

11939

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALURGICA E DOS
MATERIAIS - PPGEMM

RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DA PONTA DO ELETRODO E A GEOMETRIA
DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

por

ALEIR ANTÔNIO FONTANA DE PARIS
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Gradua
ção em Engenharia Metalurgica e dos Materiais - PPGEMM

PORTO ALEGRE

1986

RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DA PONTA DO ELETRODO E A GEOMETRIA
DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

D I S S E R T A Ç Ã O

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação

por

ALEIR ANTÔNIO FONTANA DE PARIS

ENGENHEIRO MECÂNICO

1986

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Metalurgia de Transformação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Francisco José Kiss

Doutor

PPGEMM - UFRGS

Banca Examinadora:

Ivan Guerra Machado

Doutor

PPGEMM - UFRGS

Arno Müller

Doutor

PPGEMM - UFRGS

Átila Mentz

Engenheiro

MKS

Coordenador do PPGEMM

Ivan Guerra Machado

Doutor

R E S U M O

No processo de soldagem TIG (Tungstênio Inerte Gás), um dos fatores que influenciam o formato do cordão de solda é o ângulo da extremidade do eletrodo. Para estudar o comportamento do arco elétrico em função da geometria de ponta do eletrodo e suas conseqüências nos cordões de solda, efetuaram-se soldagens sobre corpos de prova sem deposição de material (bead-on-plate) através de parâmetros controlados e a mecanização do processo. Parâmetros tais como vazão do gás, velocidade de avanço da tocha e comprimento do arco foram testados para verificar a atuação em conjunto com o ângulo do eletrodo.

Pela análise metalográfica (macrografia) estudaram-se os perfis dos cordões de solda, verificando-se que o ângulo exerce uma influência significativa na característica do arco tensão-corrente, na largura e profundidade de penetração da solda. Para maiores ângulos de extremidade do eletrodo obteve-se aumento na penetração, diminuição da tensão e largura do cordão de solda para uma mesma intensidade de corrente.

A B S T R A C T

In Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) the weld bead shape is affected by the electrode tip angle. To study the electrical arc behavior against the electrode tip geometry and their effects on the weld bead shape, several welding tests were performed through controlled parameters and process mechanization. Parameters such as gas flow, torch travel speed and arc length were tested to verify the effect of the electrode angle on the weld bead shape.

Studies on the weld bead profile through metallographical analysis showed that the vertex angle have a significant influence on the bead width, on the weld penetration depth and on the volt-ampere characteristic. For larger tip angles and same current intensity, an increased weld penetration, and reduction in voltage and weld bead width was obtained.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr. Francisco J. Kiss pela confiança e apoio técnico.

Ao Prof. Eng. Reni Bertagnolli pelo uso do laboratório de metrologia da UFSM.

À CAPES pelo suporte financeiro.

S U M Á R I O

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ANEXOS	xvi
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - INFLUÊNCIA DA PONTA DO ELETRODO	3
2.1 - Introdução	3
2.2 - Característica do arco	3
2.3 - Largura do cordão de solda	16
2.4 - Penetração da solda	26
2.4.1 - Influência da espessura do corpo de prova	26
2.4.1.1 - Chapa espessa	26
2.4.1.2 - Chapa fina	39
2.5 - Área da secção transversal da solda	43
3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	49
3.1 - Material	49
3.2 - Eletrodo	50
3.3 - Velocidade de soldagem	53
3.4 - Gás de proteção	57
3.5 - Equipamento	59
4 - RESULTADO E DISCUSSÃO	61
5 - CONCLUSÕES	91
6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	93
7 - BIBLIOGRAFIA	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores característicos do arco para vários ângulos de vértice para um eletrodo de \emptyset 3.0 mm [5].....	6
Tabela 2	Efeito da geometria do eletrodo sobre a tensão do arco para um arco estacionário. Tempo de permanência igual a 10 s [6].	7
Tabela 3	Efeito da geometria do eletrodo sobre a tensão do arco para um arco móvel igual a 127 mm/min [6].....	8
Tabela 4	Resumo dos cálculos para a densidade média de corrente para vários ângulos de vértice [2].....	11
Tabela 5	Altura calculada de subida do plasma para as várias combinações de correntes e ângulos de vértice [2].....	11
Tabela 6	Comparação de resultados para as características do arco.....	17
Tabela 7	Influência da ponta do eletrodo na largura do cordão de solda [10].....	19
Tabela 8	Efeito da configuração do eletrodo na largura do ponto fundido para um arco estacionário. Tempo de permanência: 10 s [6].	20
Tabela 9	Efeito da configuração do eletrodo na largura do cordão para um arco móvel. Velocidade de avanço: 127 mm/min [6].....	21
Tabela 10	Resumo dos resultados e recomendações gerais para os ângulos extremos estudados [4]	25
Tabela 11	Efeito da configuração do eletrodo na profundidade de penetração do ponto fundido para soldagem estacionária. Tempo de permanência: 10 s [6].....	30
Tabela 12	Efeito da configuração do eletrodo na profundidade de penetração do cordão de solda para um arco móvel de 127 mm/min [6]..	31

Tabela 13	Efeito da extremidade do eletrodo na profundidade de penetração [10].....	36
Tabela 14	Comparação dos resultados obtidos por vários pesquisadores [10].....	38
Tabela 15	Resumo dos resultados e recomendações gerais [4].....	43
Tabela 16	Efeito da ponta do eletrodo na área da seção transversal da solda com arco estacionário (ponto fundido). Tempo de permanência 10 s [6].....	46
Tabela 17	Efeito da ponta do eletrodo na área da seção transversal da solda com arco móvel. Velocidade de soldagem, 127 mm/min [6]	46
Tabela 18	Efeito da ponta do eletrodo na área da seção transversal da solda [10].....	48
Tabela 19	Composição química dos corpos de prova utilizados.....	49
Tabela 20	Relação da vazão do gás de proteção e velocidade de soldagem para um eletrodo de 30 ^o com o aparecimento de corcova.....	56
Tabela 21	Valores característicos do arco para vários ângulos de vértice.....	62
Tabela 22	Valores característicos do arco para vários ângulos de vértice e corpos de prova de 6.4 mm de espessura.....	64
Tabela 23	Valores médios da largura de cada cordão de solda em função do ângulo de vértice e intensidade de corrente para chapa de 4.5 mm de espessura.....	67
Tabela 24	Valores médios da largura de cada cordão de solda em função do ângulo de vértice e intensidade de corrente para chapas de 6.4 mm de espessura.....	70
Tabela 25	Valores médios (10 medidas de cada cordão) da largura da solda em função da velocidade de avanço para corpos de prova com espessura de 6.4 mm (I = 245 A).....	72
Tabela 26	Valores da tensão do arco em função da velocidade de avanço para uma corrente constante de 245 A.....	73

Tabela 27	Valores da tensão para os ângulos do eletrodo em função do aumento do arco para uma intensidade de corrente constante (245 A).....	73
Tabela 28	Valores da largura do cordão de solda em função dos ângulos e da distância eletrodo-peça com a corrente constante (245 A).	73
Tabela 29	Valores médios da largura do cordão para os ângulos estudados com variações da vazão do gás a uma corrente constante de 245 A.	75
Tabela 30	Valores médios da tensão para os ângulos estudados com variações da vazão do gás a uma corrente constante de 245 A.....	76
Tabela 31	Relação da profundidade do cordão de solda em função dos ângulos de ponta estudados	78
Tabela 32	Valores médios da profundidade do cordão de solda em chapas de 6.4 mm para os ângulos considerados.....	85
Tabela 33	Valores calculados das áreas das seções transversais dos cordões de solda para chapas de 4.5 mm.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fatores influenciando o formato da poça fundida sob um arco de tungstênio com proteção gasosa [1].....	2
Figura 2	Efeito do ângulo de vértice da ponta sobre as características tensão-corrente (para aço carbono, velocidade de soldagem 1.27 mm/s, "gap" 1.27 mm) [2].....	4
Figura 3	Características tensão-corrente para vários ângulos de extremidade do eletrodo (para aço inox 321, velocidade de soldagem 2.54 mm/s, "gap" 1.40 mm) [4].....	5
Figura 4	Características tensão-corrente para vários ângulos de extremidade do eletrodo (tungstênio resfriado à água, "gap" 1.52 mm) [5]	6
Figura 5	Efeito da configuração da ponta do eletrodo sobre a tensão, com variações da truncação da extremidade, para $I = 90$ A e comprimento do arco = 0.9 mm [6].....	8
Figura 6	Altura de crescimento do plasma.....	10
Figura 7	Influência da ponta do eletrodo e intensidade de corrente no comprimento efetivo do arco.....	13
Figura 8	A resistência total do sistema, após a fonte de energia ser dividida em 2 componentes resistivos: um que representa a resistência do arco R_a , e outro para o metal R_t [5]	15
Figura 9	Largura do cordão de solda em relação ao ângulo do eletrodo para várias correntes de arco [2].....	18
Figura 10	Influência do movimento do arco na largura da poça de fusão e no cordão [10].....	19
Figura 11	Influência da ponta do eletrodo na largura do cordão de solda para os dois arcos, móvel (127 mm/min) e estacionário (10 s) [6]	22
Figura 12	Influência da truncação da ponta do eletrodo na largura do cordão de solda e do ponto fundido. Arco móvel (127 mm/min) e estacionário (10 s) [6].....	23

Figura 13	Largura do cordão de solda em função do ângulo de vértice do eletrodo. Velocidade de trabalho : (a) 150 mm/min, (b) 225 mm/min, (c) 300 mm/min 4	24
Figura 14	Penetração com relação ao ângulo de vértice para várias correntes de soldagem 2 .	27
Figura 15	Profundidade máxima de penetração com relação ao ângulo de vértice do eletrodo. Velocidade de trabalho: (a) 150 mm/min, (b) 225 mm/min, (c) 300 mm/min 4	28
Figura 16	Desenhos de macrosecções para os ângulos extremos, em 200 A e uma velocidade de trabalho de 150 mm/min: (a) 30° e (b) 120° . Aumento 5x, 4	29
Figura 17	Esquema de truncamento da ponta dos eletrodos.....	30
Figura 18	Efeito do ângulo da ponta do eletrodo na penetração para os dois tipos de arco: fixo e móvel 6	32
Figura 19	Dependência da pressão específica do arco sobre a corrente de soldagem; (1) eletrodo com ponta aguda, (2) eletrodo com ponta esférica 11	33
Figura 20	Efeito da truncação da ponta do eletrodo na penetração 6	34
Figura 21	Perfil da zona de fusão, como função da geometria da ponta do eletrodo, com truncações de 0.125 e 0.5 mm 10	35
Figura 22	Penetração com a variação da ponta do eletrodo para dois arcos diferentes (móvel e estacionário) 10	37
Figura 23	Desenho das macrosecções para a zona fundida com 150 A e velocidade de soldagem de 300 mm/min, junta de topo e espessura de 3.2 mm. (Nota: decréscimo na penetração com aumento do ângulo de vértice). Aumento 5x 4	41
Figura 24	Representação esquemática da configuração do arco TIG. (Nota: modos sugeridos de operação sobre chapas "finas" e chapas "grossas" à mesma corrente nominal com ângulos de vértice extremos). (a) 30°, (b) 120° e (c) 30°, 4	42

Figura 25	Área média da secção transversal do cordão de solda como uma função da corrente do arco 2	45
Figura 26	Equipamento utilizado para afiação da extremidade dos eletrodos.....	50
Figura 27	Ângulo cônico do eletrodo.....	51
Figura 28	Extensão da ponta do eletrodo fora do bocal da tocha.....	52
Figura 29	Aspecto de uma solda com corcova; (a) vista superior da formação no cordão de solda e (b) corte longitudinal mostrando a penetração.....	54
Figura 30	Aspecto do movimento do metal fundido conforme o avanço do arco 22	55
Figura 31	Região de aparecimento de defeito para um eletrodo de diâmetro igual a 3.0 mm e gap de 1.5 mm.....	57
Figura 32	Influência do gás empregado na característica do arco 17	58
Figura 33	Base de fixação e nivelamento dos corpos de prova.....	60
Figura 34	Equipamento utilizado para fixação dos corpos de prova e nivelamento da superfície	60
Figura 35	Esquema da leitura correta da tensão do arco segundo o IIW.....	62
Figura 36	Característica do arco para vários ângulos de vértice.....	63
Figura 37	Característica do arco para vários ângulos de vértice para chapas de 6.4 mm de espessura.....	64
Figura 38	Efeito do ângulo de vértice na largura do cordão de solda para corpos de prova de 4.5 mm. Aumento 1.35x.....	66
Figura 39	Largura do cordão de solda para vários ângulos do eletrodo e intensidades de corrente. Chapa de 4.5 mm.....	67
Figura 40	Aspectos de alguns cordões de solda em função do ângulo e da intensidade de corrente. Chapa de aço com espessura de 6.4 mm. Aumento 1.35x.....	68

Figura 41	Esquema do cabo de retorno em relação ao aparato de fixação do corpo de prova; (a) inicial, (b) corrigido.....	69
Figura 42	Desvio do cordão de solda quando o arco cruzou o ponto da conexão de retorno (terra).....	69
Figura 43	Largura do cordão de solda para vários ângulos do eletrodo e intensidades de corrente. Média de 10 medidas sobre cada cordão. Chapa com 6.4 mm.....	70
Figura 44	Influência da velocidade de soldagem na largura do cordão de solda.....	72
Figura 45	Relação do comprimento do arco em função dos ângulos de ponta e influência na largura do cordão.....	74
Figura 46	Equipamento utilizado para medições da profundidade de penetração e largura dos cordões de solda.....	77
Figura 47	Curvas de penetração em função do aumento do ângulo do eletrodo para uma chapa de 4.5 mm.....	79
Figura 48	Aparência de arcos estacionários para vários ângulos de vértice em 150 A com um gap de 1.4 mm; ângulo de vértice: (a) 30°, (b) 60°, (c) 90° e (d) 120°. Aumento de $17^{1/2} \times 4 $	81
Figura 49	Características do formato de vários cordões em função da amperagem e ângulos da extremidade. Aumento 10x.....	82
Figura 50	Macrofotografias dos cordões de solda obtidos para uma chapa de 4.5 mm de espessura, com uma velocidade de soldagem de 125mm/min e várias intensidades de corrente. Ataque com reativo de iodo. Aumento 2.4x.....	84
Figura 51	Característica da penetração em função do ângulo de ponta do eletrodo para uma chapa de 6.4 mm de espessura.....	86
Figura 52	Macrofotografias dos cordões de solda obtidos para uma chapa de 6.4 mm de espessura, com uma velocidade de soldagem de 125mm/min e intensidade de corrente de 245 A. Ataque com reativo de iodo. Aumento 2.4x.....	86

Figura 53	Características do formato de vários cordões de solda, em função da amperagem e ângulos de extremidade. Chapa com espessura de 6.4 mm. Aumento 10x.....	87
Figura 54	Método de Simpson para o cálculo da área da secção transversal 25	88
Figura 55	Valores das áreas calculadas dos cordões de solda obtidos e relacionadas à aplicação da fórmula proposta por SAVAGE. Nota-se a variação com relação a linha cheia acima de 100%.....	90

LISTA DE ANEXOS

Anexo I	Valores máximos e mínimos encontrados para a largura e profundidade do cordão de solda. Chapa de 4.5 mm de espessura.....	96
Anexo II	Valores máximos e mínimos encontrados para a largura e profundidade do cordão de solda. Chapa de 6.4 mm de espessura.....	97
Anexo III	Valores máximos e mínimos encontrados para a largura do cordão de solda em função da velocidade de soldagem.....	98

1 - INTRODUÇÃO

Os mecanismos envolvidos na formação de um cordão de solda por um arco elétrico são complicados e, embora muitas vezes investigados, descrição exata não é fornecida. O formato que pode ser assumido por um cordão pode ser o resultado de qualquer um dos vários fenômenos relacionados para a distribuição da energia do arco e redistribuição da mesma após entrar a peça.

A Figura 1, mostra alguns fatores básicos para o formato assumido pela poça fundida sob um arco de tungstênio com proteção gasosa (processo de soldagem TIG). Intensidade e distribuição da energia imposta pelo arco, fluxo de metal dentro da poça fundida, fluxo de calor, fenômeno de capilaridade e o ângulo da ponta do eletrodo precisam ser considerados entre outros.

Até pouco tempo atrás não se dava muita atenção ao afiamento da ponta do eletrodo de tungstênio no processo de soldagem TIG, desconhecendo-se seus efeitos na formação do cordão de solda principalmente com relação a largura e penetração. Descobriu-se posteriormente que apontando a extremidade do eletrodo aumentava a penetração do cordão de solda, mas esta afiação foi feita de modo aleatório não mantendo-se o mesmo ângulo e ignorando-se qual o ângulo que fornecia maior penetração.

Com relação a geometria da ponta do eletrodo de tungstênio, um número pequeno de trabalhos foram efetuados com resultados que diferem entre si com respeito ao formato do cordão de solda obtido variando o ângulo da extremidade. As diferenças de resultados obtidos foram bastante acentuadas entre os vários trabalhos, tanto nos efeitos como nas causas da influência do ângulo do eletrodo.

As divergências surgiram principalmente sobre o efeito que ocasionaria com relação a penetração obtida e, qual o ângulo mais indicado para o eletrodo de tungstênio no processo TIG. Procurou-se efetuar o trabalho baseados nestas discordâncias, numa tentativa experimental de verificar os pontos em que não há uma tendência clara dos resultados. Entre os efeitos do ângulo do eletrodo, investigou-se a influência nas características do cordão de solda.

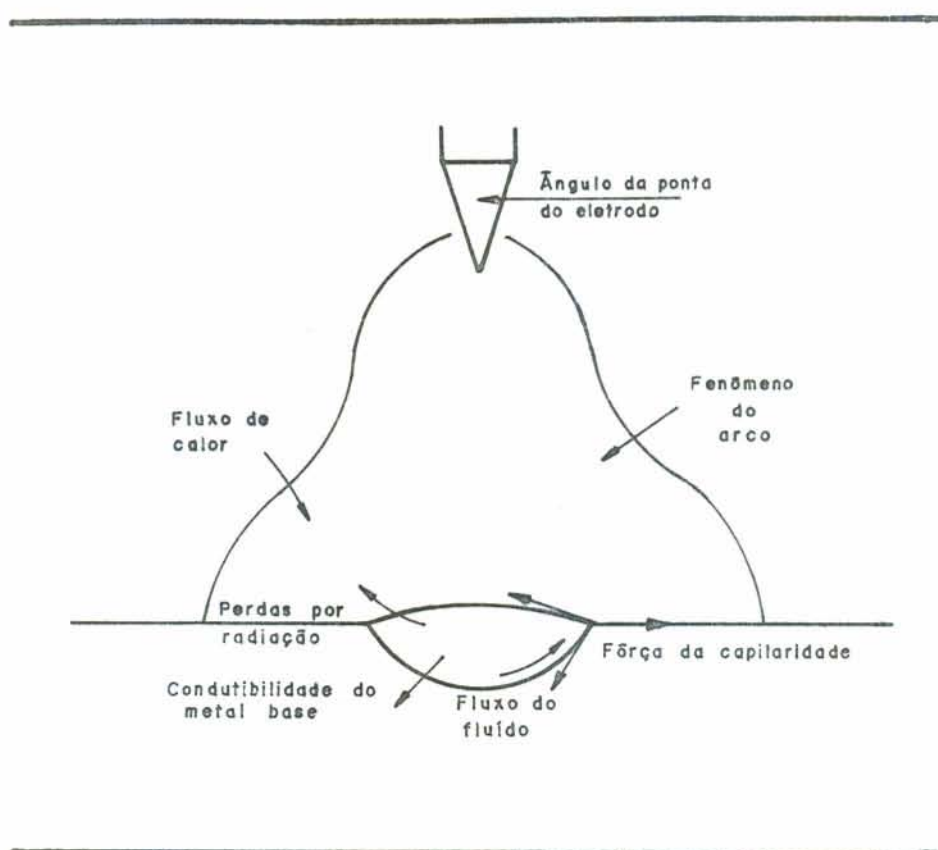


FIGURA 1 - Fatores influenciando o formato da poça fundida sob um arco de tungstênio com proteção gasosa [1].

