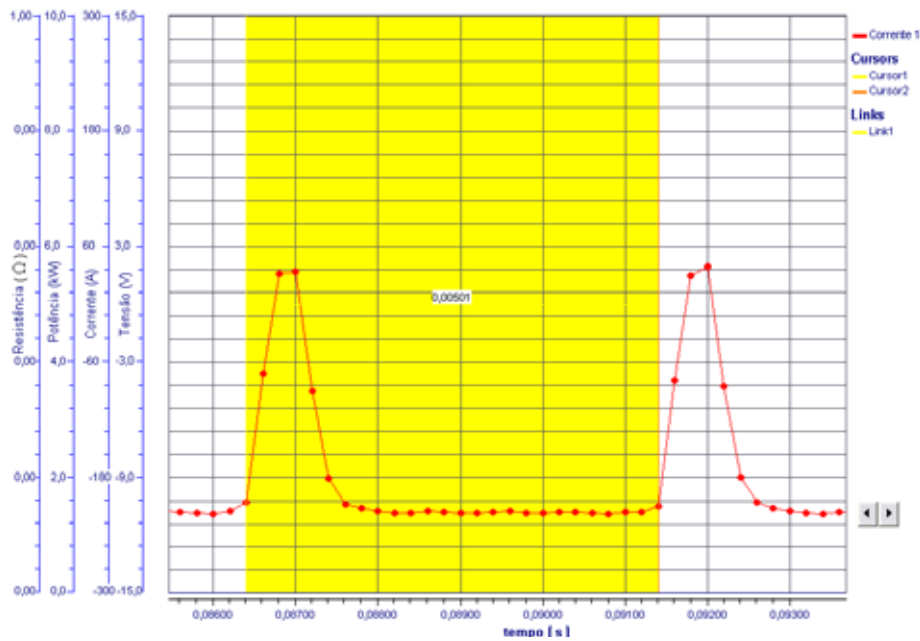


Figura D2- Demonstração do período de inversão de polaridade do eletrodo:  $1/0,0050 = 200\text{Hz}$

Na Figura D3, a faixa selecionada mostra o tempo de polaridade positiva do eletrodo em um ciclo (0,0005s). Observe que existe um “delta t” para ocorrer a completa inversão de polaridade do eletrodo, a inversão não é instantânea, como numa onda perfeitamente quadrada. Observe também que a resolução de leitura do SAPV4.19s (o tempo entre uma leitura e a leitura seguinte 0,0002s) não é suficientemente pequena para ler o pico da corrente positiva. Por isso não sabemos se a inversão de polaridade alcançou o pico positivo de fato. Esses valores não foram aproveitados no experimento, porque no cálculo da média das correntes, faltarão os valores da corrente positiva de pico o que poderá mascarar a média, e o conseqüente cálculo da potência, o que de fato pode ser comprovado com os valores de potencia média calculados pelo sistema apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3.

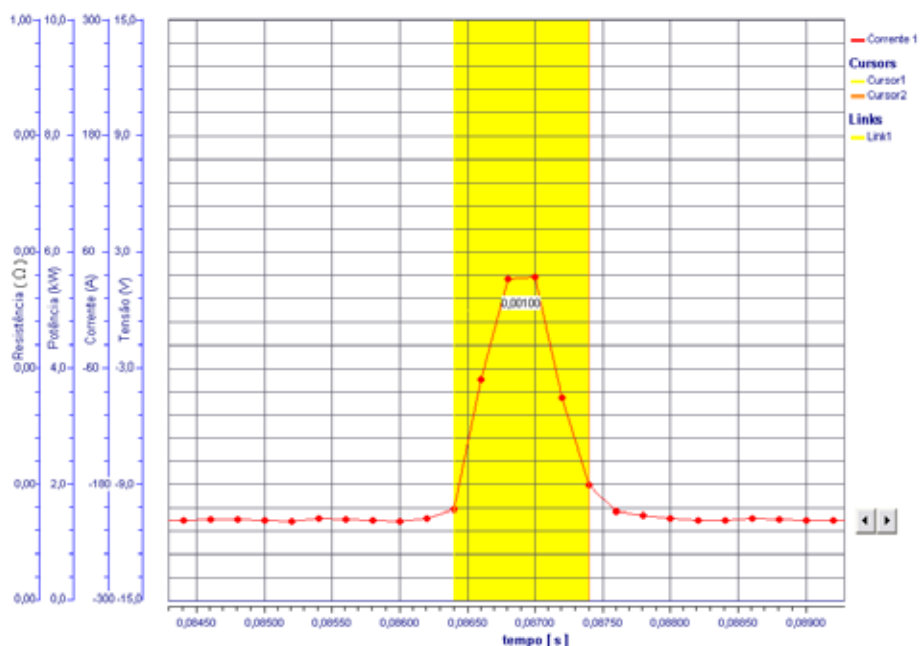


Figura D3- Demonstração do tempo de polaridade positiva do eletrodo  $t_p=0,001s$

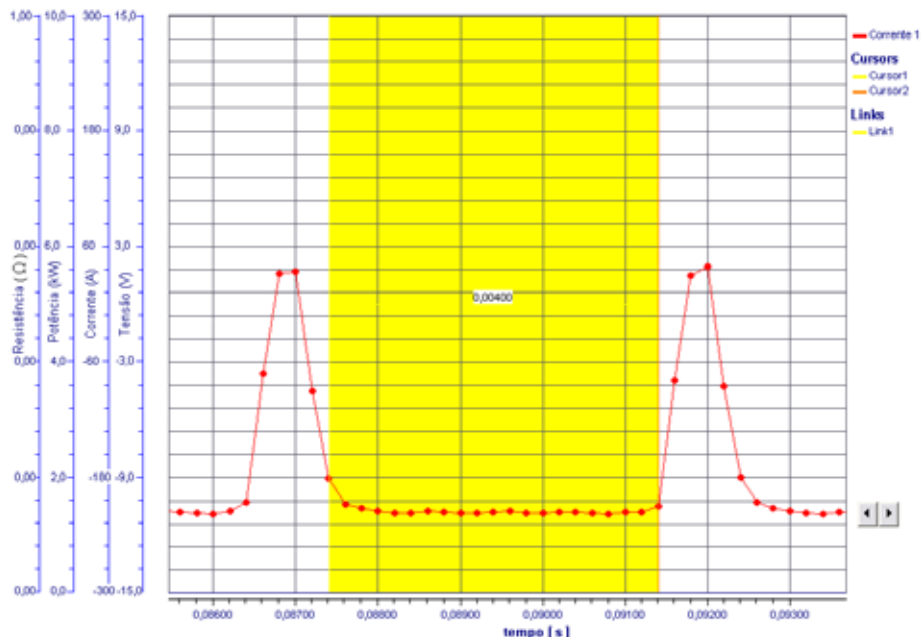
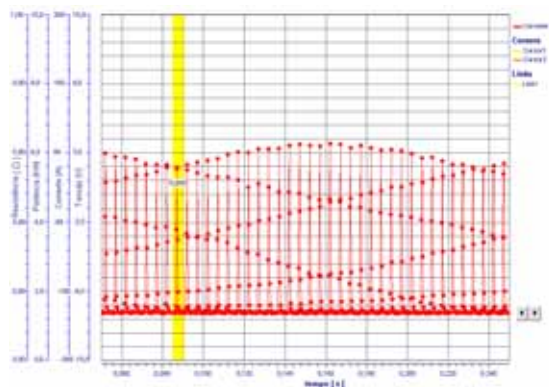
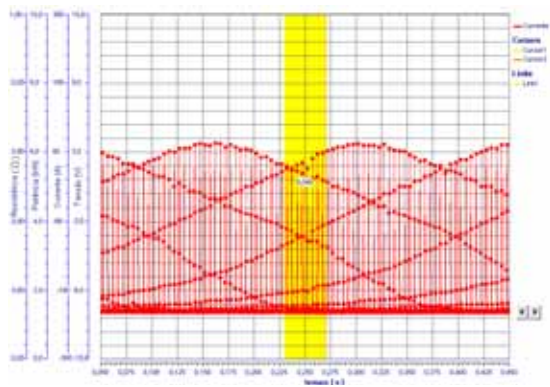


Figura D4- Demonstração do tempo negativo  $t_n=0,004s$

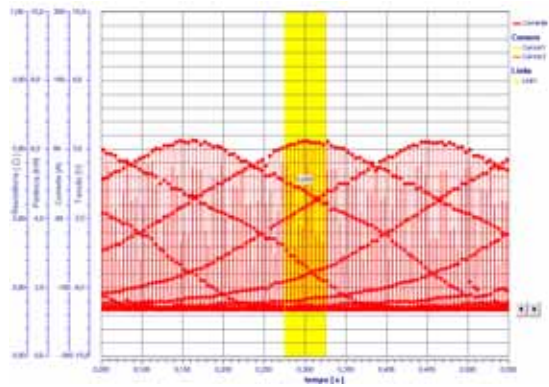
Na Figura D5, entre dois ciclos consecutivos existe uma defasagem dos pontos que conseguem ler o pico de polaridade positiva do eletrodo, conseqüentemente esses picos são truncados em alturas diferentes. Quando se diminui a escala do tempo no gráfico, deixando os ciclos mais próximos uns dos outros, a seqüência de picos de corrente de polaridade positiva do eletrodo truncadas desenha uma senóide.



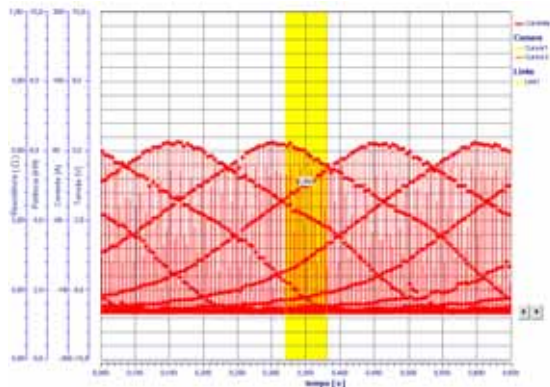
a- Escala do tempo 0,2s.



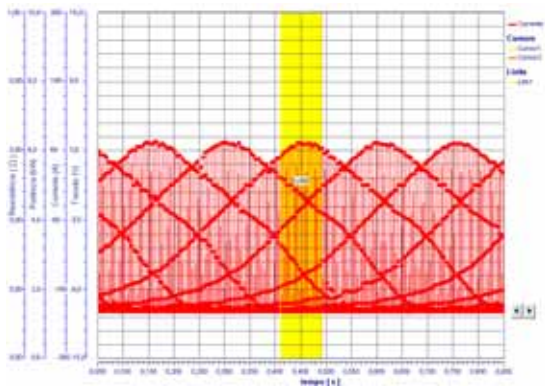
b- Escala do tempo 0,4s.



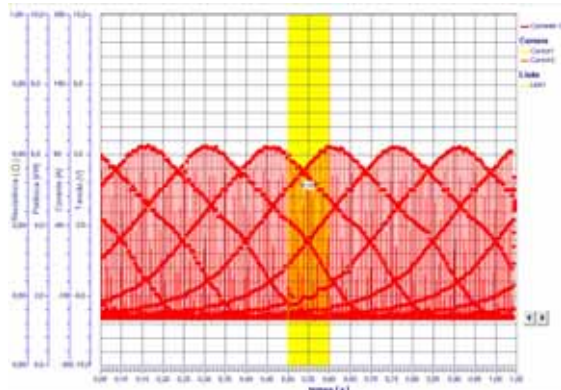
c- Escala do tempo 0,5s.



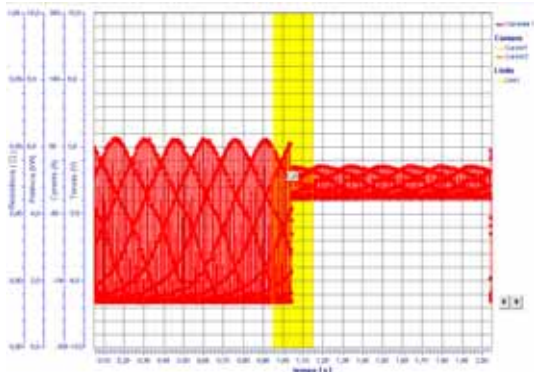
d- Escala da tempo 0,6s.



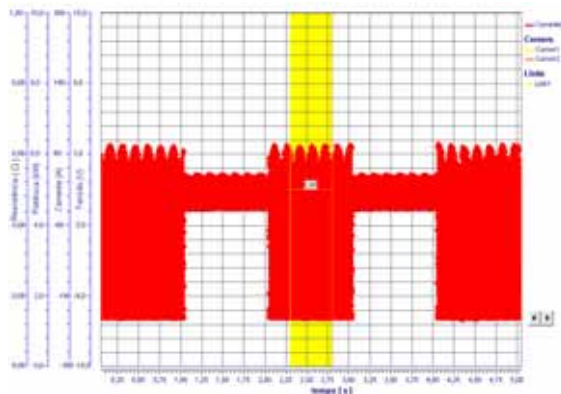
e- Escala do tempo 0,8s.



f- Escala do tempo 1,0s.



g- Escala do tempo 2,0s.



h- escala do tempo 5,0s.

