

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA TAXA DE DEPOSIÇÃO E DA GEOMETRIA DE UMA JUNTA SOLDADA PELO
PROCESSO TIG PULSADO COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME

por

Augusto Zaffari Amoedo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2013.

ANÁLISE DA TAXA DE DEPOSIÇÃO E DA GEOMETRIA DE UMA JUNTA SOLDADA PELO
PROCESSO TIG PULSADO COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME

por

Augusto Zaffari Amoedo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a.Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto, Fabricação e Automação.**

Orientador: Prof. Ivan Guerra Machado

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Porto Alegre, 14, Novembro de 2013.

Dedico este trabalho aos meus pais, Rubens Amoedo e Denise Zaffari Amoedo, ao meu irmão Gabriel Zaffari Amoedo, e a minha namorada Laureane Testa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Ivan Guerra Machado, pela dedicação empregada em todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos meus pais, Rubens Amoedo e Denise Zaffari Amoedo, pelo total esforço, dedicação e apoio na realização dessa conquista.

À minha namorada, Laureane Testa, que sempre me apoiou e me incentivou nessa caminhada, sendo sempre muito especial.

A toda equipe do LS&TC, que sempre esteve disposta a me auxiliar no decorrer da realização deste trabalho.

Aos meus amigos, pois certamente ajudaram a tornar esse sonho possível. Dias e noites de estudo, que com certeza valeram a pena.

AMOEDO, Z. A. **Análise da Taxa de Deposição e da Geometria de uma Junta Soldada pelo Processo TIG Pulsado com Alimentação Automática de Arame.** 2013. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

O processo de soldagem TIG é sinônimo de qualidade em juntas soldadas, apresentando entre outras vantagens, baixo hidrogênio no metal de solda e estanqueidade da junta, porém apresenta baixa produtividade, causada principalmente pela baixa taxa de deposição. Baseado nisso, e utilizando corrente contínua pulsada, este trabalho tem como objetivo estudar uma variante do processo, onde a alimentação do arame se dá de forma automática. O trabalho foi dividido em duas etapas, na primeira foi realizada a execução de seis juntas de canto soldadas na posição plana, variando-se três ângulos para a alimentação do arame (Y) e duas distâncias horizontais do centro do eletrodo até a chegada do arame na poça de fusão (X). Na segunda etapa foram soldadas duas chapas com simples deposição utilizando arame frio e quente e mantendo-se os parâmetros de soldagem, visando avaliar as máximas taxas de deposição para cada variante, sem se preocupar com a qualidade do cordão. Para a primeira etapa a configuração que se mostrou mais adequada de acordo com a geometria do cordão, foi com $X=5,5$ mm e $Y=30^\circ$. Na segunda parte, utilizando a mesma configuração geométrica para o conjunto alimentador ($X=5,5$ mm e $Y=30^\circ$), a máxima taxa de deposição para arame frio foi de 3,5 kg/h e para arame quente foi de 4,1 kg/h. As chapas utilizadas foram de aço SAE 1020 com 4,76mm de espessura, e o consumível foi o AWS ER 70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.

PALAVRAS-CHAVE:TIG, taxa de deposição, geometria do cordão.

AMOEDO, Z. A. **Analysis of Deposition Rate and Geometry of a Joint Welded by Pulsed TIG Process with Automatic Wire Feeding.** 2013. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

The TIG welding process is synonym of quality in welded joints, presenting advantages such as low hydrogen in the weld metal and joint tightness, however it presents low productivity, mainly due to low deposition rate. Based on this and using pulsed direct current, this work aims the study of a variant of the process, in which the wire feeding will be automatic. The study was divided in two steps, the first performed a flat welding of six corner fillet joints, varying three wire feeding angles (Y) and two horizontal distances from the centre of the electrode to the weld pool (X). In the second step were welded two plates with simple deposition using cold and hot wire and maintaining the welding parameters in order to analyse the maximum deposition rate for each variant disregarding the quality of the welding bead. For the first the step, the configuration that proved to be the most appropriate, taking into account the same bead geometry, was at $X=5,5$ mm and $Y=30^\circ$. In the second step, using the same geometric configuration for the feeding assembly ($X=5,5$ mm e $Y=30^\circ$), the maximum deposition rate for the cold wire was 3,5 kg/h and for the hot wire was 4,1 kg/h. SAE 1020 steel plates with 4,76 mm in thickness and the consumable was a AWS ER 70S-6 with 0,8 mm in thickness.

KEYWORDS: TIG, deposition rate, bead geometry.

LISTA DE SÍMBOLOS

AWS	American Welding Society
CA	Corrente Alternada
CCEN	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CCEP	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
D	Diluição [%]
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
I_p	Corrente de pico [A]
I_b	Corrente de base [A]
L	Largura do cordão de solda [mm]
LS&TC	Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas
L_s	Comprimento do cordão de solda [mm]
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MB	Metal base
MBF	Metal base fundido
Mmsd	Massa de metal de solda depositado [g]
MS	Metal de solda
p	Penetração do cordão de solda [mm]
R	Área de reforço [mm ²]
S	Perna do cordão de solda [mm]
s	Tamanho do cordão de solda [mm]
SAE	Society of Automotive Engineers
Tdep	Taxa de deposição [kg/h]
TIG	Tungsten Inert Gas
t	Garganta do cordão de solda [mm]
t_p	Tempo de pico [ms]
t_b	Tempo de base [ms]
V_s	Velocidade de soldagem [mm/s]
V_a	Velocidade de alimentação do arame [m/min]
X	Distância horizontal do eletrodo até o arame, na poça de fusão [mm]
Y	Ângulo de inclinação da alimentação do arame [graus]

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
3.1. Processo de soldagem TIG	1
3.2. Parâmetros de soldagem para TIG pulsado com corrente contínua	2
3.2.1. Corrente de pico e de base.....	2
3.2.2. Frequência de soldagem	2
3.2.3. Velocidade de soldagem.....	2
3.2.4. Alimentação de arame frio	3
3.2.5. Alimentação de arame quente	3
3.2.6. Vazão do gás de proteção	3
3.3. Taxa de deposição	3
3.4. Geometria do cordão de solda.....	4
4. METODOLOGIA	5
4.1. Materiais e métodos para soldagem	5
4.2. Materiais e métodos para avaliação da taxa de deposição	7
4.3. Materiais e métodos para avaliação da geometria dos cordões.....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	8
5.1. Etapa A.....	8
5.1.1 Taxa de deposição	8
5.1.2 Geometria dos cordões.....	9
5.1.3 Parâmetros sistema de aquisição	11
5.2. Etapa B.....	12
5.2.1. Taxa de deposição	12
5.2.2. Geometria dos cordões.....	13
5.2.3: Parâmetros sistema de aquisição	14
6. CONCLUSÕES	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15

FIGURAS

Figura 3.1: Gráfico corrente x tempo [IMC Soldagem, 2011].