2 - INFLUÊNCIA DA PONTA DO ELETRODO

2.1 - Introdução

Investigando o formato da geometria da ponta do eletrodo sobre o cordão de solda, no processo de soldagem TIG, os primeiros resultados obtidos foram na influência significativa do ângulo nos seguintes fatores:

- característica tensão-corrente do arco;
- característica penetração-largura do cordão de solda.

Com relação aos fatores acima, os vários trabalhos de pesquisa efetuados apresentam pontos conflitantes quanto ao formato do ângulo de afiação do eletrodo utilizado e o resultado nas características da solda.

Na bibliografia consultada, encontrou-se estudos da variação dos parâmetros que podem influenciar estas características, todos relacionados com o tipo de ângulo.

2.2 - Características do arco

Um dos primeiros trabalhos que tratam da influência do formato da ponta do eletrodo foi efetuado por SAVAGE et alii [2]. Trabalhando com chapas de aço carbono e efetuando cordões de solda sem deposição de material, registrou os valores da tensão e corrente para vários ângulos à uma distância eletrodo-peça constante. A Figura 2, mostra as características do arco para ângulos de vértice de 45, 60, 90 e 120 graus.

Pela figura, nota-se que a tensão do arco decresce repen-

tinamente com o aumento da corrente até um certo valor de aproximadamente 20 ampères e independe do ângulo da extremidade. Segundo MILNER et alii [3], este decréscimo na tensão inicial das características do arco é duplo. Primeiro a área condutora da coluna do arco faz-se maior; em segundo lugar sua temperatura, e

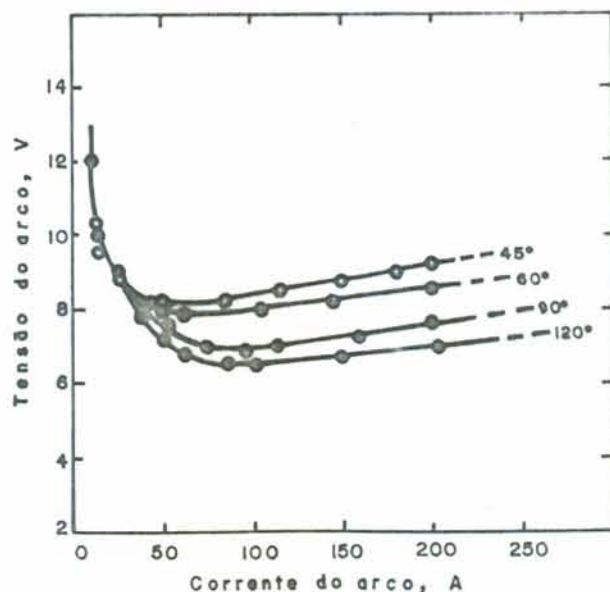


FIGURA 2 - Efeito do ângulo de vértice da ponta sobre as características tensão-corrente (para aço carbono, velocidade de soldagem 1.27 mm/s, gap 1.27 mm) [2].

portanto sua condutividade elétrica, aumentam de modo que a corrente está apta a fluir com menor tensão.

Aumentando a intensidade de corrente acima desta valor há um mínimo na tensão individual para cada ângulo e eleva-se gradualmente com adicional acréscimo na intensidade de corrente do arco. Para manter-se a mesma tensão com o aumento do ângulo, deveria ser aumentada a distância eletrodo-peça para estabelecer a mesma característica volt-ampère. Pesquisando o efeito da extremidade do eletrodo no cordão de solda, SPILLER & MacGREGOR [4], encontraram resultados semelhantes para as características tensão-corrente, Figura 3.

A forma gráfica dos resultados obtidos mostra que a tensão em qualquer corrente dada, além da zona da característica negativa é grandemente dependente do ângulo da extremidade. A tensão aumenta com o decréscimo do ângulo, sendo que uma mudança de 30° altera a tensão de aproximadamente 7 a 10 %.

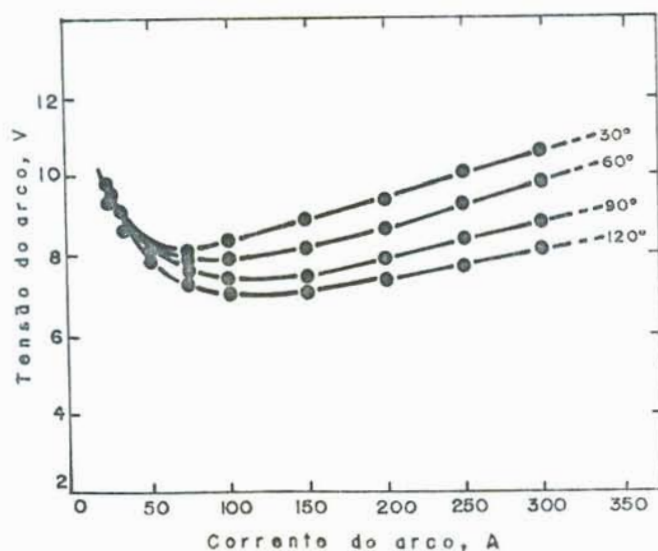


FIGURA 3 - Características tensão-corrente para vários ângulos de extremidade do eletrodo (para aço inox 321, velocidade de soldagem 2.54 mm/s, gap 1.40 mm) [4].

Nos trabalhos anteriores os resultados são dados somente na forma gráfica, não sendo fornecidos os valores exatos lidos da tensão-corrente para cada ângulo a uma dada intensidade de corrente.

CHIHOSKI [5], estudando o relacionamento da energia entre um arco de tungstênio e o eletrodo fornece os valores da tensão e corrente para vários ângulos de extremidade, Tabela 1.

A Figura 4, mostra de forma gráfica as características do arco. Nota-se as mesmas tendências já estudadas da diminuição da tensão com o aumento do ângulo para uma dada corrente mas, neste caso, não foram indicados os valores abaixo de 100 A para verificar se o comportamento das características do arco mantém-se constante após uma determinada corrente, para os vários ângu-

los estudados. Pela figura, nota-se que o ângulo de 180° apresenta uma diminuição na tensão mesmo sendo maior do que o ângulo

TABELA 1 - Valores característicos do arco para vários ângulos de vértice para um eletrodo de $\varnothing 3.0$ mm [5].

Corrente do arco, A	Tensão do arco, V				
	30°	60°	90°	120°	180°
100	18.8	18.1	18.8	17.6	17.0
200	18.6	17.9	16.9	16.9	16.6
300	22.0	19.7	18.2	18.0	18.2
400	25.5	21.9	20.5	20.0	20.5

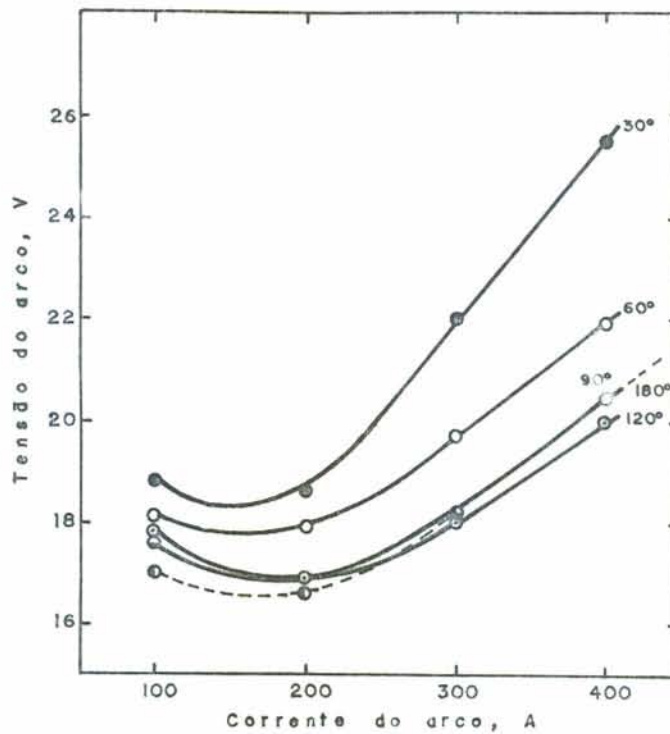


FIGURA 4 - Características tensão-corrente para vários ângulos de extremidade do eletrodo (para tungstênio resfriado à água, gap 1.52 mm) [5].

lo de 120° . Segundo o autor, isto seria devido ao arco emergir do canto do eletrodo já que a ponta é plana e gira sobre ele

fazendo com que se comporte como uma ponta menor do que 120° . Existe uma diferença de valor entre o tabelado e o da figura. Para uma intensidade de corrente de 100 A, o valor plotado na figura para um ângulo de 90° é de aproximadamente 17.8 V, enquanto o tabelado é de 18.8 V, possivelmente sendo um erro de impressão.

GLICKSTEIN et alii [6], trabalhando com eletrodos com vários ângulos de ponta truncados e eletrodos com ângulo fixo de 30° truncados com vários valores, encontraram para arcos fixos (spot-on-plate) e móveis (bead-on-plate) os valores que encontram-se nas Tabelas 2 e 3.

TABELA 2 - Efeito da geometria do eletrodo sobre a tensão do arco para um arco estacionário. Tempo de permanência igual a 10 s [6].

Ângulo, graus*	Tensão, volts	Truncação, mm**	Tensão, volts
15	8.5	0.12	9.0
30	9.0	0.25	8.8
45	8.9	0.50	8.4
60	8.7	0.89	8.1
90	7.9	1.27	7.9
180	7.4	1.90	7.9

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°);

** Os eletrodos usados nesta parte do estudo tem um ângulo de 30° .

Com os valores das tabelas para os eletrodos de 30° truncados, obteve-se uma forma gráfica a Figura 5. Dentro das características de construção das figuras não foi possível elaborar uma forma gráfica para as pontas dos eletrodos variando de 15 a

180 graus, já que a intensidade de corrente utilizada não sofreu modificações.

TABELA 3 - Efeito da geometria do eletrodo sobre a tensão do arco para um arco móvel igual a 127 mm/min [6].

Ângulo, graus*	Tensão, volts	Truncação, mm**	Tensão, volts
15	9.00	0.12	9.25
30	9.25	0.25	8.70
45	9.10	0.50	9.00
60	8.60	0.89	8.10
90	8.10	1.27	7.70
180	7.80	1.90	7.50

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°);

** Os eletrodos usados nesta parte do estudo tem um ângulo de 30°.

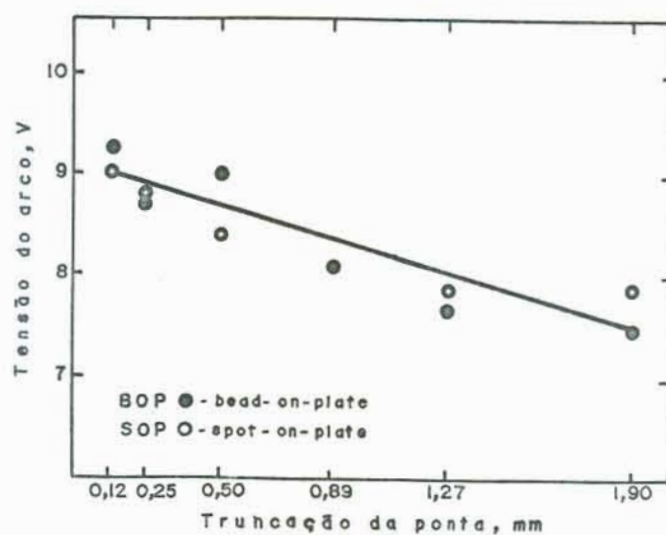


FIGURA 5 - Efeito da configuração da ponta do eletrodo sobre a tensão, com variações da truncação da extremidade, para $I = 90A$ e comprimento do arco = 0.9 mm [6].

Comparando estes valores verifica-se que há um decréscimo

da tensão com o aumento do ângulo de vértice para uma corrente constante (neste caso 90 A). Há uma pequena excessão para o ângulo de 15 graus em ambos os casos, arco estacionário e móvel, em que a tensão é menor do que para ângulos de 30°. Acima deste valor, a tensão cai com o aumento do ângulo para ambos tipos de arco.

A Figura 5, mostra um decréscimo da tensão com o aumento da truncação da ponta, considerado linear pelos autores. Poderia considerar-se que com este aumento na truncação o eletrodo se comportaria como se fosse mais obtuso.

Uma explicação do efeito do ângulo nas características do arco tensão-corrente dada por SAVAGE et alii [2], seria que aumentando a amperagem o centro brilhante branco do plasma cresce para os lados da extremidade cônica, sugerindo que a densidade de corrente, na superfície de emissão, foi essencialmente constante. Isto implicaria que o acréscimo na área da superfície de emissão resultante do crescimento do plasma, fosse proporcional ao acréscimo na corrente do arco. Analisando este fenômeno verifica-se que a extremidade dos eletrodos exibem uma aparência "frosty", Figura 6, para uma determinada altura que seria a do crescimento do plasma. Uma equação foi proposta para calcular a área lateral do cone exibindo esta aparência (na fórmula apresentada no trabalho de Savage faltou o termo π):

$$A = k^2 \cdot \frac{\tan \phi/2}{\cos \phi/2} \cdot \pi \quad (1)$$

onde:

ϕ - ângulo da extremidade do eletrodo (graus)

k - altura do crescimento do plasma (mm)

A - área lateral da região frosty (mm²)

Para uma intensidade de corrente constante (250 A) e três ângulos diferentes mediu-se o valor do aumento da região em que

houve crescimento do plasma e determinou-se a área de emissão, Tabela 4.

Como a área de emissão aumentou de um valor pequeno (da ordem do erro experimental da medida), foi considerado um valor médio de 1.04 mm^2 representativo para todos os ângulos a esta

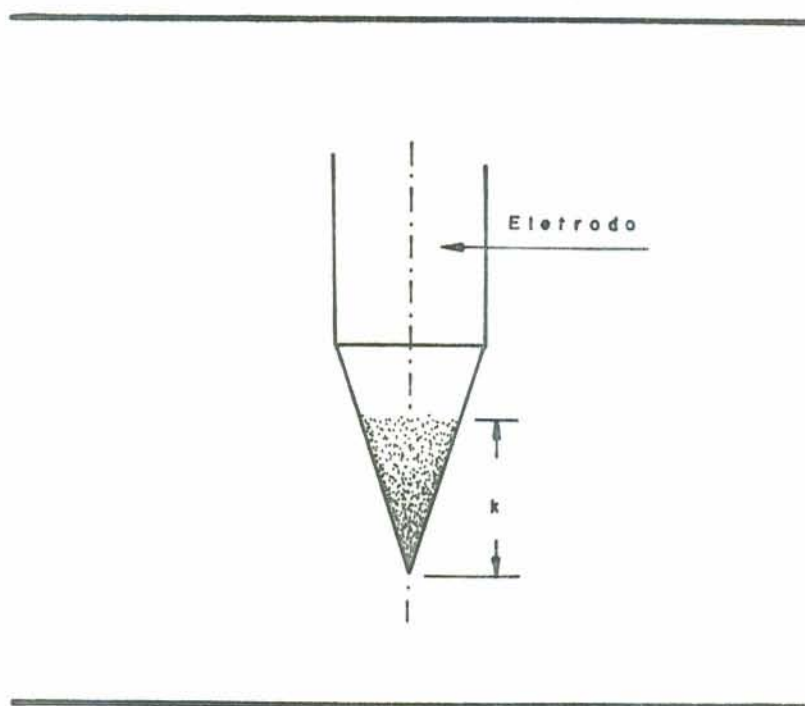


FIGURA 6 - Altura de crescimento do plasma.

amperagem. Foi considerado, também, como representativo para todas condições de corrente e ângulos estudados uma densidade média de 240 A/mm^2 . Entrando com estes valores na equação (1) modificada para as várias correntes como segue:

$$k = \left[\frac{I \cdot \cos \phi/2}{\rho \cdot \tan \phi/2 \cdot \pi} \right]^{1/2}$$

onde:

ρ - densidade média de corrente (A/mm^2)

I - corrente do arco (A)

encontrou-se os seguintes valores de altura de subida do plasma, Tabela 5.

TABELA 4 - Resumo dos cálculos para a densidade média de corrente para vários ângulos de vértice [2].

Ângulo de vértice \emptyset	Altura do crescimento k	Área de emissão calculada A	Densidade de corrente correspondente
graus	mm	mm^2	A/mm^2
30	1.06	1.00	250
60	0.71	1.00	250
90	0.50	1.14	220

TABELA 5 - Altura calculada de subida do plasma para as várias combinações de corrente e ângulos de vértice [2].

Ângulo de vértice, °	Altura de subida do plasma, mm				
	100A	150A	190A	240A	290A
30	0.70	0.85	0.95	1.07	1.20
45	0.55	0.66	0.75	0.85	0.93
60	0.45	0.55	0.62	0.70	0.76
90	0.30	0.37	0.42	0.47	0.52
120	0.20	0.24	0.27	0.30	0.34

Dos valores da Tabela 5, as características observadas da tensão-corrente podem ser explicadas como segue:

a) A tensão do arco representa a soma das quedas no ânodo e cátodo mais a queda proporcional ao comprimento do plasma; aumentando o comprimento efetivo do plasma aumenta a voltagem total do arco.

b) O comprimento efetivo do plasma é igual a soma da distância eletrodo-peça e um incremento proporcional a altura de crescimento do plasma na extremidade cônica.

Então, como pode ser visto pela inspeção da Tabela 5, em ambas situações, diminuindo o ângulo de vértice e aumentando a corrente haverá incremento da altura de crescimento do plasma e portanto aumento da tensão. O comprimento efetivo do arco foi estimado como sendo a raiz quadrada média do comprimento máximo e mínimo do curso do plasma:

$$l_{ef} = \left[\frac{l_{máx}^2 + l_{mín}^2}{2} \right]^{1/2}$$

sendo:

$$l_{máx} - \text{distância eletrodo-peça} + k$$

$$l_{mín} - \text{distância eletrodo-pela}$$

Com relação a parte descendente da curva da característica do arco, com uma baixa intensidade de corrente a tensão deve ser alta para que a potência do arco consiga ionizar e manter o trajeto do plasma. Aumentando a amperagem esta tensão decresce, mas mantendo uma potência suficiente de ionização e geração de calor. Após uma determinada intensidade de corrente, novamente há um aumento da tensão com o aumento da mesma, isto devido ao fato que, como há um aumento do crescimento do plasma na ponta do eletrodo, a coluna do arco e o comprimento efetivo serão aumentados. Alongando o caminho aumenta a resistência e conse-

qüentemente a tensão. Entre os ângulos estudados, reduzindo os mesmos ($120^\circ + 30^\circ$) há um aumento do plasma e, portanto, o comprimento efetivo do arco será aumentado para uma dada corrente com isto aumentando a tensão do arco, Figura 7.

