

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Este capítulo descreve as peculiaridades envolvidas nas etapas de planejamento e de execução dos experimentos. A realização sistemática dos experimentos é descrita com a preocupação de se enfatizar os procedimentos utilizados, tanto no âmbito do *processo*, quanto no da *metalurgia da soldagem*. Em termos de processo, ressalta-se o modo de seleção, de preparação, de execução e de monitoração dos procedimentos de soldagem, envolvidos na confecção dos cordões de solda. Pelo lado metalúrgico, é feito um detalhamento dos aspectos operacionais relacionados com os ensaios mecânicos, modo de extração e preparação dos corpos de prova e as técnicas de caracterização das particularidades, oriundas da implementação da *pulsção térmica*, apresentadas pela zona fundida.

4.2 Processo de soldagem

4.2.1 Consumíveis

a) Metal de base

Para avaliação dos possíveis efeitos da utilização da variante *MIG/MAG Térmico* sobre a estabilidade do processo de transferência metálica (dinâmica dos equipamentos e a estabilidade do arco), as características geométricas do cordão e, finalmente, a microestrutura da zona fundida (**ZF**) selecionou-se duas ligas metálicas que apresentassem características distintas de susceptibilidade à transformação no estado sólido, ou seja, uma liga de aço com baixo teor de carbono (ABNT 1020) e uma liga de AlMg (AA 5052-H34), respectivamente com e sem transformação no estado sólido. Na tabela 4.1 são relacionadas as principais propriedades mecânicas e na tabela 4.2 apresentam-se as especificações técnicas e as composições químicas das referidas ligas adotadas como metais de base.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas dos metais de base (ASM,1996/1998).

| Material | Especificação | Densidade (kg/m ³) | Dureza Vickers (HV) | Resistência à tração (MPa) |
|----------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Aço | ABNT 1020 | 7800 | 210 | 380 |
| Alumínio | AA 5052- H34 | 2680 | 68 | 260 |

Tabela 4.2 – Características dimensionais adotadas e composições químicas apresentadas pelos metais de base (ASM, 1996/1998).

| Identificação | | | Composição química (% em peso) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|---|
| Material | Especificação | Dimensões (mm) | |
| Aço | ABNT 1020 | 300 x 150 x 6,3 300 x 150 x 19 | C (0,18 a 0,23) Mn (0,40 a 0,60) Si (0,30 a 0,60) S (0,035 máx) P (0,035 máx) Fe (balanço) |
| Alumínio | AA 5052-H34 | | Mg (2,20 a 2,80) Si (0,25 máx) Fe (0,40 máx) Cu (0,10 máx) Mn (0,10 máx) Cr (0,15 a 0,35) Al (balanço) |

b) Metal de adição

Os metais de adição para confecção dos cordões de solda foram selecionados com base em recomendações propostas por fabricantes de consumíveis, tendo como referência a composição química dos metais de base. A tabela 4.3 exibe as composições químicas e a nomenclatura usada na identificação dos consumíveis.

Tabela 4.3 – Características e composições químicas obtidas na deposição dos metais de adição. Extraído de ASM (1998) e Okumura et al (1982).

| Identificação | | | Composição química (% em peso) |
|---------------|---------------------|---------------|--|
| Material | Especificação (AWS) | Diâmetro (mm) | |
| Aço carbono | AWS ER 70S-6 | 1,2 | C (0,07) Mn (1,58) Si (0,89) S (0,017) P (0,02) Al (0,001) Cu (< 0,45) Fe (balanço) |
| Alumínio | AWS ER 5356 | 1,2 | Mg (4,7) Si (0,1) Fe (0,1) Mn (0,8) Al (balanço) |

c) Proteção gasosa

□ Aço carbono

Uma vez que o tipo de proteção gasosa e a vazão de trabalho foram considerados como parâmetro fixos (não tendo, a princípio, influência sobre a resposta levantada) foi aplicada uma mistura gasosa contendo 95% Ar + 5% CO₂ sob uma vazão de trabalho constante e igual a 19 l/min, para toda faixa de

Tabela 4.5 – Resumo dos parâmetros de pulsação convencional para o AlMg.

| Alumínio (AWS ER 5356) | | | | | | |
|------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|
| Parâmetros de pulsação | | | | | | |
| v_a (m/min) | I_p (A) | I_b (A) | t_p (ms) | t_b (ms) | I_m (A) | I_{ef} (A) |
| 4,0 | 180 | 44 | 5,0 | 23,9 | 67 | 84 |
| 5,5 | 200 | 55 | 5,0 | 14,6 | 92 | 111 |
| 6,0 | 200 | 50 | 5,0 | 11,1 | 97 | 118 |
| 7,0 | 220 | 60 | 5,0 | 8,8 | 117 | 141 |
| 9,0 | 250 | 75 | 5,0 | 5,8 | 156 | 178 |

4.2.3 Procedimentos de soldagem complementares

- ❑ Utilização de um valor fixo da distância entre o bico de contato e o metal de base (**DCP**) igual a 19 mm;
- ❑ Ângulos de deslocamento e trabalho constantes e com valores de 0 e 90°, respectivamente;
- ❑ Posição de soldagem plana (**1G**);
- ❑ Manutenção de um valor fixo na corrente de curto-circuito (I_{cc}) igual a 350 A;
- ❑ Manutenção de um valor fixo na tensão de curto-circuito (U_{cc}) igual a 10V;
- ❑ Velocidade de soldagem variando em função da condição experimental realizada;
- ❑ Valor do comprimento do arco (ℓ_0) variando em função da forma de onda de *pulsação térmica* utilizada;
- ❑ Comprimento dos cordões na condição simples deposição igual a 15 cm.

4.2.4 Equipamentos

As peculiaridades e a relação dos equipamentos e programas utilizados nos experimentos serão descritas a seguir, objetivando explicitar as técnicas de caracterização e de visualização do procedimento de soldagem.

a) Fonte de soldagem e modo de operação

O processo de deposição foi executado a partir da utilização de uma fonte de soldagem com microprocessadores e multiprocesso (**MTE DIGITEC 450**), em virtude de sua facilidade de acionamento e comunicação remota, via computador, com aparelhos periféricos. Esta característica permite que sejam executadas ao

mesmo tempo operações de controle e de aquisição dos sinais de corrente (I_s), tensão (U_s), velocidade de alimentação do arame (v_a), vazão de gás (ϕ_g) e velocidade de deslocamento da tocha (v_s). Esta flexibilidade permite a aplicação da **DIGITEC** em atividades científicas e em sistemas automatizados de soldagem (célula de soldagem), entre outros.

A **DIGITEC** é uma fonte de soldagem transistorizada, com chaveamento após o secundário do transformador, que apresenta as seguintes características operacionais: corrente nominal de 280 A a 100% do fator de trabalho, dinâmica no sinal de corrente (di/dt) na ordem de 600 A/ms, dinâmica no sinal da velocidade de alimentação do arame (dv_a/dt) de 0 a 6 m/min no intervalo de 46 ms e fator de potência de 94%.

Na confecção dos depósitos, a fonte foi selecionada no modo “*remoto*” utilizando-se os processos de soldagem “*MIG pulsado com pulsação térmica*”, com imposição de corrente no pulso e na base. Seu acionamento foi executado remotamente via o *software* de controle “**TERMICO2**”, desenvolvido pela equipe do LABSOLDA/UFSC. Na tabela 4.6 são descritas outras características técnicas do equipamento. Outros detalhes da fonte **DIGITEC** são apresentados no item “(e) *Bancada de soldagem*”.

Tabela 4.6 – Características técnicas apresentadas pela fonte de soldagem.

| Item | Característica |
|---------------------------|---------------------------------|
| Tipo de corrente | Contínua (constante ou pulsada) |
| Corrente máxima | 450 A |
| Tensão de alimentação | 220, 380 ou 440 V Trifásica |
| Tensão em vazio | 64 V |
| Potência máxima consumida | 10 kVA |
| Dimensões | 0,5 x 0,6 x 0,9 m |
| Peso | 150 kg |
| Circuito de arrefecimento | 3,5 litros de água destilada |

b) Placa de aquisição e controle INTERDATA

A **INTERDATA** foi utilizada como forma de possibilitar o processo de comunicação entre a fonte de soldagem e o programa de gerenciamento da variante *MIG/MAG Térmico*, denominado de **TERMICO2**, e, ainda, do *software* comercial de aquisição (**OSCILOS**) com os sensores de **I**, **U** e **v_a**.

A placa de aquisição e controle apresenta um conversor A/D de 16 canais, um conversor D/A de 8 canais, um freqüencímetro e uma porta digital com 8 entradas e 8 saídas. O conversor A/D opera na faixa de -10 V a +10 V, com leitura em 8 ou 12 bit, e o conversor D/A trabalha com saída de -5 V a +5 V, com 8 canais de saída e 12 bit.

Para a realização dos experimentos, a placa **INTERDATA** foi calibrada com uma freqüência de aquisição de 5 kHz, no processo de confecção dos corpos-de-prova, e de 10 kHz, no processo de filmagem do modo de transferência metálica (em virtude da necessidade de sincronização dos sinais de tensão e corrente com o sinal da filmadora).

c) **Software de controle do processo MIG/MAG Térmico**

A escolha pelo comando remoto, via *software*, da variante *MIG/MAG Térmico* deveu-se à necessidade de se comandar individualmente e independentemente os diferentes parâmetros de soldagem, inerentes a esta variante. O controle de todos os parâmetros envolvidos com a *pulsção térmica*, respectivamente, nas fases de *pulso* e *base térmica*, foi implementado através do programa, em linguagem Pascal, denominado **TERMICO2** (elaborado pelo LABSOLDA/IMC).

O *software* permite, via **INTERDATA**, atuar no comando dos sinais da fonte **DIGITEC**. Basicamente, o programa **TERMICO2** controla e avalia os valores instantâneos dos sinais de tensão (**U**) e de corrente (**I**) e, concomitantemente, caso seja detectado algum curto-circuito ($U < U_{cc}$), interrompe a geração dos parâmetros de pulsção e a fonte passa a operar com a corrente de curto-circuito (I_{cc}), até o restabelecimento da abertura do arco ($U > U_{cc}$).

O programa **TERMICO2** gerencia, em tempo real, os valores dos seguintes parâmetros (vide figura 4.1 e figuras 4.6 e 4.7 para detalhamento das variáveis):

- Na fase de *pulso térmico* (**pt**)
 - Tempo de pulso térmico (t_{pt}), com incrementos de 10^{-2} s;
 - Velocidade de alimentação do arame na fase de pulso térmico (v_{a-pt}), com incremento de 10^{-1} m/min;
 - Tempo de pulso na fase de pulso térmico (t_{p-pt}), com incremento de 10^{-4} s;

- Tempo de base na fase de pulso térmico (t_{b-pt}), com incremento de 10^{-4} s;
 - Corrente de pulso na fase de pulso térmico (I_{p-pt}), com incremento de 1 A;
 - Corrente de base na fase de pulso térmico (I_{b-pt}), com incremento de 1 A.
- Na fase de *base térmica* (**bt**)
- Tempo de base térmica (t_{bt}), com incrementos de 10^{-2} s;
 - Velocidade de alimentação do arame na fase de base térmica (v_{a-bt}), com incremento de 10^{-1} m/min;
 - Tempo de pulso na fase de base térmica (t_{p-bt}), com incremento de 10^{-4} s;
 - Tempo de base na fase de base térmica (t_{b-bt}), com incremento de 10^{-4} s;
 - Corrente de pulso na fase de base térmica (I_{p-bt}), com incremento de 1 A;
 - Corrente de base na fase de base térmica (I_{b-bt}), com incremento de 1 A.
- Parâmetros de curto-circuito
- Corrente de curto-circuito (I_{cc}), com incrementos de 1 A;
 - Tensão de curto-circuito (U_{cc}), com incrementos de 1 V.

A figura 4.1 apresenta uma descrição da distribuição das variáveis na tela do programa **TERMICO2** e na figura 4.3 é esquematiza a interação do programa com a bancada de soldagem.

d) Programa de monitoração do processo de soldagem

A monitoração e captura, em tempo real, dos sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame foram feitas a partir do *software* comercial **OSCILOS**, desenvolvido pelo LABSOLDA/IMC. O *software* permite simular na tela do microcomputador um osciloscópio digital a partir dos sinais de tensão

(analógicos) enviados, por sensores conectados na **DIGITEC** e na placa de aquisição **INTERDATA** (conversão para digital). O **OSCILOS** permite a representação gráfica, dos sinais recebidos pela placa de aquisição, na forma da variável selecionada em função do tempo de aquisição. Nas obtenções dos sinais, como já citado anteriormente, empregou-se frequência de aquisição de 5 kHz, com intervalos de leitura de 1 s para o modo *pulsado convencional* e de 2 s para a soldagem com *pulsação térmica*.

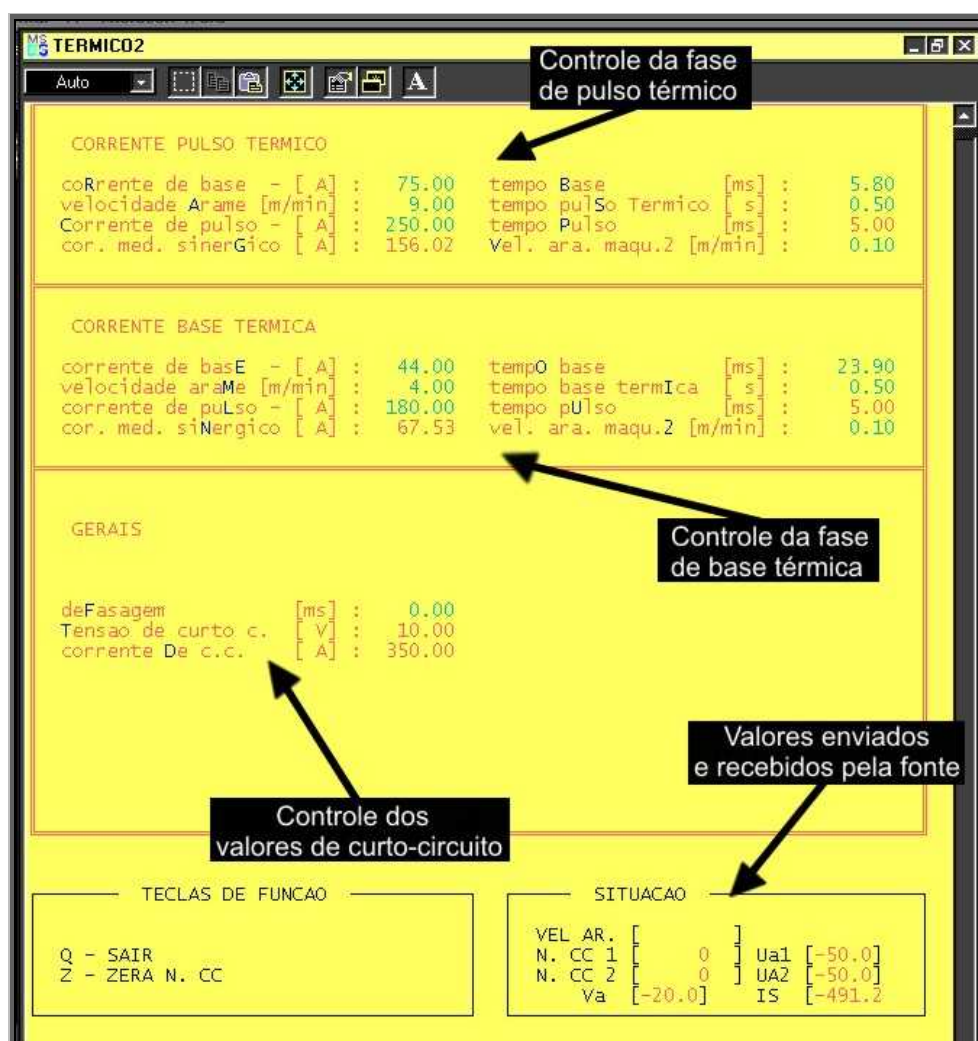


Figura 4.1 – Tela do programa de controle **TERMICO2**.

O sinal de tensão foi medido através de dois condutores fazendo a ponte entre a entrada da **INTERDATA** e os pontos de tomada de tensão, posicionados no cabo de alimentação de corrente da tocha de soldagem (+), o mais próximo do bico de contato, e no suporte de fixação das chapas à mesa de soldagem (-), vide figura 4.2(a). Por sua vez, o sinal de corrente foi capturado por meio de um

sensor (transdutor) Hall, ligado à placa de aquisição e ao cabo de alimentação da tocha (+), vide figura 4.2(b). O sinal da velocidade de alimentação do arame, por sua vez, foi obtido com a utilização de um sensor de velocidade contendo uma resolução de 500 pulsos por volta, fabricado pela HP, acoplado próximo ao sistema de tracionamento do arame (vide figura 4.5(b)).