Figura 3.2: Taxa de deposição x potência do arco [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

Figura 3.3: Principais características geométricas de uma junta de canto.

Figura 4.1: Dispositivo de soldagem para a etapa A.

Figura 4.2: Desenho esquemático da tocha na etapa A.

Figura 4.3: Desenho esquemático da tocha na etapa B.

Figura 5.1: Taxa de deposição x potência do arco [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

Figura 5.2: Etapa A – Comparação dos cordões com maiores valores de diluição.

Figura 5.3: Taxa de deposição x potência do arco [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

TABELAS

Tabela 4.1: Composição química do arame [GERDAU, 2013].

Tabela 4.2: Composição química do metal base.

Tabela 4.3: Etapa A – Avaliação da geometria dos cordões de solda.

Tabela 4.4: Etapa B – Taxa de deposição para arame frio e quente.

Tabela 5.1: Taxa de deposição das juntas da etapa A.

Tabela 5.2: Fotografias e macrografias das juntas soldadas na etapa A.

Tabela 5.3: Principais características geométricas das juntas da etapa A.

Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem obtidos com o sistema de aquisição na etapa A.

Tabela 5.5: Taxa de deposição para etapa B.

Tabela 5.6: Fotografias e macrografias dos cordões soldados na etapa B.

Tabela 5.7: Parâmetros de soldagem obtidos com o sistema de aquisição na etapa B.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem TIG manual sempre se destacou por apresentar elevada qualidade nas juntas soldadas, tais como estanqueidade e baixo hidrogênio, porém ainda encontra algumas barreiras para sua aplicação no meio industrial, devido principalmente a sua baixa produtividade, que está relacionada com a relativa baixa taxa de deposição do processo, além de dificuldades na alimentação do arame.

Pensando nisso, e visando melhorar a produtividade do processo, será utilizada uma variante onde a alimentação do arame se dá de forma automática. Segundo [RICHARDSON, 1995], essa variante possibilita por si só ganhos de qualidade e produtividade, pois já que o arame é alimentado automaticamente, o soldador poderá concentrar sua atenção na junta soldada e no comprimento do arco por exemplo.

Para a automatização da alimentação do arame é de fundamental importância que se estude alguns parâmetros que apresentam significativa influência na geometria do cordão de solda, tais como ângulo de alimentação do arame e a distância horizontal da chegada do arame até o centro do eletrodo. Com os resultados encontrados será realizada uma análise da influência de cada um na geometria do cordão de solda. Além disso, será utilizada corrente contínua pulsada, visando um menor aporte de calor e melhor controle sobre a poça de fusão.

Após a obtenção destes resultados, será escolhida uma combinação geométrica para a alimentação do arame, com a qual serão utilizados arames frio e quente, visando obter a máxima taxa de deposição para cada um, sem se preocupar com a qualidade do cordão de solda. Nos dois experimentos serão utilizadas chapas de aço SAE 1020 com 4,76 mm de espessura.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de estudar o processo de soldagem TIG pulsado com alimentação automática de arame, buscando obter altas taxas de deposição e conseqüentemente uma maior produtividade para o processo, que é conhecido historicamente pela baixa produtividade e boa qualidade das juntas soldadas. Com isso em vista, na primeira parte do trabalho serão variados parâmetros geométricos na alimentação do arame, visando obter a combinação que resulte na melhor geometria do cordão de solda em juntas de canto, soldadas na posição plana. Na segunda etapa serão utilizados tanto arame quente quanto arame frio, com foco na máxima taxa de deposição possível para cada variante do processo, soldando na posição plana com simples deposição sobre as chapas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Processo de soldagem TIG

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), é um processo de soldagem por fusão, utilizando um arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo não consumível de tungstênio. Seu modo de operação é normalmente manual, mas pode ser também automático e semiautomático, utilizando ou não metal de adição. Seu grande desenvolvimento se deu em torno de 1940, em plena 2ª Guerra Mundial, para realizar a soldagem de alumínio, magnésio, e suas ligas, materiais de amplo emprego na aeronáutica. É geralmente utilizado para peças de pequena espessura, ou para realizar o passe de raiz em tubulações e equipamentos que requerem alta qualidade [MACHADO, 1996; BRACARENSE, 2000].

As fontes utilizadas são do tipo “corrente constante” ou “tombante”, tendo em vista que este processo é, na maioria das vezes, empregado de forma manual, e é impossível o soldador manter o mesmo comprimento de arco durante a soldagem. Logo, com essa curva

característica, mesmo ocorrendo variação nesse comprimento, a corrente sofre pequenas alterações [TEIXEIRA, 2011].

A polaridade da corrente tem grande influência tanto na penetração quanto na distribuição de calor eletrodo-peça. Esta pode ser CCEN – corrente contínua eletrodo negativo, CCEP – corrente contínua eletrodo positivo e CA – corrente alternada. Na primeira o calor gerado se distribui com 30 % no eletrodo e 70 % na peça, o que reflete em uma maior penetração. Na segunda o calor gerado se distribui ao contrário, com 30 % na peça e 70 % no eletrodo, acarretando em uma menor penetração. Finalmente a terceira age de forma intermediária, ou seja, 50 % do calor gerado vai para a peça, e 50 % para o eletrodo [KOU, 2002].

3.2. Parâmetros de soldagem para TIG pulsado com corrente contínua

O TIG pulsado é uma das variantes do processo de soldagem TIG, que possibilita a variação da corrente, com diferentes frequências, em níveis de pico e de base, proporcionando diversas vantagens, e melhorando significativamente a qualidade do cordão de solda.

As principais vantagens decorrentes desses diferentes níveis de corrente são a combinação de boa penetração com baixa distorção e aporte de calor, além de um melhor controle sobre a poça de fusão, possibilitando a execução de soldas em chapas de pequena espessura e de materiais dissimilares [AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

3.2.1. Corrente de pico e de base

A corrente de pico é a responsável pela formação da poça de fusão, e está diretamente relacionada com a penetração do metal de solda [BRACARENSE, 2000; CUNHAL, 2013]. Por estar diretamente relacionada com a penetração, normalmente é fixada por restrições prévias.

Visto que a corrente de pico se responsabiliza pela penetração e pelo controle da poça de fusão, a corrente de base é necessária para a manutenção da estabilidade da poça de fusão [CUNHAL, 2013].