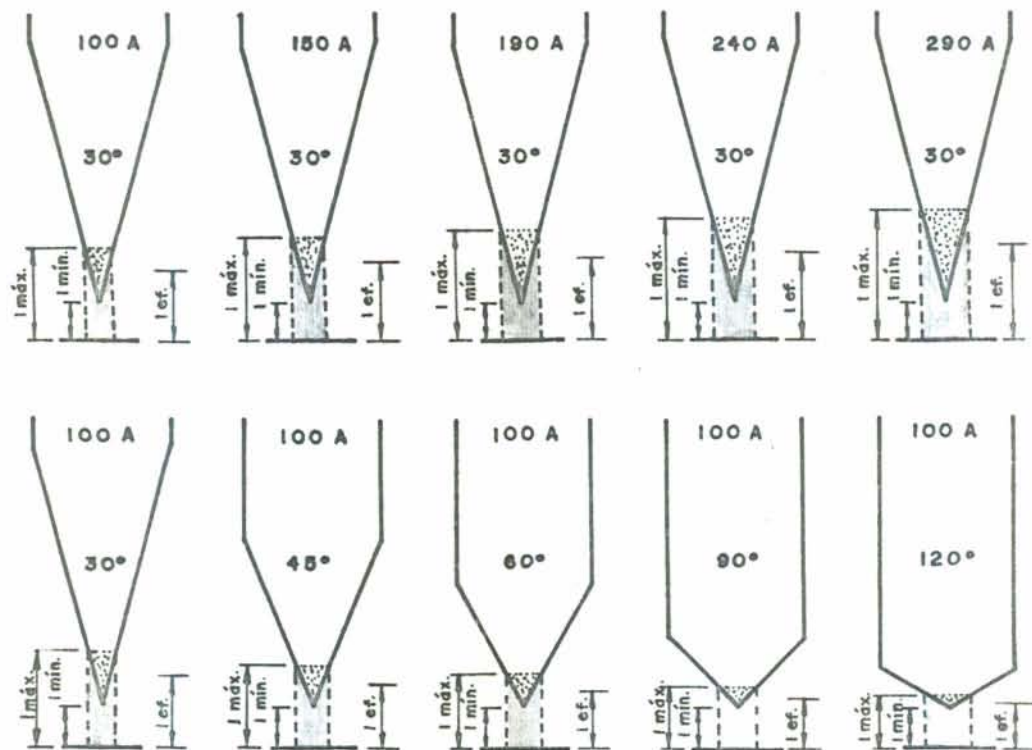


FIGURA 7 - Influência da ponta do eletrodo e intensidade de corrente no comprimento efetivo do arco.

A característica do arco é explicada por HOULDCROFT [7] do seguinte modo: tanto a temperatura como o diâmetro do núcleo central (coluna do arco) dependem da intensidade de corrente que passa pelo mesmo. Devido ao fato de que a maior parte da corrente é transmitida por esta canal e é influenciada por sua temperatura e diâmetro, a relação entre a intensidade e a tensão do arco não segue a lei de Ohm. Quando a intensidade é aumentada a partir de um valor baixo, o canal se alarga e sua

temperatura se eleva, de maneira que a tensão cai a um mínimo, depois a curva se mantém plana ou ascende ligeiramente até que se obtenha as intensidades mais elevadas.

A característica do arco tensão-corrente foi explicada por SPILLER & MacGREGOR [4] simplesmente em termos de um aumento do grau de desionização do plasma e associado aumento da perda de calor (ou transferência) do arco, com eletrodos apontados finamente, o que resultaria num acréscimo da potência imposta ao arco. Como a potência é dada por $P = V \cdot I$, para uma dada corrente resultaria em um aumento da tensão com os eletrodos com ângulos de vértices menores. Para melhor explicar esta queda de tensão com o aumento da intensidade de corrente, CHIHOSKI [5], trabalhou em função da resistância total associada a cada eletrodo, para cada corrente experimental e calculada pela lei de Ohm, $R = E / I$. Esta resistância total deveria ser a soma de dois sistemas de resistências associadas em série: uma resistência metálica R_t , e outra devida ao arco R_a . A resistância dos condutores metálicos mudam à medida que a temperatura aumenta (principalmente o eletrodo) que será uma função da corrente. Ela aumenta continuamente e planamente com a corrente e temperatura. Por outro lado, o sistema condutor do gás plasma decresce na resistância com aumento na temperatura, Figura 8.

A queda precipitada na resistância total é portanto devido a queda da resistância do arco com o aumento da corrente. Isto está consoante com a natureza do gás plasma aquecido, que conduz melhor à medida que sua temperatura aumenta ou seu aumento na secção transversal.

Entre as pontas dos eletrodos estudados (30° , 60° , 90° e 120°), as mais agudas tem a resistância mais alta e aumentam mais rápido com a corrente em relação as de maiores ângulos. A explicação imediata da alta resistância e rápido aumento comparada aos mais baixos valores é o estreitamento da secção transversal do tungstênio na ponta antes da extremidade de emissão

de elétrons. A densidade de corrente mais alta na constrição aumenta a resistência e temperatura do cone.

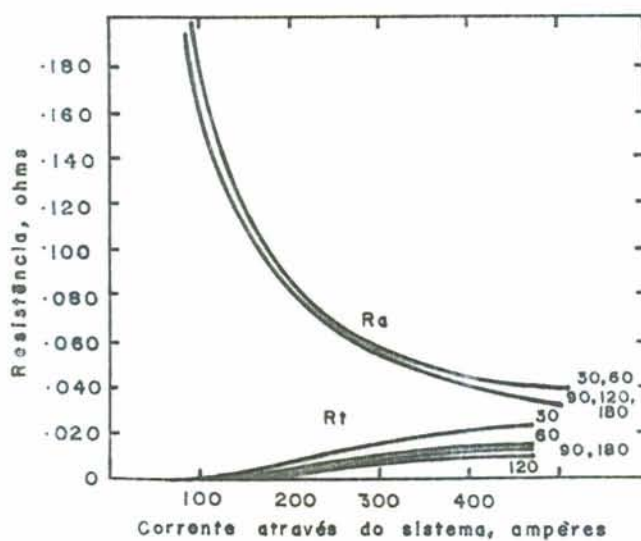


FIGURA 8 - A resistência total do sistema, após a fonte de energia ser dividida em 2 componentes resistivos: um que representa a resistência do arco R_a , e outro para o metal R_t [5].

Na bibliografia consultada, verificou-se que à parte das explicações, há um decréscimo da tensão com o aumento do ângulo da extremidade do eletrodo. A única exceção é no trabalho feito por GLICKSTEIN [6] para um ângulo de 15° , em que há um pequeno decréscimo com relação ao ângulo de 30° e, para eletrodos com várias trunicações com um ângulo fixo de 30° . Com relação ao formato das curvas características do arco, segundo [6], há um decréscimo linear da tensão com o ângulo da extremidade para uma determinada corrente. Verifica-se que os trabalhos [2] e [4] são os que apresentam as curvas mais semelhantes, quase coincidentes, com pequena variação na inclinação. Nestas curvas (Figuras 2 e 3), acima de 25 A não existe nenhuma influência do ângulo da

ponta na tensão. A partir de 25 A, aproximadamente, continua a diminuição da tensão com o aumento da intensidade de corrente, mas começando a sofrer influência do formato da ponta. Acima de 100 A, a tensão começa a aumentar (com a corrente), sendo fortemente dependente do ângulo de afiação do eletrodo a uma determinada corrente.

CHIHOSKI [5], achou este decréscimo na tensão até uma intensidade de 150 A, aumentando após este valor com o aumento da corrente. Abaixo de 100 A não foram fornecidos os valores de tensão para comparação do comportamento das curvas (Figura 4).

Como corpos de prova foram utilizados vários tipos de materiais para os trabalhos acima, além de diâmetros de eletrodos e comprimentos de arco diferentes. Esta variação nas curvas poderia ser creditada a estes parâmetros variáveis. GOLDMAN et alii [8] estudaram o efeito do ânodo sobre o mecanismo do arco para vários materiais diferentes e não encontraram qualquer efeito apreciável de composição sobre as características do arco. Por outro lado, outros pesquisadores informaram da sensibilidade do arco à composição do ânodo. A inclinação da curva característica tensão-corrente é modificada pela adição de certos elementos ligantes, já que o potencial do arco em uma dada corrente e comprimento é alterado por ligeiras mudanças na composição do ânodo, CHASE et alii [9].

A Tabela 6, fornece um apanhado geral dos resultados obtidos para os vários autores, com os diferentes parâmetros utilizados.

2.3 - Largura do cordão de solda

Outra influência da geometria da ponta do eletrodo é com relação as características do formato do cordão de solda. Mantendo-se constante uma determinada corrente de soldagem, a largura do cordão de solda diminui à medida que o ângulo de ponta

TABELA 6 - Comparação de resultados para as características do arco (a,b,c,d).

Ângulo de vértice, graus	SAVAGE*					SPILLER*								CHIHOOSKI**				GLICKSTEIN***		I(A)
	25	50	100	150	200	25	50	100	150	200	250	300	100	200	300	400	SOP"	BCP		
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.5	9.0		
30	-	-	-	-	-	9.6	8.1	8.3	8.9	9.4	10.1	10.6	18.8	18.6	22.0	22.5	9.0	9.25		
45	9.0	8.3	8.4	8.7	9.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.9	9.1		
60	9.0	9.0	8.0	8.2	8.5	9.6	7.9	7.9	8.1	8.6	9.2	9.8	18.1	17.9	19.7	21.9	8.7	8.6		
90	9.0	7.5	6.9	7.2	7.6	9.6	7.6	7.4	7.5	7.9	8.3	8.8	18.8	16.9	18.2	20.5	7.9	8.1		
120	9.0	7.1	6.5	6.7	7.0	9.6	7.3	7.0	7.1	7.3	7.7	8.1	17.6	16.9	18.0	20.0	-	-		
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.0	16.6	18.2	20.5	7.4	7.8		

(a) Parâmetros de Savage: v = 1.27 mm/s; gap = 1.27 mm; aço carbono; diâmetro do eletrodo = 2.4 mm

(b) Parâmetros de Spiller: v = 2.54 mm/s; gap = 1.40 mm; aço inox 321; diâmetro do eletrodo = 2.4 mm

(c) Parâmetros de Chihoski: v - não foi fornecida; gap = 1.52 mm; tungstênio resfriado a água; diâmetro do eletrodo = 3.0 mm

(d) Parâmetros de Glickstein: v = 2.12 mm/s (BOP); SOP = 10s; gap = 1.90 mm; alloy 600; diâmetro do eletrodo = 1.4 mm; I = 90 A

* Os valores foram tirados diretamente dos gráficos

" Bead-on-plate (cordão sem deposição)

** Não houve fusão do metal-base

*** Os eletrodos foram truncados de 0.12 mm (exceto o de 180°)

" Spot-on-plate (arco estacionário - ponto fundido)

aumenta e esta diferença torna-se mais acentuada chegando até quase a metade nas correntes mais elevadas [2]. A Figura 9 mostra o efeito do ângulo do eletrodo para várias correntes de soldagem.

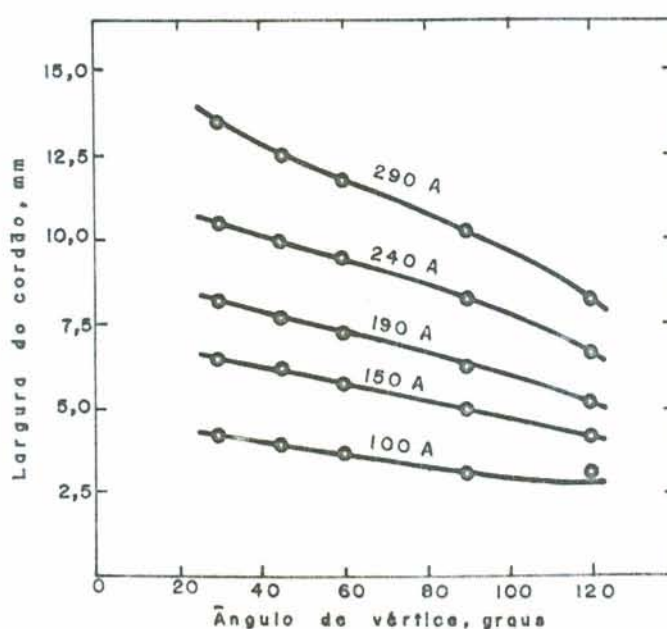


FIGURA 9 - Largura do cordão de solda em relação ao ângulo do eletrodo para várias correntes de arco [2].

Trabalhos tal como o de KEY [10], apresentam as mesmas características de decréscimo da largura com o aumento do ângulo do eletrodo. Neste caso, a configuração da extremidade do eletrodo utilizado foi diferente do anterior já que a ponta foi truncada. Operando com arco móvel e estacionário, obteve os resultados tabelados abaixo, Tabela 7.

Com os dados da Tabela 7, montou-se o gráfico da Figura 10 com o objetivo de comparar-se a influência do ângulo e do movimento do arco na largura da solda. Pelos valores da tabela, vê-se que há, de modo geral, um decréscimo da largura com o au-

mento do ângulo, com excessão dos ângulos extremos.

TABELA 7 - Influência da ponta do eletrodo na largura do cordão de solda [10].

Ângulo do eletrodo, graus*	Largura do cordão, mm	
	SOP**	BOP***
15	6.55	6.51
30	6.92	6.91
45	6.95	6.91
60	6.06	6.02
75	5.05	5.53
90	4.93	5.51
120	5.08	4.82
180	5.69	4.92

* Pontas truncadas de 0.125 mm

** SOP - Spot-on-plate

*** BOP - Bead-on-plate

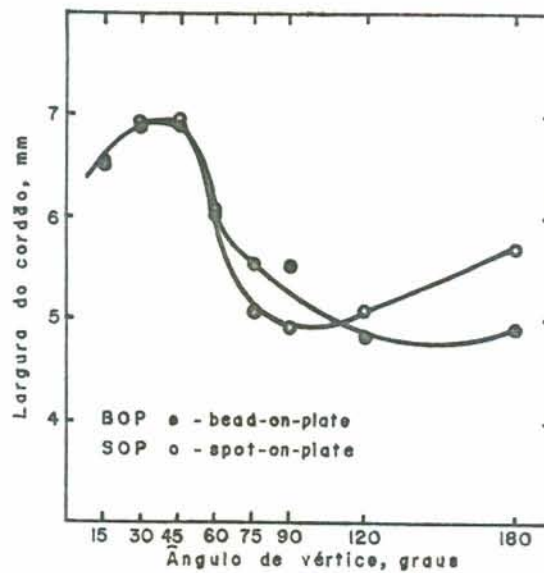


FIGURA 10 - Influência do movimento do arco na largura da poça de fusão e no cordão [10].

Pela Figura 10, entre um ponto fundido (arco fixo) e um cordão (arco móvel), as curvas são aproximadamente iguais para pequenos ângulos do eletrodo. No início a largura cresce com o aumento do ângulo, valores máximos para 30° e 45°, após estes valores decrescem para um mínimo, crescendo novamente para ângulos mais obtusos. Entre um arco estacionário e móvel há uma diferença acentuada na largura para ângulos maiores que 60°, sendo este valor maior para arcos fixos.

GLICKSTEIN et alii [6], obtiveram resultados semelhantes ao anterior. Utilizando eletrodos truncados, arcos estacionários e móveis, encontraram os resultados das Tabelas 8 e 9.

TABELA 8 - Efeito da configuração do eletrodo na largura do ponto fundido para um arco estacionário. Tempo de permanência: 10 s [6].

Ângulo do eletrodo, graus*	Largura, mm	Truncação, mm**	Largura, mm
15	6.45	0.12	6.75
30	6.75	0.25	6.35
45	6.85	0.50	6.29
60	6.40	0.89	5.68
90	5.33	1.27	5.28
180	5.48	1.90	4.57

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°)

** Os eletrodos usados nesta parte do estudo tem um ângulo de 30°

Com os valores das tabelas, para eletrodos com vários ângulos e eletrodos com várias truncações, obtiveram-se as Figuras 11 e 12.

Na Figura 11, pode-se verificar que há um aumento na largura do cordão de solda até um valor máximo, tanto para um arco estacionário como para móvel, e depois um decréscimo com o aumento do ângulo.

TABELA 9 - Efeito da configuração do eletrodo na largura do cordão para um arco móvel. Velocidade de avanço: 127 mm/min [6].

Ângulo do eletrodo, graus*	Largura, mm	Truncação, mm**	Largura, mm
15	4.69	0.12	5.33
30	5.33	0.25	5.23
45	5.02	0.50	5.08
60	4.95	0.89	4.47
90	4.31	1.27	4.36
180	4.31	1.90	4.06

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°)

** Os eletrodos usados nesta parte do estudo tem um ângulo de 30°

No caso do arco móvel, a máxima largura é para um ângulo de 30°, enquanto que para um arco estacionário este valor é máximo para 45°. Além disso, todos os valores da largura para o arco fixo são maiores do que para o arco móvel. Isto poderia ser devido a quantidade de calor imposto pelo arco estacionário à peça ser maior devido ao tempo de permanência de 10 s, aumentando o tamanho do ponto fundido e, portanto, as larguras em relação ao cordão obtido pelo arco móvel com as mesmas extremidades do eletrodo.

Como no caso anterior, para os ângulo extremos, não há

uma diminuição da largura com o aumento do ângulo, coincidindo com as características do trabalho de KEY [10]. Entre os dois trabalhos, a maior diferença é com relação a largura obtida para os dois arcos estacionários, provavelmente devido ao tempo de permanência, 2 e 10 s.

Com um eletrodo de ângulo constante (30°) e várias trunicações, pode-se notar pela Figura 12, um decréscimo da largura com um aumento na truncação da ponta. Este decréscimo é de modo linear, sendo que as larguras para o arco estacionário são também maiores do que para um arco móvel (devido ao tempo de permanência). Se analisar-se de modo a considerar um eletrodo mais truncado, como um aumento no ângulo (mais obtuso), verifica-se que a largura para uma mesma intensidade de corrente diminui com o aumento do mesmo.

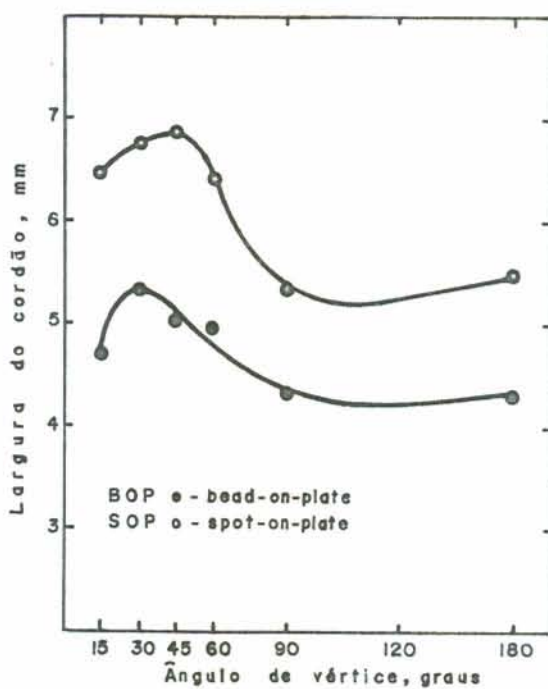


FIGURA 11 - Influência da ponta do eletrodo na largura do cordão de solda para os dois arcos, móvel (127 mm/min) e estacionário (10 s) [6].

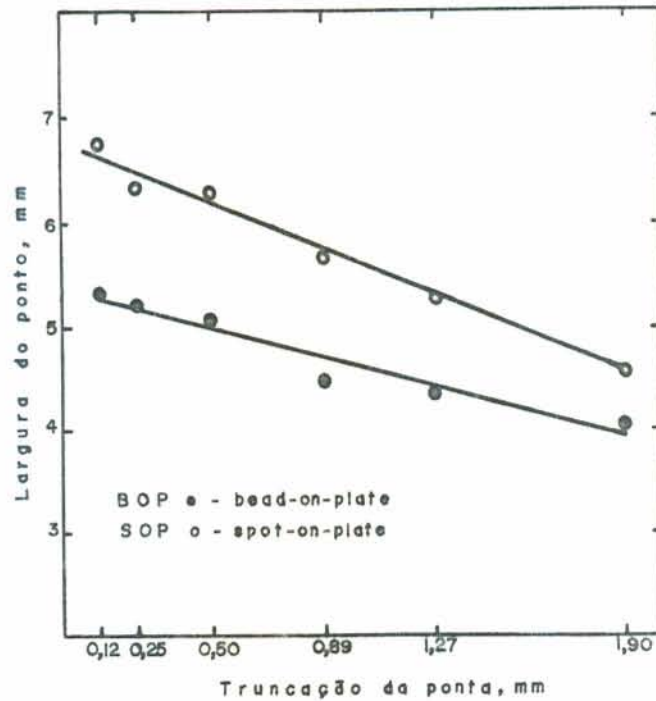


FIGURA 12 - Influência da truncação da ponta do eletrodo na largura do cordão de solda e do ponto fundido. Arco móvel (127 mm/min) e estacionário (10 s) [6].