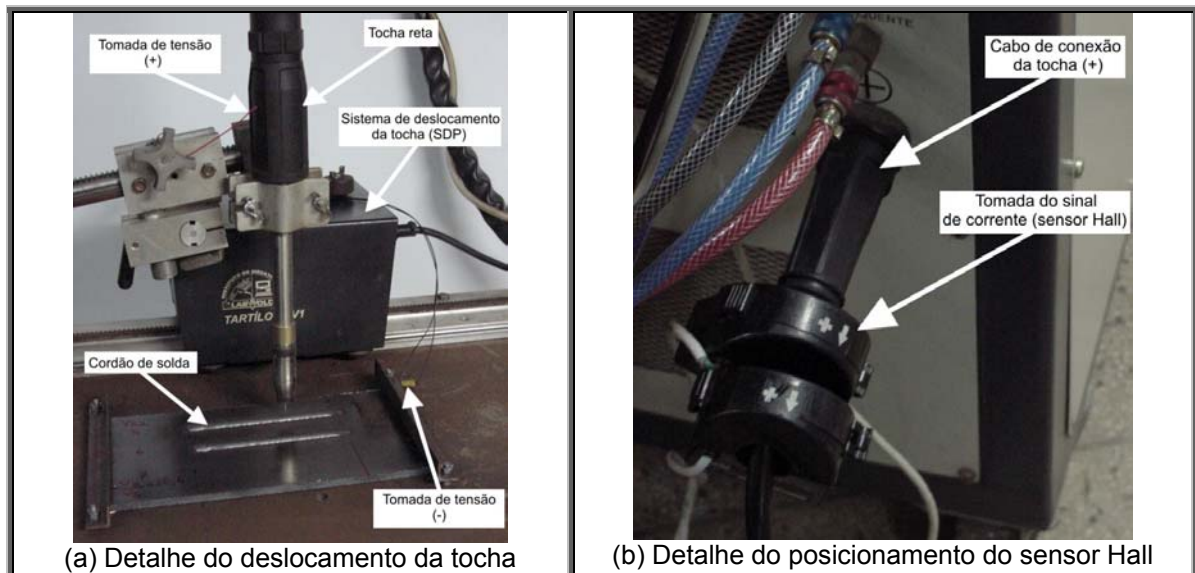


Figura 4.2 – (a) Sistema de deslocamento da tocha e pontos de tomada de tensão e (b) localização do sensor Hall.

e) Bancada de soldagem

Para atingir os objetivos propostos, foi implementada uma bancada experimental de soldagem que permitisse, ao mesmo tempo, a deposição dos cordões na condição automatizada e a obtenção sincronizada dos sinais da corrente, da tensão e da velocidade de alimentação do arame. A figura 4.3 mostra uma representação esquemática da bancada de soldagem, onde se observa o processo de interação e o fluxo de informações/acionamento entre os diversos equipamentos e *softwares* que compõem o conjunto. Como complemento, a figura 4.4 detalha os medidores, a maleta de aquisição e o microcomputador (**TERMICO2**) utilizados na operação de soldagem.

Na figura 4.5 são apresentados detalhes da fonte de soldagem (**DIGITEC**) e do cabeçote alimentador de arame (**STA-20D**). O sistema de tracionamento utilizado foi o do tipo *empurra* e o sinal da velocidade de alimentação do arame foi tomado na entrada do tracionador (vide novamente figura 4.5(b)).

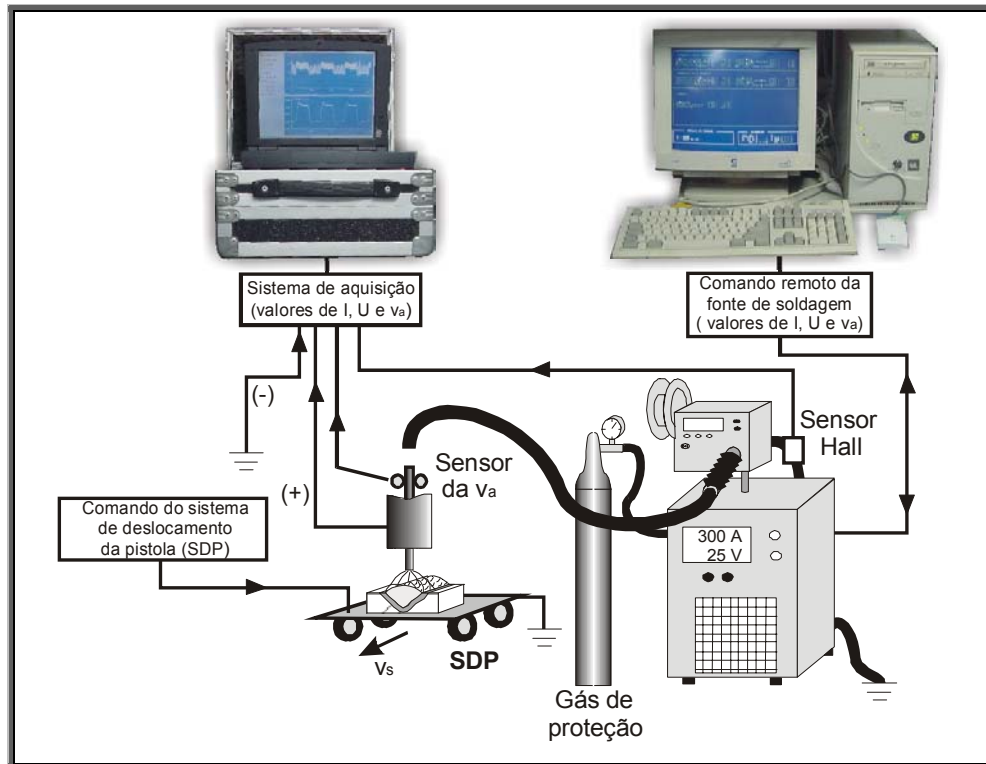


Figura 4.3 – Representação esquemática da bancada de soldagem.



(a) Painel de controle manual do SDP e os aparelhos utilizados na aquisição dos sinais de soldagem



(b) Microcomputador utilizado no gerenciamento da soldagem com a MIG/MAG Térmico, via o programa **TERMICO2**

Figura 4.4 – (a) Detalhe dos equipamentos utilizados no processo aquisição e (b) controle do processo de soldagem.

Para minimizar a incerteza, decorrente da parcela dos ruídos gerados nos sinais aquisitados, teve-se a preocupação em se posicionar os sensores (tomada dos sinais) o mais próximo possível da região do arco, como citado anteriormente.

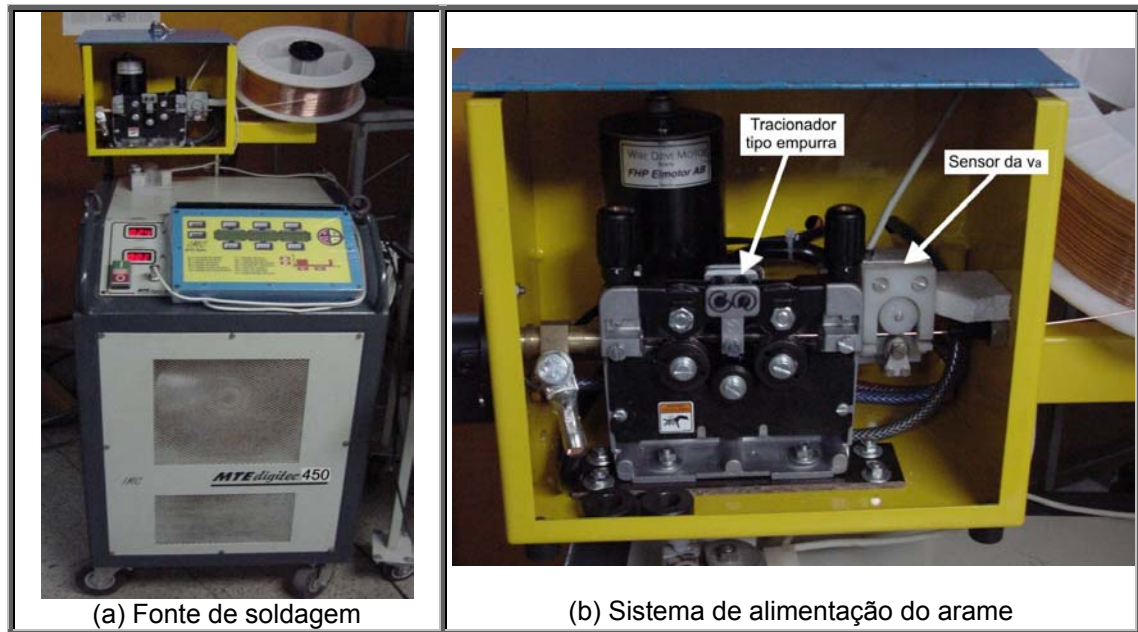


Figura 4.5 – (a) Fonte de soldagem **DIGITEC 450** e (b) detalhe do sistema de tracionamento e do posicionamento do sensor da v_a .

Para controle da velocidade de soldagem (v_s) utilizou-se o sistema de deslocamento automático da pistola (**SDP**), denominado de **TARTÍLOPE V1** (vide novamente figura 4.2(a)). O **TARTÍLOPE** permite a execução do traslado da tocha com incrementos na ordem de 0,2 cm/min.

4.2.5 Deposição dos cordões

a) Preparação e deposição dos cordões

Os cordões foram aportados na posição plana (**1G**) sobre chapas com dimensões de 150 x 300 x 6,3 mm. Durante a realização dos experimentos, as condições descritas no item 4.2.3 foram mantidas constantes.

Antes da realização dos depósitos, as chapas passaram por um processo de preparação da superfície que envolveu:

- ❑ Remoção de oxidação através de escova rotativa de aço inoxidável e, quando necessário, uso de escovamento manual;
- ❑ Remoção, com solvente, de substâncias contendo hidrogênio (**H**) em sua estrutura (H_2O , óleos, graxa, entre outros).

Na confecção dos depósitos, utilizando a variante *MIG/MAG Térmico*, foram adotadas duas formas de onda de *pulsção térmica*. A primeira forma, denominada de **onda I**, permitia a variação sincronizada na modulação do sinal de corrente com a velocidade de alimentação do arame, entre os tempos de *pulso térmico* (t_{pt}) e de

base térmica (t_{bt}) e vice-versa (vide figura 4.6 para melhores detalhes). Na segunda forma de onda, denominada de **onda II**, por sua vez, a velocidade de alimentação do arame foi mantida constante durante todo o *período térmico* ($T_t = t_{pt} + t_{bt}$), modulando-se apenas o sinal de corrente (vide detalhes na figura 4.7).

Como a literatura, que aborda o estudo da *pulsção térmica*, não especifica qual a fronteira a partir da qual a velocidade de alimentação do arame (v_a) passa a ser denominada de *velocidade de alimentação do arame na base térmica* (v_{a-bt}) para *velocidade de alimentação do arame no pulso térmico* (v_{a-pt}), ou vice-versa, foi adotado, com vista ao projeto fatorial, o valor de $v_a = 5,5 \text{ m/min}$ como o valor limite pra v_{a-bt} (limite entre o *pulso* e a *base térmica*). Assim, se:

$$v_a \leq 5,5 \text{ m/min} \rightarrow v_a = v_{a-bt} \text{ e } I_m = I_{m_{bt}}$$

$$v_a > 5,5 \text{ m/min} \rightarrow v_a = v_{a-pt} \text{ e } I_m = I_{m_{pt}}$$

Onde:

$I_{m_{bt}} \rightarrow$ é a corrente média na *base térmica*;

$I_{m_{pt}} \rightarrow$ é a corrente média no *pulso térmico*.

Desse modo, considerando a imposição de uma onda retangular periódica, o valor da corrente média para o modo pulsado convencional pode ser determinado por:

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T I dt = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Com a preocupação de se evitar que os cordões, depositados paralelamente sobre o mesmo metal base, provocassem alguma alteração térmica sobre o cordão adjacente, foi determinada experimentalmente uma distância mínima onde não houvesse influência térmica de um cordão sobre o já depositado. A tabela 4.7 e a figura 4.8 relacionam as condições de deposição envolvendo a distância adotada entre cada cordão, o comprimento e o número de cordões depositados por chapa.

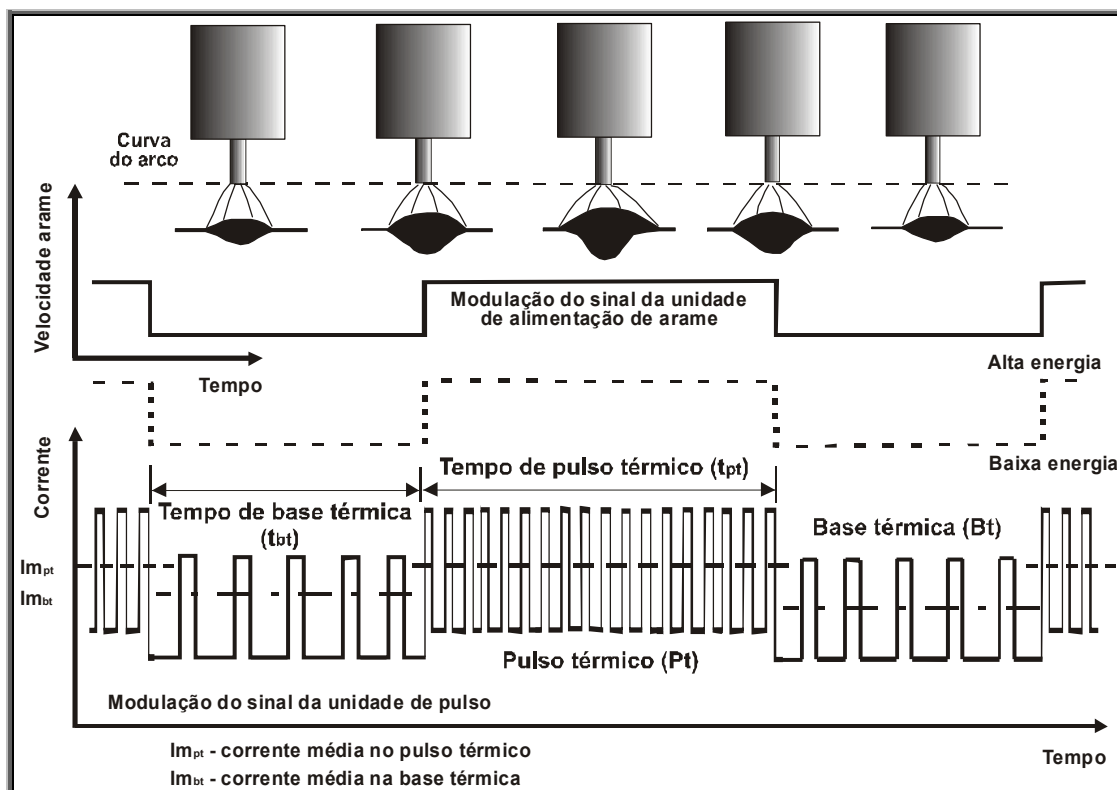


Figura 4.6 – Representação esquemática da forma de onda de *pulsção térmica* contendo modulação conjunta da corrente média (I_m) com a velocidade de alimentação do arame (v_a), **onda I**.

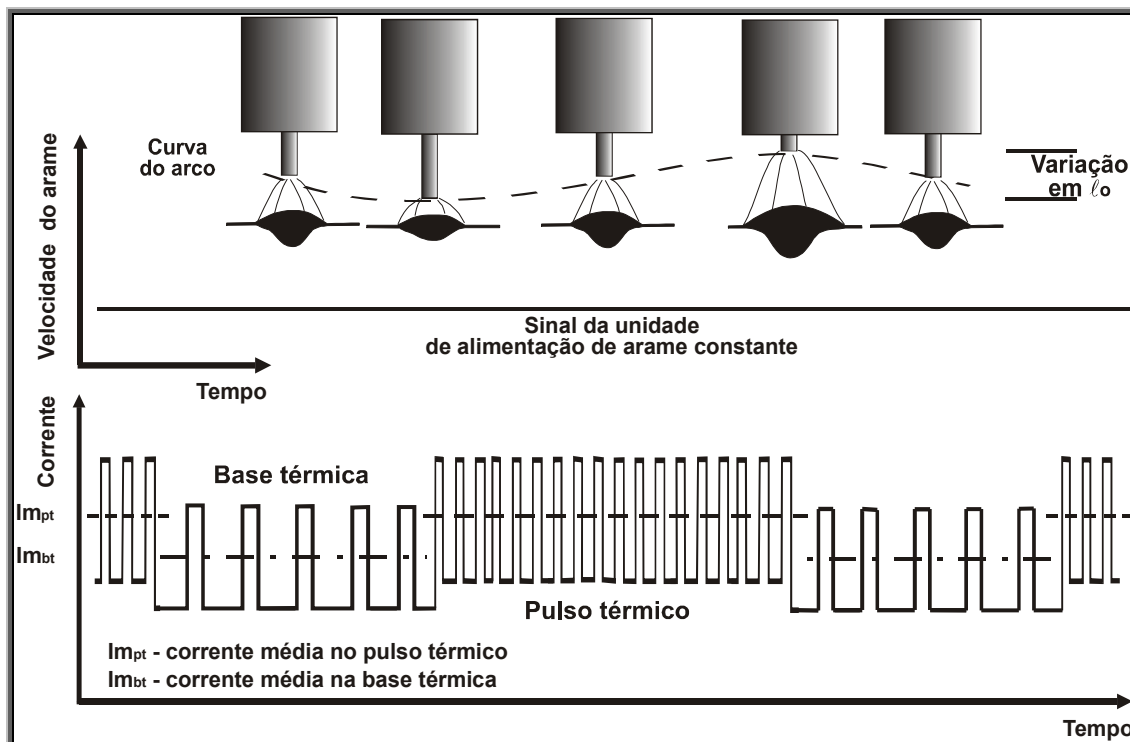


Figura 4.7 – Representação esquemática da forma de onda de *pulsção térmica* contendo modulação apenas na corrente média (I_m), **onda II**.

