

Trabalho Prático N°:

Transferência de Metal na Soldagem GMAW (MIG/MAG)

1. Objetivos:

- Familiarizar-se com o arranjo e a operação do equipamento utilizado na soldagem GMAW semi-automática e mecanizada.
- Familiarizar-se com os consumíveis e os parâmetros mais importantes do processo.
- Familiarizar-se com as diferentes formas de transferência de metal e sua importância para este processo de soldagem.
- Familiarizar-se com técnicas de aquisição de dados por computador.

2. Revisão Teórica:

2.1. Transferência de Metal (deve ser complementada com o texto das aulas teóricas):

Existem três formas principais de transferência de metal no processo GMAW: (a) Transferência por Curto-Circuito, (b) Transferência Globular e (c) Transferência por "Spray", Aerossol ou Goticular. Além dessas, usando-se equipamentos capazes de fornecer corrente com pulsos de valor elevado, é possível se soldar com uma transferência do tipo spray com valores relativamente baixos de corrente (transferência pulsada). Uma discussão mais aprofundada destas formas é encontrada no livro texto e o seu conhecimento será assumido aqui. A figura 1 mostra esquematicamente a relação entre a corrente e tensão de soldagem para as três formas básicas de transferência na soldagem GMAW com um gás de proteção rico em argônio.

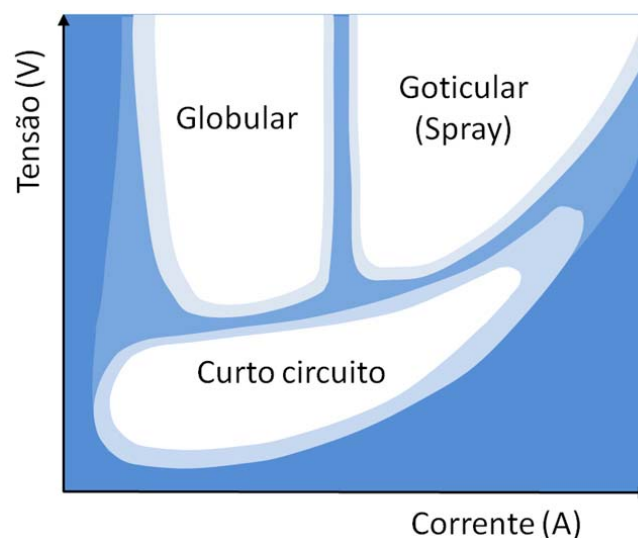


Figura 1 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático).

O modo de transferência influencia fortemente características operacionais do processo GMAW como a sua estabilidade, o nível de respingos, o formato do cordão e sua regularidade e a capacidade de fundir o metal de base. Como a forma de transferência obtida no processo GMAW depende dos parâmetros de soldagem e é muito sensível ao seu ajuste, a seleção adequada destes é fundamental para uma soldagem adequada com este processo.

As principais variáveis que determinam o modo de transferência são a corrente de soldagem, o comprimento do arco, a composição do gás de proteção e a composição, a bitola e o comprimento do eletrodo. Existem, além dessas, diversos outros fatores que podem afetar o modo de transferência de metal de adição. Em particular, a presença de contaminações tanto no metal de base como no eletrodo ou no gás de proteção pode perturbar fortemente a transferência.

A transferência por curto-circuito é típica da soldagem com um pequeno comprimento de arco (menores valores de tensão de soldagem). Nesta, o eletrodo toca periodicamente (entre cerca de 20 a 200 vezes por segundo) a peça, ocorrendo um curto-circuito. Durante este, a corrente de soldagem se eleva rapidamente causando um aquecimento forte do eletrodo por efeito Joule, a sua fusão e a transferência de metal para a poça de fusão com a ruptura de uma parte do eletrodo e a reabertura do arco elétrico. Esta forma de operação é muito usada industrialmente para a soldagem de aços carbono com arames de menor bitola (0,6 a 1,2 mm), com proteção de CO₂ e correntes relativamente baixas, para a soldagem de juntas de pequena espessura e, frequentemente, fora da posição plana.