2.3.1 - Influência da espessura dos corpos de prova na largura do cordão de solda

Para efeito de estudo, SPILLER & MacGREGOR [4] convencionaram classificar os corpos de prova em três classes: grosso, médio e fino. Um corpo de prova seria considerado grosso quando a penetração do cordão de solda não vai além de 30% da espessura do mesmo. Dentro destas condições, os resultados obtidos experimentalmente encontram-se de forma gráfica na Figura 13, para três velocidades diferentes de soldagem. Como resultado encontrou-se que a largura do cordão de solda é uma função linear do ângulo de vértice e decresce com o aumento do mesmo.

Todos os trabalhos anteriormente analisados comportaram-se como corpo de prova grosso, com menos de 30% de penetração do cordão de solda, conforme a classificação acima.

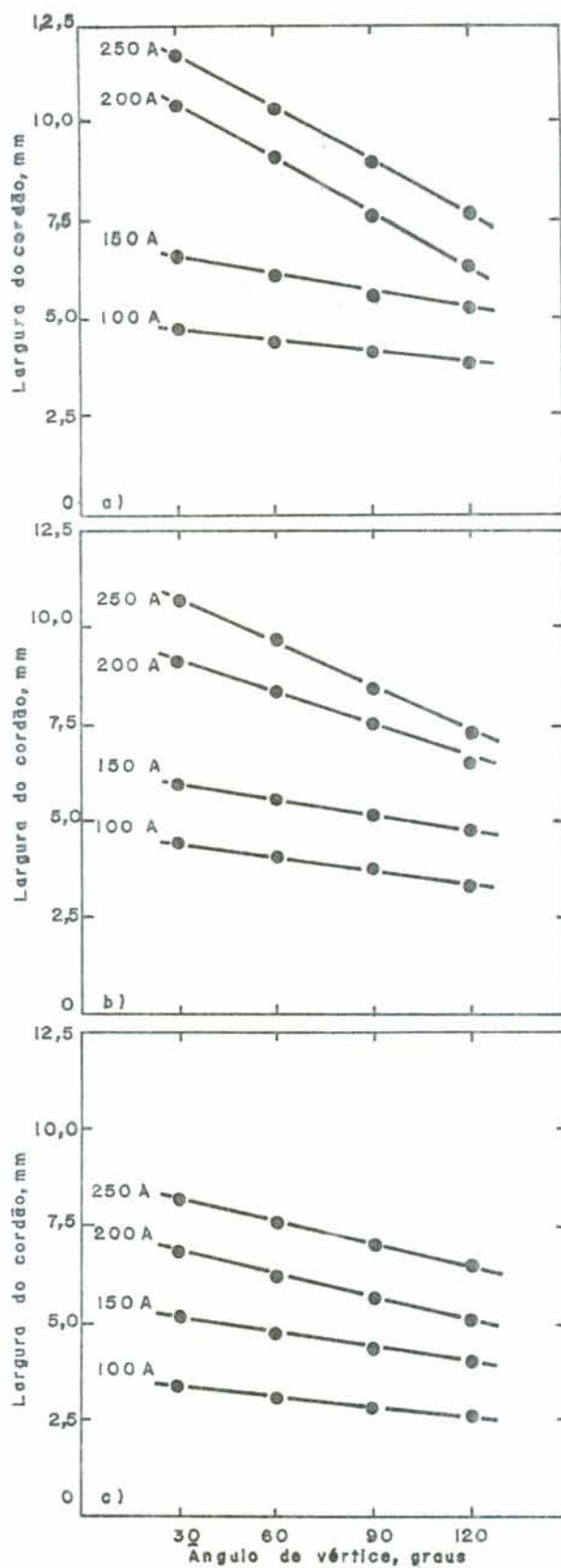


FIGURA 13 - Largura do cordão de solda em função do ângulo de vértice do eletrodo. Velocidade de trabalho : (a) 150 mm/min, (b) 225 mm/min, (c) 300 mm/min, [4].

Para chapas finas, em que a penetração do cordão fica acima de 70% da espessura, SPILLER encontrou que a largura é virtualmente constante e independente do ângulo de vértice.

Do exposto anteriormente com relação a peças de espessura grossa, segundo a classificação de SPILLER, verifica-se que os trabalhos de GLICKSTEIN e KEY apresentam resultados que diferem dos outros com relação aos ângulos de afiação extremos (no caso 15° e 180°). Com os outros ângulos utilizados, verifica-se de um modo geral uma diminuição da largura com o aumento do ângulo para uma determinada intensidade de corrente. SAVAGE e também SPILLER, encontraram um decréscimo na largura com o aumento do ângulo, trabalhando com ângulos entre 30° e 120°. Outra diferença foi quanto ao formato do ângulo de extremidade, que foi mantido agudo (com a ponta fina), enquanto que nos trabalhos citados houve uma truncação.

Com relação a peças finas, o resultado de SPILLER difere dos resultados obtidos para peças espessas, sendo o único trabalho encontrado na literatura, não sendo possível efetuar-se uma comparação de resultados o que deixa margem a dúvidas. Para chapas de espessura média, não encontrou-se nenhuma citação da influência na largura. A Tabela 10, fornece as conclusões de SPILLER.

TABELA 10 - Resumo dos resultados e recomendações gerais para os ângulos extremos estudados [4].

Largura relativa			
Ângulo do eletrodo, graus	Chapa fina, 70 - 100%	Chapa média, 30 - 70%	Chapa grossa, menos de 30%
30	nenhuma mudança significativa	larga	larga
120		estreita	estreita

2.4 - Penetração da solda

A profundidade de penetração é a máximo medida abaixo da superfície da peça, em que houve fusão do metal. Avaliando os efeitos dos parâmetros de soldagem TIG na geometria do cordão de solda, SPILLER & MacGREGOR [4], consideraram a influência da espessura da chapa utilizada (corpo de prova) relativa a penetração requerida. É conveniente considerar três classes de espessura: "fina", "intermediária" e "grossa". Fina onde a penetração é entre 70 e 100%, intermediária entre 30 e 70% e espessa onde a penetração não excede 30% da espessura da chapa.

2.4.1 - Influência da espessura do corpo de prova

2.4.1.1 - Chapa espessa

Dentro da classificação acima trabalhando com peças espessas (aquelas que apresentam uma retirada de calor tridimensional), SAVAGE et alii [2] consideraram que, dentro de um erro experimental de medição, para velocidade de soldagem a uma distância eletrodo-peça constantes, a área da secção transversal do cordão de solda não é afetada pelo ângulo do eletrodo, sendo influenciada somente pela corrente do arco. A Figura 14, mostra o aumento na profundidade de penetração observada conforme o ângulo aumentou. Nota-se que este efeito torna-se mais pronunciado à medida que a corrente de soldagem é aumentada. Estudando a influência da distribuição de temperatura no eletrodo, verificou-se que a temperatura aumenta, conforme o ângulo aumenta, sendo consistente com o fato de que a vida do eletrodo foi maior para ângulos menores.

Segundo SPILLER [4], a penetração, embora mudando com o ângulo, não exhibe qualquer tendência definível. Descontando aqueles poucos testes os quais deram mais do que 50% de penetração, não há relacionamento claro entre o ângulo de vértice

e penetração. A Figura 15, mostra a relação da penetração com ângulos do eletrodo, e a Figura 16 desenhos das macrosecções.

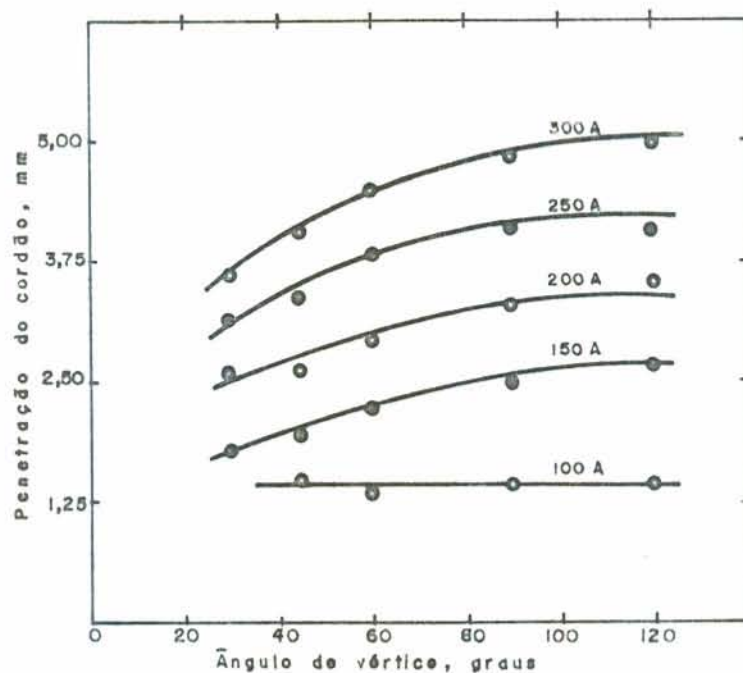


FIGURA 14 - Penetração com relação ao ângulo de vértice para várias correntes de soldagem [2].

Analisando a Figura 15a, soldagem com velocidade mais baixa, pode-se notar que para intensidades de corrente mais elevadas há um aumento na penetração com o aumento do ângulo de vértice do eletrodo. Na faixa até 150 ampères, nota-se uma diminuição da penetração com o aumento do ângulo e esta é mais acentuada diminuindo a intensidade de corrente. Para o ângulo maior (120°), tanto para altas amperagens como para baixas, há um decréscimo na penetração, sendo mais acentuado à medida que diminui a corrente.

Na Figura 15b, a penetração comporta-se de modo bastante aproximado, a não ser pela curva de alta amperagem (250 A).

Finalmente na Figura 15c, tem-se um aumento da penetração

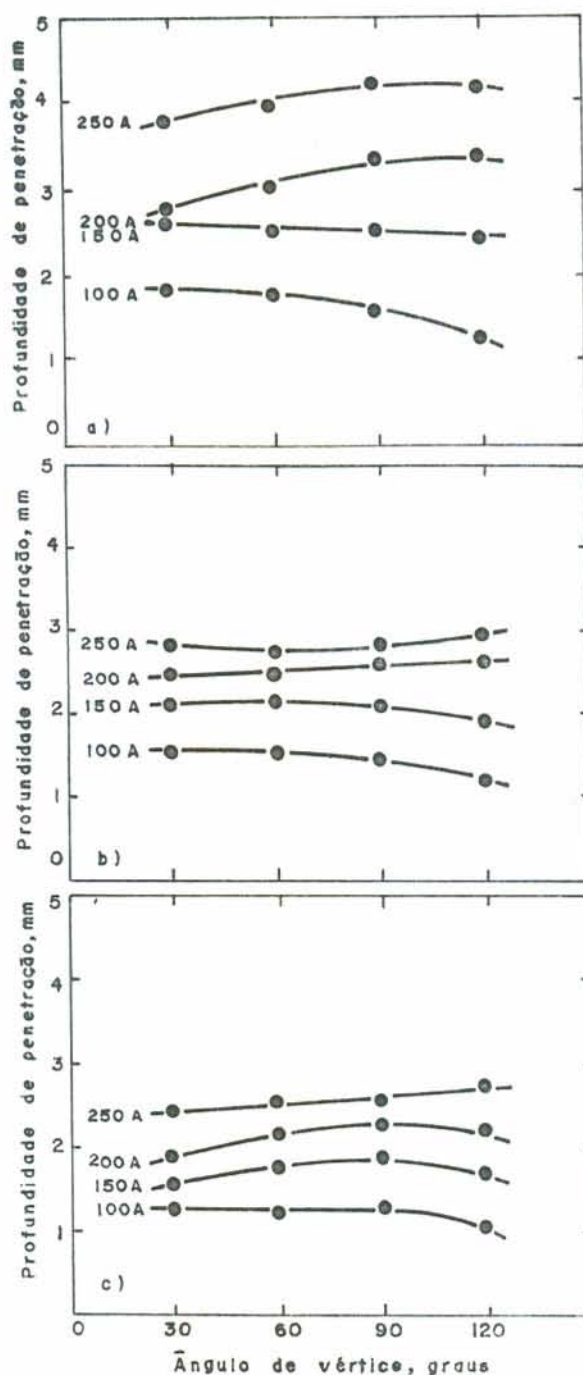


FIGURA 15 - Profundidade máxima de penetração com relação ao ângulo de vértice do eletrodo. Velocidade de trabalho: (a) 150 mm/min, (b) 225 mm/min, (c) 300 mm/min [4].

com o aumento do ângulo de vértice e um decréscimo com o ângulo maior. Do exposto acima, pode-se observar que há uma variação na penetração, para uma intensidade de corrente constante, com a variação da velocidade de avanço da soldagem, em função

do ângulo do eletrodo. Com relação a esta velocidade e levando em conta a classificação de chapa "fina" e "grossa", pode-se notar que à velocidade de 150 mm/min a chapa comporta-se como fina dando maior penetração e a 300 mm/min como grossa.

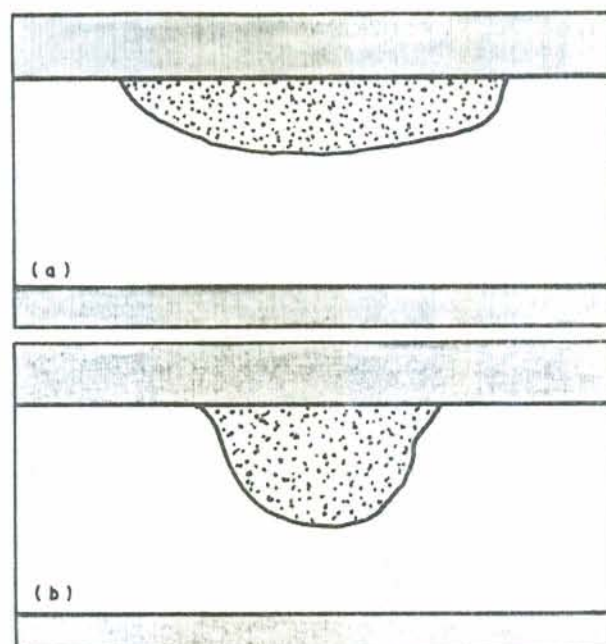


FIGURA 16 - Desenhos de macrosecções para os ângulos extremos, em 200 A e uma velocidade de trabalho de 150 mm/min: (a) 30°, e (b) 120°. Aumento 5x, [4].

Os desenhos acima foram obtidos das figuras (fotografias) do trabalho de SPILLER e mostram a maior profundidade de penetração para o ângulo maior (120°). Os resultados foram apresentados somente na forma gráfica.

Efetuada uma série de cordões de solda sobre chapas de aço (bead-on-plate) e pontos fundidos (spot-on-plate), como já citado, GLICKSTEIN et alii [6] obtiveram os resultados das Tabelas 11 e 12 com variação do ângulo do eletrodo para a profundidade de penetração.

A Figura 17, mostra o esquema de truncamento da ponta do eletrodo utilizado nos testes. O eletrodo é afiado com um determinado ângulo e depois seccionado de uma forma plana com um determinado valor.

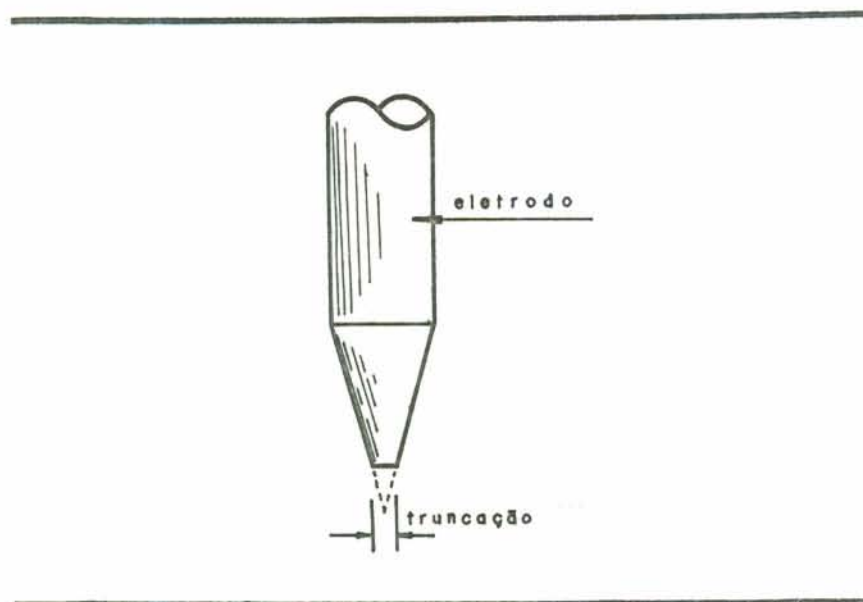


FIGURA 17 - Esquema de truncamento da ponta dos eletrodos.

TABELA 11 - Efeito da configuração do eletrodo na profundidade de penetração do ponto fundido para soldagem estacionária. Tempo de permanência: 10 s [6].

Ângulo do eletrodo, graus*	Penetração, mm	Truncação, mm**	Penetração, mm
15	0.81	0.12	1.06
30	1.06	0.25	0.89
45	1.11	0.50	0.91
60	0.81	0.89	0.78
90	0.71	1.27	0.71
180	0.76	1.90	0.66

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°)

** Os eletrodos usados nesta parte tem um ângulo de 30°

Pela tabela verifica-se que para o ponto fundido por um arco estacionário, a penetração é maior para os ângulos de 30° e 45°, comportando-se do mesmo modo para o eletrodo de ângulo fixo com várias truncações.

TABELA 12 - Efeito da configuração do eletrodo na profundidade de penetração do cordão de solda para um arco móvel de 127 mm/min [6].

Ângulo do eletrodo, graus*	Penetração, mm	Truncação, mm**	Penetração, mm
15	0.96	0.12	1.09
30	1.09	0.25	1.06
45	1.01	0.50	1.11
60	0.96	0.89	1.01
90	0.88	1.27	0.93
180	0.76	1.90	0.86

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°)

** Os eletrodos usados nesta parte tem um ângulo de 30°

Os dados da tabela acima, indicam que a máxima penetração ocorreu para os eletrodos com 30 e 45 graus. Portanto, excluindo o ângulo de 15°, a profundidade aumentou à medida que o ângulo da extremidade do eletrodo foi diminuído de 180° para 30°. A Figura 18, mostra de forma gráfica os resultados obtidos para a penetração, com a variação dos ângulos com truncação constante.

A intensidade de corrente foi mantida constante, igual a 90 A. É interessante notar que entre os arcos, a maior e menor profundidade de penetração é para o arco fixo (estacionário). EROKHIN (conforme citado em [6]), observou similar efeito de um

pico de tensão e máxima penetração em seu estudo da influência da geometria do eletrodo na penetração da solda. Ele explica seu resultado notando que o aumento da penetração com um afiamento da ponta do eletrodo é acompanhada por um aumento na pressão do jato do arco e na densidade de corrente que ele também mediu na superfície do ânodo. A redução na penetração e na pressão do arco para os ângulos menores (15°), é explicada com base que a energia altamente concentrada no ânodo, provavelmente obriga o material evaporar rapidamente e reconstruir um poderoso penacho no ânodo. Isto diminui a pressão do arco sobre o ânodo que resulta em menor penetração.