Na soldagem do AlMg, por não ser tratável termicamente, o valor adotado para a distância entre cordões foi inferior ao selecionado para o aço carbono, susceptível a transformação no estado sólido.

Tabela 4.7 – Condições utilizadas na soldagem em simples deposição.

| Material | Comprimento dos cordões | Distância entre cordões | Cordões por chapa | Temperatura inicial da chapa antes de cada deposição |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|--|
| Aço carbono | 15 cm | 30 mm | 4 | ambiente |
| Alumínio | 15 cm | 26 mm | 5 | ambiente |

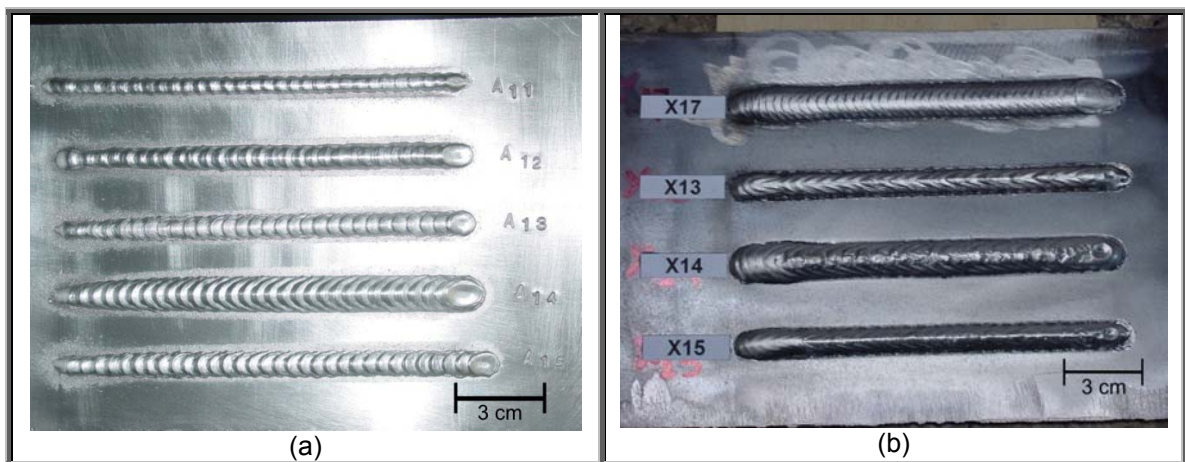


Figura 4.8 – Forma de deposição adotada. Onde (a) AlMg e (b) aço carbono.

Os parâmetros de soldagem implementados, na deposição com o modo *pulsado convencional*, obedeceram aos valores adotados para a velocidade de alimentação do arame (v_a), conforme relacionado nas tabelas 4.4 e 4.5.

Para a soldagem com *pulsação térmica*, os valores utilizados para os parâmetros relacionados, vide novamente item 4.2.4(c), tiveram como base a etapa do planejamento experimental realizada (ensaios preliminares ou análise fatorial).

b) Ensaios preliminares

Esta etapa objetivou mostrar os procedimentos de soldagem adotados para avaliar, de forma isolada, os possíveis efeitos ocasionados quando há variação dos valores de determinados parâmetros intrínsecos do processo *MIG/MAG Térmico*. Portanto, nesta fase dos ensaios, considerou-se que os demais parâmetros não sofreram variações e não influenciaram a resposta analisada.

Os parâmetros selecionados para uma análise isolada foram:

- **Frequência térmica (F_t)** → denominada como sendo o valor inverso do *período térmico* (T_t), podendo ser expressa por:

$$F_t = \frac{1}{T_t} = \frac{1}{t_{pt} + t_{bt}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

- **Distância entre pulsos térmicos (D_{pt})** – denominada como sendo a distância percorrida pela tocha de soldagem durante um *período térmico* ou a distância entre duas *escamas* consecutivas, podendo ser expresso por:

$$D_{pt} = v_s \cdot T_t = v_s \cdot (t_{pt} + t_{bt}) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

- **Ciclo de trabalho térmico ou ciclo ativo térmico (C_t)** – denominado como sendo o percentual do tempo de *pulso térmico* (t_{pt}) em relação ao *período térmico* (T_t), podendo ser expresso por:

$$C_t = \frac{t_{pt}}{T_t} \cdot 100 = \frac{t_{pt}}{t_{pt} + t_{bt}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

- **Corrente média total (Im_t)** – denominada como sendo a corrente média de um *período térmico* (T_t), podendo ser expresso por:

$$Im_t = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} I dt = \frac{1}{(t_{pt} + t_{bt})} \int_0^{t_{pt} + t_{bt}} I dt = \frac{Im_{pt} \cdot t_{pt} + Im_{bt} \cdot t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

- **Desnível térmico (D_t)** – denominado como sendo a relação entre a *corrente média na base* (Im_{bt}) e a *corrente média no pulso* (Im_{pt}). De uma maneira simples, D_t mostra o quanto o processo *MIG/MAG Térmico* se afasta do modo pulsado convencional. D_t pode ser expresso por:

$$D_t = \frac{Im_{bt}}{Im_{pt}} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Observação:

É importante salientar que para a variante *MIG/MAG Térmico*, com exceção de Im_t e F_t , todos os outros parâmetros analisados (C_t , D_t e D_{pt}) são proposições deste trabalho, portanto, não apresentando citação similar na literatura técnica pesquisada.

▣ Procedimento adotado na avaliação do efeito da frequência térmica (F_t)

Este tópico dos experimentos visou avaliar os possíveis efeitos da variação da *frequência térmica* sobre o aspecto superficial (número de escamas) e a geometria (reforço e largura) do cordão e sobre a dureza e a microestrutura (tipo e fração volumétrica dos microconstituintes, tamanho e forma do grão) apresentada pela zona fundida. Para tal, foram escolhidos sete níveis de F_t , mantendo-se as demais condições de soldagem fixas. Nesta etapa do trabalho foi utilizada apenas a forma de **onda I**.

Mesmo não sendo um dos objetivos desta etapa, é importante enfatizar que, em função do valor fixo adotado para a velocidade de soldagem (v_s) e, ainda, pela variação na quantidade de metal transferido, gerado pela variação de F_t , fica impossibilitada a tentativa de se impor qualquer relação fixa entre a quantidade de metal transferido e a velocidade de soldagem (massa transferida por unidade de comprimento do cordão – kg/m).

Na confecção dos depósitos com a *pulsção térmica* utilizaram-se os parâmetros correspondentes a 3 e 7 m/min (para o aço) e 4 e 7 m/min (para o AlMg), adotados nos períodos de *base* e *pulso térmico*, respectivamente (vide tabela 4.4). As tabelas 4.8 e 4.9 apresentam o resumo dos parâmetros, fixos e variáveis, empregados na avaliação do efeito da *frequência térmica* na soldagem do aço carbono e do AlMg.

Como forma de simplificar a execução e a análise dos depósitos foi imposta uma relação de igualdade entre os valores do tempo de *pulso térmico* (t_{pt}) e o tempo de *base térmica* (t_{bt}), ou seja:

$$\frac{t_{pt}}{t_{bt}} = 1$$

Tabela 4.8 – Pacotes operacionais de pulsação utilizados para variar os valores de F_t na soldagem do aço carbono.

| | Frequência térmica – F _t (Hz) | | | | | | |
|--|--|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Parâmetro | 0,5 | 1,0 | 1,6 | 2,5 | 5,0 | 7,0 | 10,0 |
| t _{pt} (s) | 1 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,07 | 0,05 |
| t _{bt} (s) | 1 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,07 | 0,05 |
| v _{a-bt} (m/min) | 3,0 | | | | | | |
| v _{a-pt} (m/min) | 7,0 | | | | | | |
| v _s (cm/min) | 30 | | | | | | |
| Onde: - v _{a-bt} é a velocidade do arame na base térmica e t _{bt} é o tempo de base térmica. - v _{a-pt} é a velocidade do arame no pulso térmico e t _{pt} é o tempo de pulso térmico. | | | | | | | |

Tabela 4.9 – Pacotes operacionais de pulsação utilizados para variar os valores de F_t na soldagem do AlMg.

| Parâmetro | Frequência térmica – F_t (Hz) | | | | | | |
|--------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| | 0,5 | 1,0 | 1,6 | 2,5 | 5,0 | 7,0 | 10,0 |
| t_{pt} (s) | 1 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,07 | 0,05 |
| t_{bt} (s) | 1 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,07 | 0,05 |
| v_{a-bt} (m/min) | 4,0 | | | | | | |
| v_{a-pt} (m/min) | 7,0 | | | | | | |
| v_s (cm/min) | 30 | | | | | | |

⚙️ Procedimento adotado na avaliação do efeito do ciclo de trabalho térmico (C_t)

Para a avaliação do efeito isolado da variação do *ciclo de trabalho térmico* sobre as características apresentadas pelo cordão (geometria, aspecto superficial e dureza e microestrutura da zona fundida) foram selecionados cinco níveis do C_t , mantendo-se as demais condições fixas e utilizando-se apenas a forma de **onda I**.

Como pacotes de *pulsação térmica* foram adotados valores de v_a correspondentes a 3 e 7 m/min (para o aço) e 4 e 7 m/min (para o AlMg), para as fases de *base* e o *pulso térmico*, respectivamente (vide tabela 4.4). As tabelas 4.10 e 4.11 apresentam o resumo dos parâmetros de *pulsação térmica*, fixos e variáveis, empregados na avaliação do efeito do *ciclo de trabalho térmico* na soldagem do aço carbono e do AlMg.

Durante a execução dos experimentos, o *período térmico* (T_t) foi mantido fixo com um valor de 1 s ($T_t = t_{pt} + t_{bt} = 1$ s).

Neste ponto, é importante ressaltar que a proposição do *ciclo de trabalho térmico* C_t foi embasada em analogia com o *ciclo ativo* ou *ciclo de trabalho (CT)*, empregado no modo pulsado convencional. Assim, tem-se:

□ Para o modo *pulsado convencional* $\rightarrow CT = \frac{t_p}{t_p + t_b} \cdot 100$ (Eq. 4.7)

□ Para a *pulsção térmica* $\rightarrow C_t = \frac{t_{pt}}{t_{pt} + t_{bt}} \cdot 100$ (Eq. 4.8)

Tabela 4.10 – Pacotes operacionais utilizados na variação de C_t na soldagem do aço.

| | Ciclo de trabalho térmico – C _t (%) | | | | |
|--|--|-----|-----|-----|-----|
| Parâmetro | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 |
| t _{pt} (s) | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,9 |
| t _{bt} (s) | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,1 |
| v _{a-bt} (m/min) | 3,0 | | | | |
| v _{a-pt} (m/min) | 7,0 | | | | |
| v _s (cm/min) | 30 | | | | |
| Onde: - v _{a-bt} é a velocidade do arame na base térmica e t _{bt} é o tempo de base térmica. - v _{a-pt} é a velocidade do arame no pulso térmico e t _{pt} é o tempo de pulso térmico. | | | | | |

Tabela 4.11 – Pacotes operacionais utilizados na variação de C_t na soldagem do AlMg.

| Parâmetro | Ciclo de trabalho térmico – C_t (%) | | | | |
|--------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 |
| t_{pt} (s) | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,9 |
| t_{bt} (s) | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,1 |
| v_{a-bt} (m/min) | 4,0 | | | | |
| v_{a-pt} (m/min) | 7,0 | | | | |
| v_s (cm/min) | 30 | | | | |

⚙️ Procedimento adotado na avaliação da distância entre pulsos (Dpt)

Os possíveis efeitos ocasionados pela alteração na *distância entre pulsos*, sobre o as características do depósito em simples deposição (geometria, aspecto superficial, dureza e microestrutura da zona fundida), foram avaliados por meio da adoção de cinco níveis do valor da **Dpt**, mantendo-se, também, as demais condições de deposição fixas e utilizando-se apenas a forma de **onda I**.

Neste tópico do trabalho, o valor da velocidade de soldagem (v_s) variou em função do valor de **Dpt**. Contudo, para se evitar a imposição de valores elevados de v_a (bem fora da faixa adotada na prática), foi selecionado um valor baixo para o *período térmico* (T_t) e imposto uma igualdade entre os tempos de *pulso térmico* (t_{pt}) e *base térmica* (t_{bt}), ou seja:

$$T_t = 0,5 \text{ s e } \frac{t_{pt}}{t_{bt}} = 1$$

Na deposição utilizando a *pulsção térmica*, os pacotes operacionais adotados foram aqueles correspondes a 3 e 7 m/min (para o aço) e 4 e 7 m/min (para o AlMg), para a *base* e o *pulso térmico*, respectivamente (vide tabela 4.4). As tabelas 4.12 e 4.13 apresentam o resumo dos parâmetros de *pulsção térmica*, fixos e variáveis, empregados na avaliação do efeito da *distância entre pulso térmico*, na soldagem do aço carbono e do AlMg.

Tabela 4.12 – Pacotes operacionais utilizados na avaliação de **D_{pt}** na soldagem do aço.

| Parâmetro | Distância entre pulso térmico – D _{pt} (mm) | | | | |
|--|--|-----|-----|-----|------|
| | 1,5 | 3,0 | 5,0 | 7,0 | 10,0 |
| t _{pt} (s) | 0,25 | | | | |
| t _{bt} (s) | 0,25 | | | | |
| v _{a-bt} (m/min) | 3,0 | | | | |
| v _{a-pt} (m/min) | 7,0 | | | | |
| v _s (cm/min) | 18 | 36 | 60 | 84 | 120 |
| Onde: - v _{a-bt} é a velocidade do arame na base térmica e t _{bt} é o tempo de base térmica. - v _{a-pt} é a velocidade do arame no pulso térmico e t _{pt} é o tempo de pulso térmico. | | | | | |

Tabela 4.13 – Pacotes operacionais utilizados na avaliação de **D_{pt}** na soldagem do AlMg.

| Parâmetro | Ciclo de trabalho térmico – D _{pt} (mm) | | | | |
|---------------------------|--|-----|-----|-----|------|
| | 1,5 | 3,0 | 5,0 | 7,0 | 10,0 |
| t _{pt} (s) | 0,25 | | | | |
| t _{bt} (s) | 0,25 | | | | |
| v _{a-bt} (m/min) | 4,0 | | | | |
| v _{a-pt} (m/min) | 7,0 | | | | |
| v _s (cm/min) | 18 | 36 | 60 | 84 | 120 |

✚ Procedimentos adotados na avaliação da corrente média total (I_{m_t}) e do desnível térmico (D_t)

O procedimento experimental adotado na avaliação dos possíveis efeitos de I_{m_t} também se emprega para avaliar as influências de D_t. Neste caso, o que irá mudar é a forma como as respostas são trabalhadas.

Quatro combinações de I_{m_{bt}} com a I_{m_{pt}} foram adotadas para levantar os possíveis efeitos sobre as características do cordão de solda (geometria, aspecto superficial, dureza e microestrutura da zona fundida), mantendo-se as demais condições de deposição fixas e utilizando-se apenas a forma de **onda I**.

Durante a deposição dos cordões, o valor do período térmico (T_t) foi mantido igual a 1 s e, para o caso de t_{pt} e t_{bt} , se impôs uma relação de igualdade, conforme especificado pela relação abaixo.

$$T_t = 1 \text{ s e } \frac{t_{pt}}{t_{bt}} = 1$$

Os pacotes operacionais no processo de *pulsção térmica*, adotados na avaliação de Im_t e D_t , estão sumarizados nas tabelas 4.14, para o aço carbono, e 4.15, para o AlMg.