3.2.2. Frequência de soldagem

A frequência de soldagem é definida como o inverso do período de um pulso, que consiste na soma do tempo de pico e tempo de base, que são os tempos em que cada uma das correntes, de pico ou de base, permanece ativa. A fig. 3.1 mostra o gráfico da corrente no tempo.

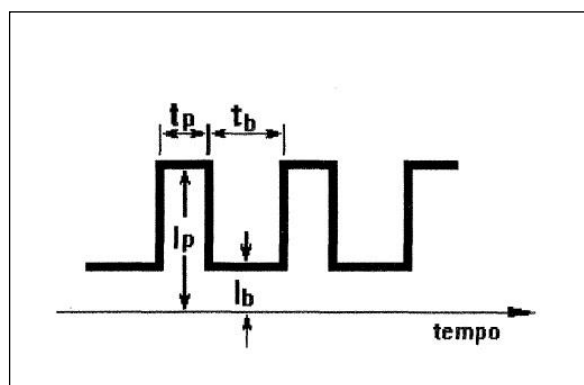


Figura 3.1: Gráfico corrente x tempo [IMC Soldagem, 2011].

3.2.3. Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem tem relação tanto com a largura quanto com a penetração do cordão de solda, tendo influências mais visíveis no primeiro. Por estar ligada diretamente com o

custo da soldagem, normalmente é um dos fatores previamente definidos, sendo que as outras variáveis são ajustadas para manter a estabilidade do arco [AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

Além disso, é um fator que deve ser levado em conta na variação da frequência dos pulsos, pois para uma alta pulsação e baixa velocidade, os pontos de solda passam a se sobrepor e elevar significativamente a energia na junta, sendo que o oposto, causa falta de continuidade do cordão [CUNHAL, 2013].

3.2.4. Alimentação de arame frio

O arame bobinado é alimentado automaticamente por um tracionador. O nome “arame frio” é dado porque este é alimentado à temperatura ambiente [DELGADO, 2000]. Em casos específicos, também é possível diferenciar a velocidade de alimentação na base ou no pulso.

3.2.5. Alimentação de arame quente

Este processo pode reunir as mesmas características do arame frio, porém apresenta a peculiaridade de provocar um pré-aquecimento no arame antes do mesmo entrar em contato com o arco elétrico, com o objetivo de aumentar a taxa de fusão do arame, e consequentemente aumentar a taxa de deposição [DELGADO, 2000].

O arame é aquecido por efeito Joule, com a utilização de uma fonte de potência operando com corrente alternada. A corrente alternada é usada para evitar deflexão no arco [AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

3.2.6. Vazão do gás de proteção

A proteção gasosa ocorre através de um fluxo de gás inerte do bocal para a peça, e tem a finalidade de impedir a oxidação do eletrodo e proteger a poça de fusão. Além disso, durante a operação o eletrodo deve-se manter na cor prateada, caso contrário a proteção não está sendo efetiva [MACHADO, 1996; TEIXEIRA, 2011]. O mais comum na grande parte das aplicações é se utilizar Argônio como gás de proteção, porém Hélio pode ser indicado em situações específicas e que necessitem maior penetração.

A vazão do gás deve ser determinada levando-se em conta o movimento do ar, diâmetro do bocal e tamanho da poça de fusão, lembrando que é necessária uma vazão mínima para manter uma corrente firme de proteção, e uma vazão excessiva causa turbulência, que pode ocasionar em uma contaminação pela atmosfera [AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

3.3. Taxa de deposição

Segundo [MACHADO, 1996], a taxa de deposição é dada pela quantidade de metal de solda depositada em um período de tempo, para uma dada corrente e com fator de operação 100%.

O processo TIG sempre foi conhecido pela sua baixa taxa de deposição quando comparado a outros processos de soldagem, como o MIG/MAG, por exemplo. No entanto, esta taxa pode ser aumentada sensivelmente com a utilização de arame quente, onde o arame é aquecido por uma fonte de potência em CA [MACHADO, 1996]. Nessa variante uma parcela da energia que antes era necessária para aquecer o arame, deixa de ser, fazendo com que a taxa de deposição aumente bastante. Além disso, como mostrado na fig. 3.2 pode-se aumentá-la ainda mais com oscilação no arame.

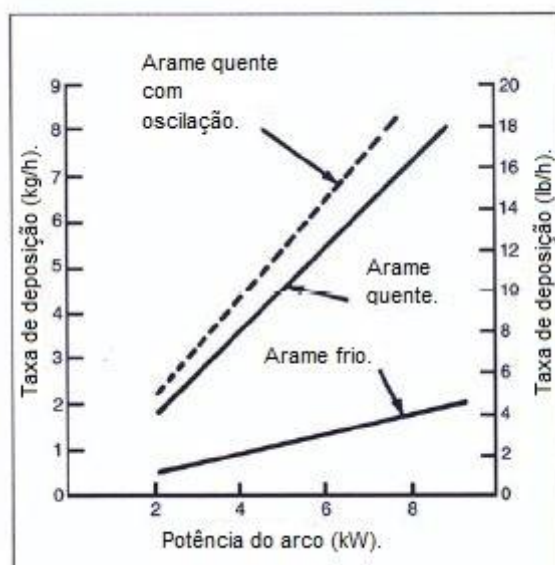


Figura 3.2: Taxa de deposição x potência do arco [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

3.4. Geometria do cordão de solda

Na figura 3.3 apresenta-se uma representação esquemática de uma junta de canto, soldada na posição plana, e suas principais características. A garganta “ t ” é mais usualmente definida como a menor distância entre a raiz da junta e a face da solda (hipotenusa do maior triângulo retângulo isósceles que pode ser inscrito na seção transversal do cordão de solda). A penetração “ p ” é definida pela maior distância (perpendicular a face do cordão) que ultrapassa a raiz da junta. O tamanho “ s ” é o cateto deste triângulo, a perna “ S ” é dada pelo metal de solda que funde a lateral da junta, e o reforço é determinado pela área hachurada. [MACHADO, 1996].