Figura D5- As diferentes escalas de tempo

Para se trabalhar com intervalos de inversão de polaridade do eletrodo muito pequenos, a máquina de solda utilizada nesse trabalho precisaria ter um  $\Delta t$  de inversão de polaridade menor, de modo a atingir eficazmente a máxima corrente programada.

## APÊNDICE E: Esquema para variação do gradiente $G$ em função da distância entre poças de fusão

A Figura E.1 mostra uma esquematização para as diferentes freqüências de período de pulso térmico. Note que como a velocidade de soldagem é constante, maior freqüência de período de pulso térmico significa aproximar os pulsos uns dos outros. No esquema, a elipse azul representa a poça de fusão no pulso térmico e está alinhada com sua foto correspondente. O esquema procura mostrar como a direção do gradiente  $G$  de extração de calor, mostrado em forma de vetores, varia de uma condição de tendência radial para uma condição de tendência transversal a medida em que as poças de fusão ficam mais próximas umas das outras.

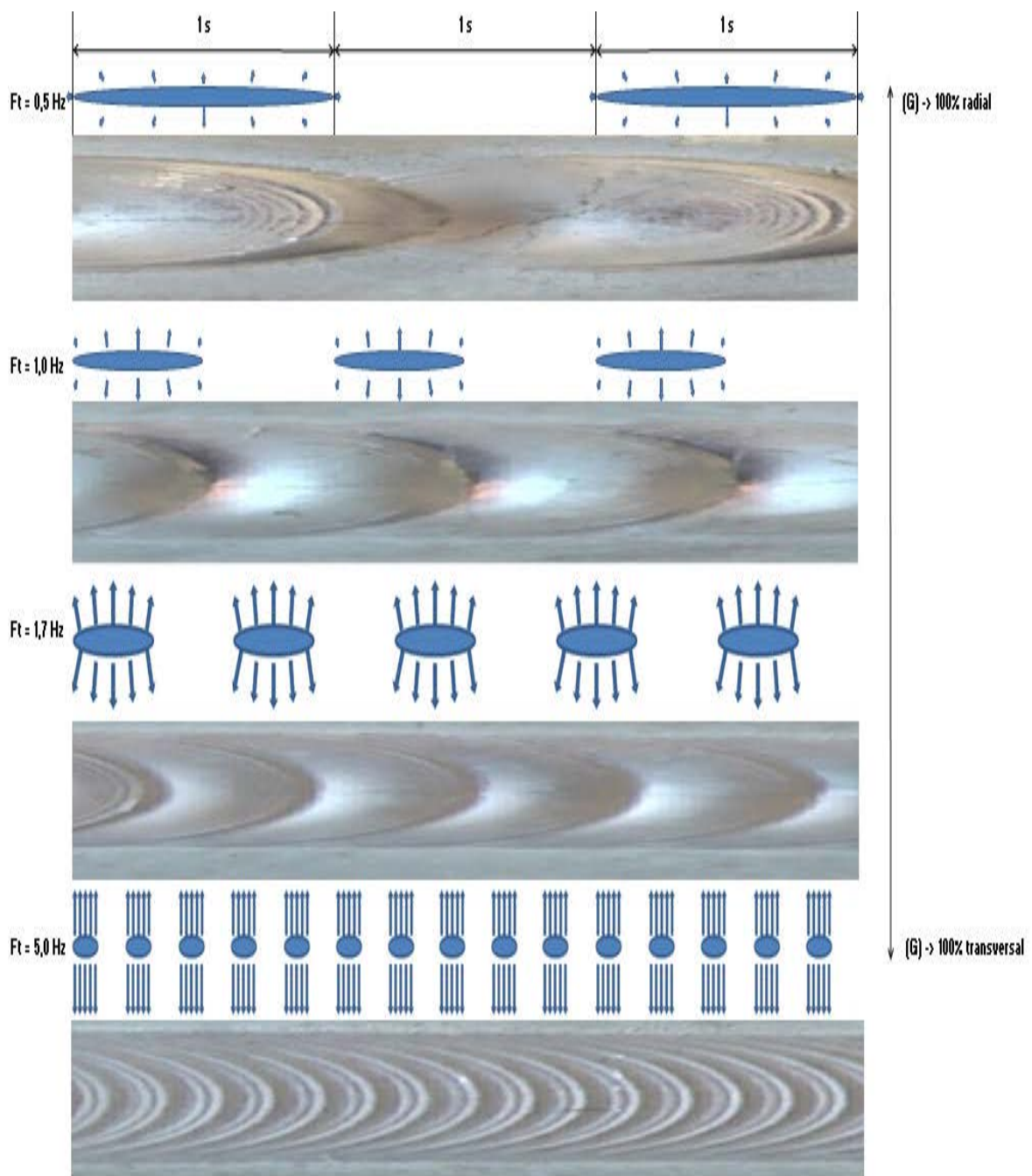


Figura E.1- Esquema para variação do gradiente  $G$  em função da distância entre as poças de fusão



**Apêndice F: Macros da frequência de inversão de polaridade de 50Hz**

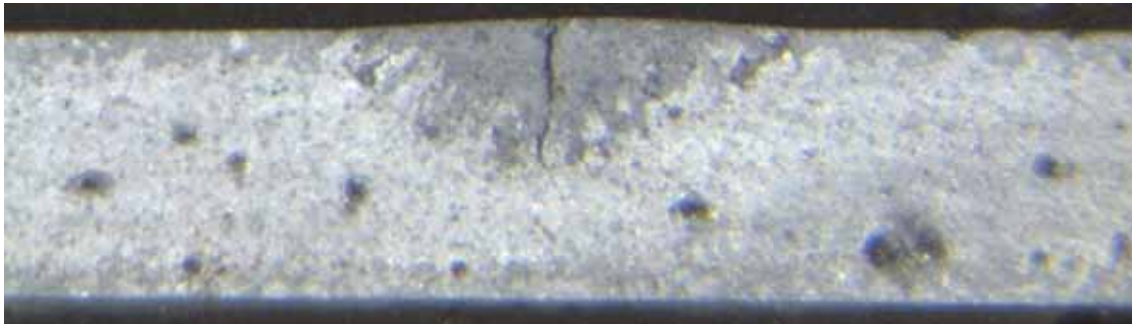


Figura F1 - Sem frequência de pulso térmico - A1 transversal.

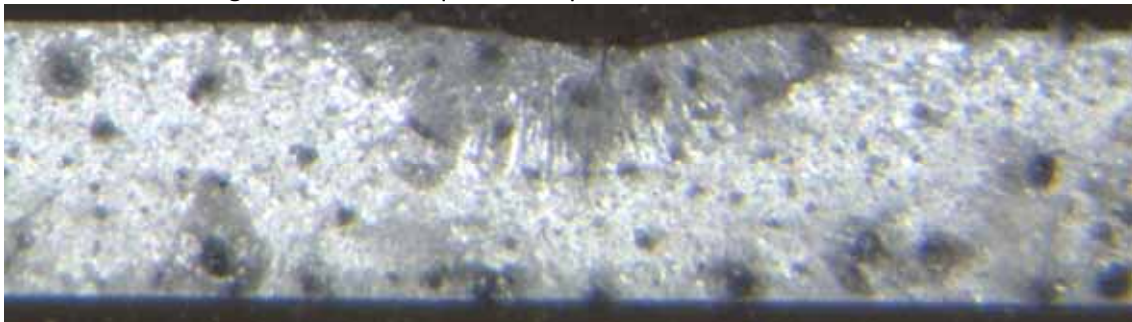


Figura F2 - Frequência de pulso térmico de 0,5Hz - A2 transversal.

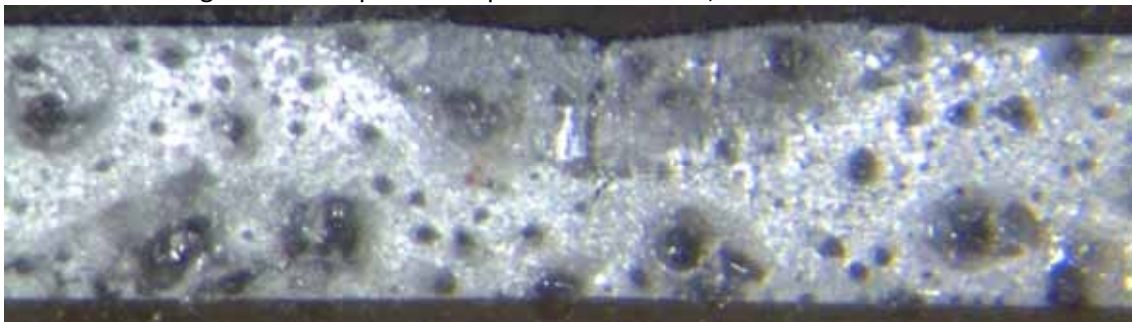


Figura F3 - Frequência de pulso térmico de 1,0Hz - A3 transversal.

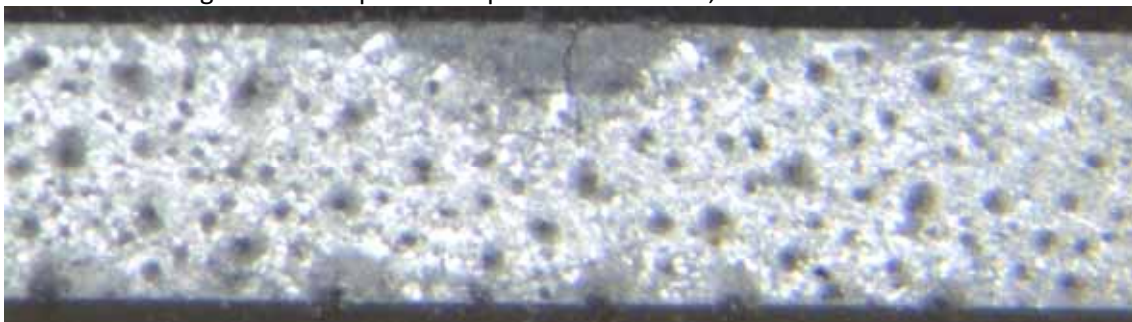


Figura F4 - Frequência de pulso térmico de 1,7Hz - A4 transversal.

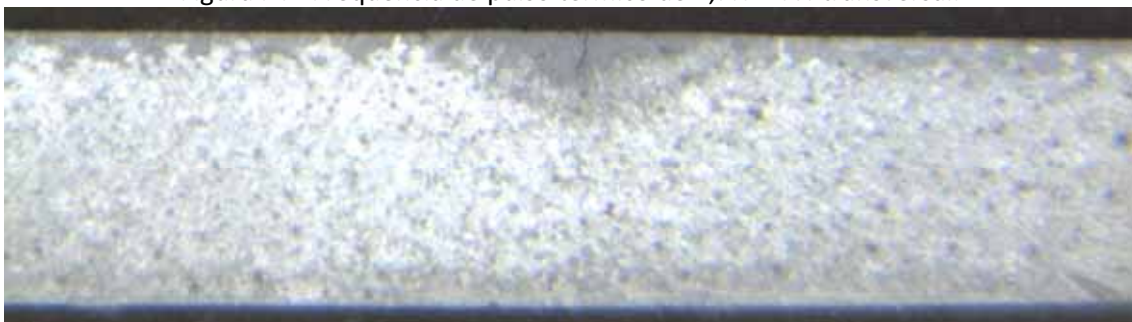


Figura F5 - Frequência de pulso térmico de 5,0Hz - A5 transversal.

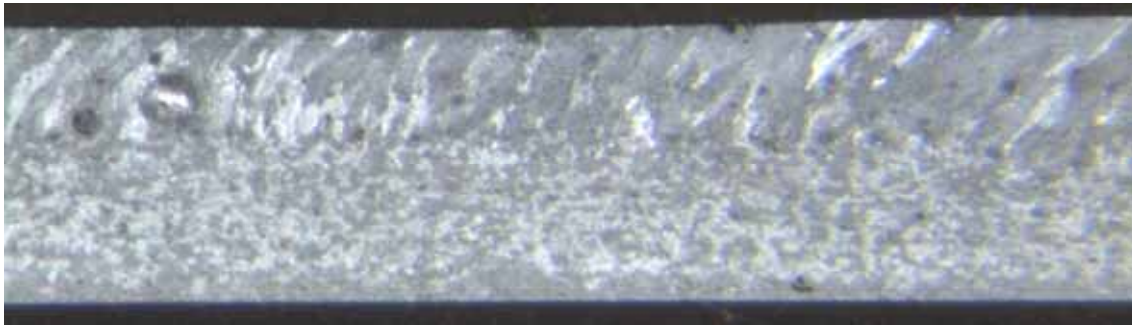


Figura F6 - Sem freq. de pulso térmico - A1 longitudinal no centro do cordão.