Tabela 4.14 – Pacotes operacionais utilizados para variar os valores de D_t e Im_t na soldagem do aço carbono.

| Parâmetro | Desnível térmico – D_t | | | | Corrente média total – Im_t | | | |
|---|--------------------------|-----|-----|-----|-------------------------------|-------|-----|-----|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 165,5 | 186,5 | 196 | 217 |
| t_{pt} (s) | 0,5 | | | | | | | |
| t_{bt} (s) | 0,5 | | | | | | | |
| v_s (cm/min) | 30 | | | | | | | |
| v_{a-bt} (m/min) | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| v_{a-pt} (m/min) | 9 | 7 | 9 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 |
| Im_{bt} | 119 | 119 | 161 | 161 | 119 | 161 | 119 | 161 |
| Im_{pt} | 273 | 212 | 273 | 212 | 212 | 212 | 273 | 273 |
| Onde: - v_{a-bt} é a velocidade do arame na base térmica e t_{bt} é o tempo de base térmica. - v_{a-pt} é a velocidade do arame no pulso térmico e t_{pt} é o tempo de pulso térmico. - Im_{bt} é a corrente média na base térmica e Im_{pt} é a corrente média no pulso térmico. | | | | | | | | |

Tabela 4.15 – Pacotes operacionais utilizados para variar os valores de D_t e Im_t na soldagem do AlMg.

| Parâmetro | Desnível térmico – D_t | | | | Corrente média total – Im_t | | | |
|--------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|-----|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 94 | 106 | 111 | 125 |
| t_{pt} (s) | 0,5 | | | | | | | |
| t_{bt} (s) | 0,5 | | | | | | | |
| v_s (cm/min) | 30 | | | | | | | |
| v_{a-bt} (m/min) | 4 | 4 | 5,5 | 5,5 | 4 | 5,5 | 4 | 5,5 |
| v_{a-pt} (m/min) | 9 | 7 | 9 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 |
| Im_{bt} | 67 | 67 | 92 | 92 | 67 | 92 | 67 | 92 |
| Im_{pt} | 156 | 117 | 156 | 117 | 117 | 117 | 156 | 156 |

Como um dos fundamentos básicos da *pulsção térmica* é a imposição de diferentes valores de corrente média (Im), entre as fases de *pulso* e *base térmica* (imposição de um valor de D_t menor que 1), é conveniente usar o valor de D_t para

avaliar o quanto a *pulsção térmica* se afasta do *modo pulsado convencional* (onde $D_t = 1$).

c) Análise fatorial (2^k)

Nesta etapa dos experimentos contemplou-se a análise do efeito conjunto de cinco parâmetros envolvidos na variante *pulsção térmica*. O *projeto ou planejamento fatorial completo 2^k* , sem replicação, foi aplicado, como ferramenta estatística, para avaliar como os fatores (efeitos principais e interações) tendem a influenciar nas respostas de interesse (volume de microconstituintes, geometria e aspecto superficial do cordão, tamanho e forma do grão, diferença na largura da zona termicamente afetada **ZTA** e volume de vazios na zona fundida **ZF**).

Os dados experimentais levantados foram analisados através de um programa (*software*) comercial para análise estatística. As respostas fornecidas pelo programa são trabalhadas no *capítulo V* e a planilha com todas as informações da matriz fatorial, gerada pelo *software*, é apresentada no *anexo I*.

Levando-se em consideração a premissa, discutida anteriormente, de que não há uma informação palpável quanto à determinação da fronteira entre o *pulso térmico* (**pt**) e a *base térmica* (**bt**) será necessária adotar um determinado valor para a velocidade de alimentação do arame (v_a) (indiretamente a corrente média), como o marco divisório entre as duas fases da *pulsção térmica*, vide relação abaixo.

Se $v_a \leq 5,5 \text{ m/min} \rightarrow \text{Base térmica (bt)}$

$$v_a = v_{a\text{-bt}} \text{ e } I_m = I_{m\text{bt}}$$

Se $v_a > 5,5 \text{ m/min} \rightarrow \text{Pulso térmico (pt)}$

$$v_a = v_{a\text{-pt}} \text{ e } I_m = I_{m\text{pt}}$$

No estudo da forma de **onda I** foram relacionados sistematicamente, em dois níveis, os seguintes fatores:

- Nível alto (+) $\rightarrow t_{pt} (+), t_{bt} (+), I_{mpt} (+), I_{mbt} (+)$ e **Dpt (+)**;
- Nível baixo (-) $\rightarrow t_{pt} (-), t_{bt} (-), I_{mpt} (-), I_{mbt} (-)$ e **Dpt (-)**.

Para o estudo da forma de **onda II** foram relacionados sistematicamente, em dois níveis, os seguintes fatores:

- Nível alto (+) → t_{pt} (+), t_{bt} (+) e **Dpt** (+);
- Nível baixo (-) → t_{pt} (-), t_{bt} (-) e **Dpt** (-).

Os valores dos parâmetros, adotados como (+) ou (-), foram obtidos através de critérios subjetivos ou por determinação experimental.

A montagem da matriz para a análise fatorial da forma de **onda I** foi composta pelas seguintes etapas:

- Adoção dos pacotes operacionais utilizados no modo *pulsado convencional*, relacionados na tabela 4.4, baseado nos valores determinados para os níveis altos e baixos de v_{a-pt} (**Im_{pt}**) e v_{a-bt} (**Im_{bt}**), valores de interesse;
- Adoção dos valores de **Dpt** (+) e **Dpt** (-), obtidos experimentalmente;
- Adoção dos valores para t_{pt} (+), t_{pt} (-), t_{bt} (+) e t_{bt} (-);
- Seleção dos critérios a serem analisados (tamanho e forma do grão, microconstituintes, geometria e aspecto superficial do cordão, dureza e microestrutura e volume de vazios na zona fundida).

Os fatores de entrada (e seus níveis), selecionados para validar a análise dos possíveis efeitos da utilização da *pulsção térmica*, foram:

- Para o aço carbono
 - Distância entre pulsos térmicos – **Dpt**
 - Nível baixo (-) → 3 mm
 - Nível alto (+) → 5 mm
 - Corrente média no pulso térmico – **Im_{pt}**
 - Nível baixo (-) → 212 A (correspondente a $v_a = 7$ m/min)
 - Nível alto (+) → 273 A (correspondente a $v_a = 9$ m/min)
 - Corrente média na base térmica – **Im_{bt}**
 - Nível baixo (-) → 119 A (correspondente a $v_a = 3$ m/min)
 - Nível alto (+) → 161 A (correspondente a $v_a = 5$ m/min)
 - Tempo de pulso térmico – **t_{pt}**
 - Nível baixo (-) → 0,3 s
 - Nível alto (+) → 0,7 s
 - Tempo de base térmica – **t_{bt}**

Nível baixo (-) → 0,3 s

Nível alto (+) → 0,7 s

Observação:

Como existe uma relação aproximadamente linear entre a corrente média (**Im**) e a velocidade de alimentação do arame (**v_a**) é importante ressaltar que quando se avalia o efeito de **Im** também está sendo avaliado, indiretamente, o efeito de **v_a** (por exemplo, ao se avaliar **Im_{pt}** tem-se também a tendência de **v_{a-pt}** sobre o fenômeno analisado).

□ Para a liga AlMg

• Distância entre pulsos térmicos – **D_{pt}**

Nível baixo (-) → 3 mm

Nível alto (+) → 5 mm

• Corrente média no pulso térmico – **Im_{pt}**

Nível baixo (-) → 117 A (correspondente a **v_a** = 7 m/min)

Nível alto (+) → 156 A (correspondente a **v_a** = 9 m/min)

• Corrente média na base térmica – **Im_{bt}**

Nível baixo (-) → 67 A (correspondente a **v_a** = 4 m/min)

Nível alto (+) → 92 A (correspondente a **v_a** = 5,5 m/min)

• Tempo de pulso térmico – **t_{pt}**

Nível baixo (-) → 0,3 s

Nível alto (+) → 0,7 s

• Tempo de base térmica – **t_{bt}**

Nível baixo (-) → 0,3 s

Nível alto (+) → 0,7 s

As tabelas 4.16 e 4.17 relacionam a forma de implementação dos projetos fatoriais **2^k**, utilizados na confecção dos cordões do aço carbono e do AlMg. Por sua vez, as tabelas 4.20 e 4.21 trazem um resumo dos valores dos parâmetros envolvidos nos experimentos.

Tabela 4.16 – Planejamento fatorial completo 2^5 para avaliação da **onda I** na soldagem do aço carbono.

| D _{pt} (-) | | | | | | | | D _{pt} (+) | | | | | | | |
|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Im _{pt} (-) | | | | Im _{pt} (+) | | | | Im _{pt} (-) | | | | Im _{pt} (+) | | | |
| Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | | Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | | Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | | Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | |
| t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) |
| t _{bt} (-) | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ | X ₇ | X ₈ | X ₉ | X ₁₀ | X ₁₁ | X ₁₂ | X ₁₃ | X ₁₄ | X ₁₅ |
| t _{bt} (+) | X ₁₇ | X ₁₈ | X ₁₉ | X ₂₀ | X ₂₁ | X ₂₂ | X ₂₃ | X ₂₄ | X ₂₅ | X ₂₆ | X ₂₇ | X ₂₈ | X ₂₉ | X ₃₀ | X ₃₁ |
| | X ₃₂ | | | | | | | | | | | | | | |

Onde: (+) é o nível alto do fator; (-) é o nível baixo do fator e **X** é combinação dos fatores analisados para o aço. Como são avaliados cinco fatores em dois níveis obtém-se $2^5 = 32$ combinações.

Tabela 4.17 – Planejamento fatorial completo 2^5 para avaliação da **onda I** na soldagem do AlMg.

| D _{pt} (-) | | | | | | | | D _{pt} (+) | | | | | | | |
|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Im _{pt} (-) | | | | Im _{pt} (+) | | | | Im _{pt} (-) | | | | Im _{pt} (+) | | | |
| Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | | Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | | Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | | Im _{bt} (-) | | Im _{bt} (+) | |
| t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) | t _{pt} (-) | t _{pt} (+) |
| t _{bt} (-) | A ₁ | A ₂ | A ₃ | A ₄ | A ₅ | A ₆ | A ₇ | A ₈ | A ₉ | A ₁₀ | A ₁₁ | A ₁₂ | A ₁₃ | A ₁₄ | A ₁₅ |
| t _{bt} (+) | A ₁₇ | A ₁₈ | A ₁₉ | A ₂₀ | A ₂₁ | A ₂₂ | A ₂₃ | A ₂₄ | A ₂₅ | A ₂₆ | A ₂₇ | A ₂₈ | A ₂₉ | A ₃₀ | A ₃₁ |
| | A ₃₂ | | | | | | | | | | | | | | |

Onde: (+) é o nível alto do fator; (-) é o nível baixo do fator e **A** é combinação dos fatores analisados para o AlMg. Como são avaliados cinco fatores em dois níveis obtém-se $2^5 = 32$ combinações.

Na montagem da matriz para a análise fatorial da forma de **onda II** foram relacionadas as seguintes etapas:

- Como nesta forma de onda a velocidade de alimentação do arame (**v_a**) permanece fixa durante todo o experimento, foram adotados os pacotes operacionais aplicados no modo *pulsado convencional*, relacionados na tabela 4.4, baseados nos valores determinados para **Im_{pt} (+)**, **Im_{pt} (-)**, **Im_{bt} (+)** e **Im_{bt} (-)**, conforme item anterior. Entretanto, sendo o valor de **v_a** mantido igual a 5 m/min para o aço carbono (média entre 3 e 7 m/min) e de 5,5 para a liga AlMg (média entre 4 e 7 m/min), tanto para o *pulso térmico* como para a *base térmica*;
- Adoção dos valores de **D_{pt} (+)** e **D_{pt} (-)**, obtidos experimentalmente;
- Adoção dos valores para **t_{pt} (+)**, **t_{pt} (-)**, **t_{bt} (+)** e **t_{bt} (-)**;
- Seleção dos critérios a serem analisados (em função de observações preliminares foi descartada a avaliação mais detalhada da **onda II**, resumindo-se a análise desta forma de onda apenas no que se refere à estabilidade no modo de transferência metálica).

As tabelas 4.18 e 4.19 relacionam a forma de execução do projeto fatorial completo 2^k , na soldagem do aço carbono e do AlMg. Por sua vez, as tabelas 4.22 e 4.23 trazem um resumo dos valores dos parâmetros envolvidos nos experimentos utilizando a **onda II**.

Tabela 4.18 – Fatorial 2^3 para avaliar a **onda II** na soldagem do aço carbono.

| | Dpt (-) | | Dpt (+) | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | $t_{pt} (-)$ | $T_{pt} (+)$ | $t_{pt} (-)$ | $t_{pt} (+)$ |
| $t_{bt} (-)$ | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_4 |
| $t_{bt} (+)$ | Y_5 | Y_6 | Y_7 | Y_8 |

Onde: **Y** é combinação dos fatores analisados para o aço carbono.

Tabela 4.19 – Fatorial 2^3 para avaliar a **onda II** na soldagem do AlMg.

| | Dpt (-) | | Dpt (+) | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | $t_{pt} (-)$ | $T_{pt} (+)$ | $t_{pt} (-)$ | $t_{pt} (+)$ |
| $t_{bt} (-)$ | AY_1 | AY_2 | AY_3 | AY_4 |
| $t_{bt} (+)$ | AY_5 | AY_6 | AY_7 | AY_8 |

Onde: **Z** é combinação dos fatores analisados para o aço carbono.

Com o intuito de se evitar a ocorrência de distorções estatísticas nos resultados obtidos (erros), os ensaios foram executados em ordem totalmente aleatória. Barros Neto et al (1995) relatam que a numeração dos ensaios é apenas uma forma conveniente de se identificar as várias combinações de níveis, e nada tem a ver com a ordem em que os experimentos são realmente executados.

A ordem de execução dos depósitos e o modo de resolução do planejamento fatorial para determinar os efeitos (respostas) principais de cada fator e suas interações, dentro da faixa experimental investigada, são apresentados no *capítulo V* (Resultados e Discussões) e detalhada no *anexo I*.

Tabela 4.20 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da *pulsção térmica* na soldagem do aço carbono (*onda I*).

| Cordão (corpo-de-prova) | Parâmetros analisados | | | | | V _s (cm/min) |
|----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|
| | t _{pt} (s) | Im _{bt} (A) | Im _{pt} (A) | D _{pt} (mm) | t _{bt} (s) | |
| X1 | (-) 0,3 | (-) 119 | (-) 212 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X2 | (+) 0,7 | (-) 119 | (-) 212 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| X3 | (-) 0,3 | (+) 161 | (-) 212 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X4 | (+) 0,7 | (+) 161 | (-) 212 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| X5 | (-) 0,3 | (-) 119 | (+) 273 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X6 | (+) 0,7 | (-) 119 | (+) 273 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| X7 | (-) 0,3 | (+) 161 | (+) 273 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X8 | (+) 0,7 | (+) 161 | (+) 273 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| X9 | (-) 0,3 | (-) 119 | (-) 212 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| X10 | (+) 0,7 | (-) 119 | (-) 212 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X11 | (-) 0,3 | (+) 161 | (-) 212 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| X12 | (+) 0,7 | (+) 161 | (-) 212 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X13 | (-) 0,3 | (-) 119 | (+) 273 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| X14 | (+) 0,7 | (-) 119 | (+) 273 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X15 | (-) 0,3 | (+) 161 | (+) 273 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| X16 | (+) 0,7 | (+) 161 | (+) 273 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| X17 | (-) 0,3 | (-) 119 | (-) 212 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| X18 | (+) 0,7 | (-) 119 | (-) 212 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| X19 | (-) 0,3 | (+) 161 | (-) 212 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| X20 | (+) 0,7 | (+) 161 | (-) 212 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| X21 | (-) 0,3 | (-) 119 | (+) 273 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| X22 | (+) 0,7 | (-) 119 | (+) 273 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| X23 | (-) 0,3 | (+) 161 | (+) 273 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| X24 | (+) 0,7 | (+) 161 | (+) 273 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| X25 | (-) 0,3 | (-) 119 | (-) 212 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| X26 | (+) 0,7 | (-) 119 | (-) 212 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |
| X27 | (-) 0,3 | (+) 161 | (-) 212 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| X28 | (+) 0,7 | (+) 161 | (-) 212 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |
| X29 | (-) 0,3 | (-) 119 | (+) 273 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| X30 | (+) 0,7 | (-) 119 | (+) 273 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |
| X31 | (-) 0,3 | (+) 161 | (+) 273 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| X32 | (+) 0,7 | (+) 161 | (+) 273 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |

Tabela 4.21 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da *pulsção térmica* na soldagem do AlMg (*onda I*).

| Cordão (corpo-de-prova) | Parâmetros analisados | | | | | v _s (cm/min) |
|----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|------------------------|----------------------------|
| | t _{pt} (s) | Im _{bt} (A) | Im _{pt} (A) | Dpt (mm) | t _{pt} (s) | |
| A1 | (-) 0,3 | (-) 84 | (-) 141 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A2 | (+) 0,7 | (-) 84 | (-) 141 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| A3 | (-) 0,3 | (+) 111 | (-) 141 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A4 | (+) 0,7 | (+) 111 | (-) 141 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| A5 | (-) 0,3 | (-) 84 | (+) 178 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A6 | (+) 0,7 | (-) 84 | (+) 178 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| A7 | (-) 0,3 | (+) 111 | (+) 178 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A8 | (+) 0,7 | (+) 111 | (+) 178 | (-) 3,0 | (-) 0,3 | 18 |
| A9 | (-) 0,3 | (-) 84 | (-) 141 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| A10 | (+) 0,7 | (-) 84 | (-) 141 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A11 | (-) 0,3 | (+) 111 | (-) 141 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| A12 | (+) 0,7 | (+) 111 | (-) 141 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A13 | (-) 0,3 | (-) 84 | (+) 178 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| A14 | (+) 0,7 | (-) 84 | (+) 178 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A15 | (-) 0,3 | (+) 111 | (+) 178 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 50 |
| A16 | (+) 0,7 | (+) 111 | (+) 178 | (+) 5,0 | (-) 0,3 | 30 |
| A17 | (-) 0,3 | (-) 84 | (-) 141 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| A18 | (+) 0,7 | (-) 84 | (-) 141 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| A19 | (-) 0,3 | (+) 111 | (-) 141 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| A20 | (+) 0,7 | (+) 111 | (-) 141 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| A21 | (-) 0,3 | (-) 84 | (+) 178 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| A22 | (+) 0,7 | (-) 84 | (+) 178 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| A23 | (-) 0,3 | (+) 111 | (+) 178 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 18 |
| A24 | (+) 0,7 | (+) 111 | (+) 178 | (-) 3,0 | (+) 0,7 | 13 |
| A25 | (-) 0,3 | (-) 84 | (-) 141 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| A26 | (+) 0,7 | (-) 84 | (-) 141 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |
| A27 | (-) 0,3 | (+) 111 | (-) 141 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| A28 | (+) 0,7 | (+) 111 | (-) 141 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |
| A29 | (-) 0,3 | (-) 84 | (+) 178 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| A30 | (+) 0,7 | (-) 84 | (+) 178 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |
| A31 | (-) 0,3 | (+) 111 | (+) 178 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 30 |
| A32 | (+) 0,7 | (+) 111 | (+) 178 | (+) 5,0 | (+) 0,7 | 21,4 |

Obs: A ordem de execução dos cordões das tabelas 4.20 e 4.21 foi randômica (vide anexo I).