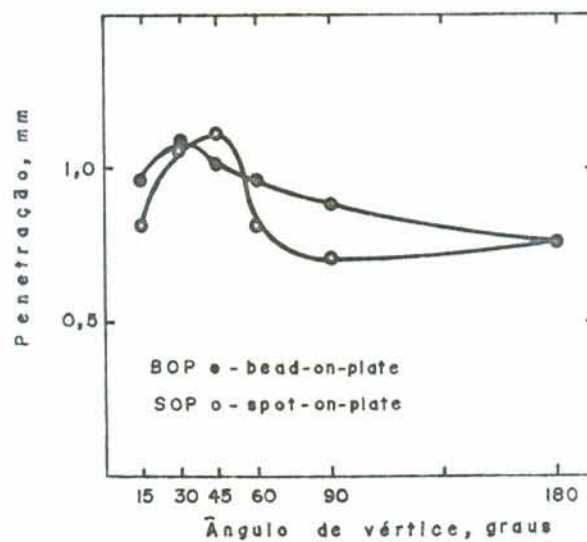


FIGURA 18 - Efeito do ângulo da ponta do eletrodo na penetração para os dois tipos de arcos: fixo e móvel [6].

STEPANOV & NECHAEV [11], efetuaram um trabalho para determinar experimentalmente a pressão do arco e mostrar seu efeito na profundidade de penetração do metal, em relação aos principais parâmetros de soldagem e, também, determinar o efeito causado pela forma com que é afiado o eletrodo. O formato da geo-

metria foi um ângulo de 30° truncado de 0.5 mm e uma ponta esférica. A dependência da pressão do arco conforme a corrente de soldagem, com os dois tipos de ponta está mostrado na Figura 19.

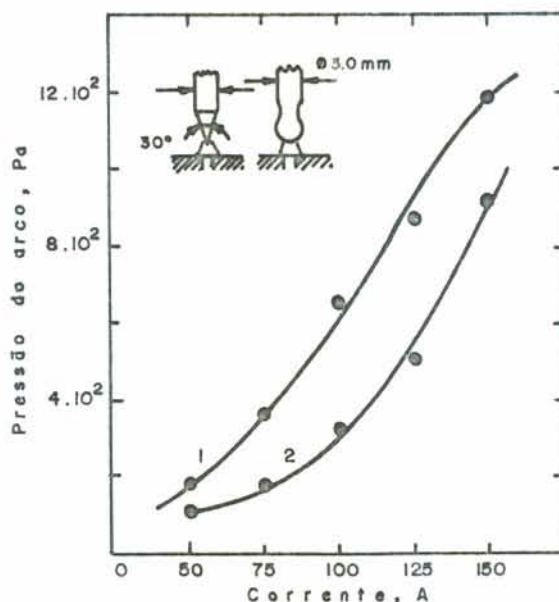


FIGURA 19 - Dependência da pressão específica do arco sobre a corrente de soldagem; (1) eletrodo com ponta aguda, (2) eletrodo com ponta esférica [11].

É visto que a pressão do arco aumenta com o aumento na corrente. Para a corrente constante, entretanto, a pressão do arco é maior em soldagem com o eletrodo agudo do que esférico, causando uma maior penetração. Isto é explicado pelo fato que a densidade de corrente no primeiro caso é consideravelmente maior do que no último. Na ponta esférica a superfície de emissão de elétrons do cátodo foi aumentada, o que levou a uma redução na densidade de corrente e na coluna do arco, e também a uma redução na energia cinética do jato catódico.

Estudando também a força do arco e sua influência na for-

mação de defeitos na solda, SAVAGE et alii [12], encontraram como resultado das medidas que a força independe do ângulo da extremidade do eletrodo. Isto está contrário aos trabalhos anteriormente citados.

O efeito da truncação da ponta do eletrodo na penetração do corpo de prova está mostrada na Figura 20.

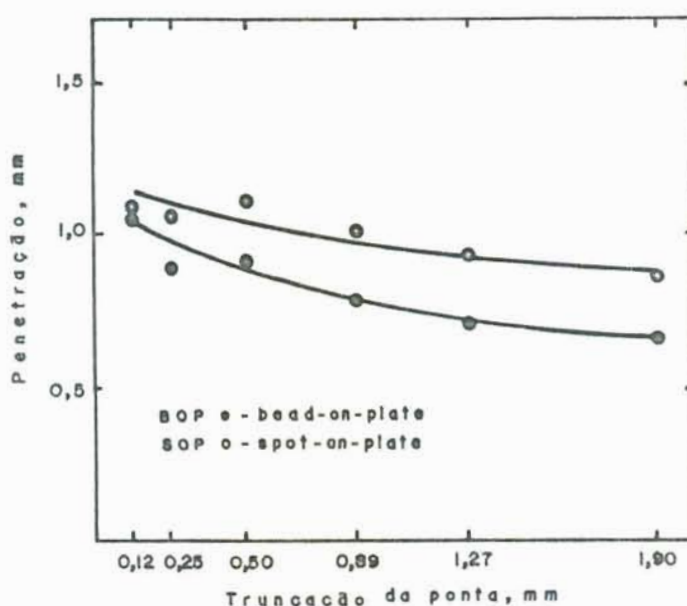


FIGURA 20 - Efeito da truncação da ponta do eletrodo na penetração [6].

Pela figura acima, nota-se uma diminuição da penetração à medida em que aumentou-se o tamanho da truncação do eletrodo, tanto para arco móvel (cordão de solda) como para o arco estacionário (ponto fundido), indicando um decréscimo na eficiência de transferência de calor com pontas obtusas.

No estudo de EROKHIN, uma diminuição na penetração da solda foi também achada à medida que o obtusamento da ponta aumentou. Isto foi atribuído ao decréscimo acompanhado na medida da pressão do arco.

CHIHOSKI [13] estudou o efeito do formato da ponta do eletrodo sobre o arco soldando alumínio. Em seu trabalho a tensão foi mantida constante, variando o comprimento do arco, ficando difícil de se fazer uma comparação. Com eletrodos de 30° truncados, verifica-se que com altos valores de corrente, os eletrodos mais finos dão maior penetração para menos corrente, e iniciam mais facilmente o arco; entretanto, são prováveis de tocar a poça e interromper a solda ou deixar inclusões de tungstênio. Eles são mais sujeitos a mudanças de forma pela erosão do arco ou contaminação. KEY [10] estudou a possibilidade de obtenção de uma combinação ótima da geometria ânodo/cátodo e gás de proteção com relação ao cordão de solda. Trabalhando com eletrodos com os ângulos variando de 15° a 180°, truncados de 0.125 e 0.5 mm, obteve maiores penetrações com aumentos dos ângulos de vértice. As diferenças maiores foram obtidas com ângulos de 15° a 90°. A profundidade máxima e a largura mínima da zona de fusão ocorreram para ângulos de vértice na ordem de 75° a 90°. O desenho das macrosecções estão mostrados na Figura 21.

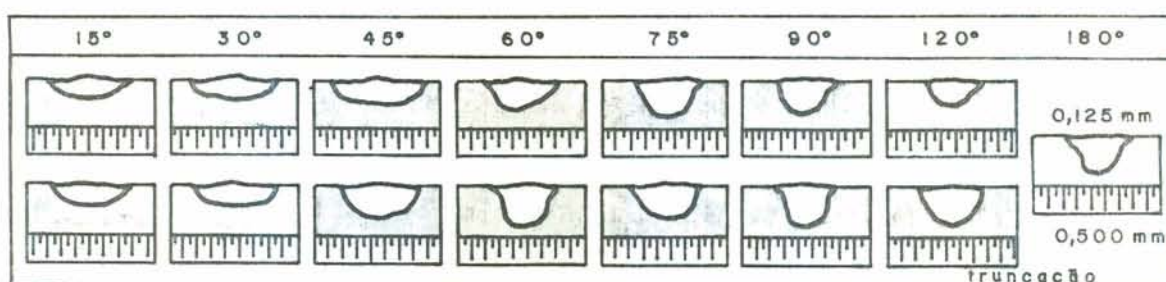


FIGURA 21 - Perfil da zona de fusão, como função da geometria da ponta do eletrodo, com trunicações de 0.125 e 0.5 mm [10].

Pela figura, nota-se que o formato do cordão torna-se mais estreito e muito mais profundo à medida que aumenta-se o ângulo de vértice. Para ângulos acima de 90°, nota-se que as

dimensões da zona de fusão diminuem para ambos os tipos de trunicações. No estudo do arco, notou-se que foram geralmente menos estáveis para eletrodos obtusos do que para agudos, sem levar em conta a composição do gás de proteção. Os arcos com a ponta de 180° são muito instáveis, a não ser que a solda seja feita no limite máximo de corrente para os eletrodos para assegurar emissão uniforme da ponta inteira.

A ótima geometria da ponta do eletrodo é governada pela estabilidade do arco quando soldando em chanfros para os dois tipos de soldas. Nenhuma combinação ótima da geometria da ponta do eletrodo ou composição do gás de proteção foi achada para todas as condições de soldagem. A Tabela 13, fornece os resultados obtidos para uma ponta truncada de 0.125 mm com arco móvel e estacionário.

TABELA 13 - Efeito da extremidade do eletrodo na profundidade de penetração [10].

Ângulo do eletrodo, graus	Profundidade de penetração, mm	
	SOP*	BOP**
15	1.33	1.83
30	1.25	1.40
45	1.60	1.70
60	2.12	2.14
75	2.68	2.96
90	2.81	2.51
120	2.65	2.79
180	2.58	2.53

* Spot-on-plate

** Bead-on-plate

Com os dados da tabela anterior, obteve-se a Figura 22. Nota-se que para ângulos acima de 30° a penetração aumenta até um máximo em 75° (BOP) e 90° (SOP). Acima destes ângulos, há um pequeno decréscimo na penetração e, abaixo de 30° , tem-se um pequeno aumento na penetração. Entre os dois arcos, a máxima penetração foi para o móvel e a mínima para o fixo. Para ângulos truncados de 0.5 mm, não foram apresentados os valores encontrados.

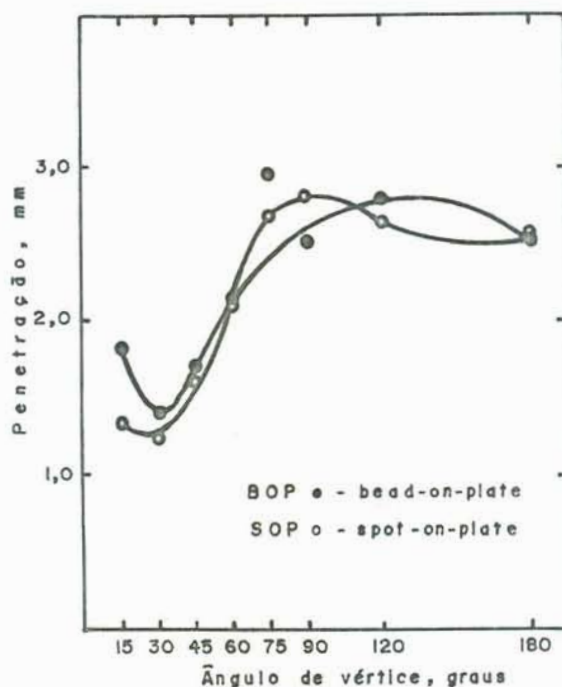


FIGURA 22 - Penetração com a variação da ponta do eletrodo para dois arcos diferentes (móvel e estacionário) [10].

A Tabela 14, faz uma comparação dos resultados obtidos por vários pesquisadores, considerando para uma única intensidade de corrente no caso de trabalhos com várias amperagens.

Todos os trabalhos apresentados foram executados em corpos de prova considerados espessos (penetração menor do que 30%

da espessura da chapa). Os ângulos estudados variaram de um mínimo de 15° até um máximo de 180°, com ou sem truncação, além de eletrodos com ângulo fixo e várias truncações.

TABELA 14 - comparação dos resultados obtidos por vários pesquisadores [10].

Ângulo do eletrodo, graus	(a)	(b)	(c)		(d)	
	Penetração, mm					
	Savage*	Spiller*	Glickstein**		Key***	
	BOP'	BOP	SOP''	BOP	SOP	BOP
15	-	-	0.81	0.97	1.33	1.83
30	1.78	2.79	1.07	1.09	1.25	1.40
45	2.03	-	1.12	1.02	1.60	1.70
60	2.29	2.54	0.81	0.97	2.12	2.14
75	-	-	-	-	2.68	2.96
90	2.54	2.54	0.71	0.89	2.81	2.51
120	2.79	2.41	-	-	2.65	2.79
180	-	-	0.76	0.76	2.58	2.53

(a) Parâmetros de Savage: $v = 127$ mm/s; gap = 1.27 mm; aço carbono; $I = 150$ A

(b) Parâmetros de Spiller: $v = 2.54$ mm/s; gap = 1.40 mm; aço inox 321; $I = 150$ A

(c) Parâmetros de Glickstein: $v = 2.12$ mm/s (BOP); 10 s (SOP); gap = 0.89 mm; liga Alloy 600; $I = 90$ A

(d) Parâmetros de Key: $v = 3.0$ mm/s (BOP); 2 s (SOP); gap = 1.0 mm; aço inox 304; $I = 150$ A

* Valores tirados dos gráficos

** Os eletrodos foram troncados de 0.12 mm (exceto o de 180°)

*** Os eletrodos foram troncados de 0.125 mm

' Bead-on-plate

'' Spot-on-plate

Analisando com relação a um cordão de solda sem deposição de material (bead-on-plate), verificou-se a grande disparidade de resultados. Entre 30° e 90°, os resultados de SAVAGE et alii [2] são coincidentes aos de KEY [10], em que há um aumento na penetração com o aumento do ângulo. GLICKSTEIN et alii [6] apresentou resultados contrários, com um decréscimo da penetração em função do aumento do ângulo entre 30° e 180°. Com relação a pontos fundidos (spot-on-plate), enquanto Key encontra aumento na penetração com o aumento do ângulo, Glickstein apresenta valores dispersivos. Para ângulos de 15°, Key achou um valor mais elevado que para 30° e Glickstein um valor menor. Já SPILLER & MacGREGOR [4], não encontraram qualquer tendência definida ângulo-penetração, para chapas espessas. Acima de 90°, Key encontrou um decréscimo na penetração com o ângulo, enquanto que para Savage existe um aumento.

Cabe salientar, aqui, que os parâmetros utilizados, tais como velocidade de soldagem, o tipo de material empregado como corpo de prova, o comprimento do arco (gap), o formato da ponta do eletrodo (truncado ou não), não são os mesmos para todos os trabalhos anteriores.

2.4.1.2 - Chapas finas

SPILLER & MacGREGOR [4] foram os primeiros que levaram em consideração a espessura das chapas nas características do cordão de solda. O padrão de resultados obtidos em chapas grossas não foi repetido em chapas finas. Por exemplo, penetração total obtida com os dois ângulos de vértice menores não foi conseguida com ângulos grandes. Efetuando a fusão sem deposição de material sobre chapa lisa e sobre duas chapas de topo, os resultados da solda encontrados foram idênticos. A Figura 23 mostra os desenhos das macrosecções para os ângulos de vértice estudados. Para chapas finas não foram apresentados resultados gráficos ou numéricos mas, simplesmente, as fotos das macrosecções,

para soldas de topo.

No caso onde a penetração total não foi obtida (Figuras 23c e 23d), foi achado que isto poderia ser retificado pelo aumento da corrente para ângulos de 90° e 120°. Notou-se que com o aumento da corrente o principal efeito é de aumento da penetração, mas a largura do cordão não é afetada.

A reversão dos resultados que ocorrem entre chapas finas e grossas é explicada em função dos estudos do arco. Encontrou-se que para ângulos maiores, não haveria a presença de um jato de plasma, mas à medida que o ângulo do eletrodo diminui, aparece um jato catódico relativamente forte. Como é postulado que a característica do invólucro em forma de sino (o qual pode ser visto com os ângulos de extremidade menores), é um resultado do jato de plasma golpeando a superfície do banho e sendo defletido por ele, extendendo este conceito argumentou-se que em chapas finas, que dão uma grande profundidade de penetração para qualquer conjunto dado de condições, a superfície do banho é mais facilmente comprimida. Portanto, o pronunciado jato de plasma catódico, quando ocorre, causa uma depressão significativa que tende a conter ou interceptar o plasma e deste modo aumentar a eficiência da transferência de calor no eixo vertical. Por isso, as maiores capacidades de penetração dos ângulos de ponta menores em chapas finas [4]. Este efeito pode ser comparado ao processo de soldagem plasma tipo "keyhole". A Figura 24 é uma representação esquemática do formato do arco atuando sobre as chapas.

As informações práticas deste trabalho são que para penetração total é mais econômico em termos de fonte de potência e categoria de tocha, usar os menores ângulos de eletrodos consistentes com a ausência de defeitos. Entretanto, levando em conta a diferença no mecanismo de penetração entre ângulos "pequenos" e "grandes", os grandes sempre irão produzir (com correntes em

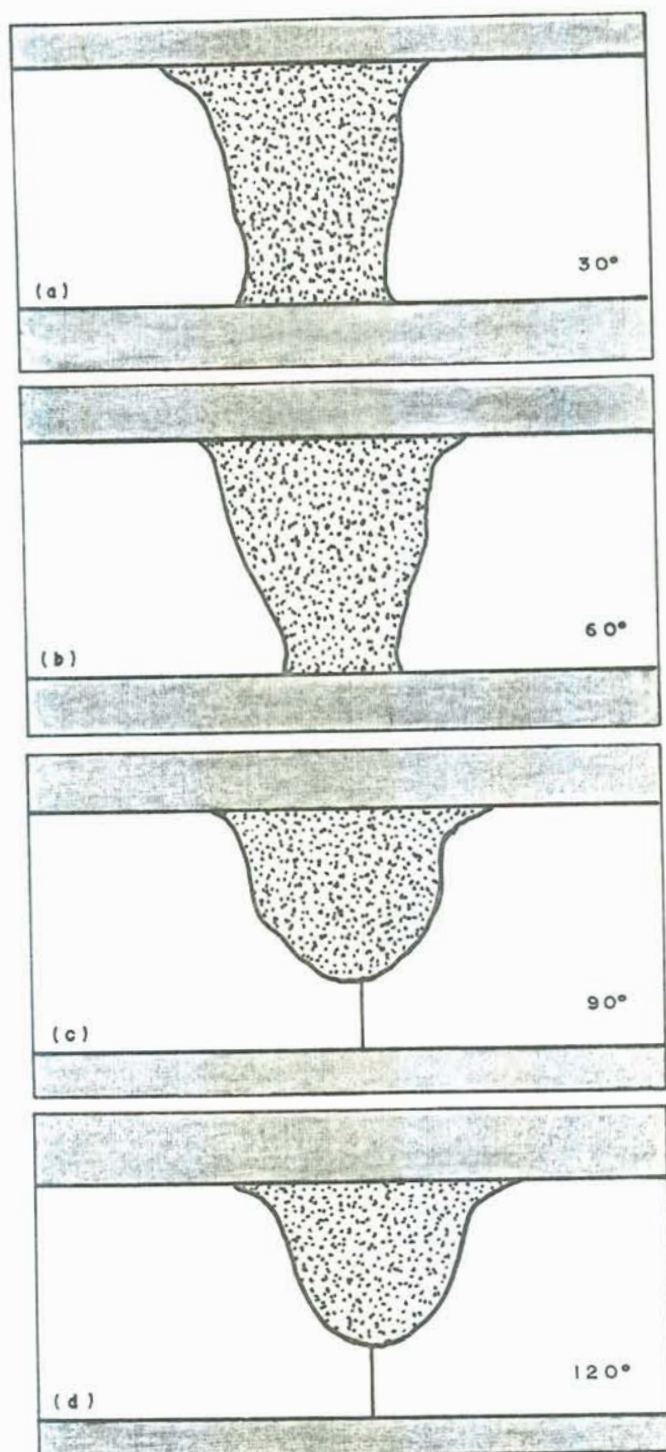


FIGURA 23 - Desenho das macrosecções para a zona fundida com 150 A e velocidade de soldagem de 300 mm/min, junta de topo e espessura de 3.2 mm. (Nota: decréscimo na penetração com aumento do ângulo de vértice). Aumento 5x |4|.

excesso de 50 A) um arco suave [4]. Na Tabela 15, tem-se os resultados de forma resumida.