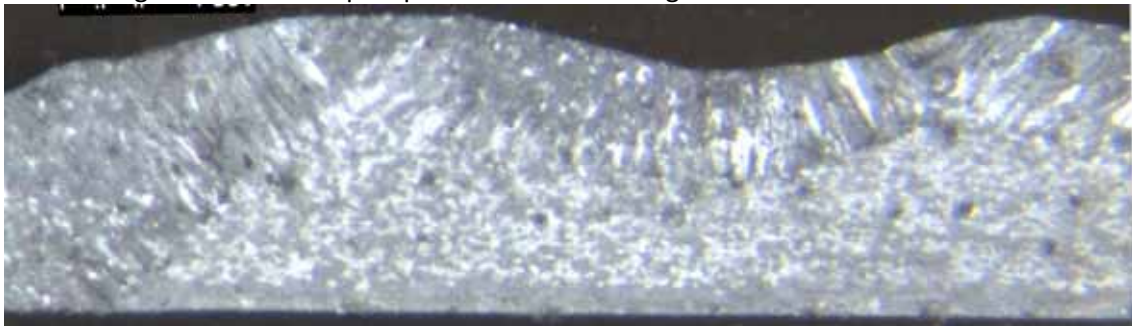


Figura F7 - Freq. de pulso térmico de 0,5Hz - A2 longitudinal no centro do cordão.

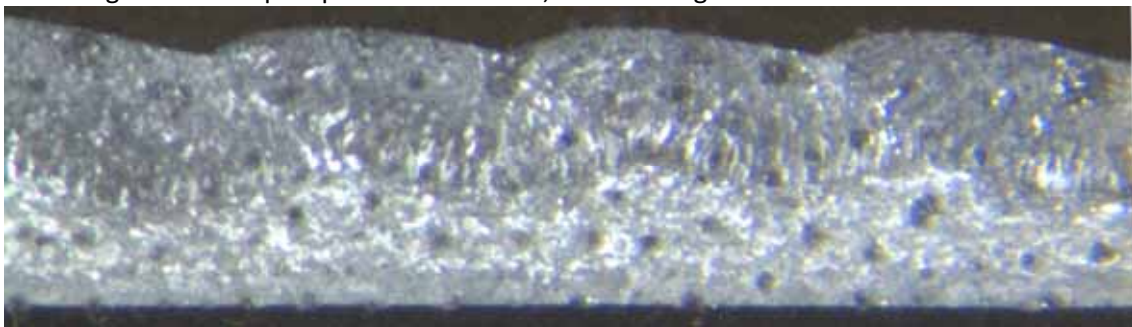


Figura F8 - Freq. de pulso térmico de 1,0Hz - A3 longitudinal no centro do cordão.

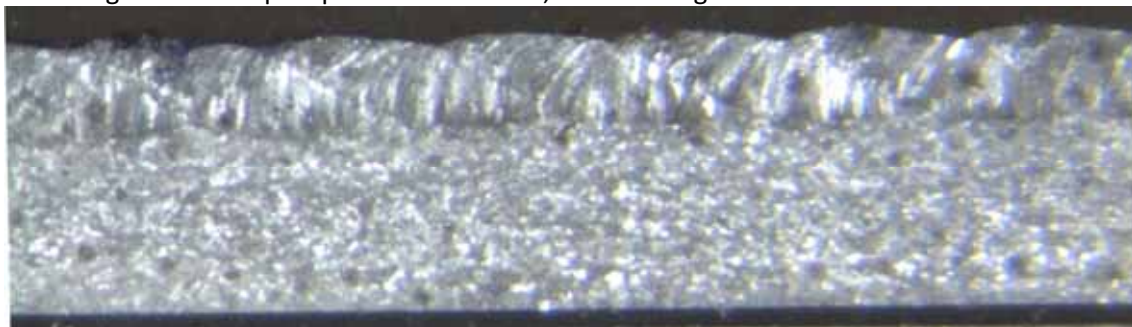


Figura F9 - Freq. de pulso térmico de 1,7Hz - A4 longitudinal no centro do cordão.

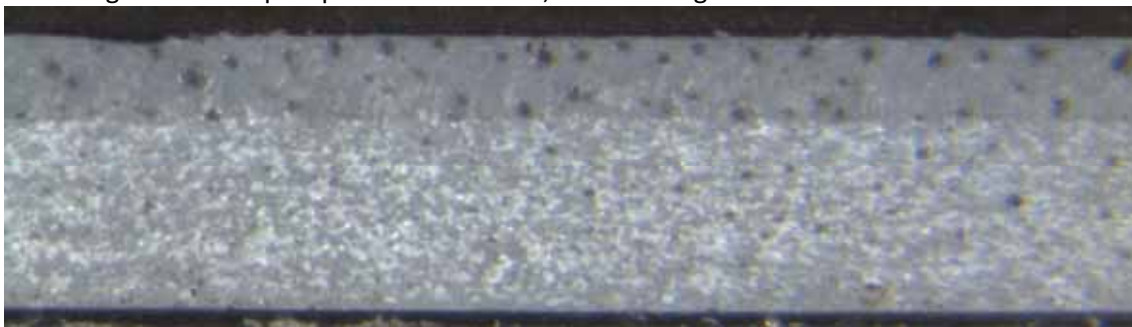


Figura F10 - Freq. de pulso térmico de 5,0Hz - A5 longitudinal no centro do cordão.

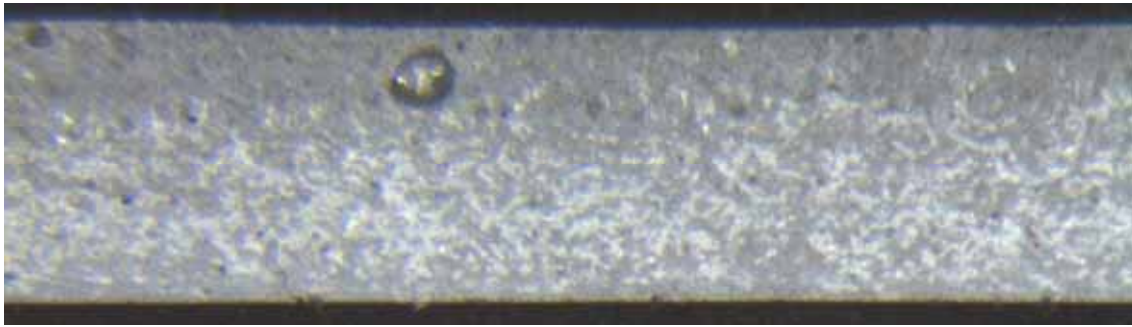


Figura F11 - Sem freq. de pulso térmico - A1 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

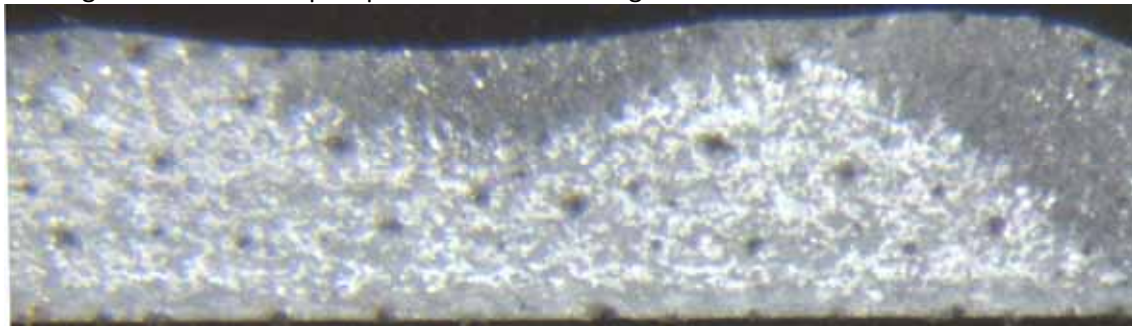


Figura F12 - Freq. de pulso térmico de 0,5Hz - A2 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

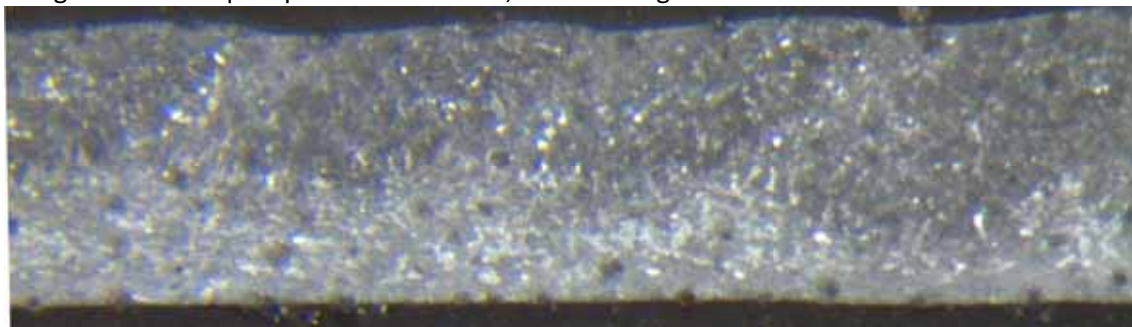


Figura F13 - Freq. de pulso térmico de 1,0Hz - A3 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

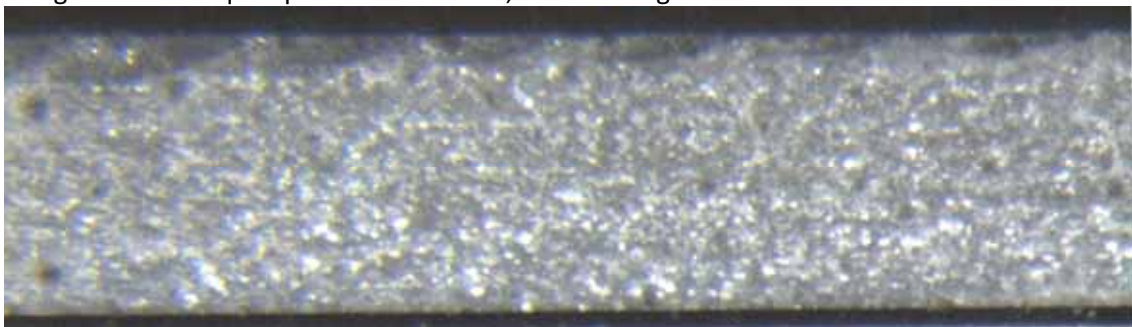


Figura F14 - Freq. de pulso térmico de 1,7Hz - A4 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

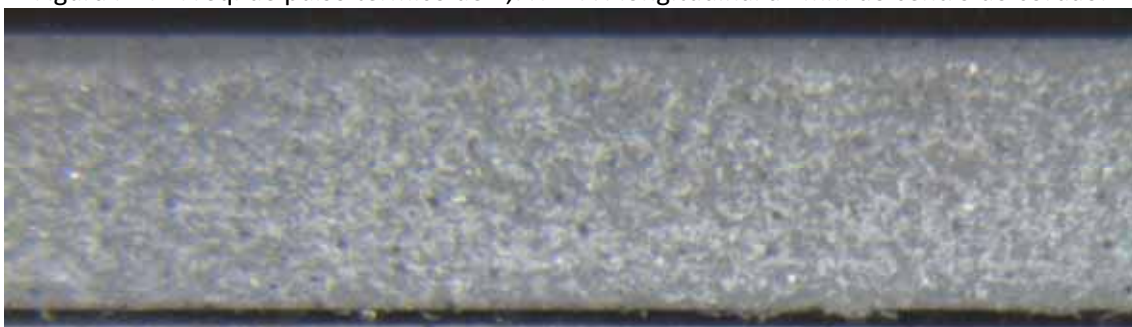


Figura F15 - Freq. de pulso térmico de 5,0Hz - A5 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

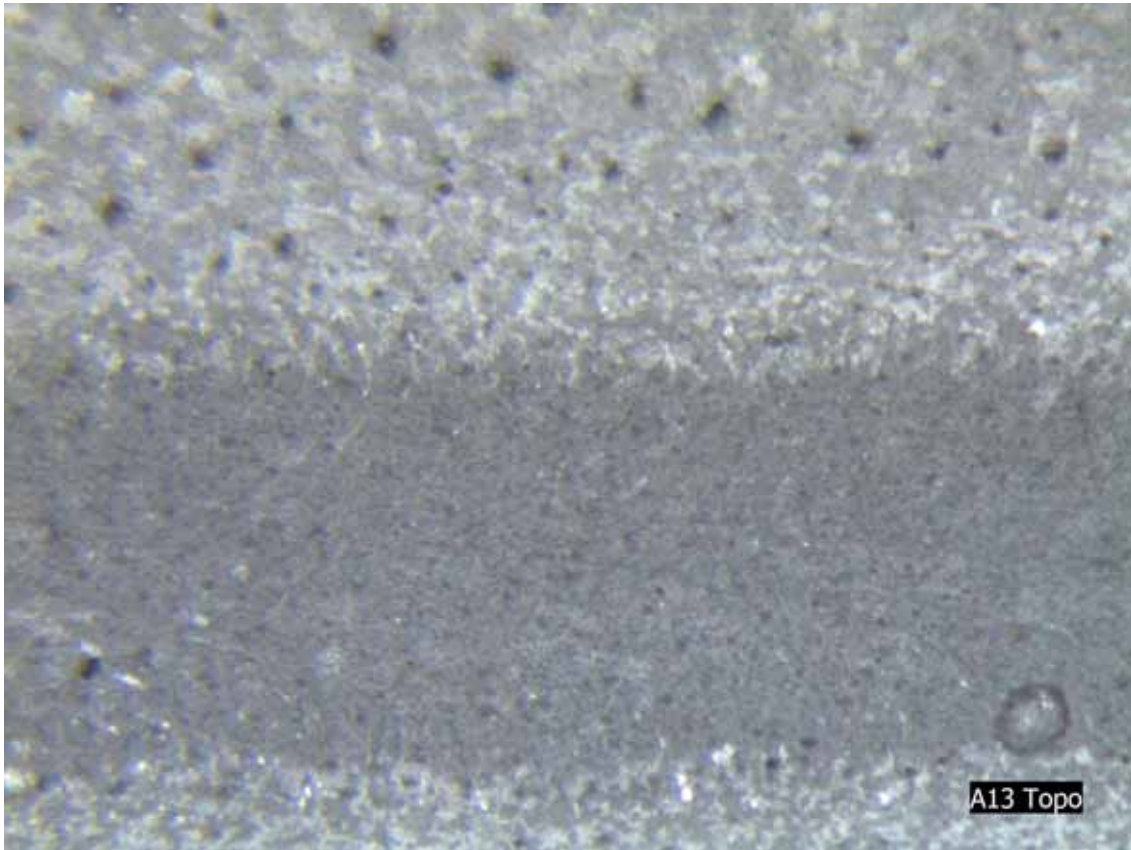


Figura F16 - Sem freq. de pulso térmico - A1 topo.

