

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 - Introdução

Neste capítulo será descrito a metodologia experimental para a realização do presente trabalho. Para a concretização dos objetivos, este trabalho foi basicamente dividido em três partes. Na primeira, foi realizado um planejamento fatorial fracionário para o estudo dos processos MAG e Eletrodo Tubular, de modo que se pudesse comparar esses processos quando operados nas mesmas condições. Na segunda parte, focada no processo com Eletrodo Tubular e baseada nos resultados anteriormente obtidos, novos testes exploratórios foram realizados com o intuito de melhor se adequar o processo e definir novos níveis para um novo planejamento fatorial. Assim, um planejamento fatorial completo foi idealizado para verificar a influência de alguns parâmetros sobre as características geométricas e produtivas do processo com eletrodo tubular. Finalmente, na terceira parte, algumas investigações das alterações metalográficas e de durezas provocadas pela utilização de diferentes condições de soldagens foram realizadas. A descrição dos métodos e materiais utilizados para a realização dos experimentos serão detalhadamente apresentados nos itens seguintes.

Para a concretização do trabalho, utilizou-se o laboratório de soldas (LSO) da UNIFEI, contando, ainda, com o apoio do laboratório de Metrologia Dimensional, de onde se utilizou o projetor de perfis e do laboratório de Metalografia, o qual possibilitou ensaios de dureza e análise de micrografias.

3.2 – Parte 1: Comparação entre os Processos MAG e Eletrodo Tubular

Nesta parte do trabalho, conforme já comentado, realizou-se testes com os processos MAG e Eletrodo Tubular, utilizando as mesmas condições para ambos, com a finalidade de compará-los. Para realizar os testes desta etapa, utilizou-se um trabalho, anteriormente realizado, sobre a análise da influência dos parâmetros de pulso sobre as características do processo MAG (Dantas, 2002), cujos testes já haviam sido realizados. Portanto, realizou-se apenas os experimentos referentes à análise do processo Eletrodo Tubular, utilizando as mesmas condições do trabalho realizado com o processo MAG.

Para a realização dos testes, utilizou-se o banco de ensaio apresentado na **Figura 3.1**, que é composto por uma fonte de soldagem Universal 300, operando na condição de imposição de corrente no modo pulsado, a qual possibilitou flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. O modo de operação da fonte com imposição de corrente permitiu a regulagem da velocidade de alimentação do arame durante a soldagem, sendo a tensão variável durante o processo.