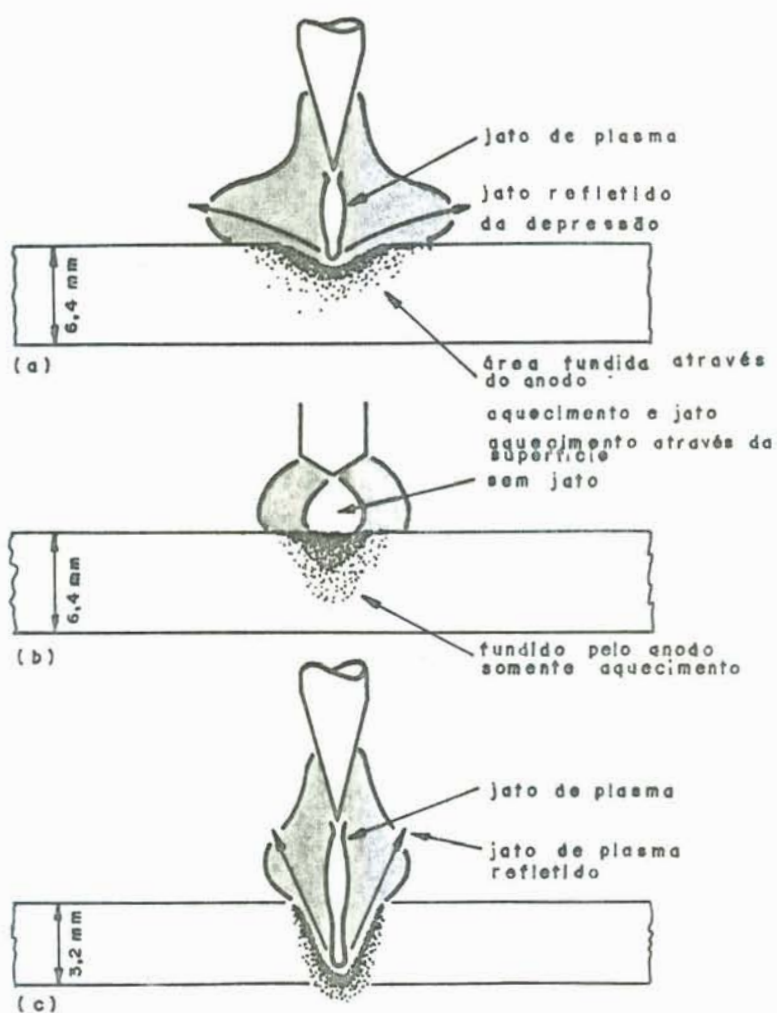


FIGURA 24 - Representação esquemática da configuração do arco TIG. (Nota: modos sugeridos de operação sobre chapas "finas" e chapas "grossas" à mesma corrente nominal com ângulos de vértice extremos). (a) 30°, (b) 120° e (c) 30°, [4].

TABELA 15 - Resumo dos resultados e recomendações gerais [4].

Penetração relativa			
Ângulo do eletrodo, graus	Chapa fina, 70-100%	Chapa média, 30-70%	Chapa grossa, < 30%
30	alta	nenhuma mudança	baixa
120	baixa	significativa	alta

Ângulos de vértices recomendados para prática geral [4]:

(a) Soldas com penetração total de 50 a 200 A (maiores penetrações para correntes mínimas) + 30° a 60°;

(b) Soldas com penetração total de 50 a 200 A com tolerância melhorada + 90° a 120°;

(c) Material de adição e usando menos do que 200 A + 60°;

(d) Material de adição e usando mais do que 200 A, ou adições com mínimas mordeduras + 120°.

Finalmente, em soldagem mecanizada onde a tensão do arco é usada em um sistema fechado para controlar o comprimento do arco, é importante, devido a dependência da tensão no ângulo de vértice, usar sempre o mesmo ângulo para um grupo particular de condições de soldagem estabelecidas [4].

Na bibliografia, não encontraram-se outros trabalhos com relação a chapas finas. Os únicos resultados são, portanto, os apresentados por SPILLER & MacGREGOR [4].

2.5 - Área da secção transversal da solda

SAVAGE et alii [2], medindo a secção transversal dos cordões de solda obtidos em seu trabalho, não encontraram nenhuma influência significativa do ângulo na área medida. Para a

distância eletrodo-peça e a velocidade de soldagem utilizada, somente a corrente do arco exibiu uma influência significativa na área da solda. Foi então proposta uma equação para cálculo da área em função da intensidade de corrente, dada por:

$$A_c = 4,29 \cdot 10^{-4} \cdot I^2$$

onde: A_c - área da secção transversal do cordão de solda (mm^2)
 I - corrente do arco (A)

Plotando os valores encontrados das medidas experimentais em um gráfico, com escala logarítmica, os mesmos caem todos dentro de $\pm 10\%$ da área obtida pela equação acima, representada por uma linha cheia na Figura 25. Portanto, dentro do erro experimental, a área independe do ângulo de vértice. Em seu trabalho, não foram apresentados de forma numérica os valores encontrados nas medições da área.

Segundo os autores [2], se a área da secção transversal da solda mantém-se constante e independente do ângulo da ponta e, como a largura diminui com o aumento do ângulo do eletrodo, logo a penetração aumentaria com este aumento.

SPILLER & MacGREGOR [4] não forneceram nenhuma indicação de cálculo da área das soldas.

GLICKSTEIN et alii [6] obtiveram os resultados apresentados nas Tabelas 16 e 17. Pelos dados das tabelas verifica-se que para uma amperagem constante de 90 A, houve variação da área da secção transversal da solda, e diminuiu linearmente à medida que a truncação aumenta.

Para arco estacionário, os valores máximos da área obtidos foram para os ângulos de 30° e 45° . Há uma tendência a diminuir a área com o aumento do ângulo do eletrodo, sendo que esta variação é do mesmo modo como foi a penetração da solda. Os valores máximos e mínimos da penetração correspondem aos valores máximos

e mínimos da área calculada. Isto se aplica tanto para arco fixo como para móvel e para as pontas de ângulo fixo com várias trunicações.

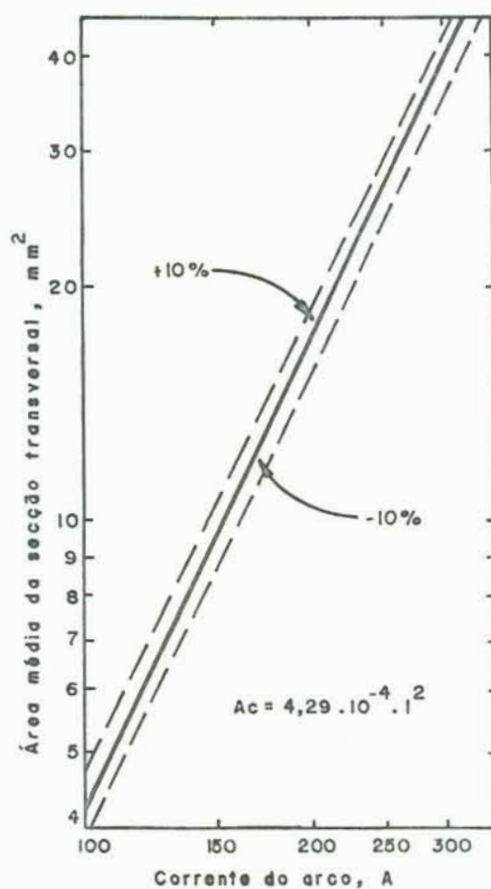


FIGURA 25 - Área média da seção transversal do cordão de solda como uma função da corrente do arco [2].

Aplicando a equação de SAVAGE et alii [2] aos valores encontrados na Tabela 16, achou-se para a intensidade de corrente utilizada que a área é igual a:

$$A_c = 4,29 \cdot 10^{-4} \cdot 90^2 = 3,47 \text{ mm}^2$$

TABELA 16 - Efeito da ponta do eletrodo na área da secção transversal da solda com arco estacionário (ponto fundido). Tempo de permanência, 10 s [6].

Ângulo do eletrodo, graus*	Área, mm ²	Truncação, mm**	Área, mm ²
15	5.87	0.12	6.45
30	6.45	0.25	5.29
45	6.65	0.50	5.62
60	5.74	0.89	4.64
90	4.32	1.27	4.06
180	4.52	1.90	2.78

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°)

** Os eletrodos usados nesta parte do estudo tem um ângulo de 30°

TABELA 17 - Efeito da ponta do eletrodo na área da secção transversal da solda com arco móvel. Velocidade de soldagem, 127 mm/min [6].

Ângulo do eletrodo, graus*	Área, mm ²	Truncação, mm**	Área, mm ²
15	3.42	0.12	4.52
30	4.52	0.25	4.39
45	4.06	0.50	4.39
60	4.00	0.89	3.29
90	3.29	1.27	3.10
180	2.97	1.90	2.70

* Cada eletrodo tem a ponta plana (truncada) de 0.12 mm (exceto o de 180°)

** Os eletrodos usados nesta parte do estudo tem um ângulo de 30°

Como as áreas máxima e mínima se situam entre 6.65 e 4.32 mm², verifica-se que o ângulo exerce influência e não é possível a aplicação da fórmula pois a dispersão fica acima de 10%. Para eletrodos com ângulo fixo (30°) e várias trunçações verifica-se a mesma tendência:

$$\begin{aligned} A_c &= 3.47 \text{ mm}^2 \\ A_{\text{máx.}} &= 6.45 \text{ mm}^2 \\ A_{\text{mín.}} &= 2.78 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Com os valores destas áreas extremas, entrando na equação proposta por SAVAGE, achou-se que a amperagem deveria ser, para o caso de arco estacionário e vários ângulos, 124.5 e 100.4 A. No caso de eletrodos com várias trunçações, 122.6 e 80.5 A.

Para a Tabela 17, com arco móvel:

$$\begin{aligned} A_c &= 3.47 \text{ mm}^2 \\ A_{\text{máx.}} &= 4.52 \text{ mm}^2 \quad \rightarrow \quad I = 102.6 \text{ A} \\ A_{\text{mín.}} &= 2.97 \text{ mm}^2 \quad \rightarrow \quad I = 83.2 \text{ A} \end{aligned}$$

eletrodo (30°) truncado:

$$\begin{aligned} A_c &= 3.47 \text{ mm}^2 \\ A_{\text{máx.}} &= 4.52 \text{ mm}^2 \quad \rightarrow \quad I = 102.6 \text{ A} \\ A_{\text{mín.}} &= 2.70 \text{ mm}^2 \quad \rightarrow \quad I = 79.3 \text{ A} \end{aligned}$$

KEY [10], também encontrou variações da área da secção transversal para uma corrente constante (150 A) com variações na extremidade da ponta do eletrodo. A Tabela 18, mostra os valores encontrados nos cálculos da área.

Aplicando a equação de SAVAGE et alii [2]:

$$A_c = 4,29 \cdot 10^{-4} \cdot 150^2 = 9.65 \text{ mm}^2$$

SOP:	$A_{\text{máx.}} = 11.81 \text{ mm}^2$	\rightarrow	$I = 165.9 \text{ A}$
	$A_{\text{mín.}} = 7.94 \text{ mm}^2$	\rightarrow	$I = 136.0 \text{ A}$
BOP:	$A_{\text{máx.}} = 13.55 \text{ mm}^2$	\rightarrow	$I = 177.7 \text{ A}$
	$A_{\text{mín.}} = 7.35 \text{ mm}^2$	\rightarrow	$I = 130.9 \text{ A}$

TABELA 18 - Efeito da ponta do eletrodo na área da secção transversal da solda [10].

Ângulo do eletrodo, (°)	Área da secção transversal, mm ²	
	SOP (Spot-on-plate)	BOP (Bead-on-plate)
15	7.94	10.32
30	9.35	9.23
45	10.32	10.45
60	10.77	7.35
75	10.90	13.55
90	10.90	11.10
120	11.23	11.42
180	11.81	10.26

Portanto, também neste caso, valores de variação bem acima de 10%. Trabalhando com soldagem spot-on-plate os resultados mostraram que a área aumenta uniformemente com o ângulo de vértice. Entretanto, dispersão nos dados para os resultados bead-on-plate não refletem esta tendência.

Nenhum destes trabalhos apresentou a fórmula empregada para o cálculo das áreas das secções transversais. Verifica-se uma grande diferença de resultados na bibliografia consultada. Chama-se a atenção aqui, que a afiação da extremidade do eletrodo não foi a mesma para todos os trabalhos.

3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 - Material

O material base utilizado nos experimentos foram barras chatas de aço carbono com espessuras de 4.5 e 6.4 mm, cuja composição química encontra-se listada na Tabela 19.

TABELA 19 - Composição química dos corpos de prova utilizados.

Elemento	Peso, %	
	Chapa 4.5 mm	Chapa 6.4 mm
C	0.12	0.30
Si	0.01	0.20
Mn	0.70	0.72
P	0.01	0.017
S	0.01	0.014
Cr	0.01	0.07
Ni	0.01	0.02
Mo	0.01	0.01
V	0.01	0.01
Cu	0.01	0.03
Ti	0.003	0.009

A utilização do aço carbono prende-se ao fato de ser o metal utilizado somente na primeira pesquisa [2] da influência

da ponta do eletrodo e, além disso, segundo MESSAGER [14], a extensão da utilização do processo TIG aos aços carbonos seria provavelmente um dos aproveitamentos tecnológicos mais importante dos anos 80 no domínio da soldagem. Os corpos de prova foram cortados em peças de 50 x 150 mm, retificados em uma retífica do tipo plana para obtenção de superfícies planas, livres de óxidos e completamente desengraxadas com acetona. A superfície foi retificada para possibilitar uma comparação e facilitar as medidas da profundidade e largura da zona de fusão.

3.2 - Eletrodo

O eletrodo utilizado foi do tipo tungstênio toriado com 2% de óxido de tório (ThO_2), classificado como AWS EWTh-2, ponta vermelha, com um diâmetro de 3.0 mm e ângulos de vértice de 30° , 60° , 90° e 120° com uma precisão de $\pm 0.5^\circ$. Os eletrodos foram apontados numa "afiadora de fresa de ponta para gravação" mostrada na Figura 26, e o modo de medida do ângulo indicado na Figura 27.

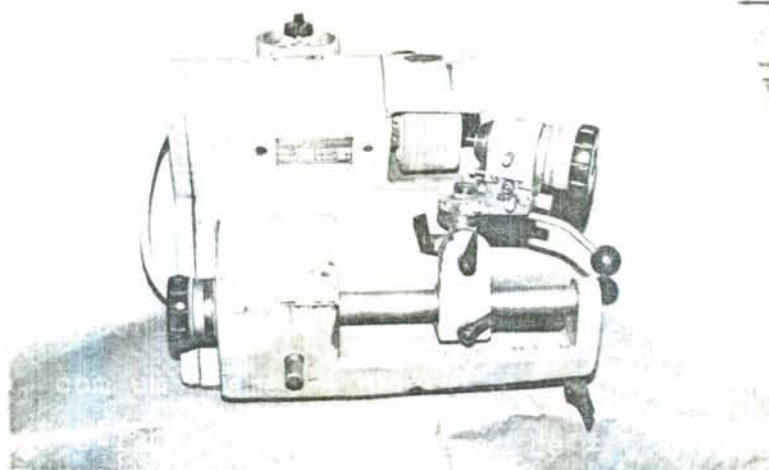


FIGURA 26 - Equipamento utilizado para afiação da extremidade dos eletrodos.

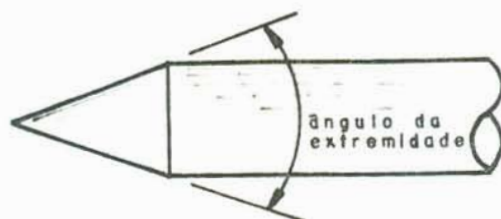


FIGURA 27 - Ângulo cônico do eletrodo.

A escolha de um eletrodo toriado baseia-se no fato que, trabalhando em CC (corrente contínua) com polaridade direta, os mesmos proporcionam uma maior estabilidade do arco, melhoram a emissividade, maior capacidade de transporte de corrente, grande resistência à contaminação e vida mais longa [15, 16, 17].

Medições de temperatura durante a soldagem indicam que os eletrodos de tungstênio toriado operam menos frio do que os eletrodos zirconados e puros [18]. Geralmente, os tamanhos dos eletrodos devem ser escolhidos de modo que trabalhem próximo da capacidade máxima de transporte de corrente. Em tal nível de corrente, o calor do arco é mais concentrado. Isto assegura máxima penetração, um arco estável, alta velocidade de soldagem, e mínima largura e convexidade do cordão de solda [15].

Pesquisadores diferem em qual o tamanho do eletrodo que poderá ser usado para uma corrente específica. Muitos acreditam que os eletrodos menores que manteriam o arco sem perderem metal da extremidade na forma de gotas fundidas ou pedaços sólidos poderão ser selecionados para correntes unitárias. Exemplos de variações encontradas na literatura são dados a seguir. Segundo CARY [19], as correntes recomendadas para um eletrodo de 3.0 mm de diâmetro do tipo EWTh-2 operando em corrente contínua

com polaridade direta, devem variar de 200 a 275 A, enquanto que [15] indica uma variação para as mesmas condições de 250 a 400 ampères e [20] fornece somente o limite máximo de 380 A.

Nos experimentos trabalhou-se com um eletrodo deste diâmetro (3.0 mm), apesar da capacidade máxima do aparelho ser de 250 A, para manter a geometria da ponta do eletrodo o maior tempo possível sem sofrer danos.

A extensão do eletrodo fora do bocal foi mantida constante com 3.0 mm de comprimento. Segundo [15], normalmente, a distância da extensão de um eletrodo além do orifício do bocal de gás é igual a uma ou duas vezes o diâmetro do eletrodo, Figura 28. Já DAVIES [20], recomenda uma distância máxima de 4 a 9 mm,

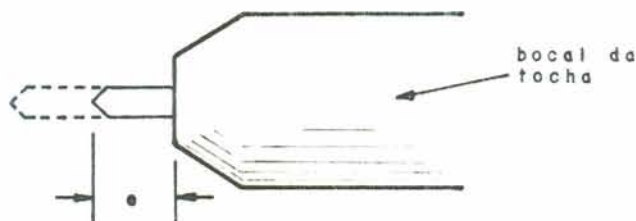


FIGURA 28 - Extensão da ponta do eletrodo fora do bocal da tocha.

mas não especifica o diâmetro do eletrodo. Quanto maior o comprimento da extensão do eletrodo fora do bocal, maior o perigo de haver contato com o metal de trabalho ou vareta de adição (quando houver) e contaminação do mesmo. Ordinariamente, a porção da extensão do eletrodo é comandada principalmente pelo perfil da junta a ser soldada [15].

3.3 - Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem escolhida (125 mm/min) foi determinada em função de defeitos que ocorrem com relação a mesma, tais como mordedura, corcova, instabilidade do arco, entre outras. Corcova consiste em uma série regular de saliências (elevações) no cordão de solda, Figura 29, e ocorre sob certas condições de corrente, tensão, tipo de gás de proteção usado e o ângulo da ponta do eletrodo [4, 21, 12].

Estas condições influenciam a velocidade de trabalho. Na soldagem a arco, é bem sabido que aumentando a velocidade de trabalho além de um certo limite crítico, resulta em deterioração do cordão de solda na forma de mordeduras e/ou corcova [12, 21]. A ocorrência destes defeitos está intimamente associada ao modo com que o metal fundido flui atrás do arco para formar o cordão de solda. A principal razão para os defeitos é o intervalo de tempo entre a goivagem de um canal sobre a superfície da chapa pelo arco e o enchimento deste canal com metal fundido.