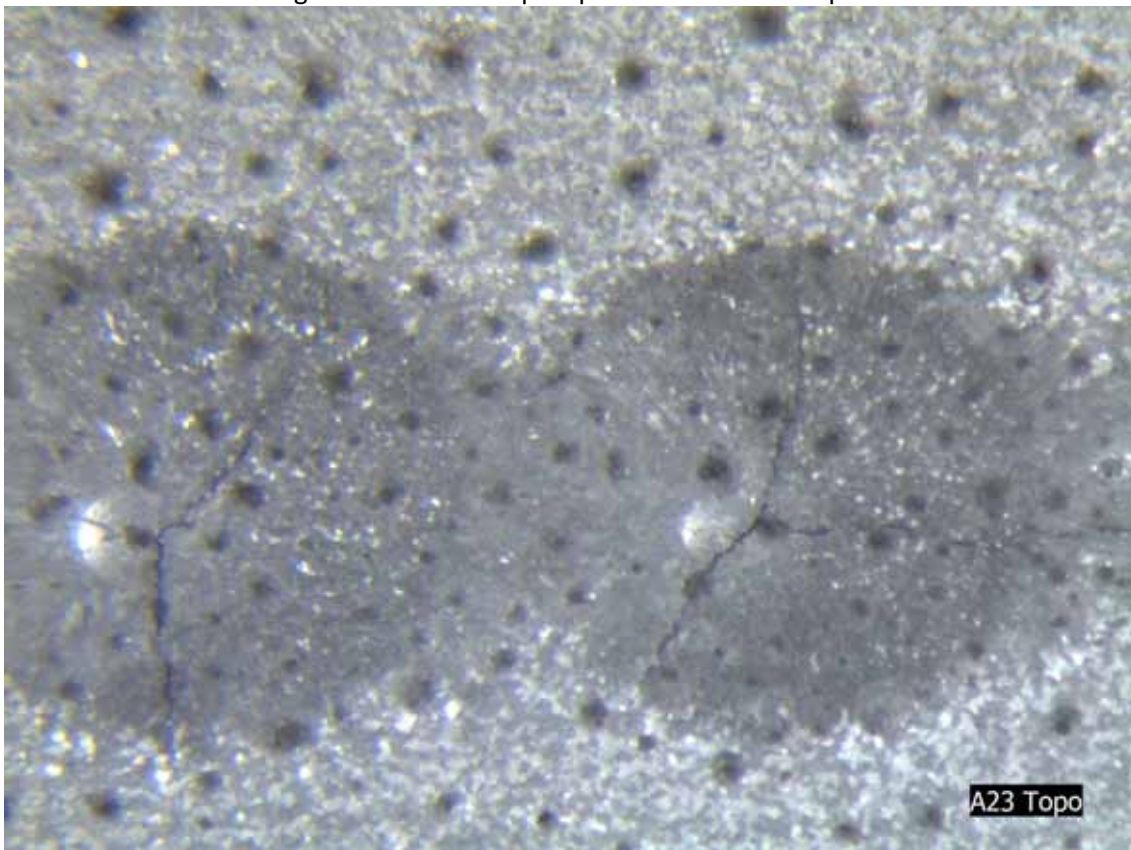


Figura F17 - Freq. de pulso térmico de 0,5Hz - A2 topo.

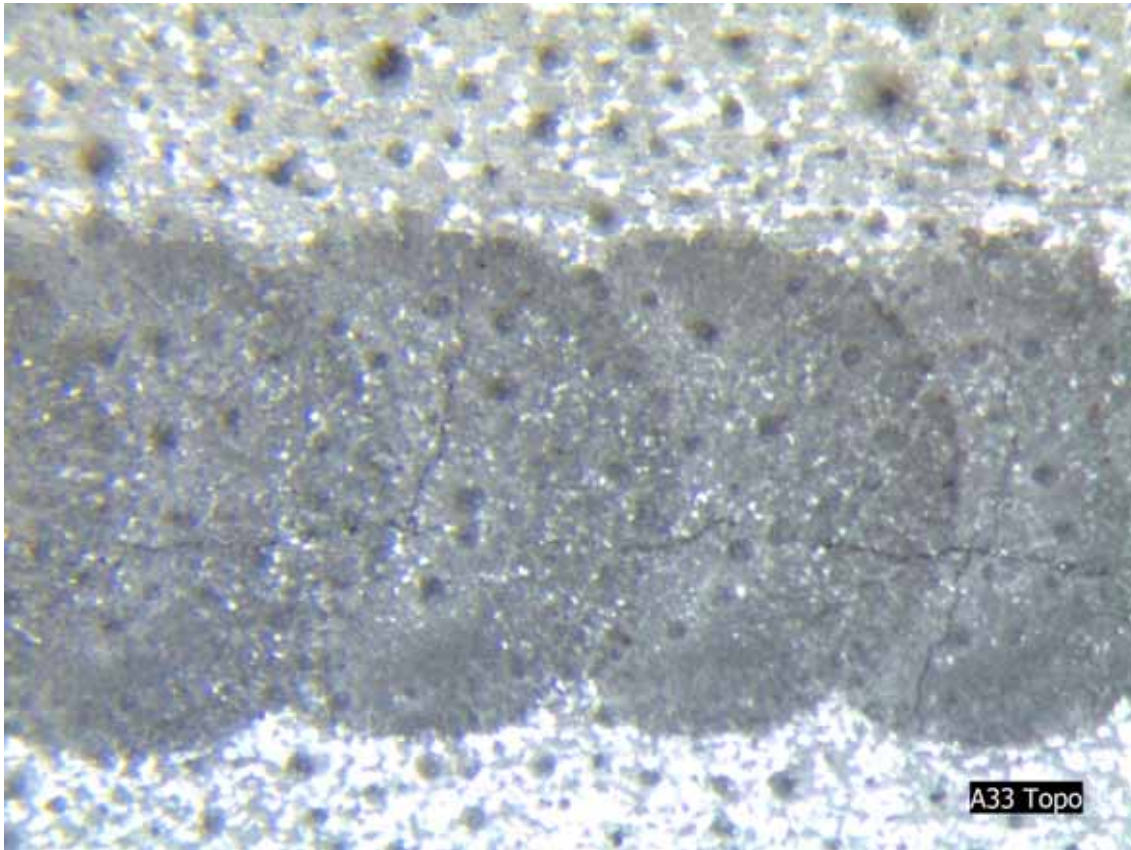


Figura F18 - Freq. de pulso térmico de 1,0Hz - A3 topo.

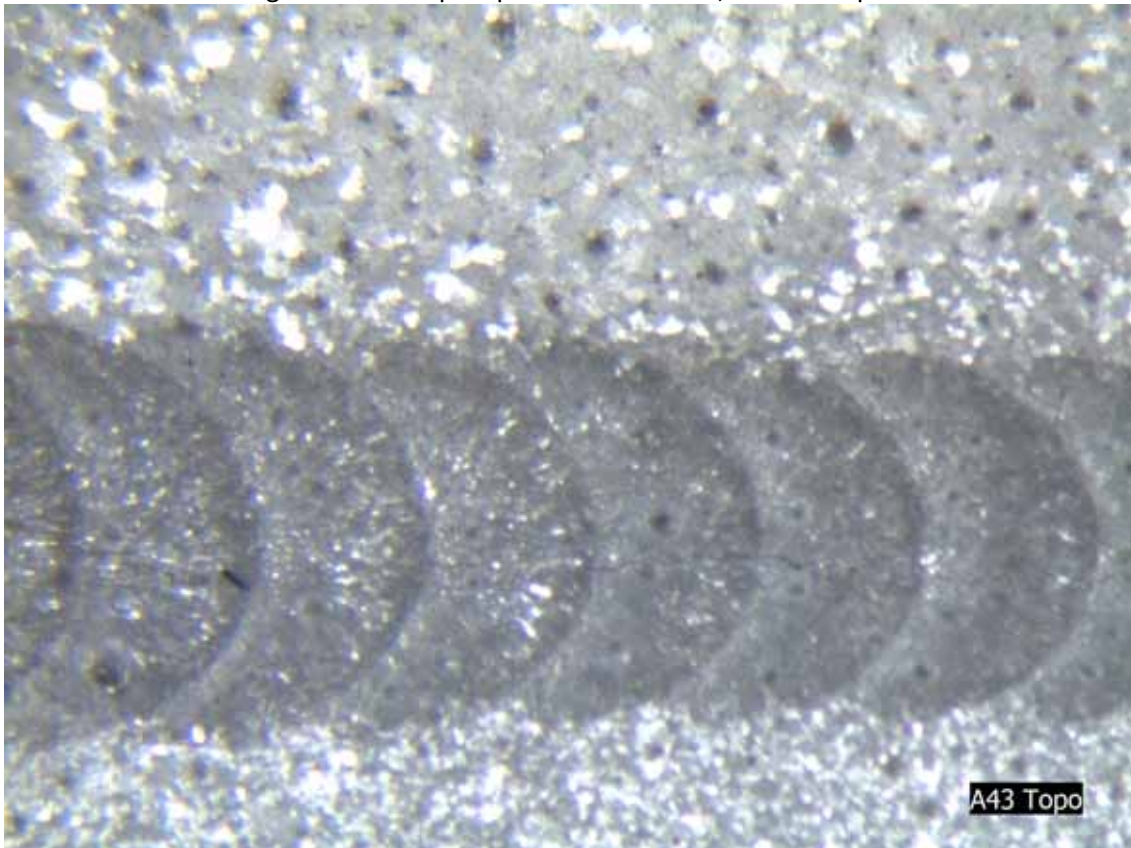


Figura F19 - Freq. de pulso térmico de 1,7Hz - A4 topo.

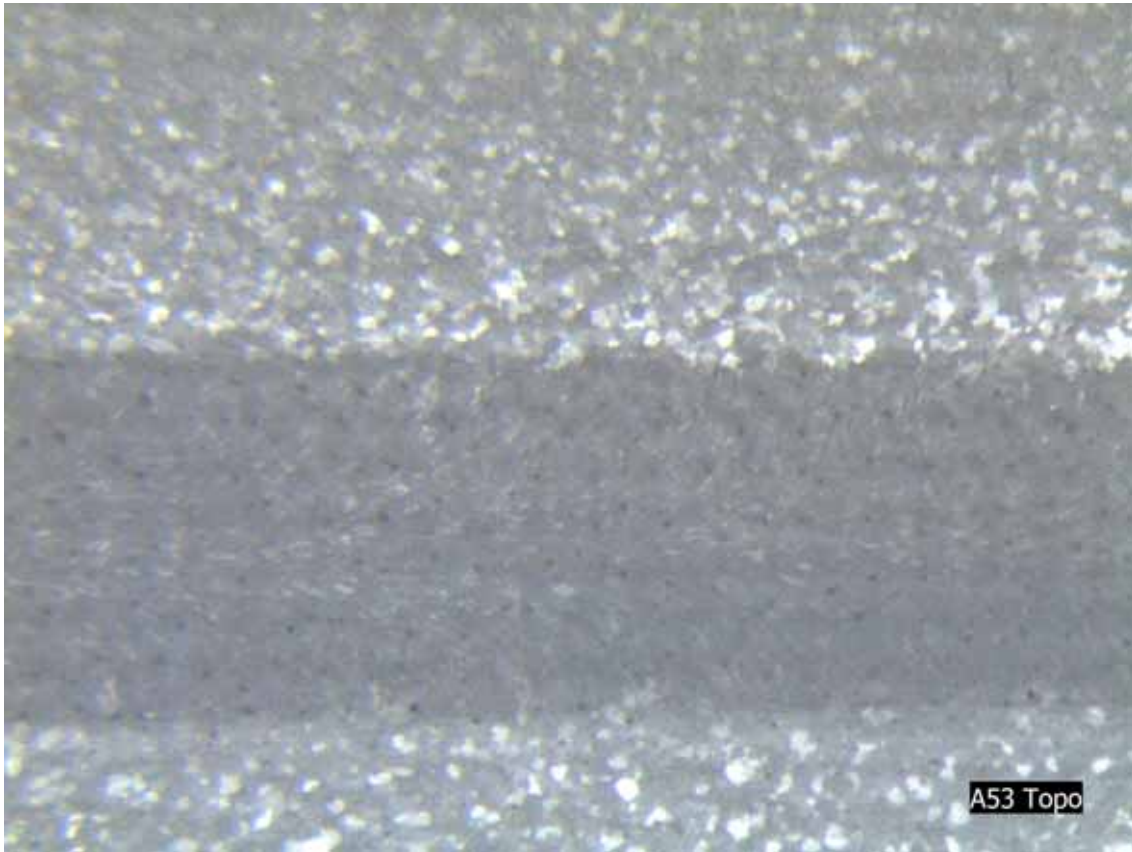


Figura F20 - Freq. de pulso térmico de 5,0Hz - A5 topo.