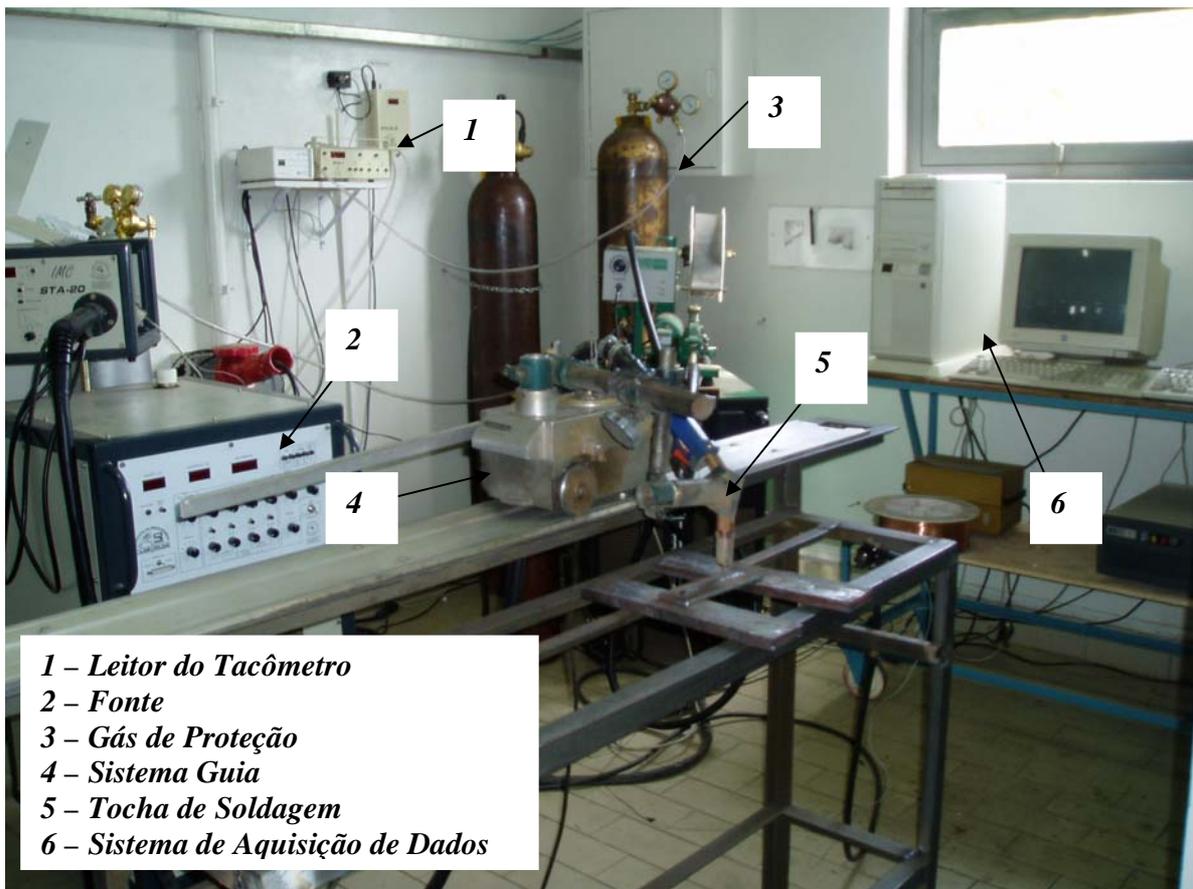


Figura 3.1 - Banco de ensaio.

Foi utilizado também um tacômetro associado ao sistema de alimentação do arame para se avaliar o comprimento de arame consumido em cada cordão e, desta forma, avaliar as perdas durante a execução dos cordões. Além disso, um sistema de medição de gás também foi acoplado ao banco, permitindo que a vazão do mesmo fosse determinada de modo flexível.

Ainda, o banco de ensaio contou com um sistema de aquisição de dados (Oscilos 4), que permitiu que os valores instantâneos de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame fossem aquisitados e processados.

Como ferramenta para idealização dos experimentos e posterior análises utilizou-se a técnica estatística do Projeto e Análise de Experimentos (DOE) e mais especificamente do Planejamento Fatorial Fracionário em Dois Níveis, onde cada fator assume um valor superior e um inferior. Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se 2^{n-1} experimentos, onde n é o número de fatores analisados. Para tanto utilizou-se o software estatístico MINITAB. Os valores assumidos para os níveis encontram-se na **Tabela 3.1**.

Os fatores analisados foram a corrente de pico (I_p), a corrente de base (I_b), o ciclo ativo (CA), que é determinado pela **Equação 1** e a velocidade de alimentação do arame (V_a). O tempo de pico (T_p) foi mantido constante em 4 ms e o tempo de base (T_b) oscilou entre os valores de 4 ms e 6 ms de acordo com o ciclo ativo (CA) pretendido.

$$CA = \frac{T_p}{(T_p + T_b)} \quad (3.1)$$

onde:

CA = ciclo ativo (%)

T_p = tempo de pico (ms)

T_b = tempo de base (ms)

Tabela 3.1 – Níveis superiores e inferiores dos parâmetros em estudo.

Fatores Analisados	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de pico, I_p	A	280	350
Corrente de base, I_b	A	70	100
Ciclo ativo, CA	%	40	50
Vel. de alim., V_a	m/min	5	6

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP descrita na **Tabela 3.2**, sendo os experimentos realizados com três replicagens. É importante mencionar aqui, que os testes realizados por Dantas (2002) referentes ao processo MAG, foram processados com duas replicagens. Entretanto, decidiu-se realizar três replicagens nos experimentos com Eletrodo Tubular objetivando minimizar a incerteza das medidas.

Tabela 3.2 – Planejamento experimental.

OP	Ip	Ib	CA	Va
-	(A)	(A)	(%)	(m/min)
1	280	70	40	5
2	350	70	40	6
3	280	100	40	6
4	350	100	40	5
5	280	70	50	6
6	350	70	50	5
7	280	100	50	5
8	350	100	50	6

As demais variáveis do processo foram mantidas constantes, sendo as soldagens realizadas com:

- Arame tubular: AWS E71T-1.
- Diâmetro do eletrodo: 1,2 mm.
- Tipo de gás: Argônio + 25% CO₂.
- Vazão de gás: 15 l/min.
- Velocidade de soldagem: 40 cm/min.
- Distância tocha-peça: 17,5 mm.
- Recuo do bico de contato: 5 mm

As soldas processadas com MAG foram feitas utilizando o Arame sólido ER 70S-6, cuja composição química encontra-se na **Tabela 3.3**.

Como material de base para este estudo, utilizou-se o aço ABNT 1045, cuja composição química é mostrada na **Tabela 3.3**, juntamente com as composições químicas dos arames utilizados neste trabalho. Vale ressaltar que este material foi escolhido com o intuito de permitir analisar também a influência metalúrgica dos parâmetros utilizados no trabalho sobre o material a ser soldado. Os corpos de prova foram preparados nas dimensões de 120x40x6 mm.