Sob as condições de soldagem que produzem defeitos na solda, o metal fundido debaixo do arco é forçado a mover-se em direção ao fundo da poça e uma superfície goivada sólida aparece sob o arco, conforme está esquematizado na Figura 30. Como o arco move-se na frente, defeitos não ocorrem se o metal fundido no fundo da poça flui adiante e enche totalmente a região goivada.

Reciprocamente, solidificação rápida do metal fundido no fundo da poça ou enchimento imperfeito com o metal fundido resulta na formação de defeitos [12]. As propriedades da superfície goivada são fatores importantes na formação de defeitos.

A literatura cita dois fatores como sendo os principais causadores do movimento do metal fundido e o aparecimento de superfícies goivadas. Primeiramente, corcova é mantida pela

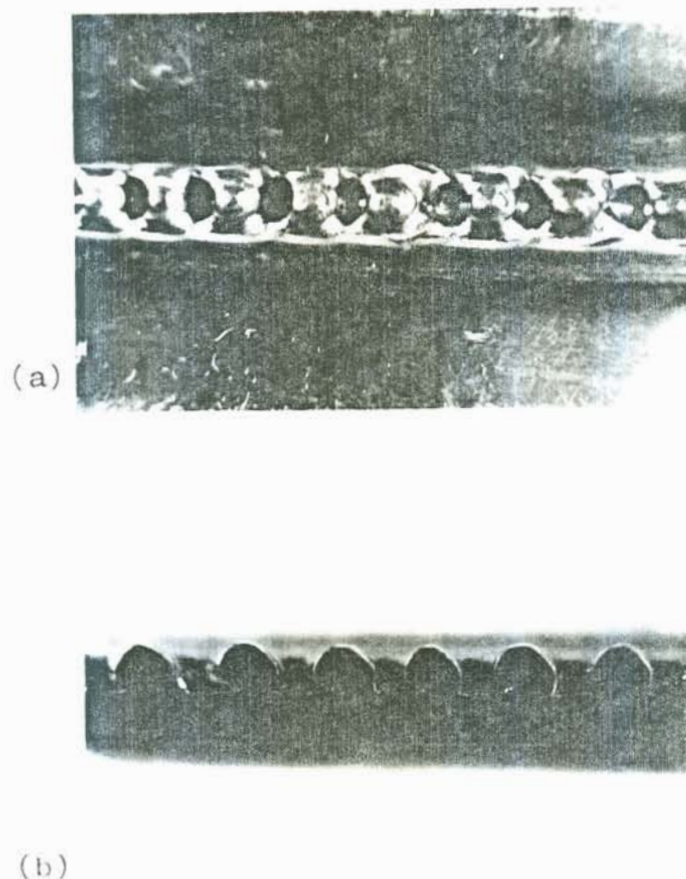


FIGURA 29 - Aspecto de uma solda com corcova; (a) vista superior da formação no cordão de solda e (b) corte longitudinal mostrando a penetração.

criação de pressões internas diferentes em partes diferentes da zona fundida devido a tensão superficial [21]. Esta tensão superficial seria esperada ter uma influência muito forte sobre o formato do cordão, desde que metais líquidos tem uma energia superficial mais alta do que qualquer líquido conhecido e controlam o "molhamento" na borda externa da poça. A outra razão para o aparecimento de superfícies goivadas é a pressão do arco, a qual atua sobre o metal fundido na frente da poça. Em geral, isto é considerado ser o maior fator responsável para o movimento do metal fundido [12]. Um fluxo super crítico foi proposto como um fator adicional que pode afetar o movimento do metal fundido.

Quando a espessura do metal fundido na frente da poça é reduzido a um valor crítico pela pressão do arco, a taxa de fluxo do metal fundido é acelerada pelo fenômeno do fluxo super crítico e o líquido tende a acumular-se em algum ponto sobre o caminho do fluxo [12].

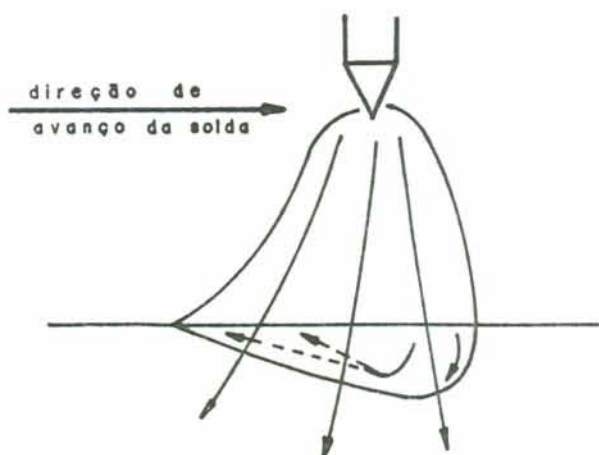


FIGURA 30 - Aspecto do movimento do metal fundido conforme o avanço do arco [22].

É de interesse notar que aumentando a velocidade diminui-se o tempo de soldagem e aumenta-se a eficiência de fusão (a maior parte do calor é usado para formar a gota fundida e uma proporção menor é usada para elevar a temperatura nos arredores do metal-base). Com isto se produz uma solda de secção transversal maior e aumento da penetração quando comparada a uma solda mais lenta feita com a mesma energia imposta [21].

Procurou-se uma velocidade compatível com a diminuição destes defeitos, principalmente a não formação de corcova. Uma

das principais limitações encontradas para altas velocidades de soldagem foi a geometria da ponta do eletrodo. À medida que aumentou-se o ângulo de vértice de 30° para 120°, a velocidade de soldagem pode ser aumentada para mais de 2 vezes sem haver o aparecimento do defeito. Esta medida experimental está de acordo com a bibliografia consultada [12].

Foram feitos testes com diferentes vazões de gás e velocidades de soldagem para encontrar uma que fosse compatível com os ângulos utilizados. O ângulo crítico para o aparecimento de corcova foi o de 30°. As vazões utilizadas de 5, 10 e 15 l/min não tiveram influência sobre os defeitos. A Tabela 20 mostra as características da utilização do ângulo, velocidades e vazões do gás.

TABELA 20 - Relação da vazão do gás de proteção e velocidade de soldagem para um eletrodo de 30° com o aparecimento de corcova.

Vazão do gás, l/min	Velocidade de soldagem, mm/min	Característica do cordão
5	400	corcova
5	300	corcova
10	300	corcova
10	200	corcova
10	150	corcova
15	250	corcova
10	125	sem defeito

Corcova sob condições normais de soldagem somente ocorre na presença de oxigênio, presente no gás de proteção ou como óxido na superfície da peça [21]. A Figura 31, para várias

velocidades de avanço (soldagem) e os ângulos dos eletrodos utilizados na parte experimental, indica a região de formação de defeitos, para uma distância eletrodo-peça constante e igual a 1.5 mm. Nota-se que a região crítica é para ângulos menores do que 60° e com velocidades acima de 150 mm/min.

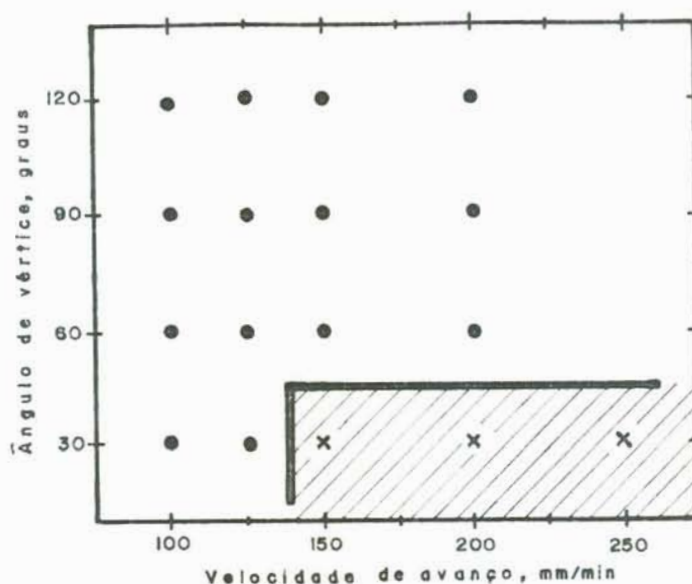


FIGURA 31 - Região de aparecimento de defeito para um eletrodo de diâmetro igual a 3.0 mm e gap de 1.5 mm.

3.4 - Gás de proteção

A vazão do gás de proteção foi escolhida como 10 l/min para assegurar uma proteção eficaz do cordão. O principal requerimento de um gás de proteção é aquele que exclui o ar da poça de solda, o eletrodo, e o final aquecido da vareta de adição (s_e usada), para evitar a contaminação do depósito de solda. Aumentando o fluxo de gás após a cobertura necessária tem sido verificado aumentar a turbulência sem aumento eficaz da cobertura. Somente suficiente gás de proteção para excluir o ar do local

de solda (e a área aquecida, para metais reativos e ligas) deveria ser usado. Excessivo fluxo de gás, não somente aumenta desnecessariamente o custo, mas pode causar mordeduras e instabilidade do arco. O gás não adiciona calor diretamente na solda, mas afeta o calor imposto. Os gases normalmente utilizados na soldagem TIG são argônio, hélio, misturas argônio-hélio e argônio-hidrogênio. A escolha do gás de proteção pode afetar significativamente a qualidade da solda bem como a velocidade de soldagem. O argônio é o gás mais comumente utilizado, por que, além de ser menos expansivo, apresenta as vantagens de manter um arco mais suave e tranquilo e uma tensão do arco mais baixa para qualquer valor da intensidade de corrente utilizada, Figura 32, ação decapante muito superior na soldagem de ligas leves como consequência de seu maior peso atômico, fácil ignição do arco e seu consumo é menor, o que supõe uma considerável economia nas uniões soldadas [17].

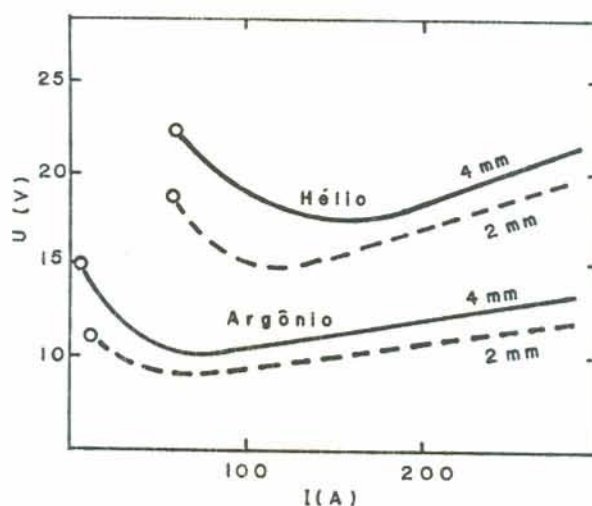


FIGURA 32 - Influência do gás empregado na característica do arco [17].

Para conseguir uma taxa de fluxo do gás de proteção eficaz

o diâmetro do orifício interno do bocal cerâmico foi escolhido como sendo de 13 mm.

3.5 - Equipamento

O equipamento utilizado na parte experimental foi uma fonte do tipo retificador-transformador, marca Prodelec 250, e o processo automatizado através da montagem da tocha de soldagem em uma máquina de oxicorte com a velocidade regulável. No processo manual, o controle do tamanho da poça e nível de penetração podem ser mantidos pela habilidade do soldador, e qualquer tendência para variações ao acaso podem ser compensadas pelo mesmo. A geometria do eletrodo não é um dos mais importantes parâmetros na soldagem manual, provavelmente por que a prática do soldador pode acomodar variações com relativa facilidade [4]. Com o processo automatizado é necessário e importante controlar a geometria da ponta do eletrodo, a tensão do arco, corrente e velocidade de trabalho para controlar a profundidade e largura do cordão.

O corpo de prova foi fixado em uma base construída especialmente para esta finalidade. A base foi projetada para impedir o deslocamento do corpo de prova e também possibilitar um nivelamento do mesmo em relação a passagem do arco elétrico. A Figura 33, mostra o desenho do equipamento, a base com o sistema de fixação do corpo de prova e o sistema de regulagem na parte inferior constituído de três parafusos de nivelamento.

Para manter a distância eletrodo-peça constante em 1,5 mm um relógio apalpador foi montado a tocha de soldagem e deslocado juntamente com o conjunto ao longo da linha a ser efetuada a fusão da peça. Procurou-se manter um nivelamento dentro de uma variação de ± 0.1 mm (na medida do possível). A Figura 34 mostra o conjunto montado. A tocha foi mantida na vertical com relação à peça com um ângulo de 90° . Este ângulo foi avaliado e achado não alterar a tendência geral dos resultados [4].

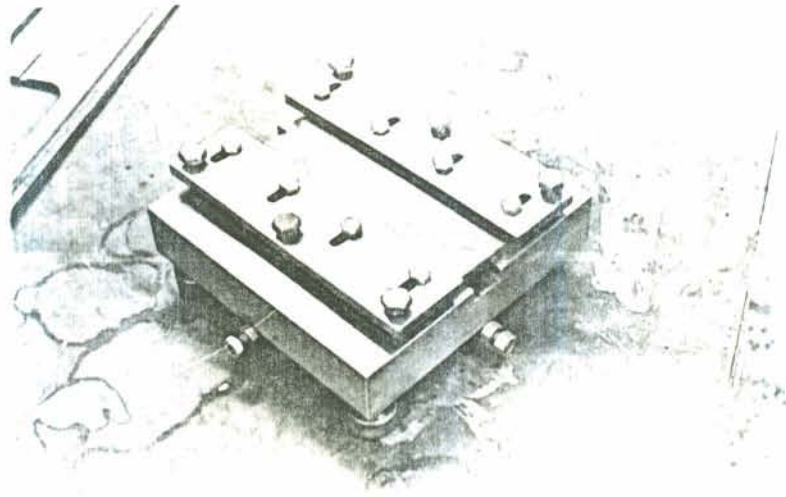


FIGURA 33 - Base de fixação e nivelamento dos corpos de prova.

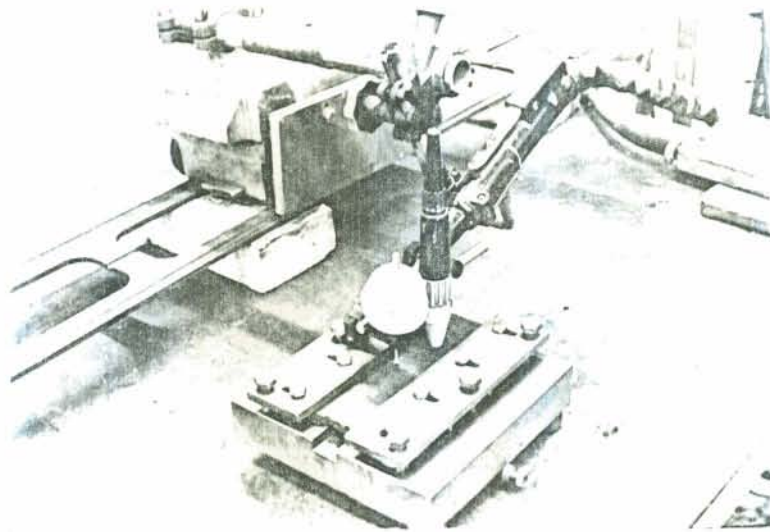


FIGURA 34 - Equipamento utilizado para fixação dos corpos de prova e nivelamento da superfície.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os cordões de solda foram efetuados sem deposição de material (bead-on-plate), somente passando o arco sobre os corpos de prova efetuando a fusão. Iniciou-se a análise da parte experimental com relação as chapas de 4.5 mm de espessura. Leituras das tensões foram feitas à medida que aumentou-se a intensidade de corrente para cada ângulo estudado. Estes valores foram lidos diretamente no amperímetro e voltímetro da fonte de energia. Eles a princípio não dariam a verdadeira característica do arco elétrico já que existem perdas pelo circuito de solda e do equipamento. Segundo NEEDHAM [23], recomendações do IIW (Instituto Internacional de Soldagem), as medidas da tensão deveriam ser efetuadas com o voltímetro conectado diretamente ao eletrodo e a conexão terra, Figura 35.

Os resultados obtidos para as características do arco tensão-corrente encontram-se na Tabela 21. Pelos dados experimentais da tabela, verificou-se que para as intensidades de corrente mais baixas que 50 A, os valores da tensão foram os mesmos para os ângulos de vértice empregados, portanto, independente da forma. Aumentando-se a intensidade até um determinado valor (aproximadamente 75 A), notou-se que há uma queda de potencial e que esta é maior para ângulos maiores. Acima deste valor a tensão aumenta com o aumento da corrente para todos os ângulos estudados, sendo que a elevação da tensão é maior e mais acentuada para os ângulos menores, diminuindo esta tensão em valor e proporção para ângulos maiores.

Com os valores da Tabela 21 montou-se o gráfico da Figura 36. Pode-se então verificar mais facilmente a queda de potencial

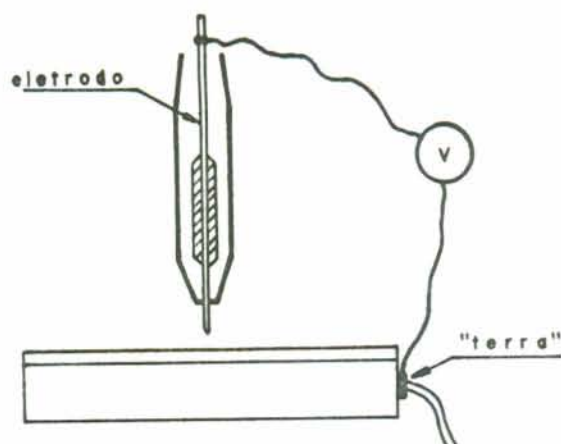


FIGURA 35 - Esquema da leitura correta da tensão do arco segundo o IIW.

TABELA 21 - Valores característicos do arco para vários ângulos de vértice.

Corrente do arco, A	Tensão do arco, V			
	30°	60°	90°	120°
50	17.0	17.0	17.0	17.0
75	17.0	16.3	16.0	16.0
100	18.0	17.4	15.9	16.2
160	20.0	19.0	18.0	18.3
205	22.0	20.5	20.0	19.5
230	22.5	21.2	21.0	20.5

e posterior elevação com o aumento da corrente (os valores obtidos foram somente acima de 50 A já que abaixo deste valor a fonte de energia não oferecia precisão). O desenho das curvas características volt-ampère são supostas para correntes menores,

baseadas na bibliografia consultada [2, 3, 4, 5].

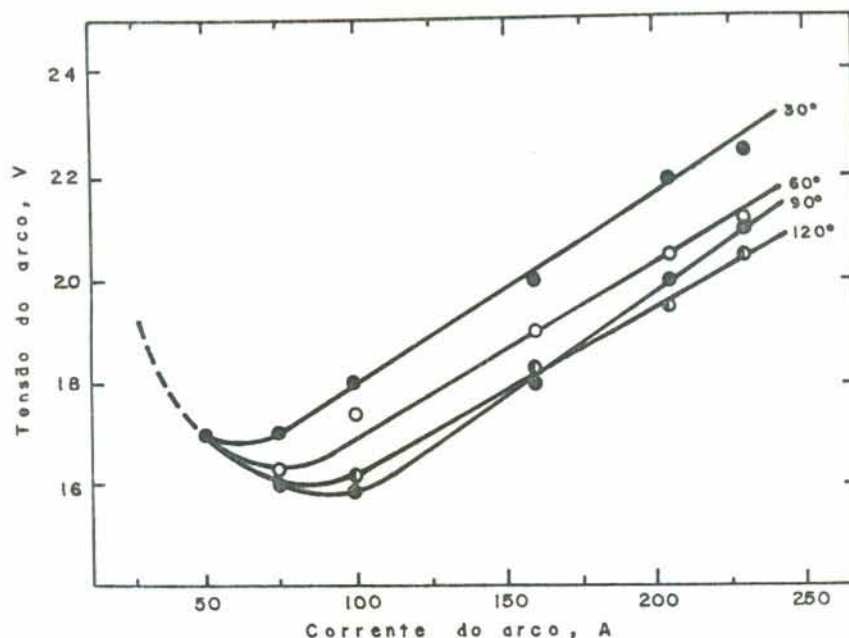


FIGURA 36 - Característica do arco para vários ângulos de vértice.