A transferência por curto-circuito é relativamente instável, com a geração de uma elevada quantidade de respingos, particularmente ao final de cada curto-circuito. Existe, contudo, em geral, uma condição de menor instabilidade que ocorre quando a frequência de transferência (ou de curtos-circuitos) é máxima. Esta condição pode ser obtida, com base no ruído emitido pelo processo, variando, em geral, a tensão de soldagem. Um outro fator importante para a estabilidade do processo na transferência por curto-circuito é a taxa de crescimento (A/s) da corrente durante um curto-circuito. Se a corrente se eleva de uma forma excessivamente rápida, o rompimento do arame ao final de um curto tende a ser explosivo e forma uma elevada quantidade de respingos. Se a corrente aumentar muito lentamente, o rompimento do arame pode não ocorrer e o processo de soldagem se interrompe. Em geral, este fator é ajustado, em máquinas para a soldagem GMAW, através de um controle denominado “**indutância**”.

Na transferência globular, as gotas de metal líquido, cujo diâmetro tende a ser maior que o do próprio eletrodo se destacam do eletrodo, pela ação direta da gravidade, de uma forma similar a uma torneira gotejando, sem a ocorrência de curto-circuito. Esta forma de transferência é característica da soldagem com corrente baixa (força magnética pequena) e elevada tensão (grande comprimento de arco). Na soldagem de aços, com proteção de CO₂, em que não existem condições para a transferência spray, a transferência globular ocorre também com correntes elevadas. A soldagem com esta forma de transferência tende a ser muito instável devido às perturbações causadas ao arco pelo destacamento de grandes gotas e a ocorrência de respingos.

A transferência spray ocorre na soldagem com mistura de proteção rica em argônio e com correntes suficientemente elevadas para que a força de origem magnética passe a controlar o processo de transferência. Esta forma de transferência tende a ser extremamente estável (desde que o arco seja suficientemente longo para prevenir a ocorrência de curto-circuito) e não depende da força da gravidade. A necessidade de uma corrente elevada, contudo, restringe o seu uso para a soldagem de juntas de maior espessura e para a soldagem na posição plana (a poça de fusão tende a ter um volume e fluidez que dificultam o seu controle fora da posição plana).

Atualmente, com o desenvolvimento de máquinas de soldagem com controle eletrônico, a soldagem com corrente pulsada tem se tornado comum. Nesta forma de soldagem GMAW, a corrente varia periodicamente entre um nível elevado (corrente de pico) e um baixo (corrente de base). O valor e a duração da corrente de pico são selecionados de forma a causar a transferência spray, enquanto que a passagem pela corrente de base permite a obtenção de um valor médio de corrente relativamente baixo. Desta forma, com a utilização de um equipamento mais sofisticado (e mais caro) pode-se soldar com a transferência spray (e com as suas vantagens) com um valor de corrente que permite a soldagem de juntas menos espessas e, também, fora da posição plana. Além disto, estes equipamentos, que possuem um tempo de resposta muito mais rápido do que os convencionais, permitem a mudança controlada da corrente de soldagem durante o ciclo do curto-circuito. Isto permitiu o desenvolvimento de equipamentos de soldagem que operam com transferência por curto-circuito com uma maior estabilidade e uma menor formação de respingos.

2.2. Monitoração de Processos de Soldagem:

A determinação de parâmetros e a calibração de equipamentos de soldagem é essencial quando qualquer método de controle é aplicado ao processo. Tradicionalmente na indústria, quando é necessário um controle das operações de soldagem, isto é feito através do estabelecimento de uma **Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)** e o seu **Registro/Qualificação** através da soldagem de um corpo de prova baseado na EPS, a retirada de corpos de prova e a realização de teste de acordo com um código ou norma de fabricação. A EPS registra basicamente os dados relativos aos materiais sendo soldados (espessuras, composição química ou especificação, etc.), características da junta (tipo de chanfro, posição de soldagem, etc.), consumíveis e parâmetros de soldagem (corrente, tensão de soldagem, etc.) que devem ser utilizados na fabricação das juntas soldadas que cobertas por esta EPS.