Tabela 3.3- Composição química (%) dos arames e do material base utilizados (Fonte ESAB (2004)).

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)	S (%)	Nb (%)
Material base	0,46	0,78	0,20	0,026	0,020	0,014	0,003
Arame tubular	0,05	1,40	0,50	-	-	-	-
Arame sólido	0,10	1,60	-	-	-	-	-

Com todas as condições definidas, testes de simples deposição e na posição plana, com a tocha posicionada perpendicularmente em relação ao metal de base foram realizados. Posteriormente, os corpos de prova foram seccionados, polidos e atacados quimicamente com nital 2%. A seguir, com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registrou-se as áreas de penetração (S_p) e de reforço (S_r), bem como a penetração do cordão (P), sua largura (b) e reforço (r), conforme esquema mostrado na **Figura 3.2**. Esses valores encontram-se na **Tabela 1, 2 e 3** do **Apêndice A**.

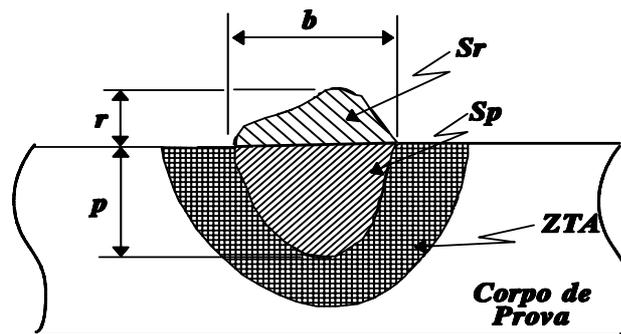


Figura 3.2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

As análises realizadas neste trabalho referem-se à geometria do cordão de solda e à produtividade do processo. As respostas referentes à geometria são:

- a penetração (P);
- o índice de convexidade (IC);
- a área total (S_T);
- a qualidade do cordão de solda (Qualidade) (que não foi analisada no estudo do processo

MAG, pois esta avaliação não foi feita por Dantas (2002));

As respostas referentes a produtividade são:

- a taxa de deposição (T_{xdep});
- o rendimento do processo ($Rend$).

Portanto, de posse dos resultados dos parâmetros acima descritos determinou-se o índice derivativo índice de convexidade (IC), dado em %, conforme a **Equação 3.2**:

$$IC = \frac{r}{b} * 100 \quad (3.2)$$

onde:

r = reforço do cordão de solda (mm).

b = largura do cordão de solda (mm).

Como orientação, procurou-se estabelecer padrões de qualidade aceitáveis, onde índices de convexidade próximos de 30% são considerados adequados (Silva et al, 2000). Um índice de convexidade superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração. Logo, considerou-se nesse trabalho, que índices de convexidade entre 20 % e 30 % são adequados.

Para a avaliação da taxa de deposição, determinou-se a massa do corpo de prova antes da soldagem e após a soldagem, eliminado qualquer traço de respingo e escória remanescente. Os valores dos dados coletados, antes e após, a soldagem estão mostrados na **Tabelas 4 e 5 do Apêndice A**. Desta forma, a taxa de deposição foi avaliada pela **Equação 3.3**:

$$Txdep = \frac{3,6 * (m_{cf} - m_{ci})}{t} \quad (3.3)$$

onde:

$Txdep$ = Taxa de deposição (kg/h);

m_{cf} = Massa final do corpo de prova (g);

m_{ci} = Massa inicial do corpo de prova (g);

t = Tempo de soldagem (s).

O rendimento do processo foi avaliado através da **Equação 3.4**:

$$Rend = \frac{4 * (m_{cf} - m_{ci})}{\pi * \varphi_{el}^2 * L_{el} * d} * 100 \quad (3.4)$$

onde:

$Rend$ = Rendimento (%);

m_{cf} = Massa final do corpo de prova (g);

m_{ci} = Massa inicial do corpo de prova (g);

d = Densidade volumétrica do arame (6,47g/cm³);

φ_{el} = Diâmetro do eletrodo (mm);

L_{el} = Comprimento do eletrodo (mm).

Vale ressaltar que a diferença entre a massa depositada e a massa consumida ($m_{cf}-m_{ci}$), no processo MAG, é decorrente da quantidade de respingos produzida para uma determinada combinação

de fatores, e para o processo Eletrodo Tubular decorre não somente da quantidade de respingos, mas também da escória produzida.

3.3 – Parte 2: Análise do Processo Eletrodo Tubular Pulsado

Nesta parte do trabalho, como já mencionado, foi definido um planejamento fatorial completo focado no estudo do processo Eletrodo Tubular. No entanto, primeiramente foram realizados testes exploratórios para definir os níveis utilizados no referido planejamento fatorial. É importante lembrar que todas as outras condições de soldagem não mencionadas aqui foram mantidas as mesmas da primeira parte, assim como a metodologia de preparação dos corpos de prova e execução das soldas.