**Apêndice G: Macros da frequência de inversão de polaridade de 100Hz**

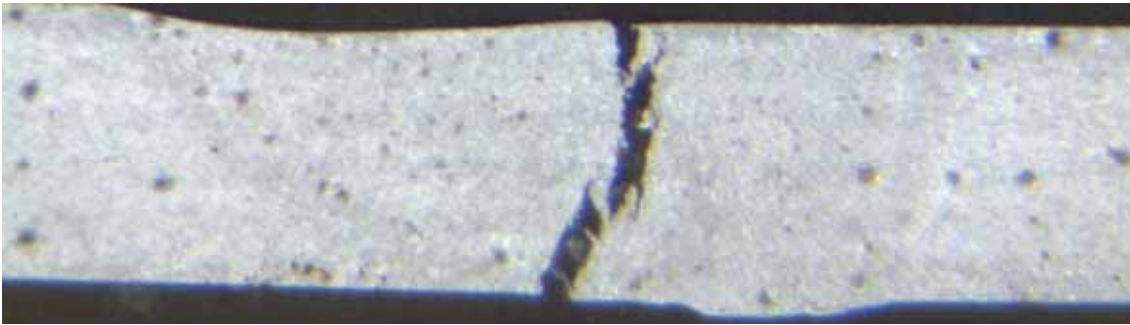


Figura G1 - Sem freq. de pulso térmico - B1 transversal.

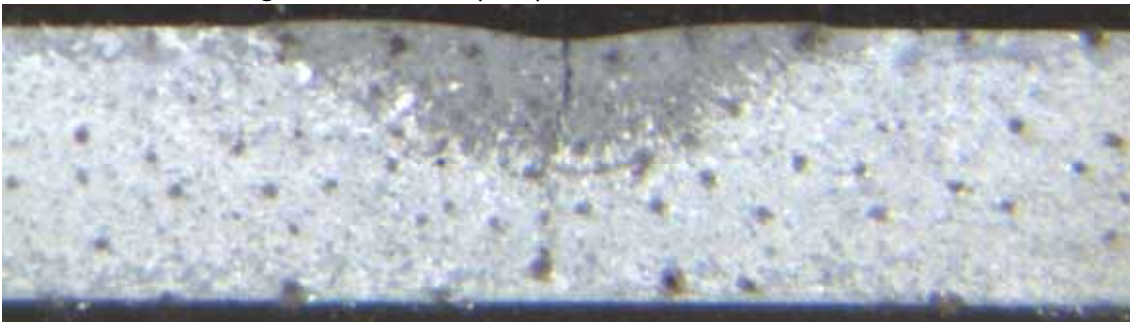


Figura G2 - Freq. de pulso térmico de 0,5Hz - B2 transversal.

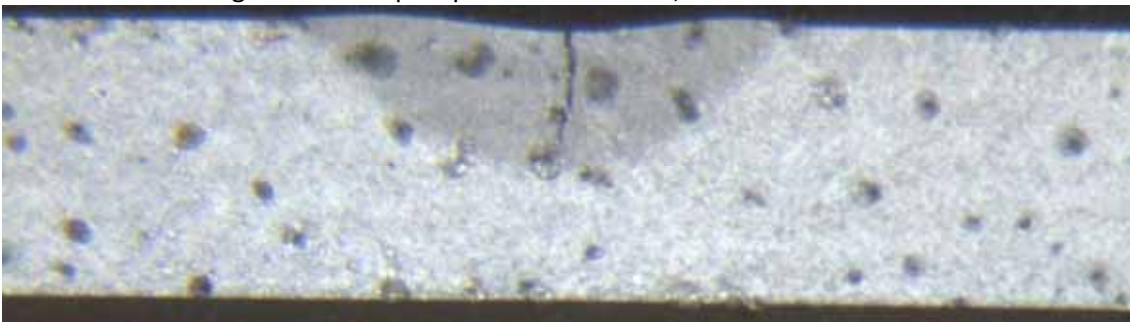


Figura G3 - Freq. de pulso térmico de 1,0Hz - B3 transversal.



Figura G4 - Freq. de pulso térmico de 1,7Hz - B4 transversal.

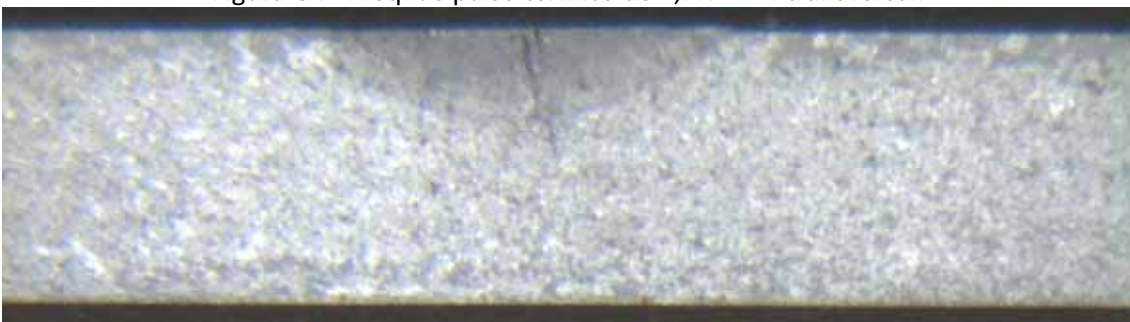


Figura G5 - Freq. de pulso térmico de 5,0Hz - B5 transversal.

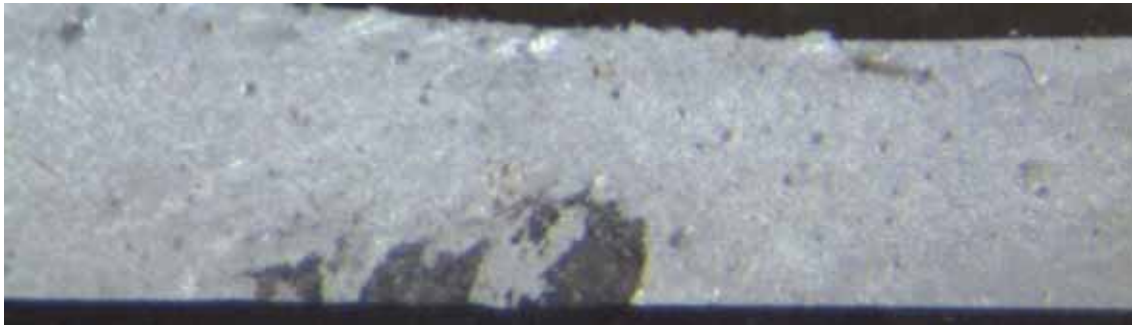


Figura G6 - Sem freq. de pulso térmico - B1 longitudinal no centro do cordão.

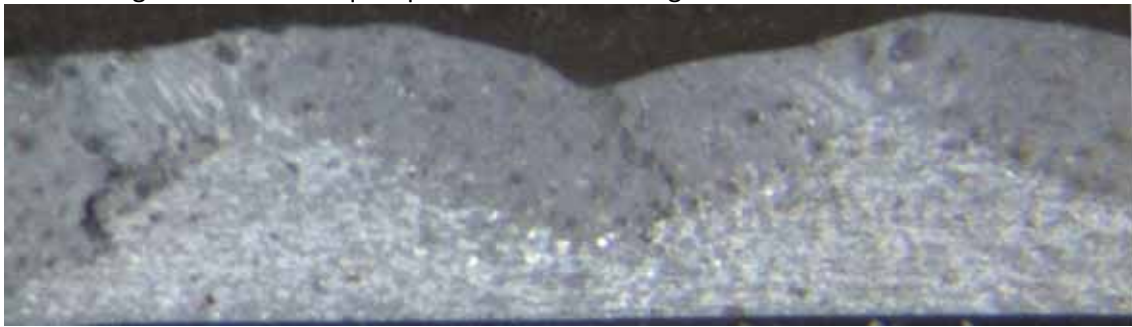


Figura G7 - Freq. de pulso térmico de 0,5Hz - B2 longitudinal no centro do cordão.

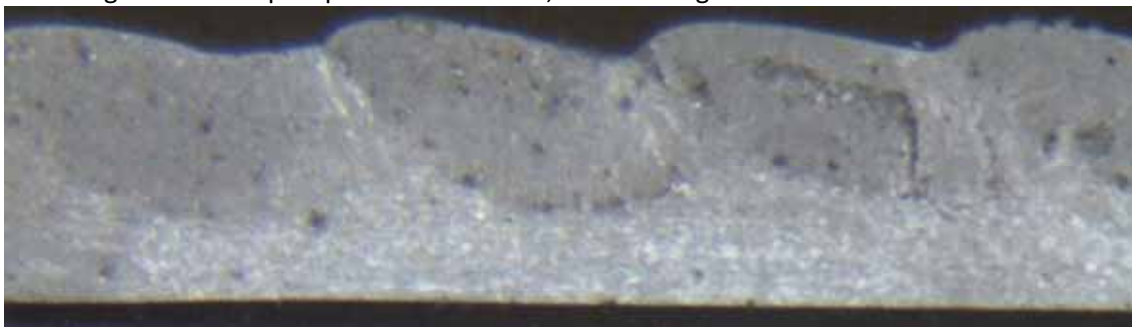


Figura G8 - Freq. de pulso térmico de 1,0Hz - B3 longitudinal no centro do cordão.

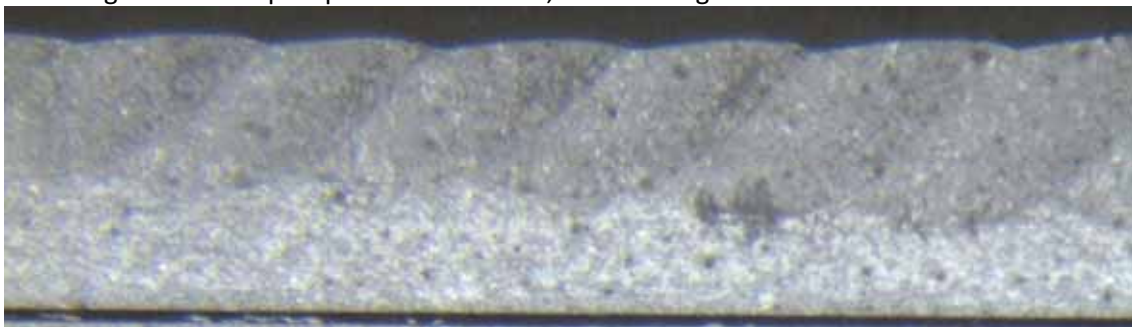


Figura G9 - Freq. de pulso térmico de 1,7Hz - B4 longitudinal no centro do cordão.

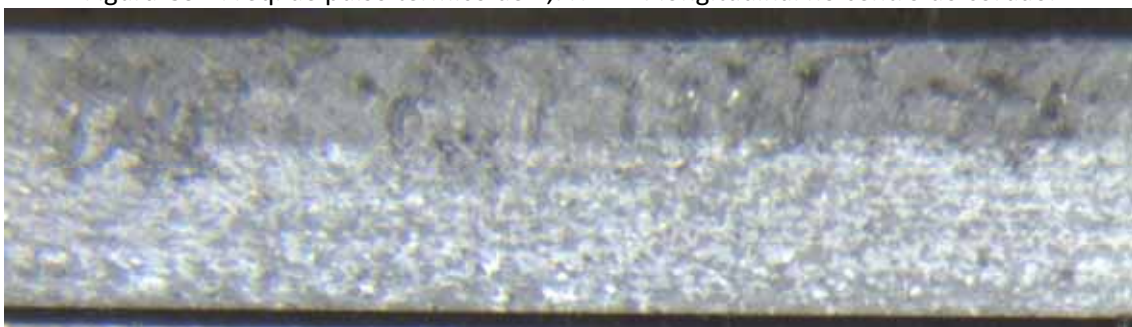


Figura G10 - Freq. de pulso térmico de 5,0Hz - B5 longitudinal no centro do cordão.