Tabela 4.22 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da *pulsção térmica* na soldagem do aço carbono (*onda II*).

| Cordão (corpo-de-prova) | Parâmetros analisados | | | v_a (m/min) | v_s (cm/min) |
|----------------------------|-----------------------|-------------|-----------------|------------------|-------------------|
| | t_{pt} (s) | Dpt (mm) | t_{bt} (s) | | |
| Y1 | (-) 0,50 | (-) 3,0 | (-) 0,25 | 5,0 | 24,0 |
| Y2 | (+) 0,75 | (-) 3,0 | (-) 0,25 | 5,0 | 18,0 |
| Y3 | (-) 0,50 | (+) 5,0 | (-) 0,25 | 5,0 | 40,0 |
| Y4 | (+) 0,75 | (+) 5,0 | (-) 0,25 | 5,0 | 30,0 |
| Y5 | (-) 0,50 | (-) 3,0 | (+) 0,50 | 5,0 | 18,0 |
| Y6 | (+) 0,75 | (-) 3,0 | (+) 0,50 | 5,0 | 14,4 |
| Y7 | (-) 0,50 | (+) 5,0 | (+) 0,50 | 5,0 | 30 |
| Y8 | (+) 0,75 | (+) 5,0 | (+) 0,50 | 5,0 | 24,0 |

Obs: A ordem de execução dos cordões nas tabelas 2.22 e 4.23 foi randômica (vide anexo I).

Tabela 4.23 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da *pulsção térmica* na soldagem do AlMg (*onda II*).

| Cordão (corpo-de-prova) | Parâmetros analisados | | | v_a (m/min) | v_s (cm/min) |
|----------------------------|-----------------------|-------------|-----------------|------------------|-------------------|
| | t_{pt} (s) | Dpt (mm) | t_{bt} (s) | | |
| AY1 | (-) 0,30 | (-) 3,0 | (-) 0,30 | 5,5 | 30,0 |
| AY2 | (+) 0,70 | (-) 3,0 | (-) 0,30 | 5,5 | 18,0 |
| AY3 | (-) 0,30 | (+) 5,0 | (-) 0,30 | 5,5 | 50,0 |
| AY4 | (+) 0,70 | (+) 5,0 | (-) 0,30 | 5,5 | 30,0 |
| AY5 | (-) 0,30 | (-) 3,0 | (+) 0,70 | 5,5 | 18,0 |
| AY6 | (+) 0,70 | (-) 3,0 | (+) 0,70 | 5,5 | 13,0 |
| AY7 | (-) 0,30 | (+) 5,0 | (+) 0,70 | 5,5 | 30,0 |
| AY8 | (+) 0,70 | (+) 5,0 | (+) 0,70 | 5,5 | 21,4 |

4.2.6 Procedimento para avaliação da estabilidade do processo de transferência metálica (comparação entre as formas de onda I e II)

Uma das proposições deste trabalho foi a avaliação (comparação) das duas formas de ondas utilizadas na soldagem *MIG/MAG Térmico*. Especificamente, objetivou-se levantar as reais características apresentadas por cada uma das ondas no que tange a estabilidade no processo de transferência metálica (verificação na condição **UGPP**) e estabilidade na região do arco voltaico. Ao final, pretendeu-se estabelecer comparações entre a variante *pulsção térmica* (com

base nas **ondas I e II**) e o modo *pulsado convencional*, visando levantar as reais vantagens ou limitações da implementação desta variante.

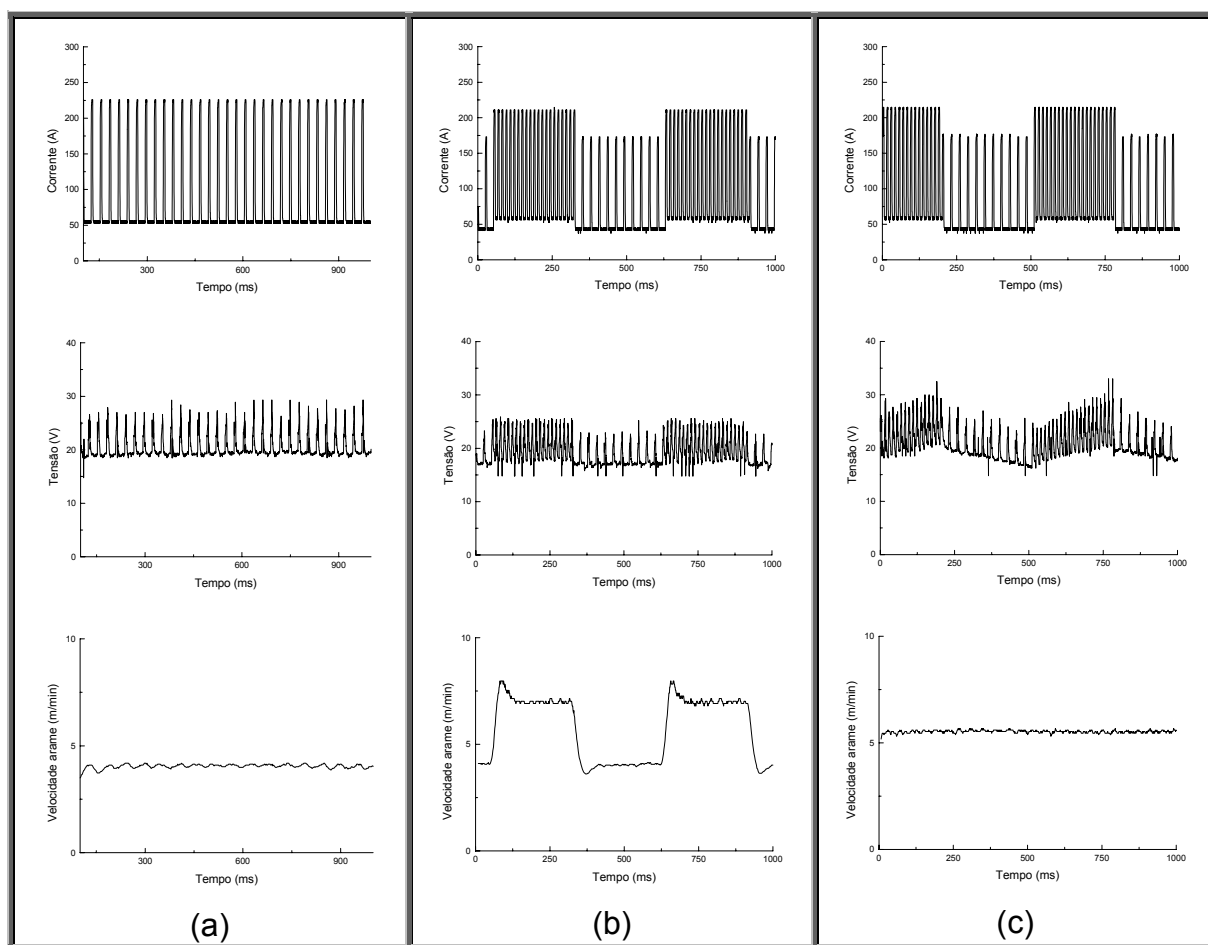


Figura 4.9 – Oscilogramas contendo os sinais sincronizados de **I**, **U** e **v_a** (liga AIMg). Onde: (a) *pulsado convencional*, (b) **onda I** e (c) **onda II**.

O acompanhamento das características das ondas de *pulsção térmica* constou de duas fases, as quais contaram com o registro dos sinais de saída da fonte (**I**, **U** e **v_a**) e a filmagem em alta velocidade do comportamento na região do arco.

Na primeira fase, foram levantados (registrados), para todas as condições ensaiadas, os oscilogramas contendo os sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame (vide figura 4.9). Em adição, esta fase visou a geração de um banco de dados contendo o comportamento das ondas de *pulsção convencional* e das **ondas I e II** nas mais diferentes condições de operação.

A segunda fase, empregando-se a técnica de *shadowgrafia*, por sua vez, teve como meta avaliar possíveis diferenças no comprimento do arco e a existência de

instabilidade na condição **UGPP**, nas interfaces (passagens) do *pulso térmico* para a *base térmica* e vice-versa.

4.2.7 Procedimento para filmagem em alta velocidade (shadowgrafia)

Balsamo et al (2000) citam que o termo *shadowgrafia* referencia a formação de uma sombra sobre um anteparo (lente da filmadora) de um objeto (tocha, arame e gota metálica) sobre o qual incide um feixe de luz (feixe de laser), técnica também conhecida com **back-lighting** (vide figuras 4.10 e 4.11).

A técnica de *shadowgrafia* foi utilizada para monitorar as seguintes características da variante *pulsção térmica*:

- Se os pacotes de pulsção, obtidos anteriormente, utilizando os sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame (oscilograma) satisfazem a condição **UGPP**;
- Possível variação no comprimento do arco entre as **ondas I e II**;
- Possível perda na condição **UGPP** nas interfaces do *pulso térmico* com a *base térmica* e vice-versa.

Os ensaios foram executados com a utilização do sistema laser-ótico e o apoio da equipe técnica do LAPROSOLDA/UFU. A figura 4.10 ilustra a bancada empregada na aquisição das imagens do processo de transferência metálica.

Basicamente, a técnica de filmagem em alta velocidade consistiu das seguintes etapas:

a) Seleção de quatro pacotes de *pulsção térmica*

Foram escolhidos quatro pacotes de *pulsção térmica* (com valores espaçados de I_m e v_a) objetivando avaliar concomitantemente as duas formas de ondas proposta (**onda I** e **onda II**), na soldagem de diferentes ligas metálicas (aço baixo carbono e liga AlMg). A tabela 4.24 relaciona os pacotes utilizados na avaliação dos efeitos da *pulsção térmica* sobre a estabilidade do arco.

b) Formação da imagem (sombra)

Para a filmagem (visualização) do processo de transferência metálica é necessário reduzir a luz gerada na região do arco voltaico por meio de uma filtragem seletiva que permita apenas a passagem da luz do laser. Como entre a fonte do laser e a lente da filmadora está situada a tocha de soldagem será feito o registro da sombra gerada pelo arame, gota e poça metálica (vide figura 4.11).

Tabela 4.24 – Pacotes operacionais utilizados na avaliação da estabilidade do processo de *pulsção térmica*.

| Forma de onda | Material | Pacote operacional | |
|---------------|-------------------|--|--|
| | | Pulso térmico | Base térmica |
| Onda I | Aço baixo carbono | $v_{a-pt} = 7 \text{ m/min}$ $Im_{pt} = 212 \text{ A}$ | $v_{a-bt} = 3 \text{ m/min}$ $Im_{bt} = 119 \text{ A}$ |
| | | $v_s = 25 \text{ cm/min}$, $DCP = 18 \text{ mm}$ e $Im_t = 188 \text{ A}$ | |
| | Liga AlMg | $v_{a-pt} = 7 \text{ m/min}$ $Im_{pt} = 117 \text{ A}$ | $v_{a-bt} = 4 \text{ m/min}$ $Im_{bt} = 67 \text{ A}$ |
| | | $v_s = 25 \text{ cm/min}$, $DCP = 18 \text{ mm}$ e $Im_t = 94 \text{ A}$ | |
| Onda II | Aço baixo carbono | $v_{a-pt} = 5 \text{ m/min}$ $Im_{pt} = 212 \text{ A}$ | $v_{a-bt} = 5 \text{ m/min}$ $Im_{bt} = 119 \text{ A}$ |
| | | $v_s = 25 \text{ cm/min}$, $DCP = 18 \text{ mm}$ e $Im_t = 188 \text{ A}$ | |
| | Liga AlMg | $v_{a-pt} = 5,5 \text{ m/min}$ $Im_{pt} = 117 \text{ A}$ | $v_{a-bt} = 5,5 \text{ m/min}$ $Im_{bt} = 67 \text{ A}$ |
| | | $v_s = 25 \text{ cm/min}$, $DCP = 18 \text{ mm}$ e $Im_t = 94 \text{ A}$ | |

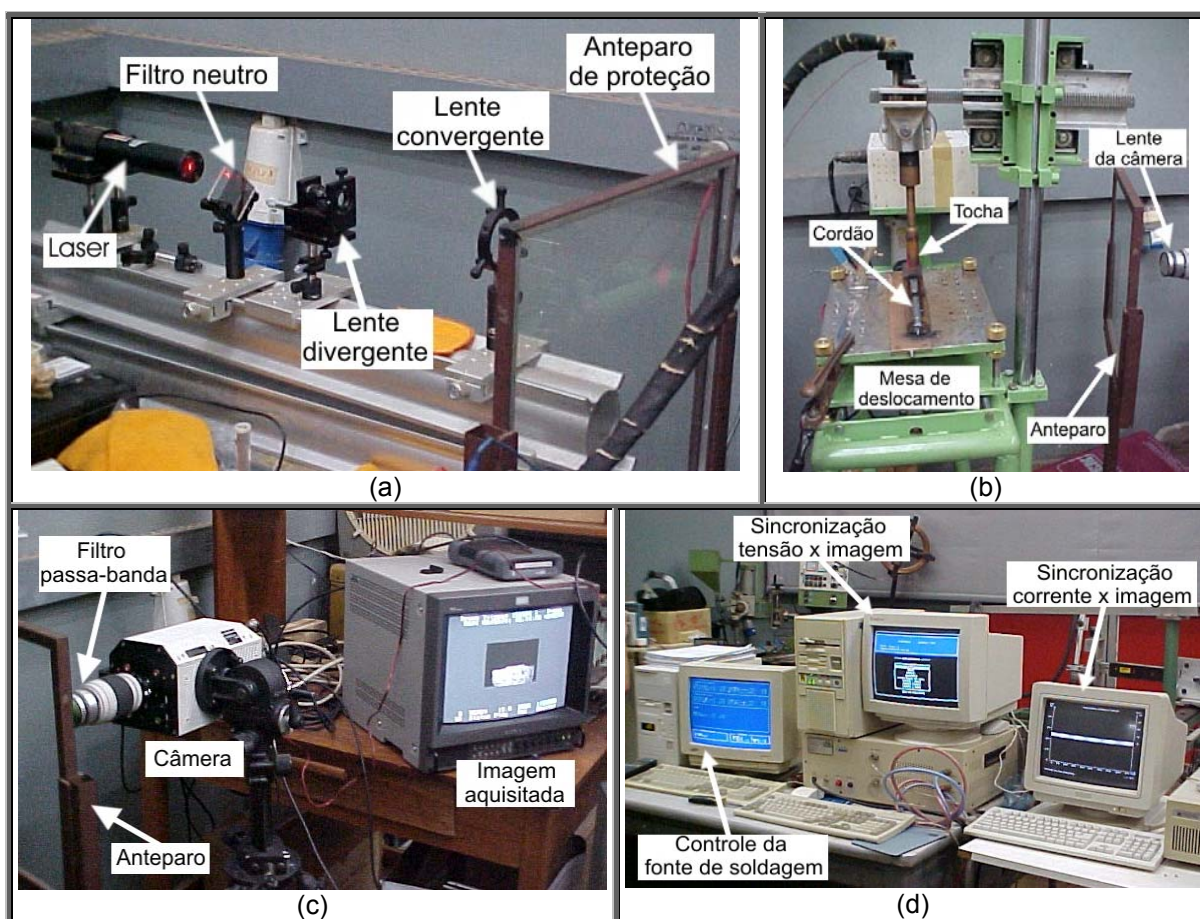


Figura 4.10 – Detalhes da bancada experimental de *shadowgrafia* por laser. Onde: (a) fonte de laser, filtros e lentes para controle do diâmetro do feixe, (b) sistema de deslocamento da tocha, (c) filmadora e monitor e (d) micros utilizados no controle e aquisição dos sinais elétricos.