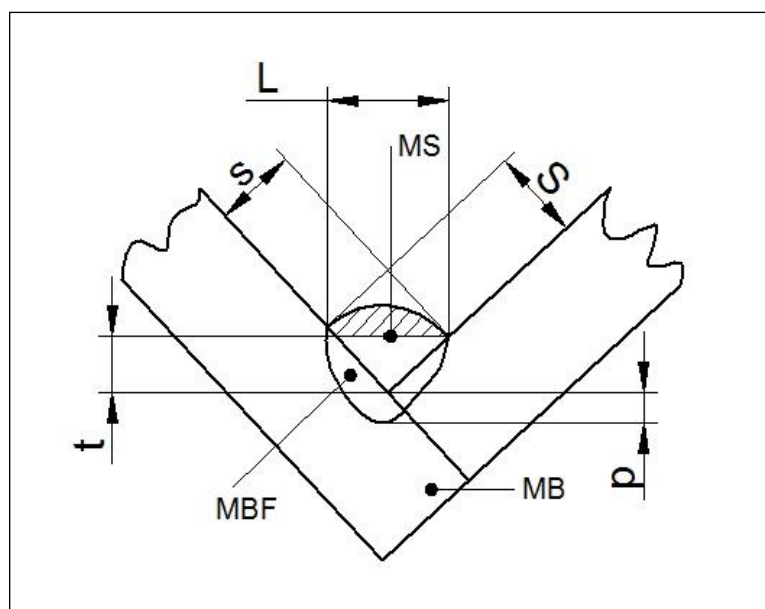


Figura 3.3: Principais características geométricas de uma junta de canto.

A diluição “ D ” é dada pela equação 3.1 [MACHADO, 1996], e é definida pela razão entre a área do metal base fundido (MBF) e toda a área do cordão ($MS + MBF$), conforme figura 3.3.

$$D = \frac{MBF}{MS + MBF} * 100 \quad (3.1)$$

4. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, além da metodologia aplicada na soldagem e na avaliação dos resultados obtidos. O desenvolvimento se deu no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC), localizado no Campus do Vale, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.1. Materiais e métodos para soldagem

Todos os experimentos foram realizados utilizando um sistema de soldagem desenvolvido pela IMC Soldagem em parceria com a SPS-Sistemas e Processos de Soldagem. Este sistema consiste em uma fonte DIGIPlus A7 450 com um processador ARM 7 de 32 bits, uma unidade para refrigeração da tocha UPR 7500 e um cabeçote alimentador de arame STA 20-2, todos da IMC. É composto também por um sistema de movimentação automática com 4 graus de liberdade Tartilope V4 da SPS. A fonte foi ajustada para o processo TIG pulsado, utilizando CCEN.

O consumível utilizado foi um AWS ER 70S-6 com 0,8 mm de diâmetro e composição conforme tabela 4.1, e o gás de proteção utilizado foi Argônio puro, com grau 4,8 e pureza mínima 99,998%, com vazão de 13 l/min. O eletrodo foi EWTh-2 (cabeça vermelha) com 3,2 mm de diâmetro e composto por no mínimo 97,3 % de Tungstênio e 1,7 a 2,2 % de Tório, além disso foi afiado com um ângulo de ponta de 45°, e em todas os experimentos a distância da ponta do eletrodo ficou 3,5 mm para fora do bocal.

Tabela 4.1: Composição química do arame [GERDAU, 2013].

Classe	Tipo	Elementos	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
AWS A 5.18	ER 70S-6	% Mín	0,06	0,8	1,4	-	-	-	-	-	-	-
		% Máx	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5	0,15	0,15	0,15	0,03

Os corpos de prova utilizados foram chapas de aço SAE 1020, de dimensões 150 mm x 60 mm e espessura de 4,76 mm, com composição química conforme tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição química do metal base.

Elementos	C	Mn	P	S
% Mín	0,18	0,3	-	-
% Máx	0,23	0,6	0,04	0,05

Os experimentos foram divididos em duas etapas. Na primeira delas, chamada de etapa A, foi realizada a soldagem de seis juntas, mantendo-se a taxa de deposição, e todos os outros parâmetros constantes e variando-se três ângulos Y e duas distâncias X, com o objetivo de avaliar a influência desses dois parâmetros na geometria dos cordões de solda. As amostras dessa etapa são seguidas pela letra A, e os parâmetros são mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Etapa A – Avaliação da geometria dos cordões de solda.

Parâmetros									
Cordão	I _p (A)	t _p (ms)	I _b (A)	t _b (ms)	Frequência (Hz)	V _s (mm/s):	V _a (m/min)	Y (°)	X (mm)
1A	300	3	20	1	250	3	4,5	40	5,5
2A	300	3	20	1	250	3	4,5	40	3,5
3A	300	3	20	1	250	3	4,5	30	5,5
4A	300	3	20	1	250	3	4,5	30	3,5
5A	300	3	20	1	250	3	4,5	20	5,5
6A	300	3	20	1	250	3	4,5	20	3,5

Para a realização dessa etapa o dispositivo usado para a fixação das chapas, mostrado na figura 4.1, foi construído de modo que estas ficassem fixas e com um ângulo de 90° entre elas, além de facilitar o posicionamento e nivelamento das mesmas, já que para o processo utilizado qualquer variação na distância eletrodo-peça tem influência significativa sobre os cordões de solda.

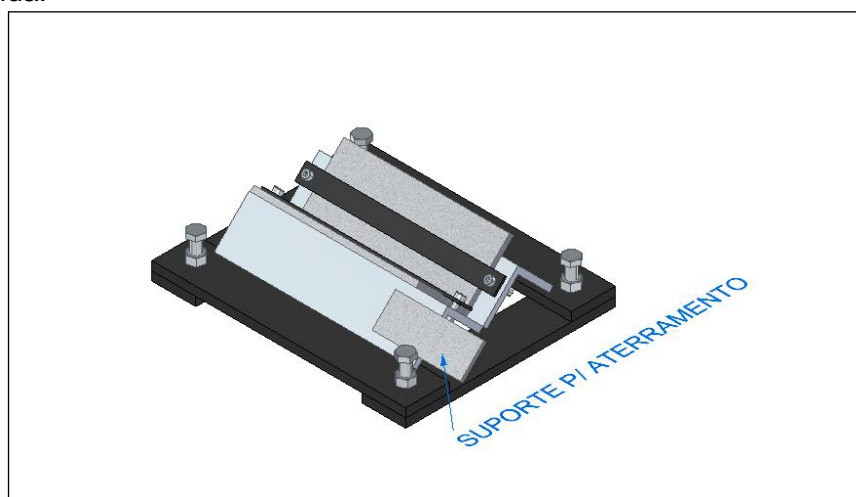


Figura 4.1: Dispositivo de soldagem para etapa A.

A alimentação do arame (por trás da poça de fusão), e o sentido de soldagem são mostrados na figura 4.2. A distância da ponta do eletrodo até a raiz da junta foi mantida sempre de 3,2 mm.