Por outro lado, na soldagem a arco, particularmente em processos mecanizados ou automáticos, é, em princípio, possível monitorar e, até mesmo, inspecionar e controlar o processo durante a operação com base na avaliação das alterações em diferentes variáveis, em particular, a corrente e tensão de soldagem. Um avanço considerável em técnicas para a monitoração e controle de processos de soldagem vem ocorrendo nos últimos anos. Na sua forma tradicional, estas técnicas incluem o uso de medidores, como amperímetros e voltímetros, para a determinação da corrente e tensão média de soldagem e de outras técnicas para a avaliação de outras variáveis do processo (por exemplo, o uso de lápis

térmico para a verificação da temperatura da peça). Nos últimos anos, o uso de sistemas de aquisição de dados baseados em dispositivos digitais se tornou comum. Estes sistemas oferecem atualmente uma alternativa interessante para o registro/análise de sinais de diferentes sensores. Existem diferentes tipos destes sistemas incluindo osciloscópios digitais, sistemas dedicados a diferentes tipos de equipamentos e cartões (placas) A/D (analógico/digital) que podem ser colocadas em computadores e controladas por um programa específico que pode, por exemplo, emular o funcionamento de um osciloscópio. Estes sistemas competem favoravelmente com sistemas analógicos em termos de custo e desempenho e têm a grande vantagem de permitir a análise e manipulação direta dos dados gerados por computadores. Estes sistemas são formados, em geral, pelos seguintes elementos: (a) transdutores (sensores), (b) dispositivos para a condicionamento dos sinais gerados pelos sensores, (c) um dispositivo (“hardware”) para aquisição digital de dados (os sinais), (d) um sistema de processamento de dados (por exemplo, um microcomputador) e (e) programas (“software”) para o controle da aquisição e análise dos dados.

Transdutores alteram uma forma de energia em outra, sendo úteis para a transformação de uma dada grandeza física, no presente caso, em um sinal elétrico que será medido, registrado e, eventualmente, processado pelo sistema. No caso da soldagem a arco, as variáveis geralmente medidas incluem a corrente e tensão de soldagem, a velocidade de alimentação de arame, a velocidade de deslocamento e a vazão de gás de proteção. Além disso, pode-se ter interesse em medir, por exemplo, o nível de radiação emitida pelo arco, o nível de ruídos do processo e a quantidade radiação infravermelho emitida pela peça, no lado oposto ao arco (este última está sendo proposta como uma técnica para controlar automaticamente a penetração da solda).

Transdutores comuns para a medição da corrente elétrica incluem os “shunts” (uma resistência calibrada da qual pode-se medir um valor de tensão elétrica proporcional à corrente que passa através do shunt) e sensores de efeito Hall (figura 2). Estes últimos são apresentam melhores características para a medição de sinais que variam rapidamente e são mais seguros pois não fazem parte do circuito elétrico de soldagem.

O sinal de saída de um transdutor precisa, em muitos casos, ser alterado (condicionado) para torná-lo adequado para a sua leitura pelo dispositivo de aquisição de dados. O condicionamento de sinais inclui, por exemplo, a amplificação de sinais, o seu isolamento, filtragem, linearização e retificação. Em alguns casos (para strain gages, por exemplo), o sensor precisa ser alimentado de forma controlada e precisa para funcionar, sendo esta alimentação considerada parte do condicionamento do sinal.

Amplificação é a forma de condicionamento de sinal mais comum. Termopares, por exemplo, geram um sinal de baixa tensão que, muitas vezes, deve ser amplificado para aumentar a sua resolução e torná-lo menos sensível a ruídos. O isolamento do sinal é usado principalmente para proteger o sistema de aquisição de dados de sinais de alta tensão com os quais o sensor possa estar em contato. Por exemplo, para medir a variação de temperatura de uma região da peça durante a soldagem, um termopar pode ser colocado nesta região. Se este não for isolado, dependendo de como a ligação for feita, a tensão de soldagem (muito maior que o sinal do termopar) pode ser passada para o sistema de

aquisição e, eventualmente, danificá-lo. Isoladores óticos ou indutivos são geralmente usados para este fim. A filtragem é utilizada para retirar ruídos indesejáveis do sinais que será medido. Outras formas de condicionamento de sinal incluem a excitação do sensor (por exemplo, no caso de “strain gages” que necessitam ser alimentados com um sinal elétrico para funcionarem), a retificação, a contagem de pulsos e a linearização do sinal.