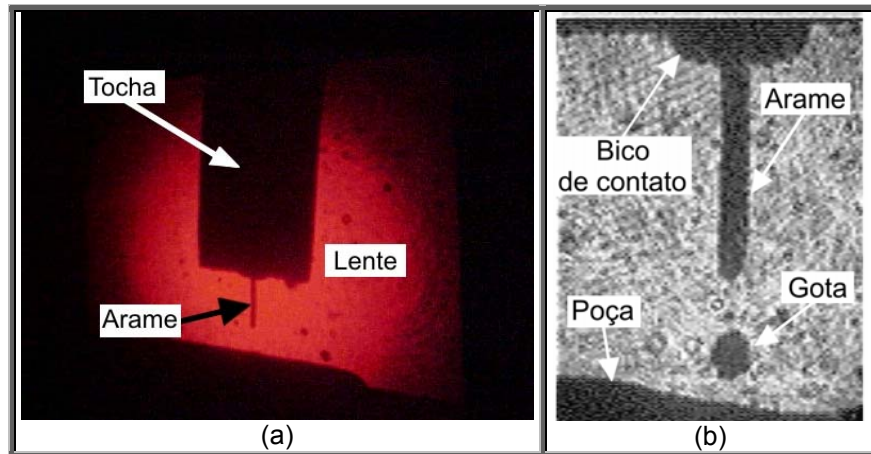


Figura 4.11 – Processo de formação e aquisição da imagem da região do arco. Onde: (a) sombra gerada pela tocha posicionada na frente do feixe de laser e (b) imagem (quadro) gerada pela filmadora.

c) Captura dos pares de sinais *corrente x imagem* e *tensão x imagem*

Como durante a aquisição das imagens a filmadora emite um pulso de tensão para cada quadro (foto) registrado, o sinal da câmera (pulso de tensão) foi adquirido em pares com os sinais da corrente (I_s) e da tensão de soldagem (U_s).

As condições utilizadas no levantamento dos sinais foram:

- Gerenciamento da fonte de soldagem via programa **TERMICO2**;
- Aquisição dos sinais via **INTERDATA** (12 bit e 10 kHz);
- Tempo de aquisição 5 s;
- Velocidade de leitura da câmera (2000 quadros/s).

d) Sincronização dos sinais de tensão da câmera com os sinais de I_s e U_s

Para a determinação precisa de qual imagem (quadro) corresponde exatamente a um determinado ponto da onda de tensão ou da corrente, foi empregado um programa (LAPROSOLDA/UFU) que sincroniza ponto-a-ponto os sinais capturados na etapa anterior. Uma vez feita a sincronização, o programa faz a plotagem dos valores de I_s , U_s com os seus respectivos números dos quadros, no intervalo de tempo adquirido, vide figura 4.12. Assim, o quadro (imagem digitalizada) corresponde a um determinado ponto da onda será identificado pelo seu número de gravação.

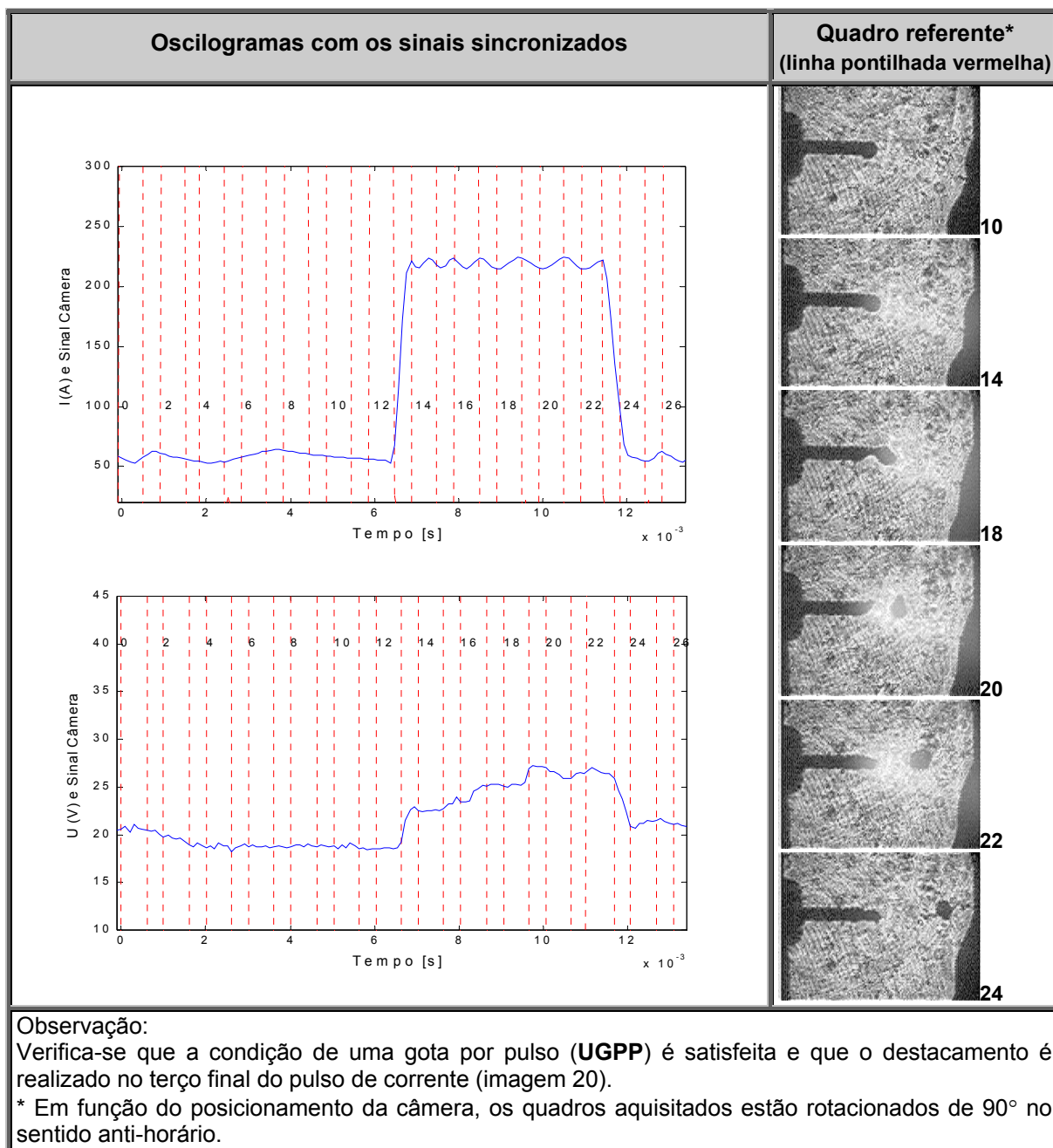


Figura 4.12 – Exemplo do resultado final obtido pela técnica de *shadowgrafia*. Como informação, verifica-se o estabelecimento da condição **UGPP** (liga AlMg) e a presença de ondulação na poça de fusão.

4.3 Metalurgia

4.3.1 Extração dos corpos de prova

Para a análise das características apresentadas pela zona fundida (**ZF**), foram extraídos corpos-de-prova situados nos terços finais dos cordões. Esta condição teve como objetivo garantir que a amostra pertencesse a uma região do cordão já em regime (longe das extremidades descartadas).

A extração dos corpos-de-prova, na condição “como soldado”, seguiu as seguintes etapas:

- ❑ Corte, através de serra de fita ou serra tico-tico, de uma tira de 2 cm de largura, transversal a linha de centro dos cordões;
- ❑ Seccionamento longitudinal dos cordões, utilizando serra manual, sobre a linha de centro dos cordões;
- ❑ Seccionamento transversal dos cordões, utilizando serra manual, nas regiões compreendendo aos pontos de maior penetração (*pulso térmico*) e de menor penetração (*base térmica*).

A figura 4.13 traz uma apresentação esquemática da forma de corte dos cordões e detalhes das regiões selecionadas para análise metalográfica (depósitos na condição simples deposição).

A figura 4.14, item (a), mostra detalhe dos cordões solda (aço baixo carbono) após a etapa de corte das seções transversais e longitudinais e na figura 4.14, item (b), é apresentada a forma da extração da zona fundida (liga AlMg).

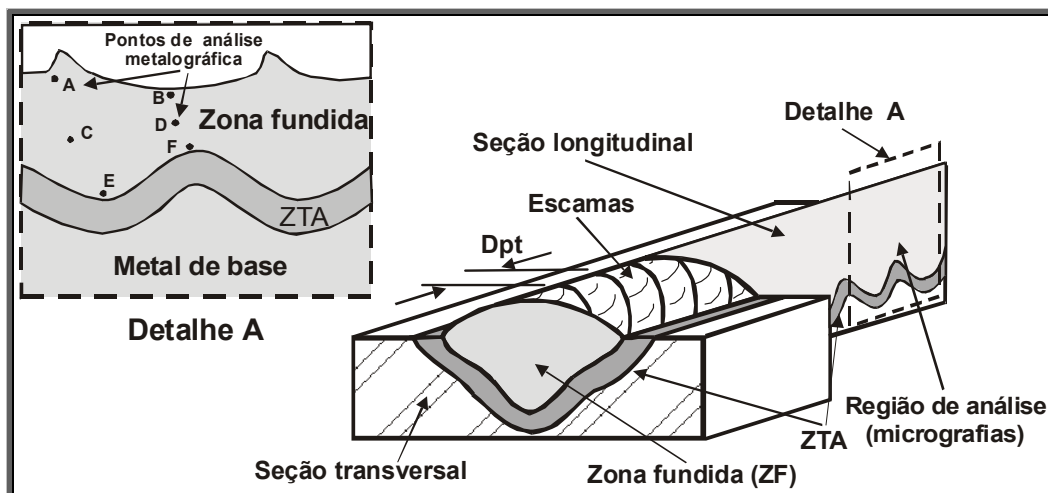


Figura 4.13 – Apresentação das características do cordão de solda e do detalhe da região de medição das respostas de interesse.

4.3.2 Preparação metalográfica

A preparação das superfícies para análise metalográfica (micro e macrografia) da zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) foi executada seguindo as subseqüentes etapas:

- ❑ Corte das regiões selecionadas através de serra de fita, serra tico-tico, serra manual ou disco diamantado;

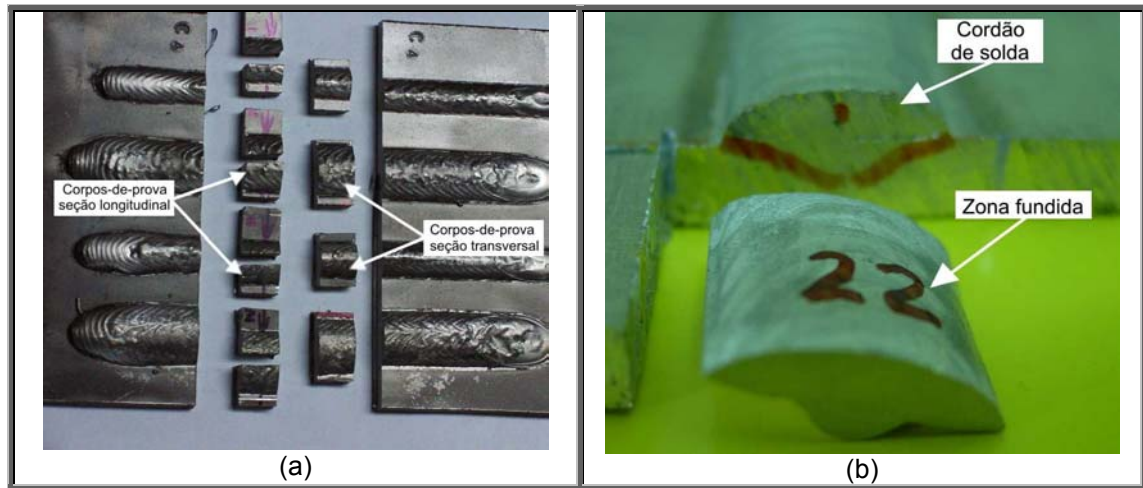


Figura 4.14 – Detalhe das regiões selecionadas para análise e do modo de extração dos corpos-de-prova (CP). Onde: (a) CP para avaliação da microestrutura da ZF e (b) CP para análise gravimétrica.

Tabela 4.25 – Procedimento adotado na preparação das superfícies para análise metalográfica dos corpos-de-prova.

| Lixamento | | | | |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|
| Granulometria (mesh) | Abrasivo | Lubrificante | Tempo (min) | Rotação (rpm) |
| 180 | SiC | Água | Até atingir planicidade | 150 |
| 220 | | | 2,0 | |
| 320 | | | 2,0 | |
| 400 | | | 2,0 | |
| 500 | | | 2,0 | |
| 600 | | | 2,0 | |
| 1000 | | | 2,0 | |
| Polimento | | | | |
| Pano | Abrasivo | Lubrificante | Tempo (min) | Rotação (rpm) |
| DP-Pan | Pasta de diamante (6 μm) | Álcool e lubrificante azul | 3,0 | 300 |
| DP-Pan | Pasta de diamante (1 μm) | | | |

- Embutimento à frio das amostras, utilizando resina de poliéster e moldes de PVC;
- Lixamento e/ou polimento manual ou em politriz automática, conforme especificado na tabela 4.25.

4.3.3 Revelação da estrutura

a) Macrografia

⚒ Aço carbono

- Reagente → Nital a 6% (6 ml HNO_3 + 94 ml $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$);

- ❑ Técnica → Imersão;
- ❑ Tempo de ataque → 10 a 20 s;
- ❑ Temperatura → 40 °C;
- ❑ Lavagem da superfície atacada com água corrente e álcool;
- ❑ Secagem da superfície;
- ❑ Aquisição e digitalização de imagem através de *scanner*, máquina digital ou estereoscópio (até 20x).

AlMg

- ❑ Reagente → Reagente de Tucker (45 ml HCl + 15 ml HNO₃ + 15 ml HF + 25 ml H₂O destilada);
- ❑ Técnica → Imersão com agitação do corpo-de-prova para evitar a formação de bolhas sobre a superfície;
- ❑ Tempo de ataque → 20 s;
- ❑ Temperatura → 40 °C;
- ❑ Lavagem da superfície atacada com água morna;
- ❑ Secagem da superfície;
- ❑ Aquisição de imagem através de *scanner*, máquina digital ou estereoscópio (até 20x).

b) Micrografia

Aço carbono

- ❑ Reagente → Nital a 2% (2 ml HNO₃ + 98 ml C₂H₅OH);
- ❑ Técnica → Imersão;
- ❑ Tempo de ataque → 10 a 15 s;
- ❑ Temperatura → 40 °C;
- ❑ Lavagem da superfície atacada com água corrente e álcool;
- ❑ Secagem da superfície;
- ❑ Aquisição de imagem através de microscópio ótico (até 1000x) ou microscópio eletrônico de varredura (MEV).

AIMg

Observação:

Devido à presença da fase intermetálica Mg_2Al_3 (fase β), que é preferencialmente atacada pelos reagentes convencionais antes da matriz e, ainda, pela característica de anisotropia ótica apresentada pela liga estudada (**cfc**), foi necessário o desenvolvimento e a construção de um aparelho para ataque eletrolítico.

A utilização do ataque eletrolítico, que é uma técnica de anodização do substrato, foi a maneira encontrada para viabilizar a revelação da estrutura de grão e a análise das possíveis variações na microestrutura do metal aportado.

A camada anodizante, formada pelo ataque, propicia a visualização, através de luz polarizada, dos grãos em diferentes tonalidades de coloração (tons cinza). Esta variação de tonalidade é decorrência das diferentes direções de crescimento dos grãos no interior da zona fundida.

Os procedimentos adotados na revelação dos grãos da liga de AIMg foram:

- Ataque ácido utilizando o reagente de Barker como eletrólito → 11,2 ml de ácido fluorbórico (HFb_4) a 50% + 500 ml H_2O destilada. Como reagente alternativo foi testada a solução contendo 10,3 ml HF a 48% + 4,4 g de H_3BO_3 (que equivale a 10 ml de HFb_4 a 50%);
- Técnica → Utilizando o eletrólito como meio condutor de carga, formar uma camada anodizante pela imposição de uma diferença de potencial (24 V) e a passagem de corrente ($0,5 A/mm^2$) entre o cátodo (aço inoxidável austenítico) e o ânodo (AIMg), empregando uma fonte de tensão variável (vide figura 4.15);
- Distância entre o ânodo e o cátodo → 25 mm;
- Dimensões do cátodo → 88 x 27 x 2 mm;
- Profundidade de imersão do centro do ânodo e do cátodo → 28 mm;
- Tempo de ataque → 2 min;
- Temperatura do eletrólito → 25 °C;
- Arrancamento das bolhas de H_2 , formadas no cátodo, através da agitação mecânica do eletrólito (a formação de bolhas reduz a área útil do cátodo e, como consequência, dificulta o processo de condução de carga

elétrica – corrente passando pelo ânodo). As figuras 4.15 e 4.16 apresentam detalhes do agitador mecânico;

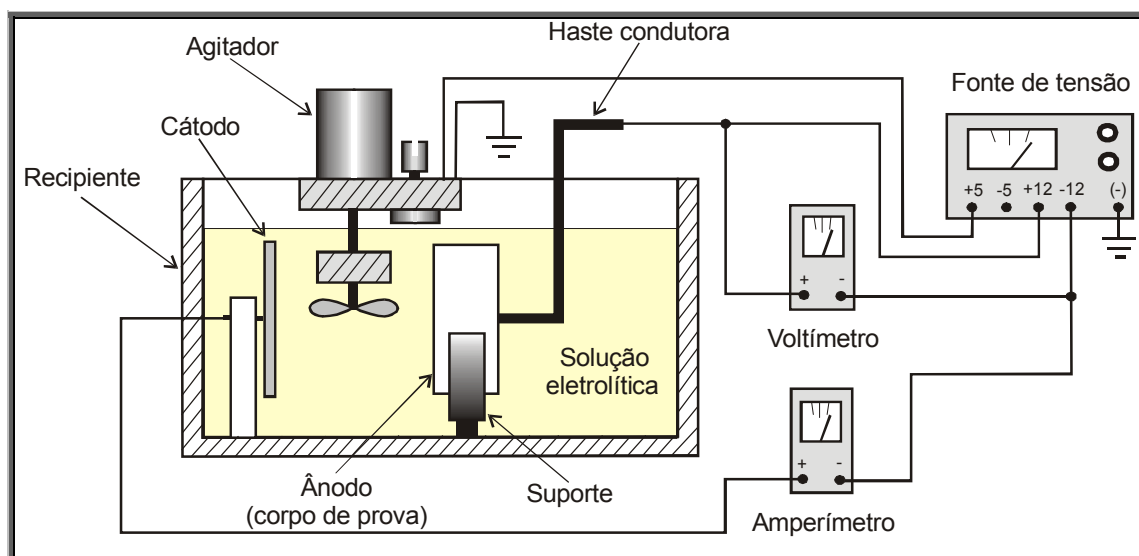


Figura 4.15 – Representação esquemática da célula eletrolítica.