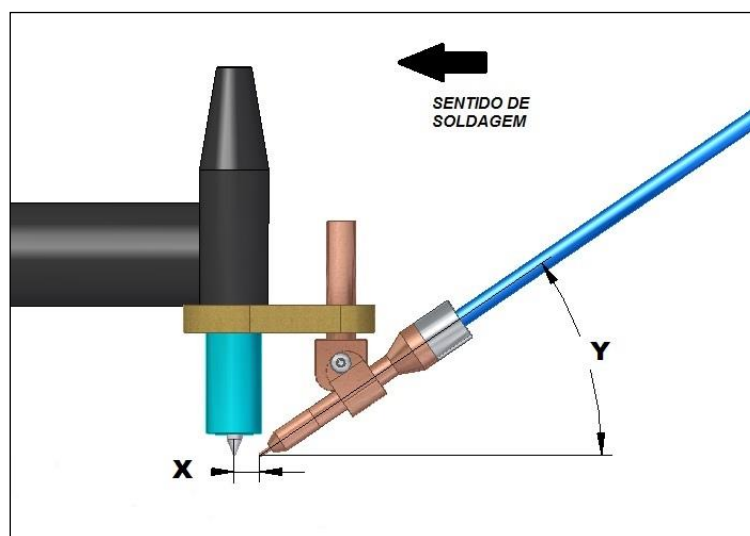


Figura 4.2: Desenho esquemático da tocha na etapa A.

Na segunda etapa dos experimentos, etapa B, realizou-se dois cordões de solda com simples deposição, soldados na posição plana, utilizando-se arame frio e arame quente, com o objetivo de avaliar a máxima taxa de deposição para cada variante do processo. Os parâmetros utilizados são mostrados na tabela 4.4. Para o pré-aquecimento do arame utilizou-se uma fonte de potência operando com corrente alternada (60 A).

Tabela 4.4: Etapa B – Taxa de deposição para arame frio e quente.

Parâmetros									
Nº Cordão	I p (A)	tp (ms)	I b (A)	tb (ms)	Frequência (Hz)	Vs (mm/s)	Va (m/min)	Y (°)	X (mm)
1B - AF	300	3	20	0,2	312,5	3	17,0	30	5,5
2B - AQ	300	3	20	0,2	312,5	3	19,5	30	5,5

Na etapa B, as chapas foram ponteadas sobre uma base para que ficassem fixas no decorrer da soldagem. A alimentação do arame também se deu por trás da poça de fusão, como mostrado na figura 4.2, e a distância da ponta do eletrodo até a chapa ficou em 7,0 mm.

A figura 4.3 mostra um desenho esquemático da tocha de soldagem com o dispositivo utilizado para o aquecimento do arame.

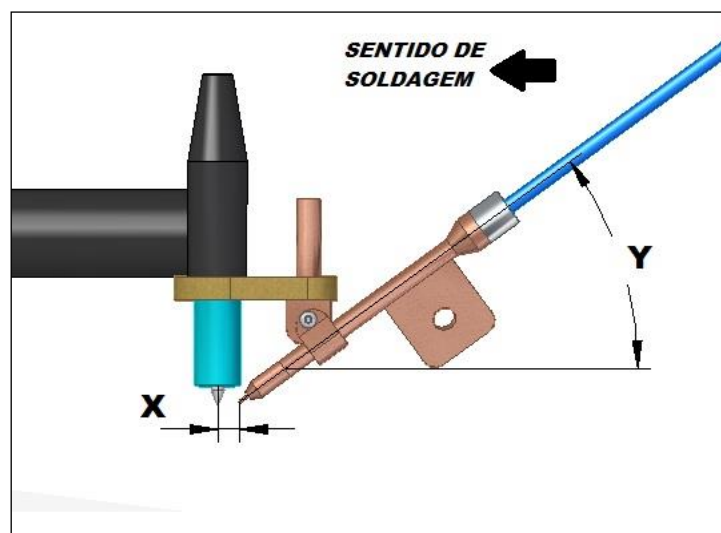


Figura 4.3: Desenho esquemático da tocha na etapa B.

Como o arame quente foi aquecido por efeito Joule, o dispositivo mostrado na figura 4.3 foi utilizado para ligar um dos cabos do circuito. O outro cabo foi fixado na mesa, formando um circuito fechado.

4.2. Materiais e métodos para avaliação da taxa de deposição

Para a avaliação da taxa de deposição foi utilizada uma balança de precisão da marca Marte com resolução de 0,1g. Todas as chapas foram pesadas antes e depois da soldagem, obtendo assim a massa de metal de solda depositado (M_{msd}). Além disso, foi medido o comprimento das juntas (L_s) em mm, e a velocidade de soldagem (V_s) em mm/s, e com a equação 4.1 [MACHADO, 1996], foi calculada a taxa de deposição (T_{dep}) em kg/h.

$$T_{dep} = 3,6 * \frac{V_s}{L_s} * M_{msd} \quad (4.1)$$

De acordo com a equação 4.1 a taxa de deposição é a massa de metal de solda depositado num certo intervalo de tempo, que é obtido através da velocidade de soldagem e do comprimento do cordão de solda, parâmetros que podem ser facilmente medidos.

4.3. Materiais e métodos para avaliação da geometria dos cordões

Para a avaliação da geometria dos cordões da Etapa A, cortou-se cada junta em três posições diferentes, início, meio e fim, que foram designadas por I, M e F, respectivamente. Em cada posição as seções foram lixadas até a granulometria 400, e atacadas com Nital10%.

Após a realização das macrografias mediu-se a garganta (t), o tamanho (s), as pernas (S1 e S2) onde S1 é a perna da chapa inferior e S2 da superior, o tamanho (s), a diluição (D), a área de reforço e a largura (L) da seção transversal da solda com o auxílio do Image J (software para análise e processamento de imagens).

4.4. Materiais e métodos para aquisição de dados

Os experimentos foram monitorados com a utilização de um sistema de aquisição de dados portátil SAP 4.0 fabricado pela IMC Soldagem. Tal sistema possui sensores para fazer a leitura instantânea dos sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão de gás.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Etapa A

Esta etapa tem como objetivo avaliar a influência dos parâmetros “X” e “Y” na geometria dos cordões de solda e no aspecto visual dos mesmos. Além disso, a taxa de deposição, embora constante, também foi medida.

5.1.1 Taxa de deposição

A tabela 5.1 mostra a taxa de deposição das juntas da etapa A, que foram obtidas com a utilização da equação 4.1.

Tabela 5.1: Taxa de deposição das juntas da etapa A.