Um sistema digital de aquisição de dados é constituído tipicamente por um **multiplexador**, um **circuito de amostragem e retenção** (“sampling and holding”) do sinal, o qual é processado pelo **conversor A/D** para uma forma digital (capaz de ser processada por computadores) e armazenado em uma posição da **memória**. O multiplexador é usado em sistemas de menor custo e atua como uma porta de várias entradas que permite acessar em um dado instante o sinal de um entre vários sensores ou, colocando de uma forma diferente, permite coletar dados de várias fonte com um único circuito de aquisição. Desta forma, a aquisição dos sinais dos diferentes sensores não é feita de forma simultânea. Sistemas mais sofisticados e de maior custo não utilizam multiplexador, apresentando um circuito de aquisição para cada canal e permitem a aquisição simultânea do sinal de diferentes sensores.



Figura 2 - Sensores para a medição de corrente: (a) Shunt e (b) Sensor de efeito Hall.

Durante a sua aquisição pelo sistema digital, o sinal analógico é alterado, passando de sua forma original (em geral, contínua) para uma forma digital (discreta tanto em seu valor como em sua variação no tempo), figura 3.

O sinal analógico pode, em geral, ser descrito como uma função contínua no tempo:

$$y = f(t)$$

onde y é o sinal o qual é representado, em um dado tempo (t_*), por um número **real**. Por sua vez, o sinal digital resultante é dado por um vetor de números **inteiros** (Y_i) relacionado com um vetor de tempo (t_i):

$$Y_i = g(t_i), \text{ onde, em geral, } t_{i+1} - t_i = \Delta t$$

onde Δt é o intervalo de amostragem.

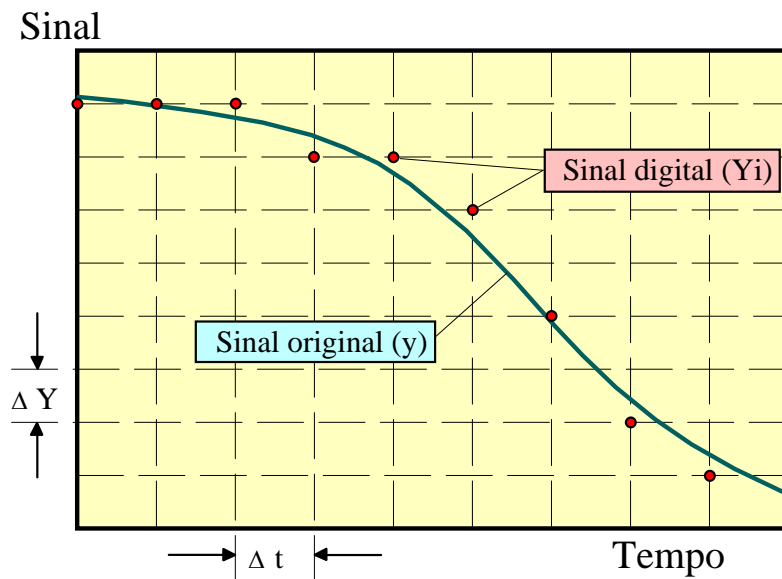


Figura 3 - Conversão de um sinal analógico em um sinal digital.

A conversão do sinal em um número inteiro implica que este não poderá mais representar precisamente qualquer valor, passando a ter um limite de resolução (que será a menor variação do sinal que poderá ser representada) que dependerá do número de **bits** usados para armazenar o sinal na memória do sistema (figura 3). Esta resolução, Δy , pode ser estimada como:

$$\Delta y = \frac{y_{MAX} - y_{MIN}}{2^{BITS} - 1}$$

onde $(y_{MAX} - y_{MIN})$ é o intervalo em que o sinal y está sendo medido. Por exemplo, supondo que o sinal de um termopar está sendo coletado em um sistema A/D de 10 bits com uma faixa de -50 a 50 mV. A resolução máxima será:

$$\Delta y = \frac{[50 - (-50)]mV}{2^{10} - 1} = 0,098mV \text{ ou } \approx 0,1\%$$

Para um termopar do tipo K (Cromel-Alumel), uma variação de 1mV no sinal corresponde, aproximadamente, a cerca de 25°C. Assim, a resolução do sistema será de cerca de 2,5°C (= 0,098mV x 25 °C / 1mV). Esta resolução poderia ser melhorada reduzindo-se o intervalo de

medida (por exemplo, para 0 a 50mV) ou aumentando-se o número de bits usados para armazenar o sinal (por exemplo para 12 ou 16 bits).