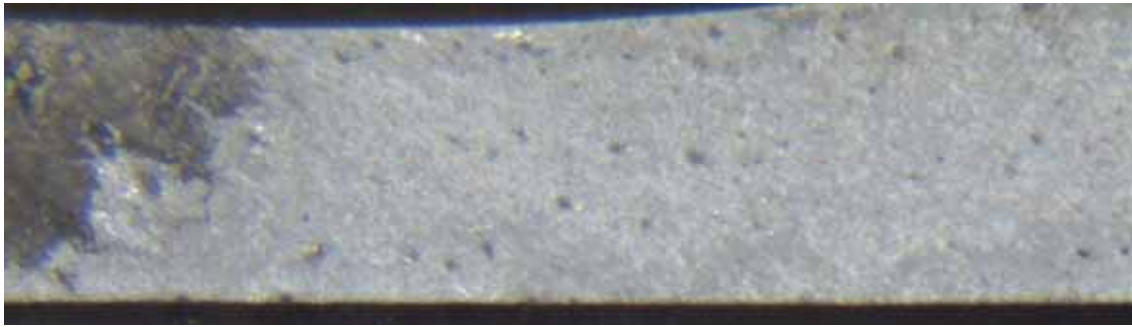


Figura G11 - Sem freq. de pulso térmico - B1 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

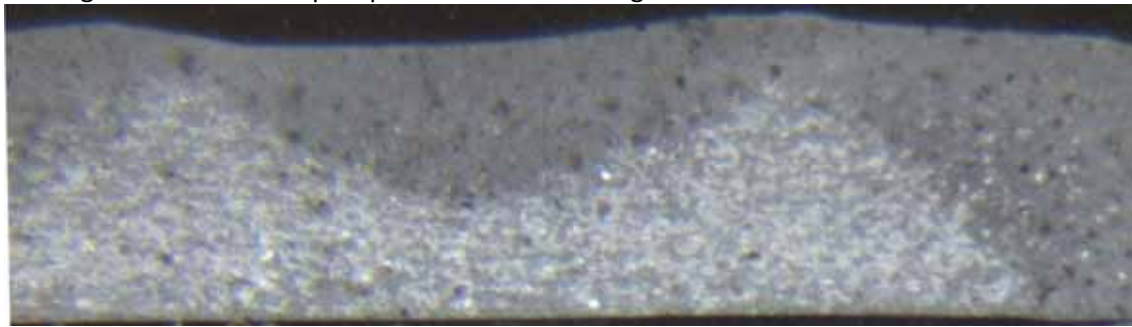


Figura G12 - Freq. de pulso térmico de 0,5Hz - B2 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

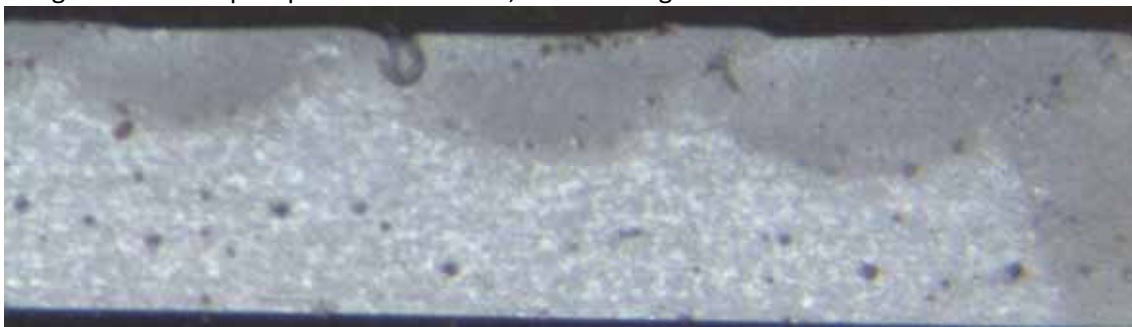


Figura G13- Freq. de pulso térmico de 1,0Hz - B3 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

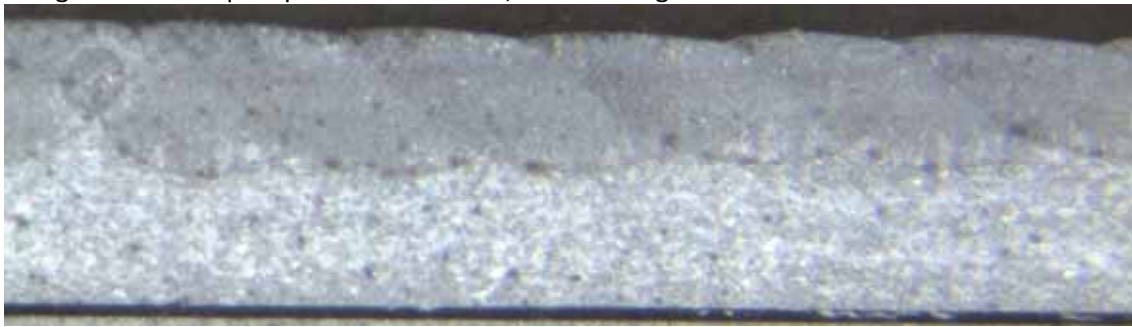


Figura G14 - Freq. de pulso térmico de 1,7Hz - B4 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

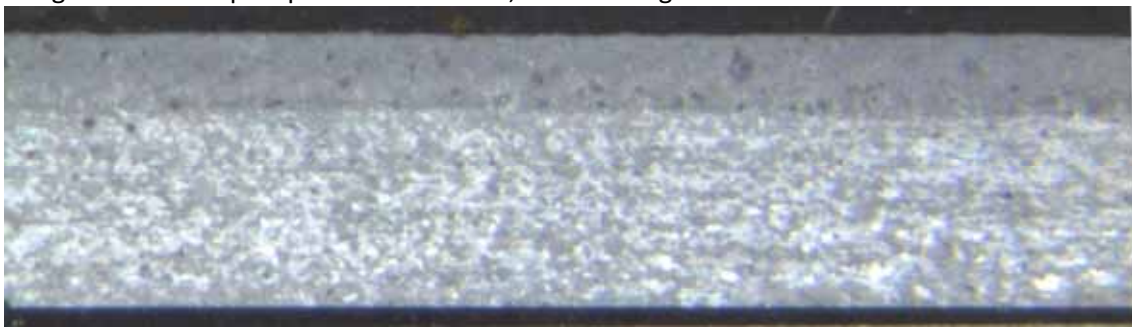


Figura G15 - Freq. de pulso térmico de 5,0Hz - B5 longitudinal à 2mm do centro do cordão.

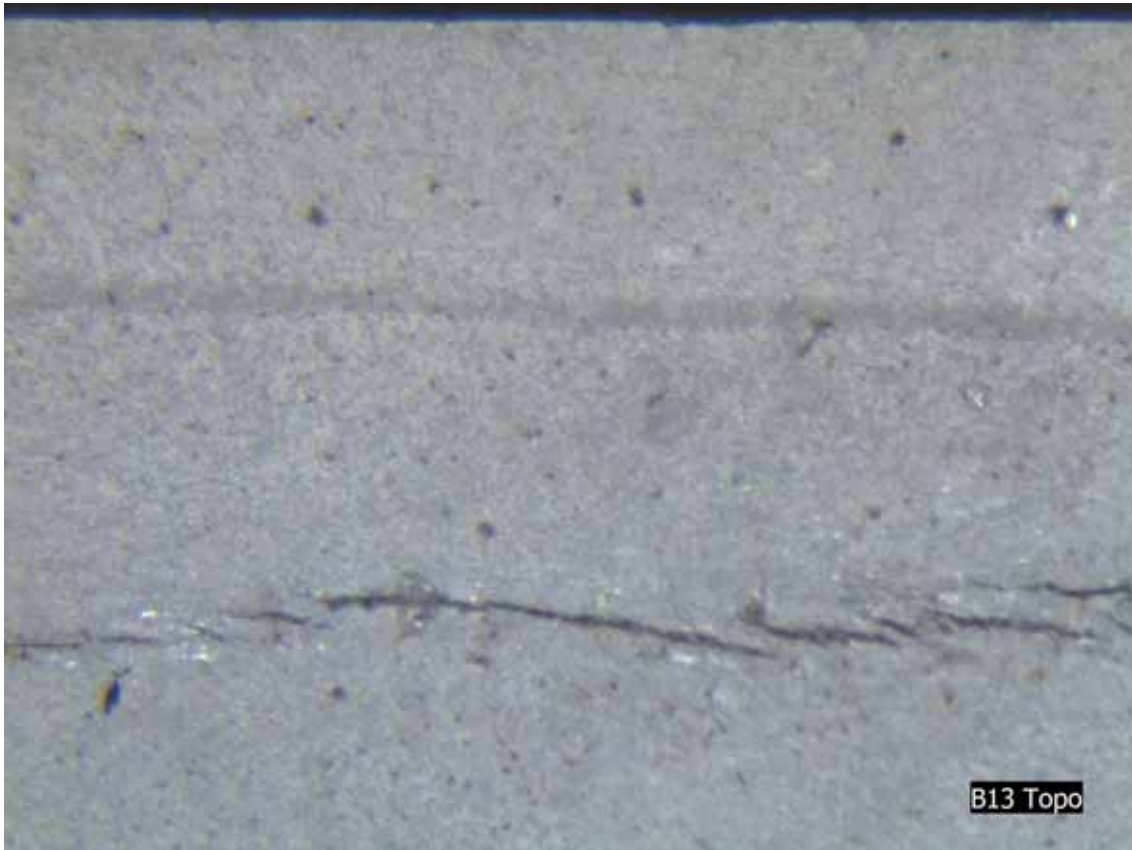


Figura G16 - Sem freq. de pulso térmico - B1 topo.

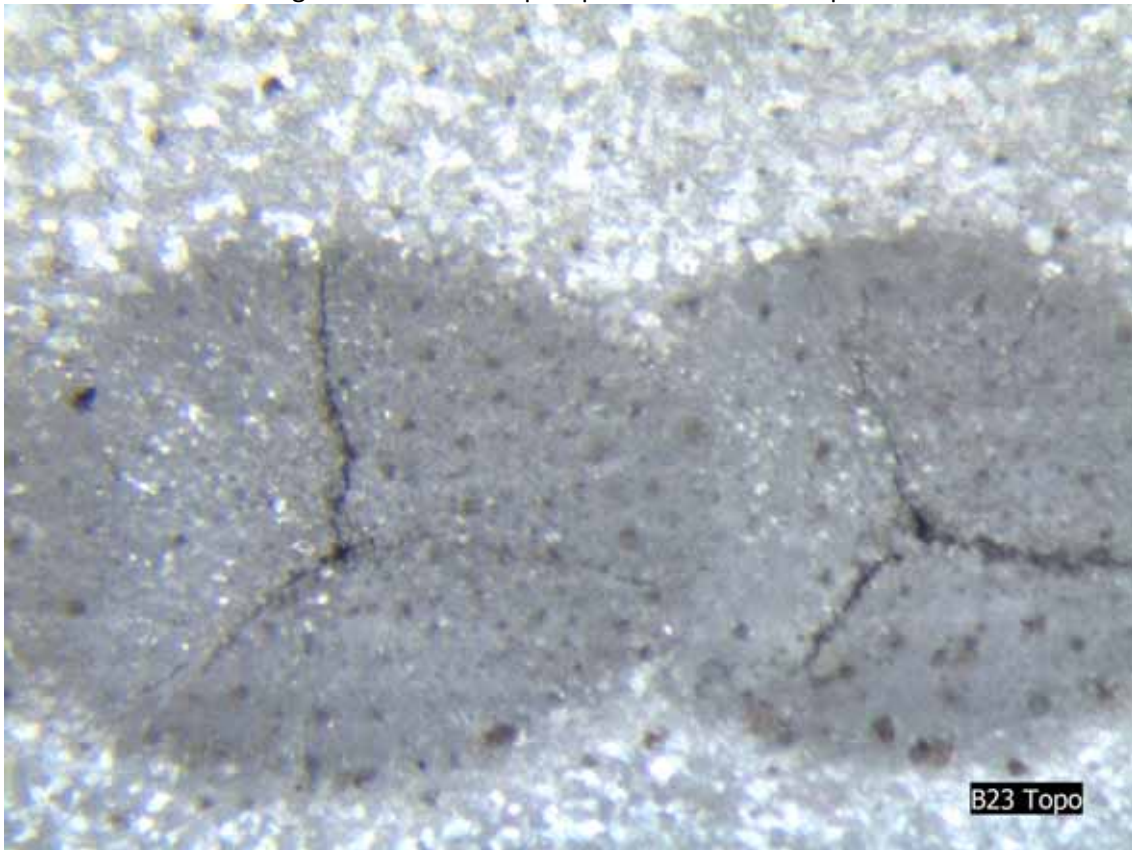


Figura G17 - Freq. de pulso térmico de 0,5Hz - B2 topo.