Taxa de deposição						
Cordão	Vs (mm/s)	Ls (mm)	Mantes (g)	Mdepois (g)	Mmsd (g)	Tdep (kg/h)
1A	3	149	670,4	684,1	13,7	1,0
2A	3	150	672,5	686,3	13,8	1,0
3A	3	151	669,2	683,1	13,9	1,0
4A	3	150	674,2	687,8	13,6	1,0
5A	3	152	668,4	681,8	13,4	1,0
6A	3	150	677,5	691,7	14,2	1,0

De acordo com a tabela 5.1 a taxa de deposição permaneceu constante, pois alguns dos parâmetros que influenciam nessa taxa, tais como velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem, foram mantidos constantes. Além disso, relacionando os valores obtidos de taxa de deposição e potência do arco com o gráfico da figura 5.1 [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004] para arame frio, pode-se perceber que os dados estão coerentes com a literatura.

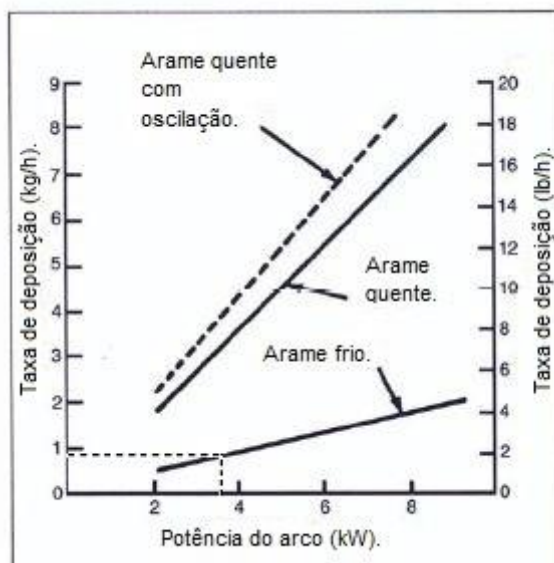


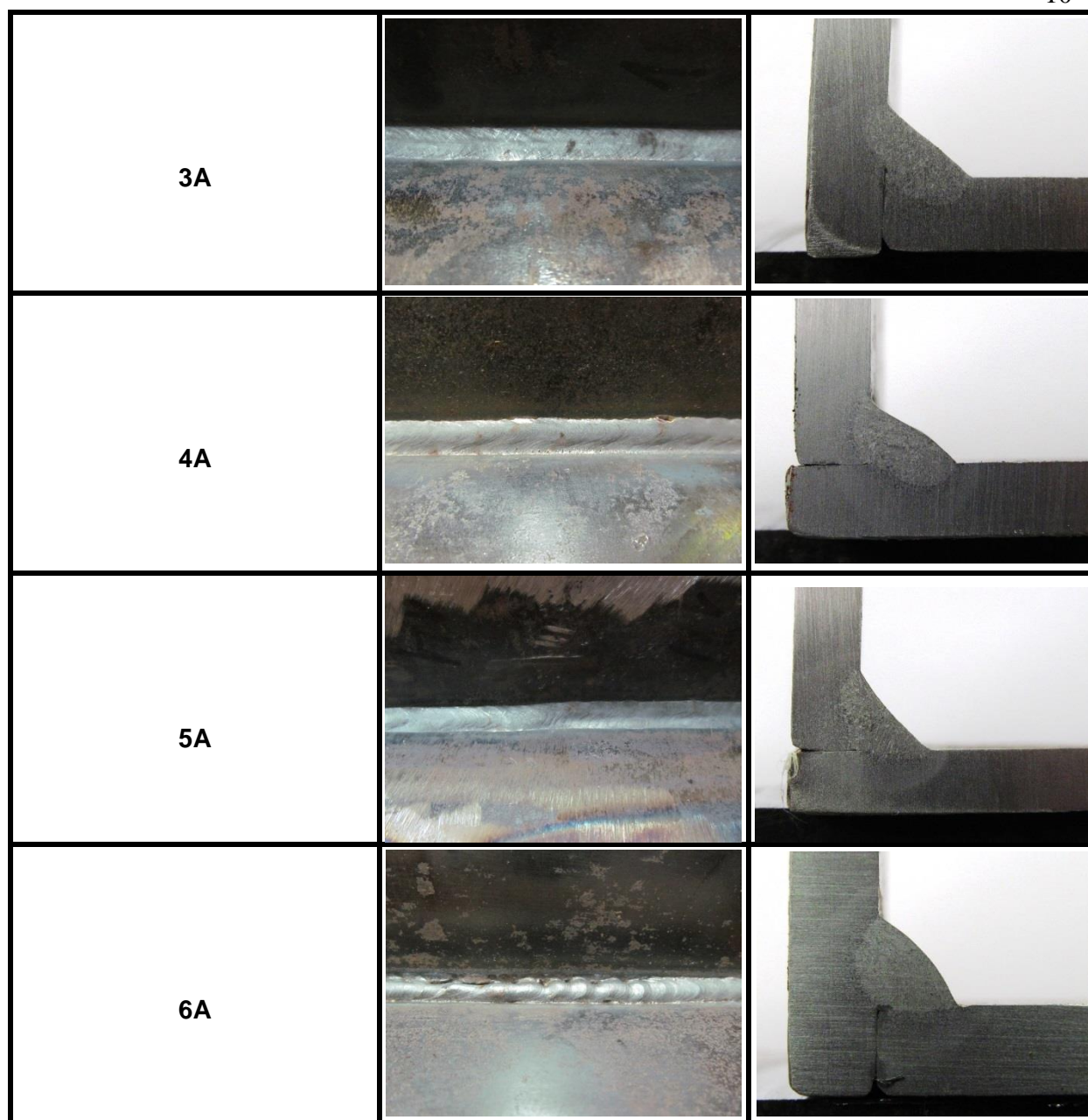
Figura 5.1: Taxa de deposição x potência do arco [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

5.1.2 Geometria dos cordões

Na tabela 5.2 são apresentadas as fotografias (aspecto visual) e macrografias das amostras da etapa A. As macrografias correspondem à seção "M" da junta.

Tabela 5.2: Fotografias e macrografias das juntas soldadas na etapa A.

Amostras	Fotografias	Macrografias
1A		
2A		



Realizando a análise das fotografias da etapa A, pode-se observar que todos os cordões apresentaram uma geometria aceitável, com exceção do 6A, que apresentou certa heterogeneidade. Esse fato pode ser explicado pela proximidade do arame com o eletrodo, fazendo com que no decorrer da soldagem o arame se depositasse sobre o eletrodo, alterando a ponta do mesmo e ocasionando instabilidade no arco elétrico.

Ainda com relação às fotografias, o cordão 5A apresenta um pequeno desalinhamento, que pode ter sido ocasionado por um mau posicionamento do conjunto chapas/dispositivo.