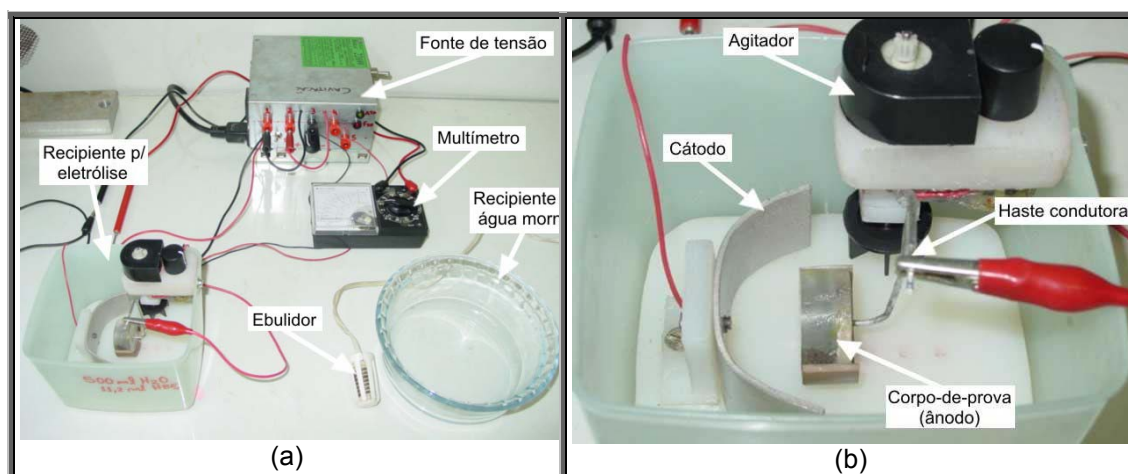


Figura 4.16 – (a) Visão geral da célula eletrolítica e (b) recipiente para eletrólise.

- ❑ Lavagem da superfície, após ataque, com água morna a 50 °C;
- ❑ Secagem da superfície;
- ❑ Aquisição de imagem através de microscopia.

4.3.4 Determinação do tamanho e forma do grão

Através de observações preliminares, foi detectado que a implementação da variante *pulsção térmica*, dentro das condições experimentais determinadas, ocasiona alterações tanto no tamanho (diâmetro médio) quanto na forma (modo de

crescimento – *equiaxial* e/ou *colunar*) dos grãos formados na zona fundida. Desta forma, foi necessária a utilização de duas diferentes, porém complementares, metodologias para viabilizar a análise das características granulométricas (diâmetro e forma) apresentadas em virtude das variações no procedimento de soldagem.

a) Determinação do diâmetro médio dos grãos (AlMg)

A primeira metodologia utilizada, proposta pelas normas **ASTM E19** e **ASTM E 112**, tem como objetivo a determinação do número de grãos (somatório dos valores inteiros e frações) inscritos em um quadrado, contendo uma área de 1 pol² (6,45 cm²), sobreposto na imagem digitalizada dos grãos (aumento de 100x). A relação entre o número de grãos e o respectivo número ASTM (**n**) é expressa por:

$$a = 2^{n-1} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Onde:

a → número de grãos contidos no quadrado sob um aumento de 100x;

n → número ASTM.

Portanto, para um aumento de 100x, o *diâmetro médio* poderá ser expresso por:

$$d_m = \frac{\sqrt{4 \frac{\text{área}}{\pi}}}{100} = \frac{\sqrt{4 \frac{645,16}{\pi \cdot a}}}{100} \text{ mm} = 0,286 \sqrt{\frac{1}{a}} \text{ mm} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Uma vez conhecidos os valores do **d_{m-pt}** (diâmetro médio fase de *pulso térmico*) e do **d_{m-bt}** (diâmetro médio na fase de *base térmica*) determina-se o *diâmetro médio*, compreendido em um *período térmico* (**T_t**), por meio da relação:

$$d_m = \frac{d_{m-pt} + d_{m-bt}}{2} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Onde:

d_{m-pt} → diâmetro médio dos grãos na região do *pulso térmico*;

d_{m-bt} → diâmetro médio dos grãos na região da *base térmica*.

Observação:

Como o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da pulsação térmica sobre o tamanho médio do grão, não foi levado em consideração, como resposta, o número **ASTM** (**n**), mas sim o *diâmetro médio* do grão (**d_m**) apresentado pela zona fundida, na região compreendida por um *período térmico* (**T_t**).

O número **ASTM** (**n**) não apresenta uma boa sensibilidade quando o foco da análise é avaliar como o tamanho do grão se comporta em função de variações no procedimento de soldagem, vide tabela 4.26. Uma mudança no valor de **n** dependerá que o *número de grãos por unidade de área* ou o *diâmetro médio* (**d_m**) dobre ou caia pela metade em relação ao número inicial (por exemplo, duas regiões contendo 128 e 256 grãos/mm², respectivamente, terão o mesmo número **ASTM** (**n** = 4), mas terão as mesmas características mecânicas?).

Tabela 4.26 – Definição do tamanho de grão baseado no número **ASTM** (**n**).
Extraído de Palma et al (1984).

| Número ASTM (n) | Grãos/pol ² a 100X | Grãos/mm ² | Diâmetro médio (mm) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|
| -3 | 0,06 | 1 | 1 |
| -2 | 0,12 | 2 | 0,75 |
| -1 | 0,25 | 4 | 0,50 |
| 0 | 0,50 | 8 | 0,35 |
| 1 | 1 | 16 | 0,25 |
| 2 | 2 | 32 | 0,18 |
| 3 | 4 | 64 | 0,125 |
| 4 | 8 | 128 | 0,091 |
| 5 | 16 | 256 | 0,062 |
| 6 | 32 | 512 | 0,044 |
| 7 | 64 | 1024 | 0,032 |
| 8 | 128 | 2048 | 0,022 |
| 9 | 256 | 4096 | 0,016 |
| 10 | 512 | 8196 | 0,011 |
| 11 | 1024 | 16384 | 0,008 |
| 12 | 2048 | 32768 | 0,006 |

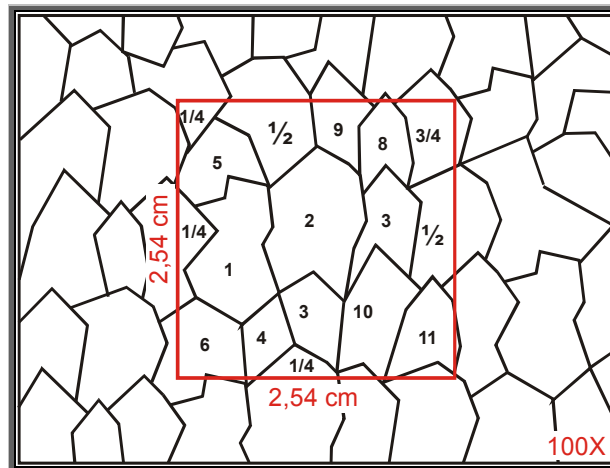


Figura 4.17 – Representação esquemática da técnica utilizada para determinação do diâmetro dos grãos. Onde: $a = 12,25$ grãos e $d_m = 0,081$ mm.

A determinação do número de grãos (a), a partir da imagem digitalizada, foi executada com o auxílio de um programa comercial para tratamento de imagem, como ilustrado pela figura 4.17.

b) Determinação da forma do grão ou modo de crescimento (AIMg)

Como a *pulsção térmica* poderá apresentar influência conjunta sobre a *forma* e o *tamanho do grão* é necessário, para uma caracterização completa, que seja feita uma avaliação conjunta destas duas características morfológicas. Assim, é proposta uma segunda metodologia através da adoção de um *parâmetro*, baseado nas características geométricas do grão, que estime o modo de crescimento apresentado pela zona fundida.

A idéia básica é relacionar a largura média dos grãos (medida perpendicularmente à direção de crescimento) com o comprimento médio dos grãos (medida na direção de crescimento), objetivando obter um valor numérico (adimensional) que estime o quanto o modo de crescimento, da região medida, se afasta da condição equiaxial (“igualdade” entre a largura e o comprimento do grão).

A técnica utilizada foi a sobreposição de duas linhas perpendiculares com dimensões conhecidas (2 mm de comprimento para cada direção, sob ampliação de 62x) sobre a imagem digitalizada dos grãos, com um aumento, também, de 62x. Em seguida, contava-se o número de grãos interceptados pela linha posicionada perpendicularmente à direção de crescimento (dir_a) e o número dos grãos interceptados na direção paralela ao crescimento (dir_b), vide figura 4.18.

Uma vez conhecidos os valores de \mathbf{dir}_a e \mathbf{dir}_b , no *pulso* e na *base térmica*, determina-se o *parâmetro do modo de crescimento (PMC)* por meio da relação:

$$\mathbf{PMC} = \frac{\mathbf{dir}_a}{\mathbf{dir}_b} = \frac{\mathbf{dir}_{a-pt} + \mathbf{dir}_{a-bt}}{\mathbf{dir}_{b-pt} + \mathbf{dir}_{b-bt}} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Onde:

\mathbf{dir}_{a-pt} → número de grãos interceptados na região do *pulso térmico*, perpendicularmente à direção de crescimento;

\mathbf{dir}_{a-bt} → número de grãos interceptados na região da *base térmica*, perpendicularmente à direção de crescimento;

\mathbf{dir}_{b-pt} → número de grãos interceptados na região do *pulso térmico*, paralelamente à direção de crescimento;

\mathbf{dir}_{b-bt} → número de grãos interceptados na região da *base térmica*, paralelamente à direção de crescimento.

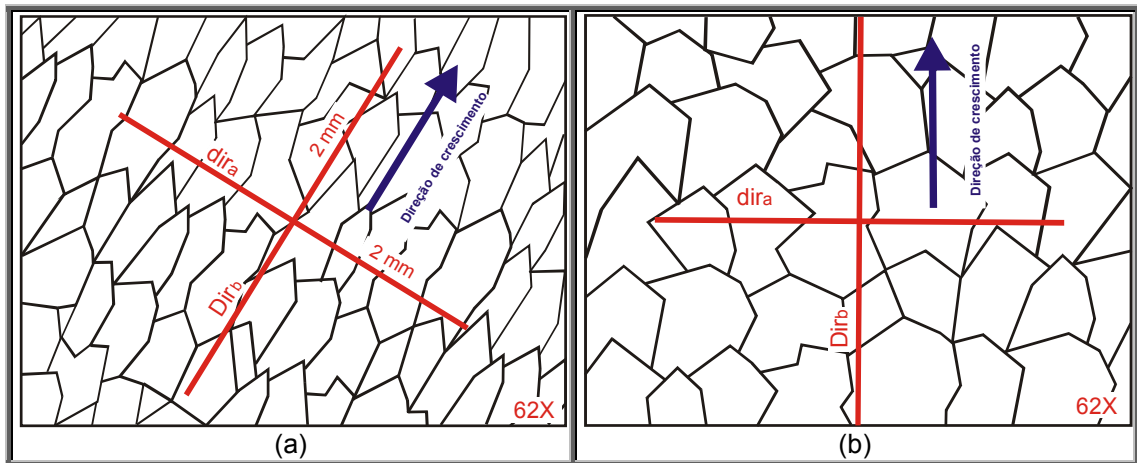


Figura 4.18 – Representação da técnica utilizada para determinação do parâmetro do modo de crescimento (**PMC**). Onde: Em (a) $\mathbf{dir}_a = 11$ grãos, $\mathbf{dir}_b = 8$ grãos e **PMC** = 1,4 e em (b) $\mathbf{dir}_a = 6$ grãos, $\mathbf{dir}_b = 6$ grãos e **PMC** = 1,0.

Assim, quando **PMC** tender para 1, o modo de crescimento predominante na zona fundida será equiaxial e, em contra partida, quanto mais o valor de **PMC** se afasta de 1 mais alongado será o grão apresentado.

A determinação do número de grãos interceptados em cada direção (\mathbf{dir}_a e \mathbf{dir}_b) foi executada com o auxílio de um programa comercial para tratamento de imagem, conforme ilustrado pela figura 4.18.

c) Determinação da largura média do grão austenítico primário (Aço)

Branco (1994) cita que o procedimento comumente adotado para a determinação do tamanho médio do grão austenítico, na região colunar, na realidade, está se referindo apenas a sua largura média. Portanto, com base nesta consideração, é necessária a adoção de um método de medição que possibilite a determinação da largura média do grão austenítico primário, tendo como preocupação adicional a tomada das medidas sempre perpendicularmente à direção de crescimento.

A técnica utilizada foi a sobreposição de uma reta (L) de tamanho conhecido (1,5 mm, ampliada 128x) sobre a imagem digitalizada da região colunar (contendo a mesma ampliação), nos pontos **C** (*pulso térmico*) e **D** (*base térmica*), vide figuras 4.13 e 4.19. A largura média do grão, em cada ponto, foi então determinada pela divisão do valor da reta (1,5 mm) pelo número de grãos interceptados. A largura média dos grãos na zona fundida (L_{zf}), por sua vez, foi obtida pela média das medidas nos pontos **C** e **D**, como expresso pela equação 4.13.

$$L_{zf} = \frac{L_c + L_D}{2} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Onde:

$L_c \rightarrow$ largura média dos grãos no ponto região **C** do pulso térmico, perpendicularmente à direção de crescimento;

$L_D \rightarrow$ largura média dos grãos no ponto região **D** da base térmica, perpendicularmente à direção de crescimento.

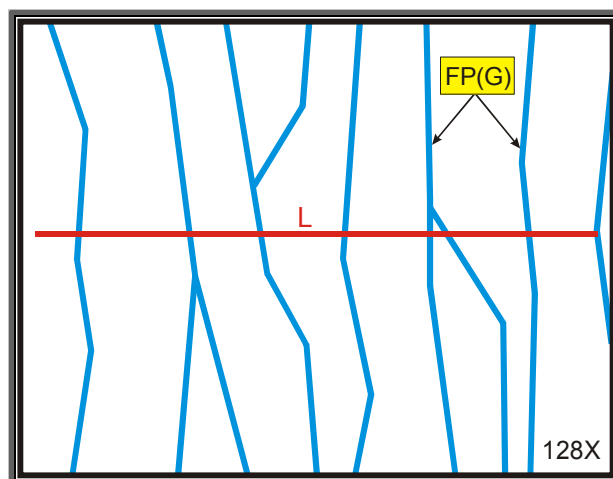


Figura 4.19 – Técnica utilizada na determinação da largura do grão colunar.

A determinação da largura média dos grãos interceptados foi executada com o auxílio de um programa comercial para tratamento de imagem (simulando a imagem visualizada no *campo escuro* – diferenciação da ferrita de contorno de grão **FP(G)**).

4.3.5 Determinação da fração volumétrica dos microconstituintes (Aço)

O procedimento utilizado foi baseado nas recomendações sugeridas pelo **IIW**. Adotou-se a técnica da determinação da fração volumétrica pela contagem dos pontos interceptados, pelo microconstituintes de interesse, na grade sobreposta a imagem digitalizada (pontos **C** e **D**). A grade apresenta 165 pontos de medição com reticulado espaçado de 0,05 mm.

Com a imagem ampliada 340x, foram contados os números de pontos interceptados por cada um dos microconstituintes (**FA**, **FG(P)**, **FS(A)** e **FS(SP)**) contidos nas regiões selecionadas da zona fundida e, ao final, os pontos contados, para cada uma das fases, foram divididos pelo número de pontos da grade (percentual relativo). Uma vez conhecidas as frações volumétricas nas regiões **C** (*pulso térmico*) e **D** (*base térmica*) os percentuais relativos dos microconstituintes, em um *período térmico* (**T_t**), foram determinados pela equação 4.14.

$$P_{ZF} (\%) = \frac{P_c + P_d}{2} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Onde:

P_{ZF} (%) → volume médio do microconstituente de interesse na zona fundida;

P_c e **P_d** → percentuais do microconstituente de interesse nas regiões **C** e **D**.