Primeiramente, foram realizados testes preliminares com o objetivo de avaliar a influência da corrente média, da frequência e da velocidade de alimentação do arame sobre o processo Eletrodo Tubular. As condições utilizadas nesta parte foram derivadas da condição, chamada neste trabalho de “condição ótima”. Esta condição foi obtida na primeira parte do trabalho, conciliando todas as respostas analisadas na obtenção de uma condição que permitisse uma solda adequada. Também foram realizados testes derivados de sugestões da literatura (Nascimento, 2003).

Tabela 3.4 – Sequência de testes.

Testes	Ip (A)	Ib (A)	Tp ms	Tb ms	Va (m/min)
1	280	100	4	4	5
2	280	100	4	4	6
3	280	100	4	4	7
4	280	100	4	6	5
5	280	100	4	6	6
6	280	100	4	6	7
7	280	100	4	8	5
8	280	100	4	8	6
9	280	100	4	8	7
10	280	100	4	6	7
11	280	100	2	2	7
12	280	100	2	3	7
13	319	85	1,3	2	7,5
14	353	142	1	1,6	9,5

Portanto, conforme observado na **Tabela 3.4**, manteve-se, da condição ótima, nos primeiros doze testes, a corrente de pico (Ip) em 280 A, a corrente de base (Ib) em 100 A e variou-se o tempo de

pico (T_p) e o tempo de base (T_b) para produzir valores de corrente média e de frequência desejados. Nos dois últimos testes, valores diferentes de corrente de pico e de base também foram testados, de acordo com sugestões da literatura. A velocidade de alimentação do arame (V_a) também foi variada, procurando utilizar níveis superiores aos testados na primeira parte do trabalho, com o objetivo de obter maiores taxas de deposição. É importante mencionar aqui, que níveis de velocidade de alimentação do arame superiores a 7 m/min foram testados com as condições de pulso dos doze primeiros testes, mas não foi obtido sucesso. Os valores dos parâmetros variados e a seqüência de testes encontram-se na **Tabela 3.4**.

Após esses testes, o novo planejamento fatorial foi, finalmente, definido, como sendo um fatorial completo com dois níveis e duas replicagens. Os fatores estudados, bem como seus respectivos níveis encontram-se na **Tabela 3.5**. A **Tabela 3.6** apresenta a ordem padrão (OP) de testes definida para o referido planejamento fatorial.

Tabela 3.5 – Parâmetros e níveis do planejamento fatorial completo.

Parâmetro	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente Média, I_m	A	160	200
Frequência, F	Hz	150	200
Vel. de alim., V_a	m/min	6	8

Tabela 3.6 – Ordem padrão de testes para o planejamento fatorial completo.

OP	I_m	F	V_a
-	(A)	(Hz)	(m/min)
1	160	150	6
2	200	150	6
3	160	200	6
4	200	200	6
5	160	150	8
6	200	150	8
7	160	200	8
8	200	200	8

Os valores de área de reforço, de área de penetração, de penetração, de reforço, de largura e da qualidade visual do cordão medidos nos corpos de prova realizados nesta parte do trabalho encontram-se nas **Tabelas 5 e 7 do Apêndice A**. Os dados de massas do corpo de prova coletados antes e após os ensaios, de comprimento do arame utilizado na soldagem e de tempo de soldagem encontram-se nas **Tabelas 6 e 8 do Apêndice A**.

3.4 – Parte 3: Medidas de Dureza e Análise Metalográfica

Nesta parte do trabalho, foram realizadas medidas de dureza e análise da micrografia de corpos de prova produzidos com os processos Eletrodo Tubular e MAG.

Os corpos de prova analisados foram produzidos com os processo Eletrodo Tubular e MAG sob as condições dos testes 2 e 8 da **Tabela 3.4**, que são transcritas na **Tabela 3.7**. Esses testes foram escolhidos de modo que se permitisse comparar também os reflexos dos diferentes aportes térmicos.

Tabela 3.7 – Condições dos testes para a análise de dureza e das micrografias.

Teste	Tb	Im	Va	Energia
-	(ms)	(A)	(m/min)	(J/mm)
2	4	190	6	1195
8	8	160	6	704

Realizado os ensaios, os corpos de prova foram seccionados, polidos e atacados quimicamente com nital 2%. Posteriormente, os corpos de prova foram embutidos e levados à máquina de ensaio de microdureza, onde foram realizados vários ensaios de dureza Vickers com carga de 5 kg. As impressões de dureza foram feitas nas três regiões dos corpos de prova: cordão, zona termicamente afetada (ZTA) e metal base. Para finalizar, os corpos de prova foram levados ao microscópio óptico, onde várias fotografias das microestruturas, com diversos aumentos, foram realizadas para posterior análise.