Com a análise das macrografias observa-se que todos os cordões tiveram falta de penetração na raiz, fato que prejudica as características mecânicas das juntas, principalmente se forem submetidas a esforços cíclicos, tendo em vista que a raiz da junta comporta-se como um concentrador de tensões.

Na tabela 5.3 são mostradas as características geométricas das juntas na etapa A, as quais podem ser relacionadas com os parâmetros de soldagem mostrados na tabela 4.3, e os parâmetros medidos mostrados na tabela 5.4.

Tabela 5.3: Principais características geométricas das juntas da etapa A.

Cordões	Tamanho (s) - mm	Garganta (t) - mm	Perna (S1) - mm	Perna (S2) - mm	Largura (L) - mm	MBF - mm ²	MBF + MS - mm ²	R - mm ²	Diluição (%)
1A	4,19	3,01	4,42	4,82	6,43	11,68	23,45	2,59	49,81
2A	3,70	2,70	3,80	4,83	6,15	7,36	19,24	3,92	38,25
3A	4,40	3,11	4,63	5,47	7,12	12,27	23,18	1,64	52,93
4A	3,81	2,74	5,15	4,20	6,63	12,64	23,25	3,37	54,37
5A	4,32	3,06	5,20	5,47	7,56	8,99	19,46	1,79	46,20
6A	3,90	2,76	4,06	4,19	5,81	3,24	15,21	5,00	21,30

Analisando a tabela 5.3 percebe-se que os cordões 1,3 e 5A (com $X=5,5\text{mm}$) apresentaram maiores gargantas, tamanhos e larguras do que seus correspondentes 2,4 e 6A (com $X=3,5\text{mm}$), e consequentemente menores reforços.

Fixando-se agora o ângulo de inclinação do arame $Y=30^\circ$, que permitiu maior diluição do metal de solda, e fazendo a figura 5.1, para os dois valores de X , observa-se com relativa facilidade a influência deste parâmetro.

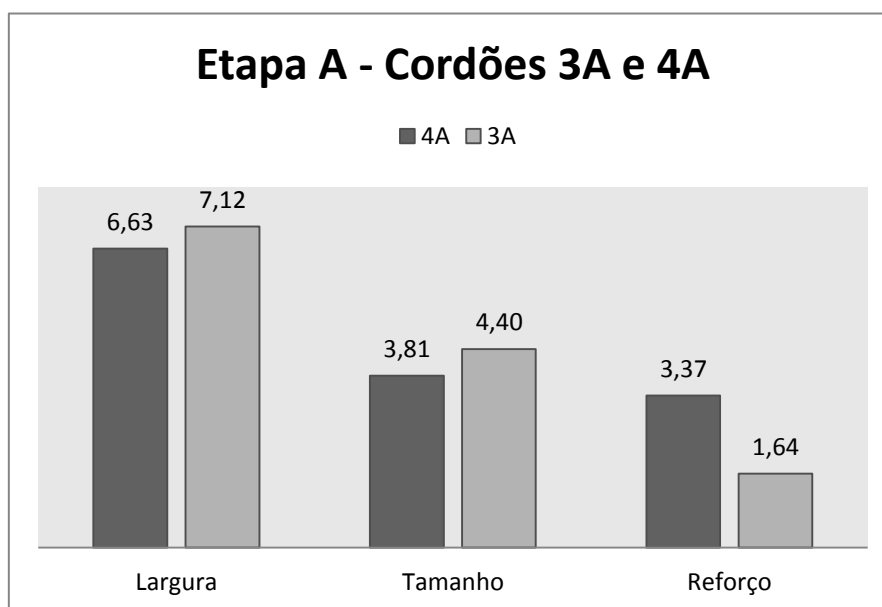


Figura 5.2: Etapa A – Comparação dos cordões com maiores valores de diluição.

Fica evidenciado observando a figura 5.2, que para um mesmo ângulo de inclinação do arame, variando-se apenas o parâmetro X , diferenças significativas são obtidas. Uma possível explicação para esses resultados é que com uma distância X maior, ou seja, com o arame chegando mais afastado do eletrodo, o metal de solda consegue se espalhar um pouco mais na junta, apresentando maiores tamanhos e largura, e consequentemente menor reforço, já que a quantidade de metal de solda permanece constante.

5.1.3 Parâmetros sistema de aquisição

A tabela 5.4 mostra os parâmetros de soldagem obtidos com o sistema de aquisição.

Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem obtidos com o sistema de aquisição na etapa A.

Parâmetros sistema de aquisição						
	1A	2A	3A	4A	5A	6A
Um (V)	12,1	12,3	13,1	12,5	12,8	15,2
Im (A)	267	265	270	269	270	263
Va (m/min)	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Pm (W)	3406	3413	3705	3538	3638	4193

Analisando os parâmetros obtidos na tabela 5.4, pode-se notar que a tensão de soldagem, que é função do comprimento do arco, manteve-se uniforme, com exceção da amostra 6A. A diferença dessa amostra com relação as demais pode estar relacionada com a instabilidade do arco e com a heterogeneidade no cordão (visível na tabela 5.2) para essa configuração.

A corrente apresentada na tabela 5.4 é a corrente média durante todo o cordão de solda, a qual se apresentou relativamente constante.

A velocidade de alimentação do arame medida encontrou-se defasada em relação à configurada na fonte de soldagem, porém essa defasagem pode ser considerada um erro sistemático, e caso necessário, poderia facilmente ser corrigida na configuração dos novos parâmetros.

A potência em Watts não segue a equação $P=U \cdot I$, pois é calculada em cada instante, e finalmente é obtida através da média das potências instantâneas.

5.2. Etapa B

Esta etapa tem como objetivo avaliar a máxima taxa de deposição para cada um dos processos, com arame frio e com arame quente, sem considerar a qualidade do cordão de solda obtido.

5.2.1. Taxa de deposição

A tabela 5.5 mostra as taxas de deposição da etapa B, obtidas com a utilização da equação 4.1.

Tabela 5.5: Taxa de deposição para etapa B.

Taxa de deposição						
Nº Cordão	Vs (mm/s)	Ls (mm)	Mantes (g)	Mdepois (g)	Mmsd (g)	Tdep (kg/h)
1B - AF	3	110	330,4	365,8	35,4	3,5
2B - AQ	3	96	338,7	375,4	36,7	4,1

Pela análise da tabela 5.5 observa-se um aumento significativo na taxa de deposição de metal de solda do cordão feito com arame quente em relação ao frio. Esse aumento de 17% foi notável, porém vale ressaltar que segundo a figura 5.3 [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004] este poderia ter sido maior, mas não foi possível exceder a velocidade de alimentação utilizada no cordão 2B, pois esta chegou ao limite da capacidade da fonte de soldagem.