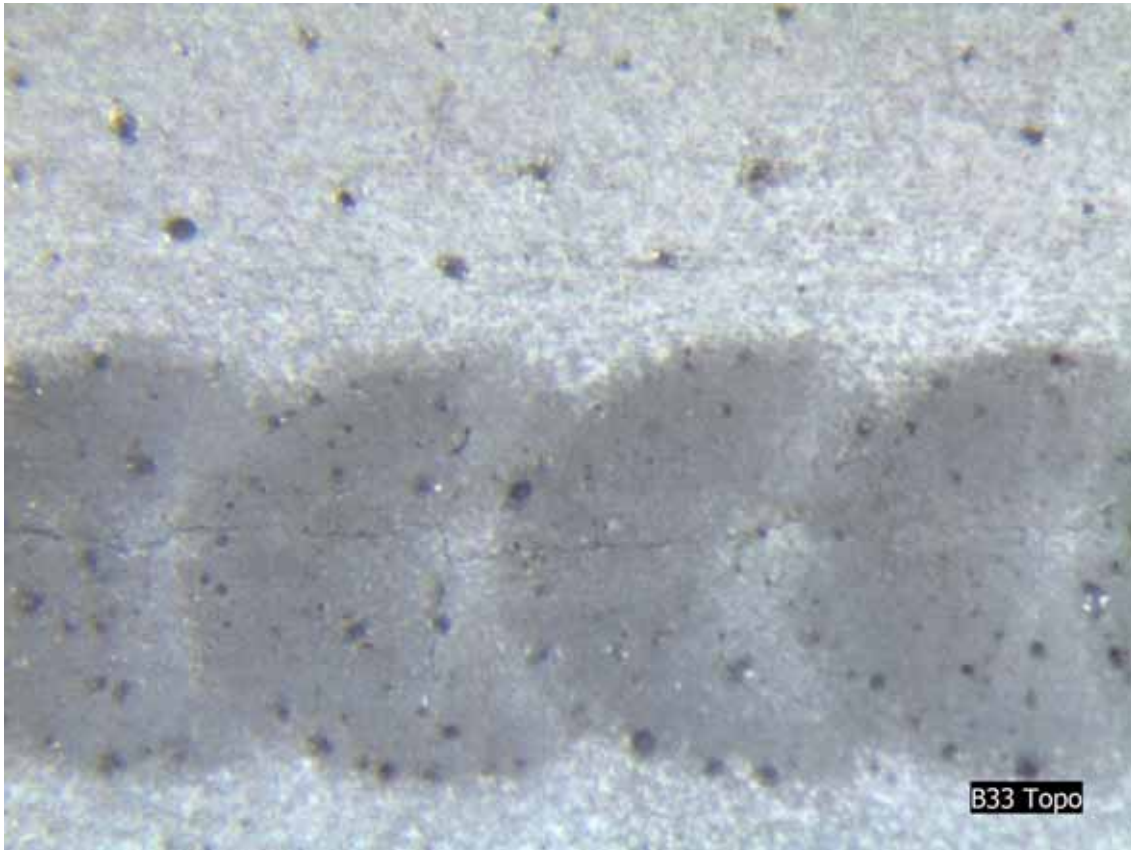


Figura G18 - Freq. de pulso térmico de 1,0Hz - B3 topo.

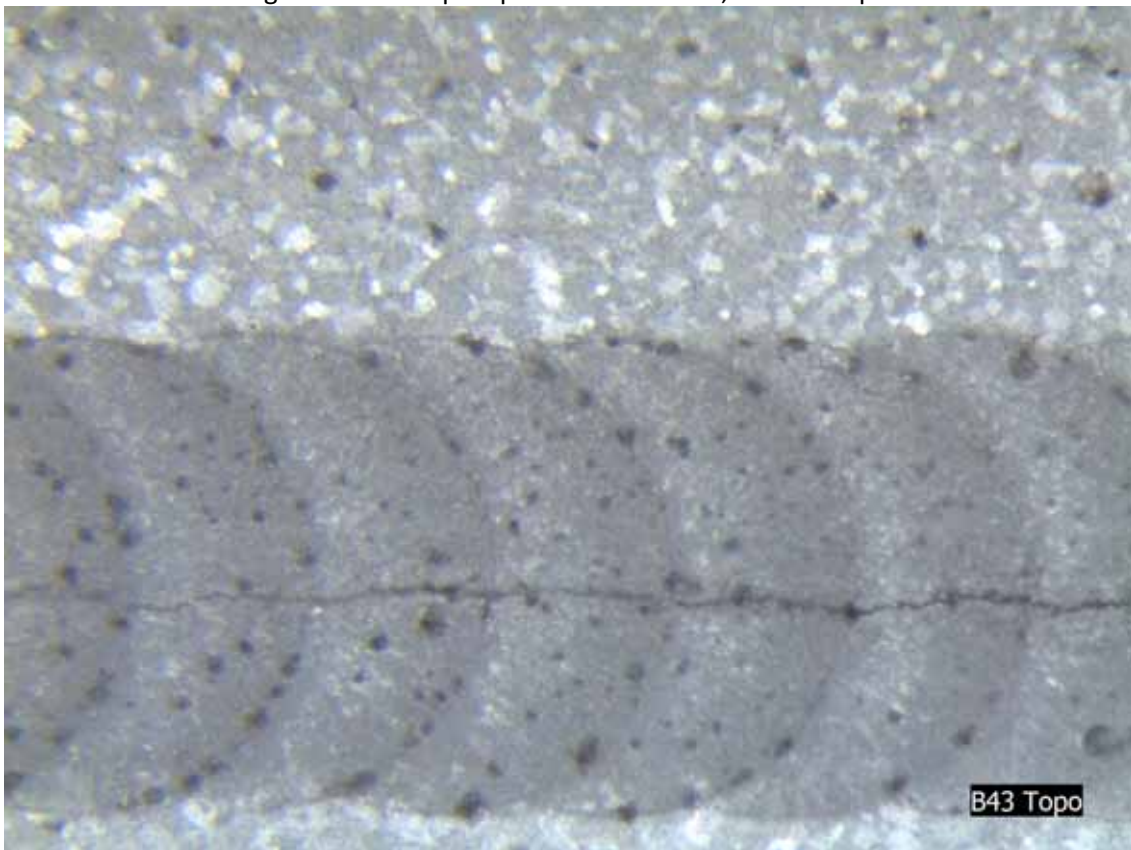


Figura G19 - Freq. de pulso térmico de 1,7Hz - B4 topo.

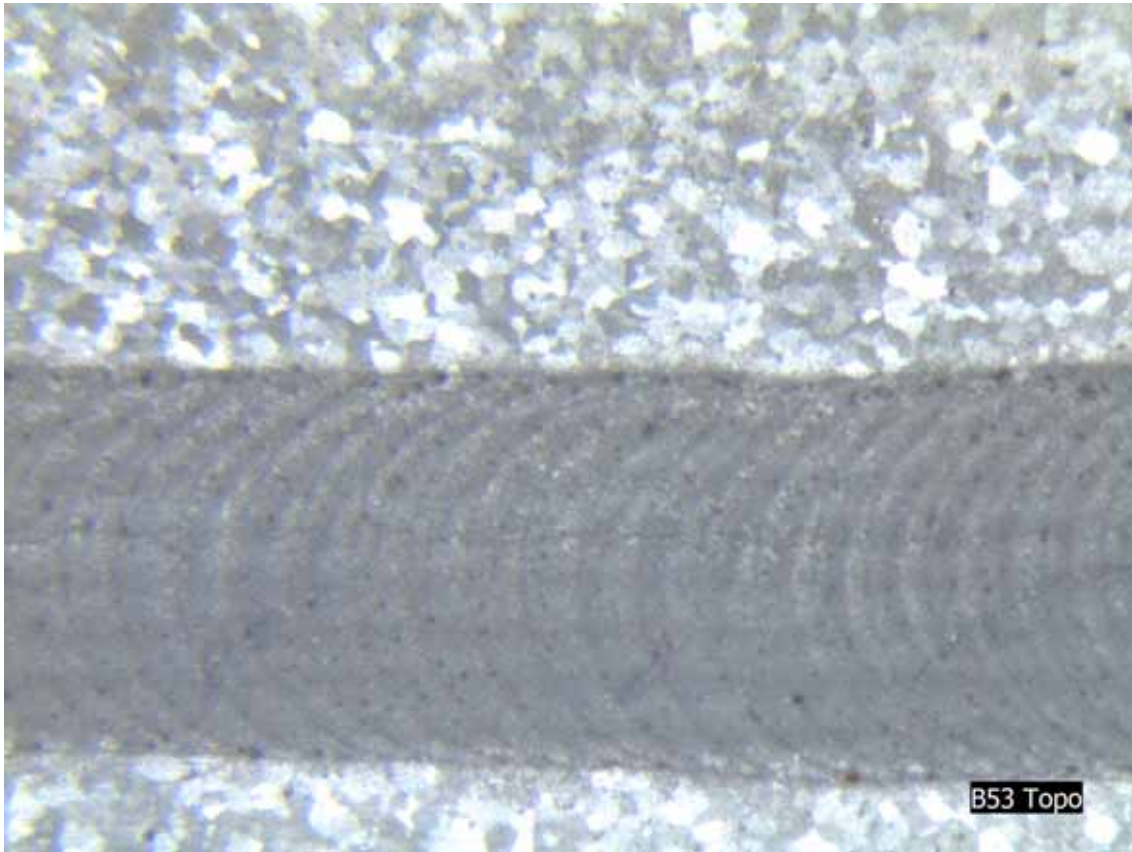
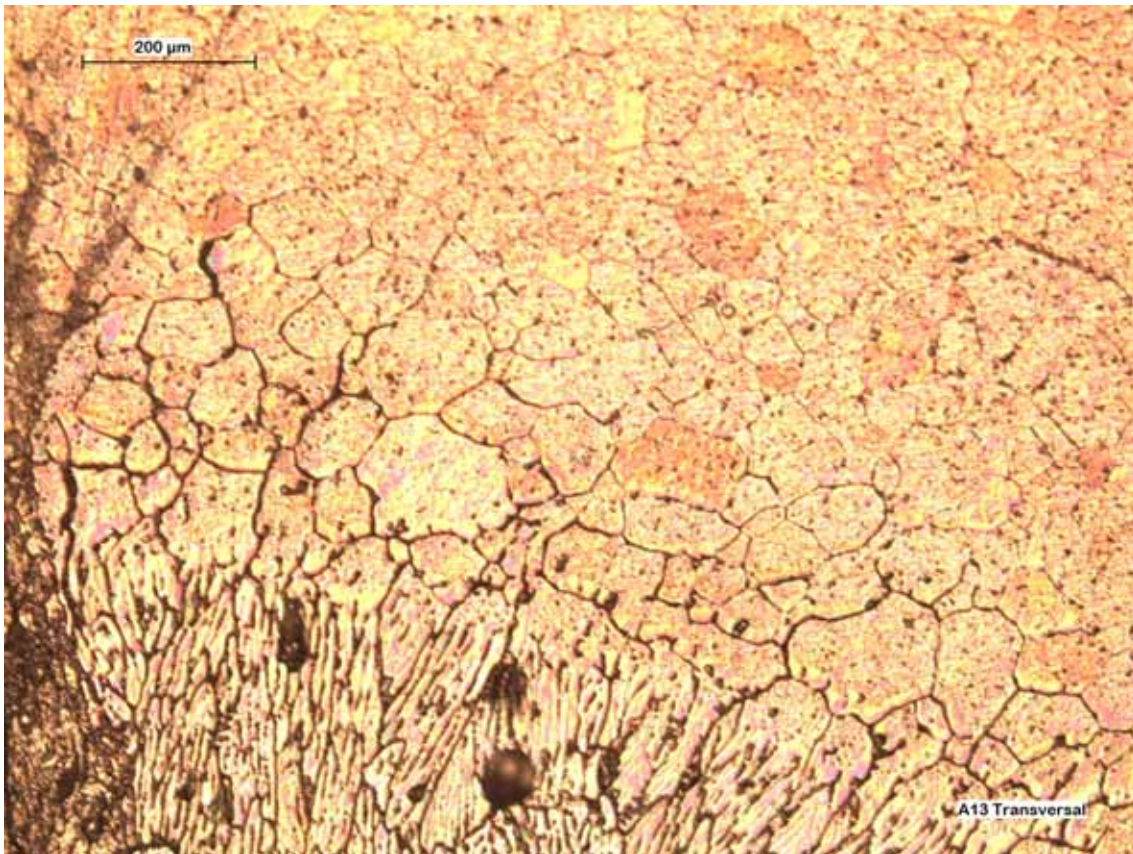
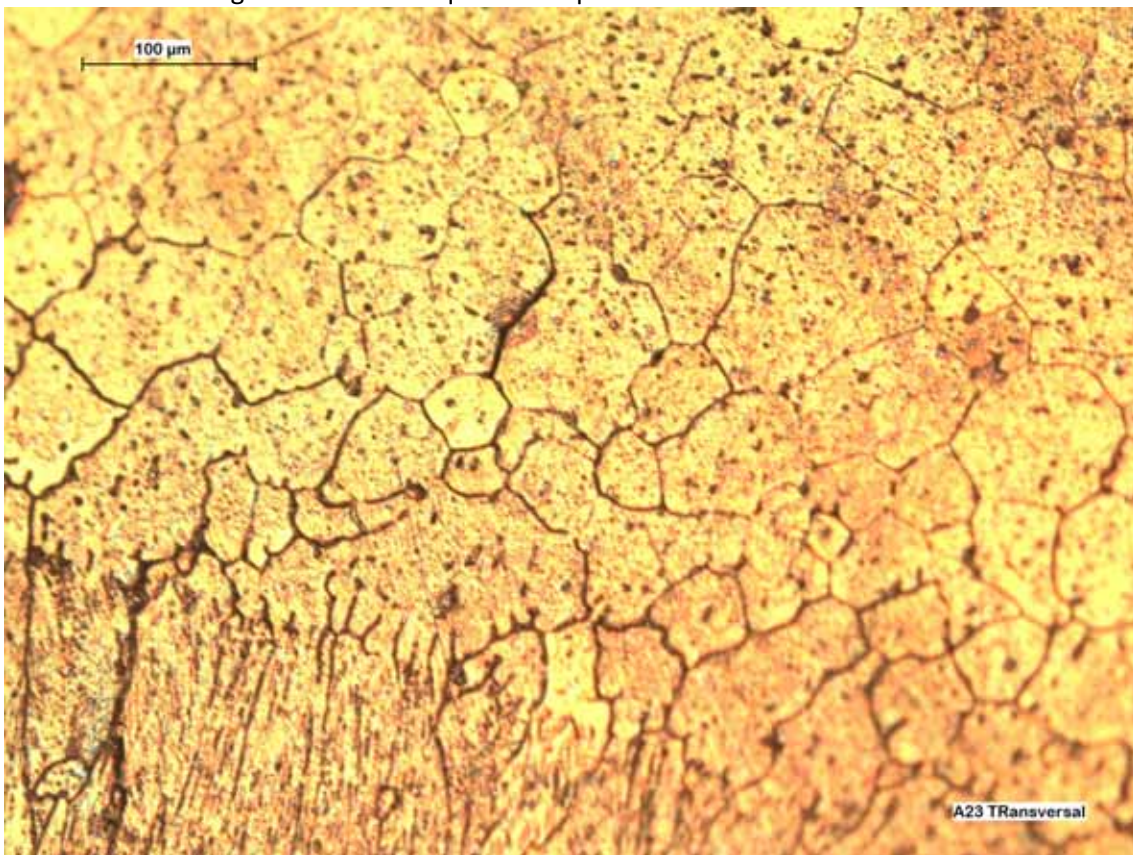