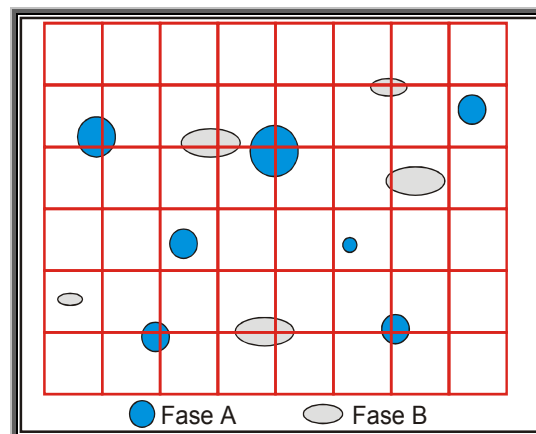


Figura 4.20 – Representação esquemática do processo de quantificação das percentagens volumétricas. Onde: **P_A (%)** = 11,4 e **P_B (%)** = 8,5.

A quantificação dos microconstituintes foi executada com o auxílio de um programa comercial para tratamento de imagem, como ilustrado pela figura 4.20.

4.3.6 Determinação do volume de vazios e sua distribuição (AlMg)

A determinação do volume de vazios (valor estimado do volume de poros), possivelmente gerado na zona fundida pela implementação da *pulsção térmica*, foi realizada através do princípio do *empuxo*, proposto por Arquimedes. Nesta técnica, também conhecida como *gravimetria*, estima-se o volume de vazios, presente no cordão, relacionando-se a densidade da zona fundida (*densidade observada*) com a densidade relativa obtida pela combinação da densidade do arame com a densidade do metal de base (*densidade esperada*).

Basicamente, a técnica de *gravimetria* consiste das seguintes etapas:

a) Determinação das densidades do metal de base (ρ_{MB}) e do arame (ρ_{ar})

Seleção e extração das amostras representativas dos consumíveis, seguidas pela determinação das densidades experimentais.

Observação:

A determinação experimental da densidade é necessária em virtude do valor teórico, além de apresentar arredondamento em suas casas decimais, considerar que o material não apresenta porosidade, o que poderá inserir erros nos experimentos.

b) Seleção e extração da zona fundida

Nesta etapa, foram extraídos corpos-de-prova dos terços finais dos cordões para a determinação das densidades observadas nas zonas fundidas (ρ_{obs}), em decorrência da variação do procedimento experimental (Análise fatorial).

Neste ponto, é importante salientar os cuidados que se deve ter quando da preparação dos corpos-de-prova. Como o interesse da análise é avaliar o volume de vazios somente na zona fundida, é comumente verificado que não há a preocupação em se fazer a retirada das amostras o mais próximo possível da linha de fusão (acompanhando o perfil de penetração) e que o grau de acabamento da superfície recortada é considerado secundário.

No primeiro caso, há o inconveniente da retirada excessiva de parte da zona fundida e, conseqüentemente, tem-se uma análise possivelmente mascarada pela ausência de parte da porosidade e/ou de pontos contendo falta de penetração/fusão (falta de padronização para a forma de extração e para a dimensão da amostra).

Finalmente, para o grau de acabamento da superfície recortada é notado que muitos experimentos têm sido realizados com diferentes graus de acabamento (falta de uma padronização) e, por conseguinte, para um mesmo corpo-de-prova, o volume levantado através do princípio do empuxo possivelmente sofrerá variação em função do acabamento apresentado, ou seja, as superfícies muito rugosas podem reter pequenas bolhas de ar durante o processo de imersão e, assim, induzindo o experimentador a estimar um volume maior de vazios.

Nos experimentos os corpos-de-prova tiveram a seguinte preparação:

- ❑ Extração de amostras representativas (3 cm de comprimento) dos cordões, na condição simples deposição;
- ❑ Lixamento (600 mesh) e ataque da seção transversal para o levantamento da diluição média (dil_m) e a visualização do perfil da zona fundida. Uma vez determinada a localização da linha de fusão, foi executada a extração manual da zona fundida, preservando a região de ligação *cordão-metal de base*;
- ❑ Lixamento (600 mesh) da superfície recortada (redução da rugosidade proveniente do corte mecânico);
- ❑ Limpeza através de ultrassom, utilizando-se álcool como fluido.

c) **Determinação da massa e volume dos corpos-de-prova**

Uma balança de resolução (0,0001 g) foi empregada no levantamento das massas experimentais das amostras (m_{obs}), vide figura 4.21.

Os volumes das amostras foram determinados através da:

- ❑ Determinação da massa inicial (m_{H_2O}) apresentada por um recipiente contendo água destilada sob temperatura controlada (18 °C);
- ❑ Imersão da amostra, suspensa por um fio contendo massa e volume desprezíveis, no recipiente e posterior determinação da nova massa do recipiente (m_{final}), vide novamente figura 4.21.

Como a densidade da água (ρ_{H_2O}) é igual a 1 g/cm³, o volume apresentado pelo corpo-de-prova (**Vol_{CP}**) pode ser definido pela expressão abaixo, a qual determina o volume de água deslocado pela imersão da amostra.

$$Vol_{CP} = \frac{\text{empuxo}}{\rho_{H_2O} \cdot g} = \frac{(m_{\text{final}} - m_{H_2O}) \cdot g}{\rho_{H_2O} \cdot g} = m_{\text{final}} - m_{H_2O} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Onde:

g → aceleração da gravidade (9,8 m/s²).

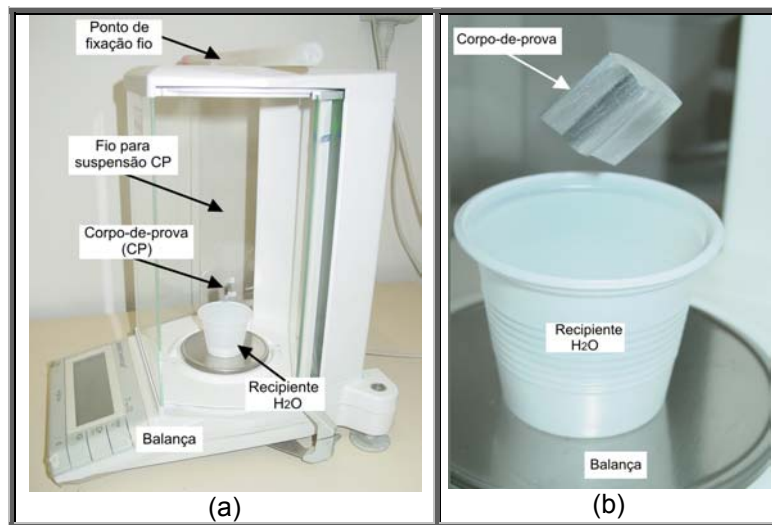


Figura 4.21 – Método utilizado para a determinação das massas e dos volumes dos corpos-de-prova. Onde: (a) posicionamento do corpo-de-prova no interior da balança (b) detalhe da região de imersão.

d) Determinação da densidade do corpo-de-prova

Uma vez conhecido o volume, o valor da densidade pode ser determinado pela expressão:

$$\rho_{CP} = \frac{m_{\text{obs}}}{Vol_{CP}} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

e) Determinação do volume de vazio

Sabendo-se os valores das densidades de referência (ρ_{ar} e ρ_{MB}), das densidades observadas (ρ_{CP}) e das diluições médias (**dil_m**) os valores dos volumes

de vazios podem finalmente ser determinados pela relação entre as densidades, conforme apresentado pela equação abaixo.

$$\text{Vol}_{\text{VZ}} = \frac{\rho_{\text{pond}} - \rho_{\text{CP}}}{\rho_{\text{pond}}} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$\rho_{\text{pond}} = \frac{\% \text{MB} \cdot \rho_{\text{MB}} + \% \text{ar} \cdot \rho_{\text{ar}}}{\% \text{MB} + \% \text{ar}} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Onde:

Vol_{VZ} → volume de vazios apresentado pelo corpo-de-prova;

ρ_{pond} → densidade média ponderada da zona fundida gerada pela variação no valor da diluição do cordão (valor esperado);

%MB → percentagem de metal de base estimado na zona fundida através da **dil_m**;

%ar → percentagem de arame estimado na zona fundida através da **dil_m**.

Observação:

O uso da densidade média ponderada (**ρ_{pond}**), como valor representativo da densidade na zona fundida (**ZF**), deve-se ao fato da *pulsção térmica* provocar diferentes níveis de diluição entre o *pulso* e a *base térmica*. Portanto, é necessário que se conheça o perfil de penetração (combinação das vistas longitudinal e transversal do cordão) para que seja determinada a melhor maneira de levantar o valor da **ρ_{pond}**.

Morais et al (2002) citam que a determinação do volume de vazios pelo método gravimétrico apresenta uma acurácia de aproximadamente 99,7%.

A figura 4.21 apresenta uma descrição dos procedimentos adotados na determinação dos volumes apresentados pelos corpos-de-prova, empregando-se o princípio do *empuxo* de Arquimedes.

No anexo I é exposta a tabela com os valores levantados para **ρ_{ar}**, **ρ_{MB}**, **ρ_{CP}**, **%MB**, **%ar**, **ρ_{pond}** e **Vol_{VZ}**.

f) Determinação da localização preferencial dos vazios (poros)

Observação:

A definição pura e simplesmente do volume de vazios é uma informação que requer o conhecimento adicional da forma, distribuição e localização destes vazios (poros e/ou falta de fusão) no cordão de solda, para que se tenha uma caracterização mais palpável sobre o fenômeno.

Nos experimentos, esta informação adicional foi levantada através da análise por microscopia ótica (100x) das seções longitudinais e transversais das zonas fundidas.

4.3.7 Microscopia ótica

A técnica de microscopia ótica foi empregada para auxiliar a caracterização do efeito da *pulsção térmica* sobre a microestrutura da zona fundida (perfil de penetração, tamanho e forma do grão, espaçamento dendrítico, localização e forma de porosidade e volume de microconstituintes) e da zona termicamente afetada **ZTA** (diferença na granulometria e na largura), entre o *pulso* e *base térmica*.

A bancada de microscopia ótica, utilizada na caracterização dos corpos-de-prova, é composta pelos seguintes equipamentos (vide figura 4.22(a)):

- ❑ Microscópio metalúrgico modelo BX60M (fabricado pela OLYMPUS);
- ❑ Sistema de aquisição (digitalização) de imagem OLYMPUS DP11;
- ❑ Microcomputador Pentium III (1 GHz).

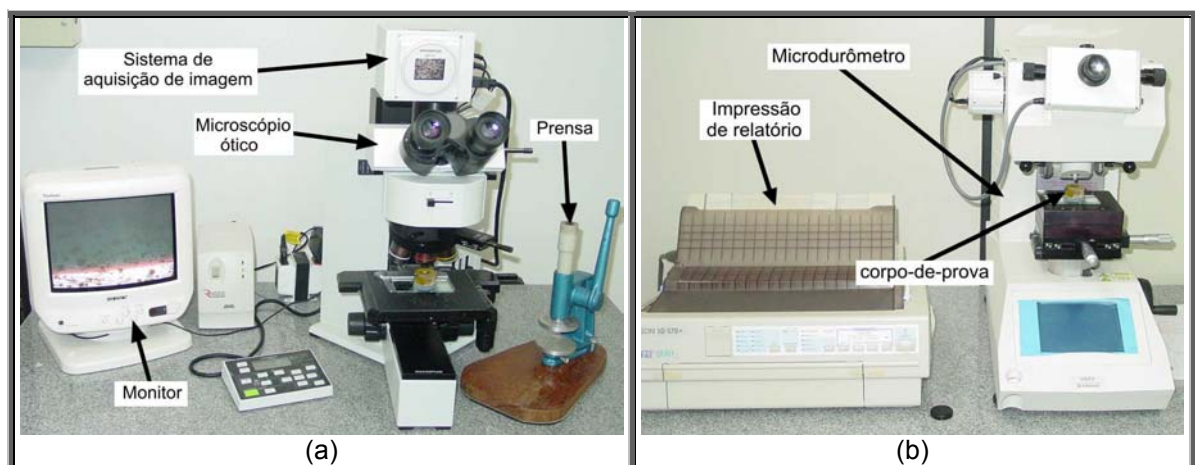


Figura 4.22 – Equipamentos utilizados na caracterização dos corpos-de-prova (imagem e perfil de dureza). Onde: (a) Microscópio ótico e (b) microdurômetro.

4.3.8 Microscopia eletrônica de varredura

Para auxiliar na acurácia da caracterização do efeito da *pulsção térmica* sobre a subestrutura (espaçamento intercelular ou dendrítico) das ligas estudadas, foi utilizada microscopia eletrônica de varredura (**MEV**).

O equipamento empregado apresenta as seguintes especificações:

- Marca Philips;
- Modelo XL-30;
- Equipado com um espectrômetro de energia dispersiva (EDS-EDAX), para a formação de imagem e a determinação, por microanálise, da composição química;
- Voltagem de aceleração do feixe de elétrons de 20 keV (como condição de operação adotada nas análises).

4.3.9 Levantamento da dureza média da zona fundida

A aplicação do ensaio de dureza nas superfícies dos corpos-de-prova objetivou relacionar as possíveis alterações na dureza média apresentada na seção longitudinal da zona fundida com eventuais variações no tamanho e na forma do grão, para o AlMg, e com os volumes dos microconstituintes (ferrita acicular – **FA**, ferrita de contorno de grão – **FP(G)**, ferrita com segunda fase alinhada – **FS(A)** e ferrita de placa lateral – **FS(SP)**), para o aço.

Para o levantamento da microdureza, na região longitudinal da zona fundida, foram empregados os seguintes equipamentos e procedimentos:

- Microdurômetro Shimadzu **HMV – 2** (vide a figura 4.22(b));
- Endentador (indentador) Vickers;
- Carga de endentação de 9,8 N (**HV₁**), para o aço, e 4,9 N (**HV_{0,5}**) para o alumínio;
- Tempo de endentação de 20 s;
- Tomada de três medidas (**med**) em cada uma das regiões selecionadas (pontos **A**, **B**, **C**, **D**, **E** e **F**, vide novamente a figura 4.13), seguida pela determinação das médias em cada ponto e utilizando-se, posteriormente, estes valores para o cálculo da dureza média (resposta) apresentada pela zona fundida, no intervalo de um *período térmico* (**T_t**). Os cálculos seguiram as formulações descritas abaixo.

$$dur_{pto} = \frac{med_1 + med_2 + med_3}{3} \quad (Eq. 4.19)$$

$$dur_{mg} = \frac{dur_{ptoA} + dur_{ptoB} + dur_{ptoC} + dur_{ptoD} + dur_{ptoE} + dur_{ptoF}}{6} \quad (Eq. 4.20)$$

Onde:

dur_{pto} → dureza média em cada região;

dur_{mg} → dureza média da zona fundida na região de um *período térmico*.

Observação:

Na liga AlMg, em decorrência da formação de uma fina e transparente camada anodizante, produzida durante o ataque eletrolítico, é necessário reavaliar o procedimento normalmente adotado no levantamento do perfil de dureza da região atacada. A endentação (penetração da pirâmide de diamante) sob a superfície atacada acarreta o trincamento da camada anodizante e a deformação nas bordas da impressão. Esta anomalia, por sua vez, mascara as medições em decorrência da dificuldade na determinação dos vértices da impressão (Fig. 4.23).

O problema criado é que a seleção das regiões a serem levantadas a dureza normalmente utiliza os grãos como referência e, portanto, dependerá que a estrutura esteja revelada (presença da camada anodizante), mas, em contrapartida, a presença da camada dificultará a leitura pela anomalia.

A figura 4.23 (itens a e b) exemplifica o problema observado na tomada da dureza sobre a superfície revelada. Nestes itens, verifica-se que as trincas e as deformações não aparecem no ataque convencional.

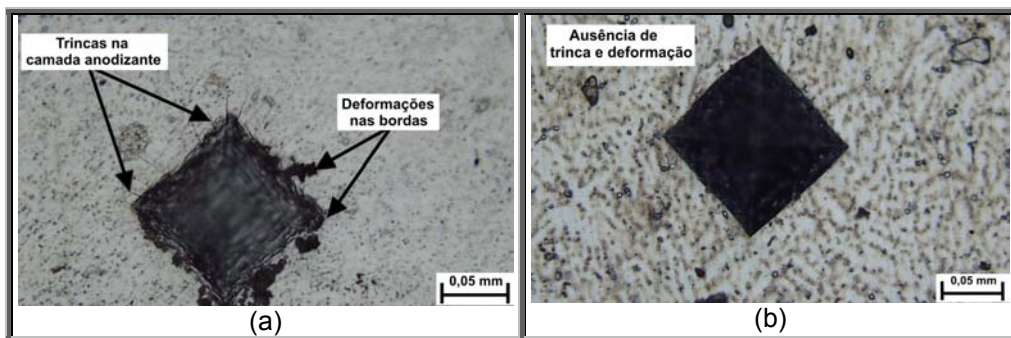


Figura 4.23 – Efeito do tipo de ataque sobre o aspecto da endentação (AlMg). Onde: (a) ataque eletrolítico (HBF_4) com a formação de trincas e deformações na camada anodizante, próxima as bordas, e (b) ataque por imersão (reagente de Keller) sem a ocorrência de defeitos na endentação.