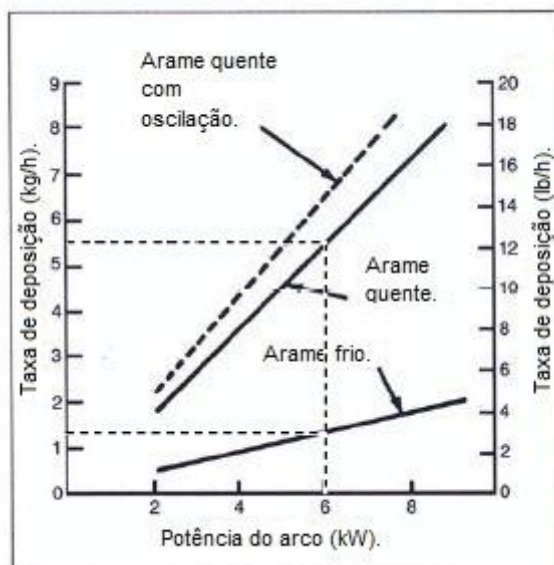


Figura 5.3: Taxa de deposição x potência do arco [Adaptado de AWS-WELDING HANDBOOK, 2004].

Além disso, novamente relacionando com a literatura, a taxa de deposição do cordão 1B deveria ter sido menor, pois de acordo com a figura 5.3, para uma potência de aproximadamente 6.000 watts, esta fica em torno de 1,3 kg/h. Uma justificativa para este fato, é que o gráfico da figura 5.3 deve considerar taxas de deposição para cordões com boa qualidade e geometria aceitável.

5.2.2. Geometria dos cordões

Na tabela 5.6 são apresentadas as fotografias (aspecto visual) e as macrografias dos cordões de solda da etapa B.

Tabela 5.6: Fotografias e macrografias dos cordões soldados na etapa B.

Amostras	Fotografias	Macrografias
1B - AF		
2B - AQ		

Pela análise das fotografias nenhuma diferença significativa é notada do arame frio em relação ao arame quente. Os dois cordões apresentaram reforço excessivo, porém apresentaram geometrias estáveis em todo o comprimento.

Com a análise das macrografias apresentadas na tabela 5.6 pode-se notar que praticamente toda a energia do arco foi utilizada para a fusão do arame, tanto no cordão com arame frio quanto no cordão com arame quente, causando assim pouca penetração. Porém no arame quente, o arame já chega à poça de fusão aquecido, e portanto uma menor energia é necessária para a fusão do mesmo, obtendo assim maiores taxas de deposição.

Além disso, pode-se notar a falta de molhabilidade nos dois cordões de solda. Essa característica pode estar ligada ao gás utilizado, visto que o Argônio é conhecido por apresentar baixa fluidez nos cordões realizados em aço ao carbono.

5.2.3: Parâmetros sistema de aquisição

A tabela 5.7 mostra os parâmetros de soldagem obtidos com o sistema de aquisição.

Tabela 5.7: Parâmetros de soldagem obtidos com o sistema de aquisição na etapa B.

Parâmetros sistema de aquisição		
	1B - AF	2B - AQ
Um (V)	18,9	19,0
Im (A)	305	306
Va (m/min)	16,7	19,1
Pm (W)	5778	6045

Há acréscimo de tensão em relação a etapa A porque a distância da ponta do eletrodo até a chapa a ser soldada precisou ser aumentada, tendo em vista que a quantidade de metal de solda a ser depositada aumentou bastante, e este poderia entrar em contato com o bocal.

A corrente medida é a corrente média em todo o cordão, a qual também se manteve praticamente constante nos dois cordões.

A velocidade de alimentação do arame apresentou algumas variações em relação à configurada, e pode ser justificada pela proximidade do limite superior da fonte de soldagem.

A potência, assim como na tabela 5.4 não obedece a equação $P=U \cdot I$, pois é obtida através da média das potências ponto a ponto.

6. CONCLUSÕES

O processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame foi estudado através de duas etapas. A primeira delas consistiu na análise da influência dos parâmetros geométricos da alimentação na geometria dos cordões de solda, e a segunda baseou-se em avaliar a taxa de deposição utilizando as variantes com arame quente ou frio.

Na primeira etapa, observando a geometria das juntas e as macrografias, pode-se concluir que a melhor geometria para o conjunto alimentador foi obtida utilizando $X= 5,5$ mm e $Y=30^\circ$ (amostra 3A), visto que além de ter apresentado 52,93% de diluição, quando comparada com a 4A (diluição de 54,37%) apresentou maior garganta (maior resistência mecânica da junta) e menor reforço, o qual não representa nenhuma vantagem mecânica. Do ponto de vista visual nenhuma diferença significativa foi encontrada, porém concluiu-se que a configuração utilizada para a amostra 6A não foi adequada, pois não apresentou estabilidade durante a soldagem.

Para a segunda etapa foram obtidas taxas de deposição relativamente altas, tanto para o processo com arame quente quanto para arame frio. Com o arame frio foi obtida uma taxa de deposição de 3,5 kg/h e para arame quente se obteve 4,1 kg/h (17% maior que o arame frio).

Essa diferença, embora menor que a esperada, comprova o fato de que fornecendo um pré-aquecimento ao arame, ganhos significativos são obtidos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS, Welding Handbook, **“Welding Processes”** vol. 2, 9th edition, 2004.

Bracarense, A. Q.; **“Processo de soldagem TIG – GTAW”**, UFMG, 2000.

Cunhal, T. V.; **“Proposta de roteiro para a determinação das variáveis de soldagem do processo TIG pulsado aplicado à soldagem de chapas finas”**, Soldagem & Inspeção, vol. 18, nº 1, 2013, p. 64 – 71.

Delgado, L. C.; **“Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame”**, Dissertação, UFSC, 2000.

Gerdau, **“Catálogo: Arame para solda”**, www.gerdau.com.br, Acessado em 02/10/2013.

IMC Soldagem, **“Manual da fonte de soldagem Digiplus A7”**, 2ª edição, Florianópolis, 2011.

Kou, S.; **“Welding Metallurgy”**, Second edition, Hoboken, New Jersey, 2002.

Machado, I. G.; **“Soldagem e técnicas conexas: Processos”**, 1ª edição, Porto Alegre, 1996.

Richardson, M.; **“Semiautomatic cold wire feeder systems increase GTA productivity”**, Welding Journal, Jan. 1995, p. 51 – 54.

Teixeira, G.; **“Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em Tandem”**, Dissertação, UFRGS, 2011.