A resolução deve ser suficientemente alta para garantir uma reprodução fiel do sinal. Por outro lado, o uso de um maior número de bits para armazenar o sinal implica, em geral, no uso de equipamentos de maior custo, na necessidade de um maior tempo para fazer uma leitura e, em alguns casos, na necessidade de mais memória para armazenar o dado. Atualmente, placas A/D comuns trabalham tipicamente com 8 a 16 bits, existindo placas que permitem selecionar o número de bits desejado. Adicionalmente, para maximizar a resolução do sinal, deve-se adequar o intervalo de medição ($Y_{MAX} - Y_{MIN}$) de acordo com a faixa de variação do sinal, o que é feito pela escolha adequada da faixa de operação da placa (esta, em geral, permite trabalhar em diferentes faixas) e pelo condicionamento (amplificação ou redução) do sinal antes de sua leitura pela placa.

O intervalo de amostragem (intervalo de tempo entre duas leituras consecutivas do mesmo sinal, Δt) é também fundamental para a reprodução adequada do sinal. Para um dado intervalo de amostragem, pode-se definir uma frequência crítica, denominada *Frequência de Nyquist* e dada por:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \Delta t}$$

Se o sinal sendo monitorado (y) apresentar variações cuja uma frequência é maior do que f_c , estas variações não poderão ser registradas adequadamente pelo sistema de aquisição de dados e, mais grave ainda, elas aparecerão, no sinal coletado (Y_i), como variações falsas, com uma frequência diferente de sua frequência original. Isto é, o sinal Y_i obtido será corrompido, não representando de forma adequada o sinal y devido às variações de frequência superior a f_c existentes neste último. Para se garantir uma reprodução mais fiel da forma de y , recomenda-se que a frequência de aquisição de dados ($1/\Delta t$) mais elevada, pelo menos 10 vezes maior que a frequência das variações mais rápidas existentes em y (f_{MAX}).

A figura 4 ilustra os conceitos discutidos no parágrafo anterior. Para $1/\Delta t \approx 8f_{MAX}$, Y_i reproduz o sinal original de forma razoável quando os pontos de Y_i são unidos por linhas retas (figura 4b, linha grossa). Por outro lado, o uso de uma frequência de aquisição inferior à frequência de Nyquist (figura 4b, linha fina), resulta em um vetor Y_i que, além de distorcer o sinal y , sugere que este tenha uma frequência superior à sua frequência real.

Assim, uma elevada taxa de aquisição de dados é desejável para se garantir uma reprodução adequada de um sinal. Entretanto existem limitações quanto a custo (necessita-se, em geral, de equipamentos mais caros para se conseguir $1/\Delta t$ mais elevada) e quanto ao volume de memória a ser usada ($1/\Delta t$ mais elevada significa um maior número de pontos para serem armazenados ao se reproduzir um sinal durante um período de tempo). Assim, é muito importante uma escolha criteriosa de $1/\Delta t$ para uma dada aplicação. Quando o sinal apresenta ruídos de alta frequência de pouco interesse, uma solução adequada para reduzir as exigências quanto à frequência mínima de aquisição de dados é a utilização de filtros para eliminar esses ruídos durante o processamento ou condicionamento inicial do sinal.