Figura G20 - Freq. de pulso térmico de 5,0Hz - B5 topo

**Apêndice H: Micros da frequência de inversão de polaridade de 50Hz:**



**Figura H1 - Sem frequência de pulso térmico - A1 transversal**



**Figura H2 - Frequência de pulso térmico de 0,5Hz – A2 transversal**

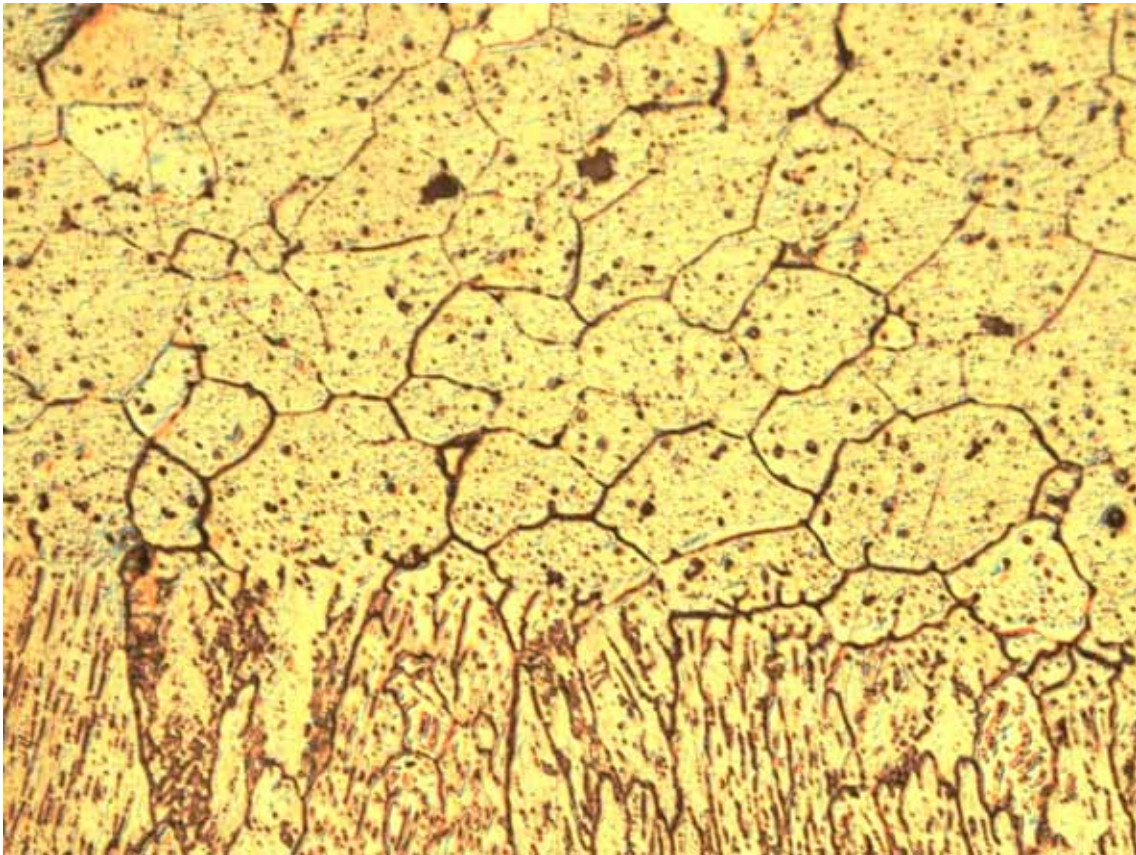


Figura H3 - Frequência de pulso térmico de 1,0Hz - A3 transversal

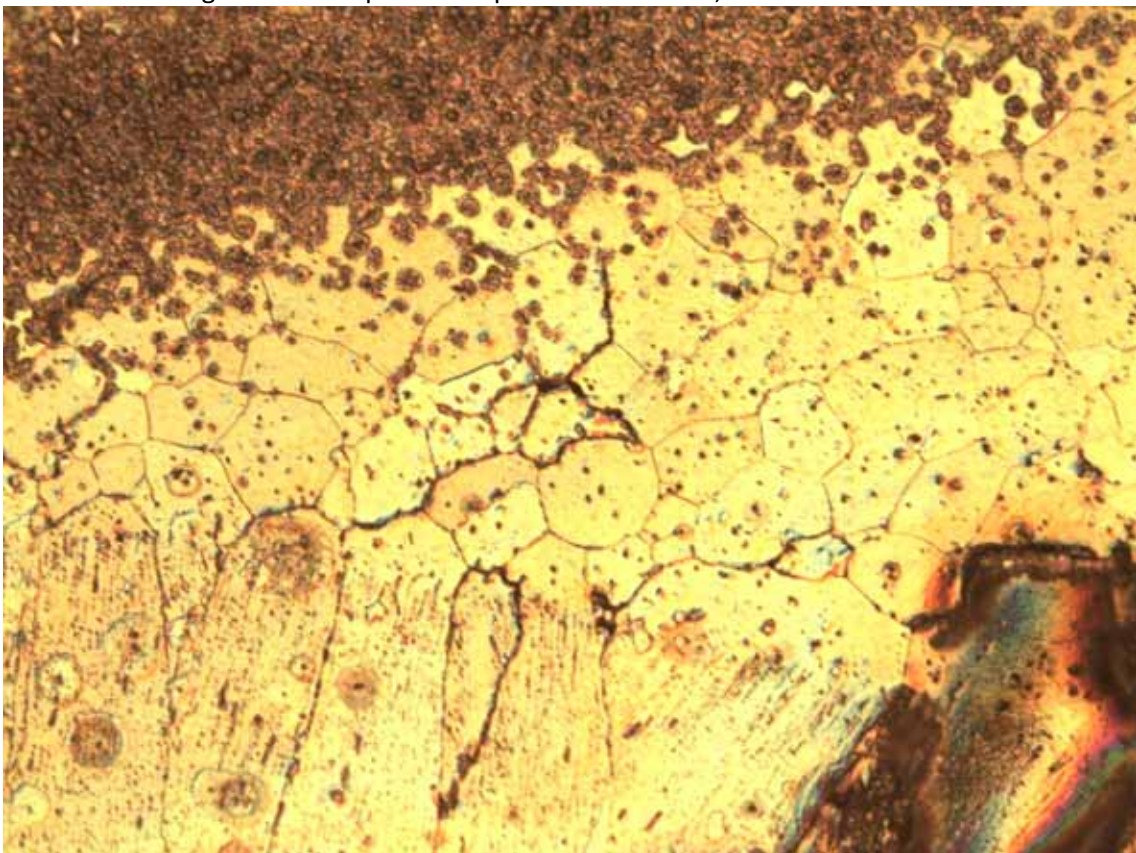


Figura H4 - Frequência de pulso térmico de 1,7Hz - A4 transversal

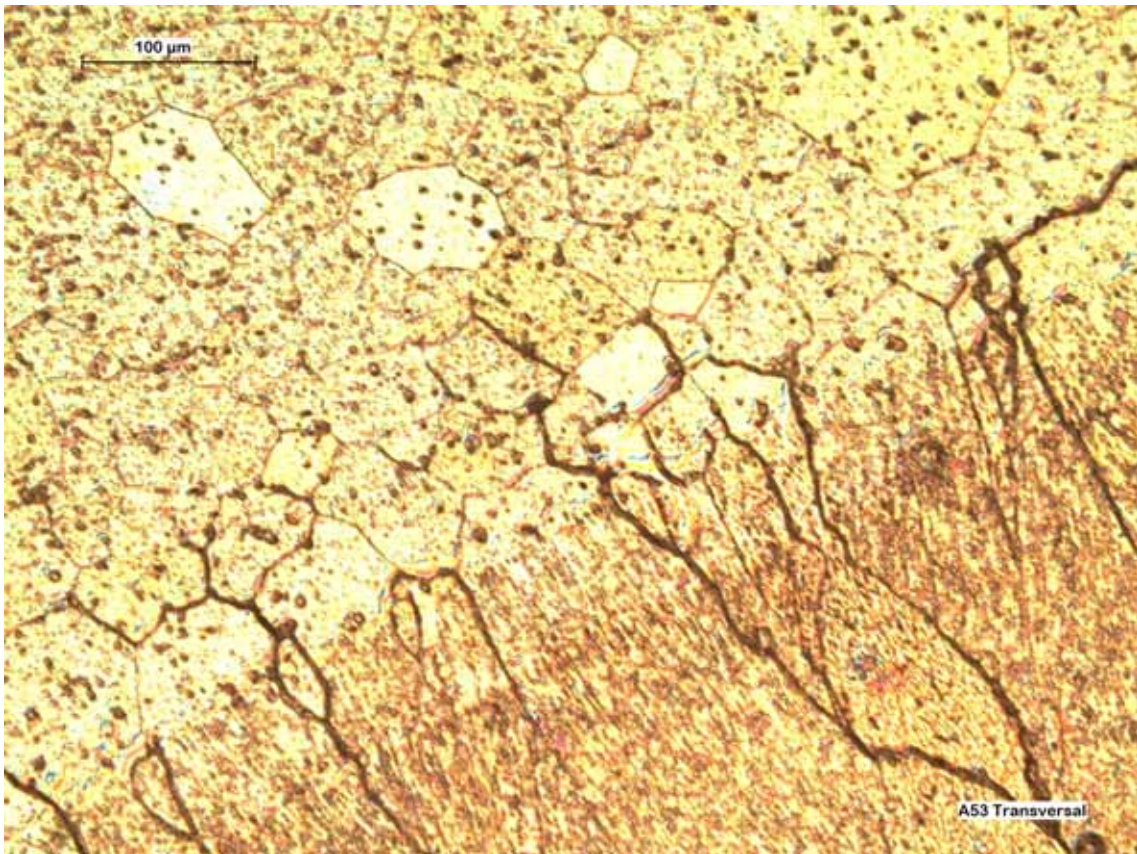


Figura H5 – Frequência de pulso térmico de 5Hz – A5 transversal