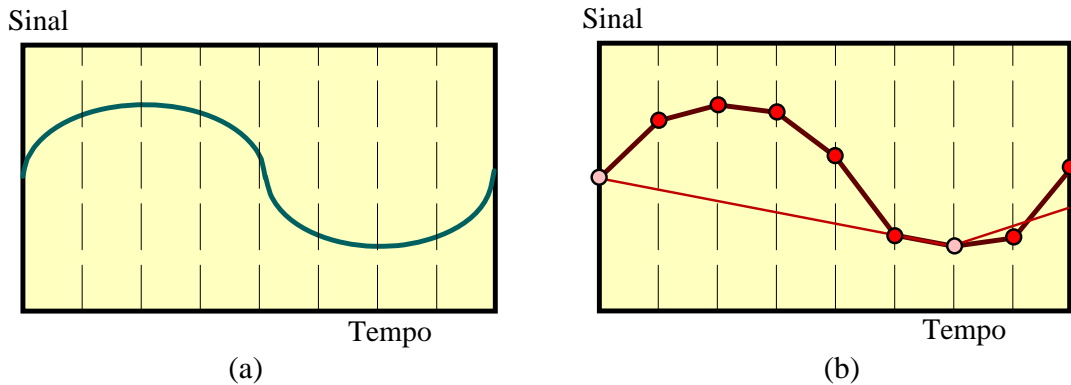


Figura 4 - (a) Sinal analógico original. (b) Sinais digitais obtidos para $1/\Delta t \approx 8 f_{MAX}$ (linha grossa) e para $1/\Delta t \approx 1,3 f_{MAX}$ (linha fina).

Outras considerações importantes relacionadas com o uso de sistemas digitais de aquisição de dados estão relacionadas com problemas de aterramento e com a formação de curtos internos na instrumentação quando vários sinais são medidos simultaneamente (“common mode”). A figura 5 ilustra um problema simples de aterramento no qual um divisor de tensão é utilizado para reduzir o valor do sinal (a tensão de soldagem, por exemplo). Em (a), o sensor e o sistema de aquisição de dados foram aterrados incorretamente, existindo, entre eles, uma diferença de potencial introduzida pela resistência do divisor de tensão. Este arranjo pode corromper o sinal medido, ou, em casos mais graves, quando a diferença de potencial for suficientemente elevada, pode chegar a danificar o sistema de aquisição de dados. A figura 5b mostra a montagem correta. Um outro problema é ilustrado na figura 6, onde tenta-se ler o sinal de um termopar ligado a uma peça que apresenta uma grande diferença de potencial em relação ao sistema de aquisição de dados. Uma solução seria o uso de um dispositivo que desacoplasse (isolasse) o sinal do termopar, como, por exemplo um acoplador óptico (dispositivo transmite o sinal elétrico do sensor como luz entre uma fonte emissora de luz e uma célula fotoelétrica, isolando, assim, o sinal).

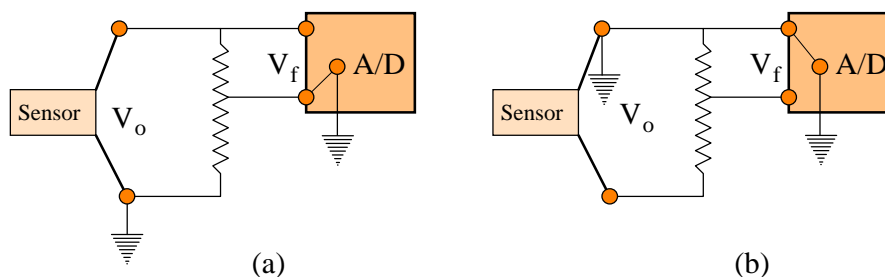


Figura 5 - (a) Aterramento incorreto de um divisor de tensões (aterramentos no lado do sensor (V_o) e da placa de aquisição de dados (V_f) têm uma diferença de potencial de $V_o - V_f$.) (b) Aterramento correto.

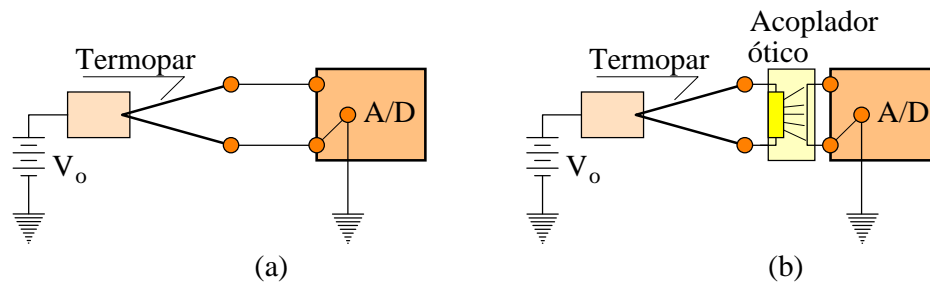


Figura 6 - (a) Problema de isolamento associado com a leitura de um termopar em uma peça com um potencial diferente do sistema A/D. (b) Uso de acoplamento óptico para isolar a tensão V_o do sistema A/D.

3. METODOLOGIA:

- Inicialmente os alunos e o instrutor discutem os objetivos, a parte teórica e a metodologia do trabalho. O instrutor mostra o equipamento a ser utilizado (figura 7), explica a sua operação e demonstra o seu funcionamento. As regras de segurança são relembradas.
- O corpo de prova (barra de aço) é colocado na mesa de soldagem e a tocha de soldagem é posicionada sobre o mesmo. As condições de soldagem especificadas são ajustadas (tipo de arame e de gás de proteção, velocidade de alimentação do arame, distância da tocha à peça, tensão de vazio da fonte, etc). O sistema de monitoração é montado e preparado para a aquisição da corrente e tensão de soldagem.
- Uma série de cordões é depositada variando, entre cada teste, uma ou mais das variáveis de soldagem e monitorando-se a corrente e tensão de operação. As condições operacionais, particularmente as características do arco e a forma de transferência, são observadas pelos alunos durante cada teste.
- Ao final dos testes, os dados obtidos são estudados com o auxílio de um programa de análise (por exemplo, o programa SINAL, desenvolvido pelo LabSEND/LRSS). Os alunos devem analisar os oscilogramas de corrente e tensão, medir os valores médios e os desvios padrões destas e calcular parâmetros característicos da transferência por curto-circuito como o número de curtos por segundo. Avaliar também os cordões depositados e relacionar o aspecto deste com os resultados anteriores.

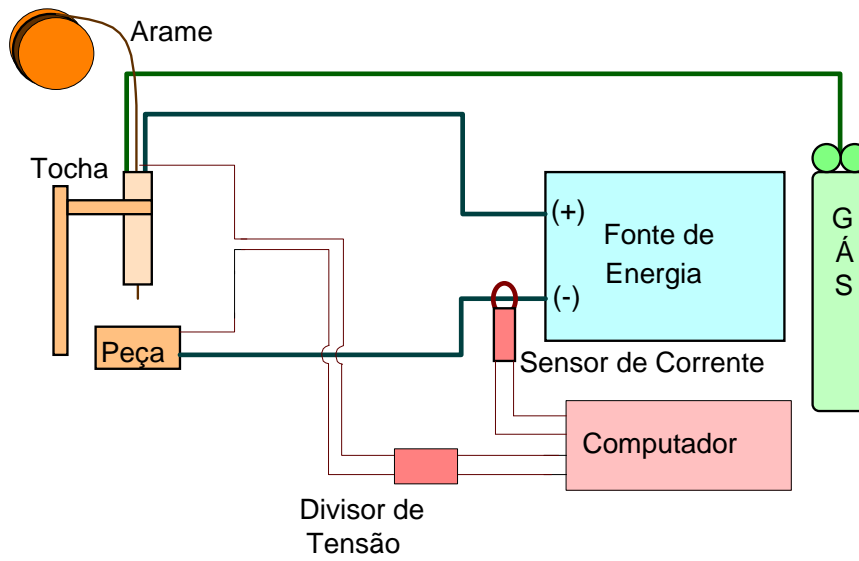


Figura 7 - Montagem utilizada

4. RESULTADOS:

Preencha a tabela abaixo:

Arame:		Bitola (mm):		Gás:			Vazão (L/min):	
Teste	DBCP (mm)	f (m/min)	v (cm/min)	I (A)	DP(I) (A)	U (V)	DP(U) (V)	Obs.

DBCP – Distância do bico à peça, f – velocidade de alimentação de arame, v – velocidade de soldagem
I e U – Corrente e tensão de soldagem, e DP – Desvio padrão

5. QUESTÕES:

1. Construir gráficos relacionando a variação dos parâmetros calculados com o auxílio do programa de análise de dados de soldagem com as condições de soldagem usadas nos testes. Para as condições de transferência por curto-circuito, estude a evolução do período médio de transferência (tempo entre o início de dois curtos) e da duração média dos curtos com a tensão de soldagem. Calcule a razão entre estes tempos (“Fator de Curto-circuito”) e estude a sua relação com a tensão média de soldagem. Discuta o significado deste último parâmetro. Relacione os coeficientes de variação (desvio padrão dividido pela média) da corrente e de tensão de soldagem com os diferentes modos de transferência
2. Ajuste, de forma esquemática, os dados experimentais ao mapa da figura 1.