Trabalhando com chapas de 6.4 mm de espessura o comportamento da característica do arco foi semelhante. Registrando os valores da tensão em função das intensidades de corrente, neste caso foi somente acima de 100 A, verificou-se uma elevação da tensão com o aumento da amperagem. Na Tabela 22 tem-se os valores encontrados e a Figura 37 o gráfico em função dos mesmos. Além do aumento da tensão com a corrente, encontrou-se uma diferença entre os vários ângulos estudados. Aumentando o ângulo de vértice ($30^\circ + 120^\circ$), há uma diminuição da tensão. Analisando as Figuras 36 e 37, nota-se que existe uma diferença bastante significativo desta diminuição entre os ângulos menores, 30° e 60° . Possivelmente esta queda maior deve-se a uma diferença muito maior entre os ângulos de vértice de $30/60^\circ$ do que entre os ângulos de $60/90/120^\circ$, veja-se Figura 7.

Portanto, para as duas espessuras estudadas, verificou-se o mesmo comportamento do arco com pequenas alterações nos valores encontrados. A tensão mínima e a forma da característica tensão-corrente (processo TIG) é influenciada pelo tamanho e material do cátodo; tamanho, material e temperatura do ânodo; natureza do gás de proteção e comprimento do arco, segundo o IIW (Instituto Internacional de Soldagem) [24].

TABELA 22 - Valores característicos do arco para vários ângulos de vértice e corpos de prova de 6.4 mm de espessura.

Corrente do arco, A	Tensão do arco, V			
	30°	60°	90°	120°
100	18.0	16.0	16.0	15.5
165	19.0	18.0	17.5	17.5
215	20.0	19.0	18.6	18.5
245	20.8	19.5	19.5	19.0

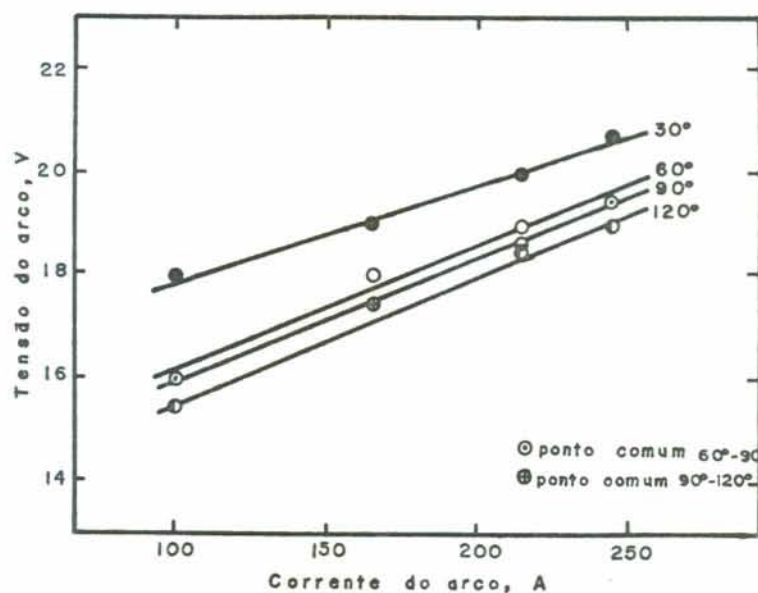


FIGURA 37 - Característica do arco para vários ângulos de vértice para chapas de 6.4 mm de espessura.

Largura do cordão

Além da influência da geometria da ponta do eletrodo na tensão, também a largura do cordão de solda é afetada pela forma com que é afiada a extremidade. Aumentando o ângulo de vértice há uma diminuição da largura do cordão e esta relação torna-se mais acentuada à medida que a intensidade de corrente é aumentada. Na soldagem a arco elétrico sabe-se que a tensão tem influência na largura do cordão de solda em qualquer processo de soldagem. Quanto maior a tensão do arco, maior a largura do cordão. Para uma mesma condição de corrente, velocidade de soldagem, gás de proteção, comprimento do arco e diâmetro do eletrodo, a tensão do arco é influenciada pela variação do ângulo da extremidade do eletrodo no processo de soldagem TIG. Então, a condição que a tensão do arco diminui com o aumento do ângulo de vértice, está diretamente ligada e implica na diminuição da largura do cordão de solda.

Em valores baixos de corrente (até 50 A) praticamente não existe uma variação, mantendo-se a largura aproximadamente constante. Isto seria devido ao fato de que em baixos valores de corrente o comportamento da extremidade é praticamente o mesmo, mantendo-se as características do arco tensão-corrente constantes (ver Figura 36).

A Figura 38, mostra a variação da largura do cordão de solda para os ângulos de vértice estudados em função do aumento da intensidade de corrente. Os valores considerados foram as médias de 10 medidas efetuadas sobre cada cordão de solda com um aumento de 10 x, reduzindo a porcentagem de erro a 1/10 de mm. As medições foram efetuadas em uma máquina de medir perfis (Perfilômetro), mostrada na Figura 46. A Tabela 23 fornece os valores médios obtidos que estão plotados na Figura 39. Os valores máximos e mínimos destas medições encontram-se no Anexo I.

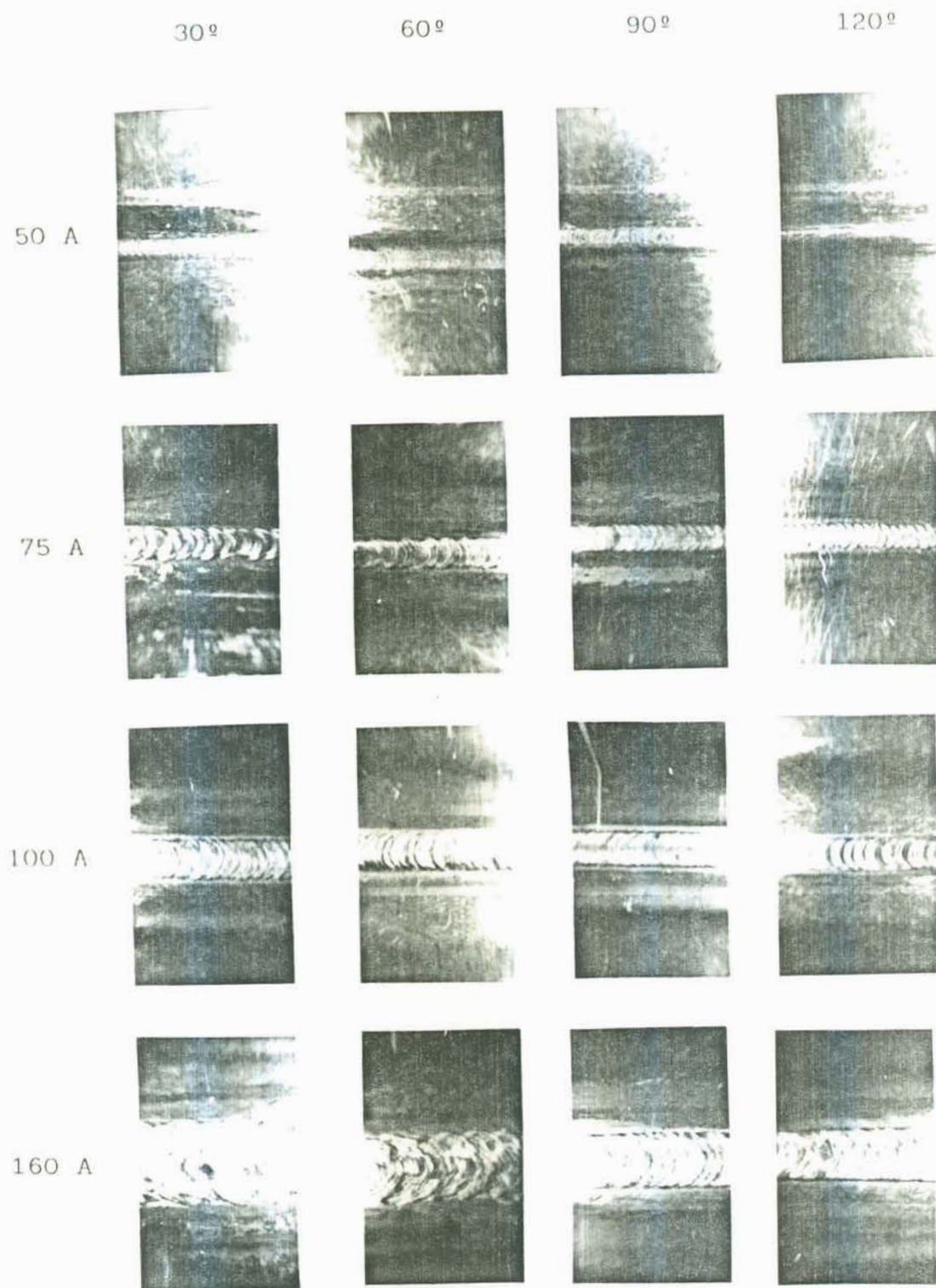


FIGURA 38 - Efeito do ângulo de vértice na largura do cordão de solda para corpos de prova de 4.5 mm. Aumento 1.35x.

TABELA 23 - Valores médios da largura de cada cordão de solda em função do ângulo de vértice e intensidade de corrente para chapa de 4.5 mm de espessura.

Intensidade de corrente, A	Largura do cordão, mm			
	30°	60°	90°	120°
< 50	1.20	1.10	1.00	-
50	2.00	1.90	1.70	1.20
75	3.70	3.60	3.10	2.80
100	5.00	4.60	4.00	3.90
160	8.20	7.50	6.70	6.30
205	10.00	9.60	8.60	8.30
230	11.10	10.00	9.00	8.70

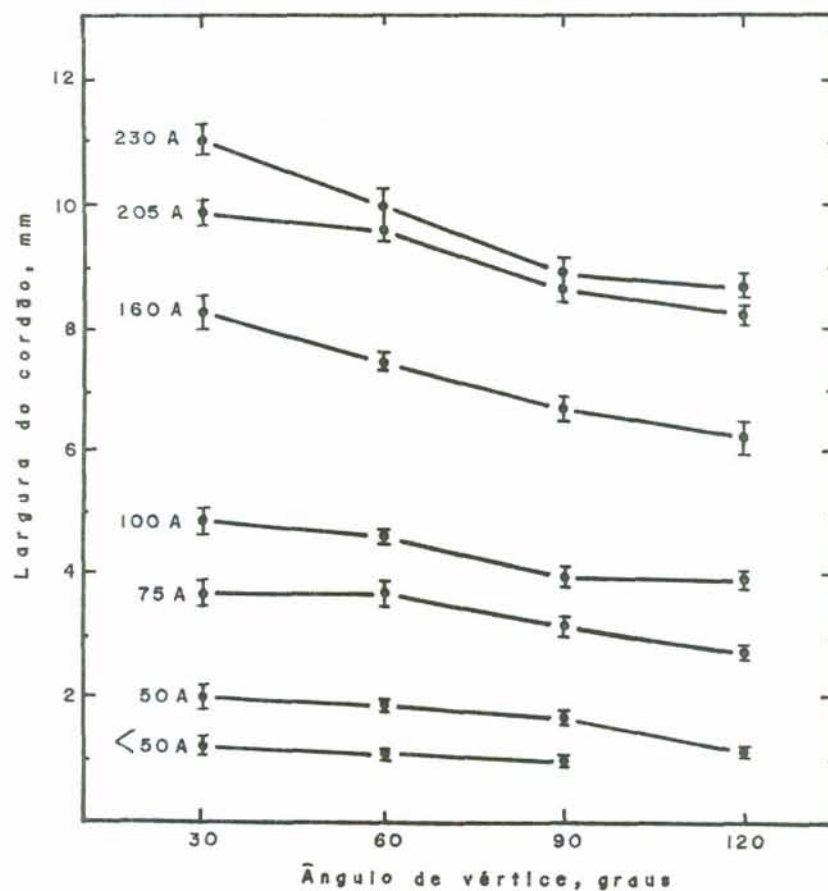


FIGURA 39 - Largura do cordão de solda para vários ângulos do eletrodo e intensidades de corrente. Chapa de 4.5 mm.

A Figura 40, mostra alguns cordões de solda para os ângulos de ponta estudados, com variações na intensidade de corrente para chapas de aço de maior espessura (6.4 mm). Ao ser efetuada a fusão dos corpos de prova, perto da extremidade final notou-se um desvio do cordão de solda que foi devido a passagem do arco pelo ponto de ligação "terra" no aparato de fixação. O problema foi corrigido trocando o aterramento para a extremidade, na direção da linha de fusão, Figuras 41 e 42.

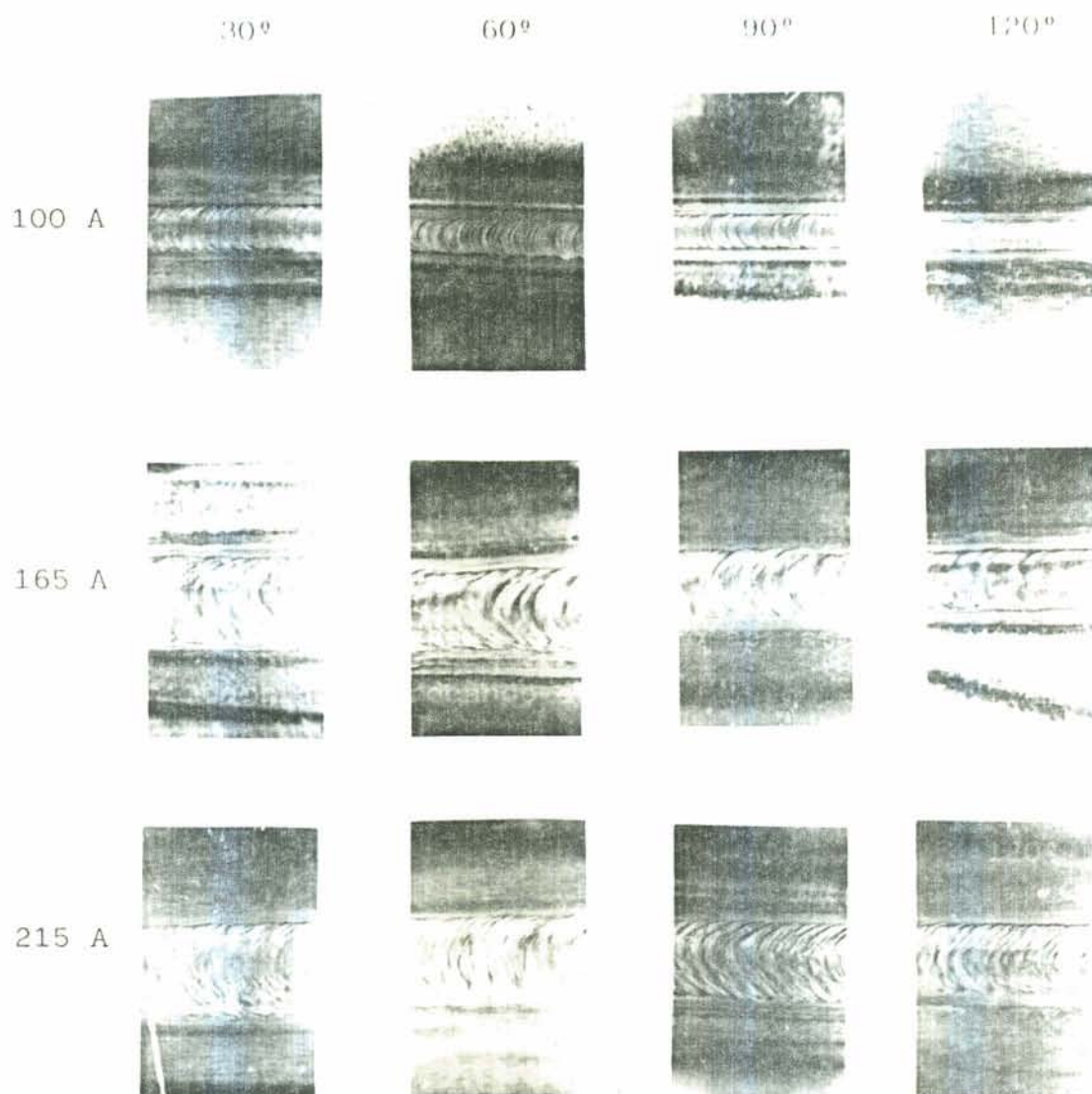


FIGURA 40 - Aspectos de alguns cordões de solda em função do ângulo e da intensidade de corrente. Chapa de aço com espessura de 6.4 mm. Aumento 1.3x.

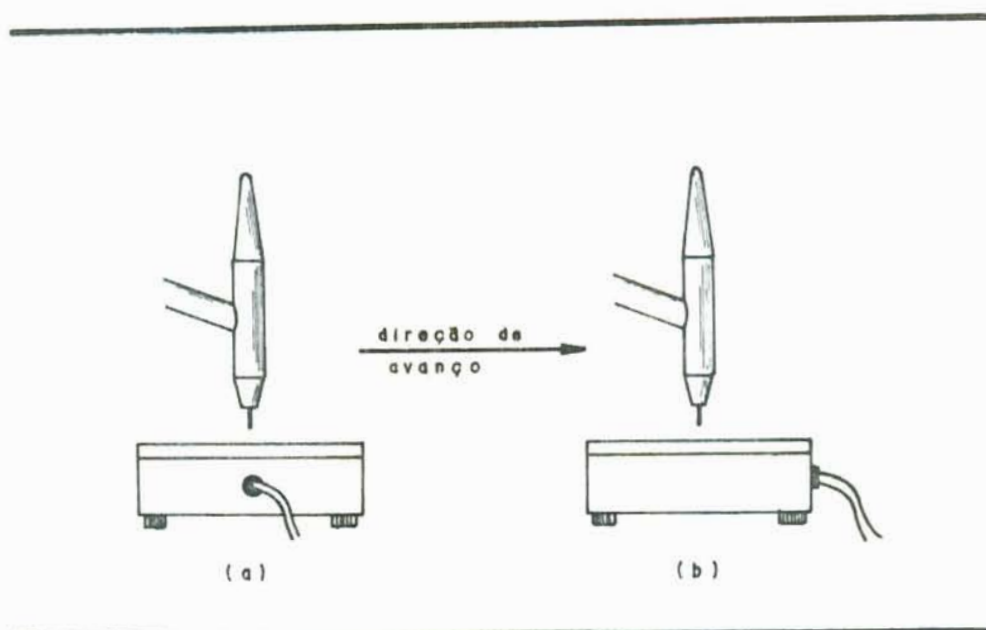


FIGURA 41 - Esquema do cabo de retorno em relação ao aparato de fixação do corpo de prova; (a) inicial, (b) corrigido.

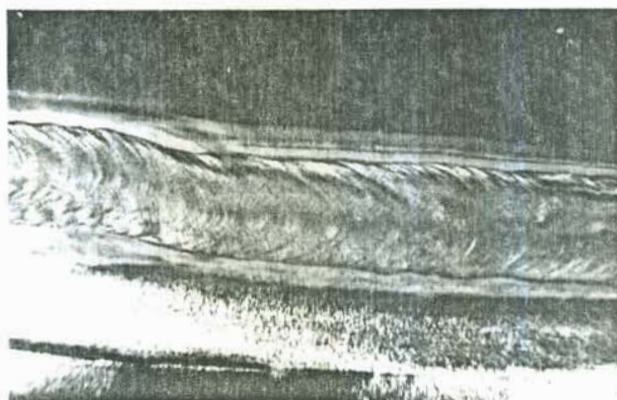


FIGURA 42 - Desvio do cordão de solda quando o arco cruzou o ponto da conexão de retorno (terra).

O valor média das 10 (dez) medidas efetuadas sobre cada cordão de solda encontram-se na Tabela 24. Estes valores estão na forma gráfica na Figura 43. No Anexo II encontram-se os valores máximos e mínimos encontrados para cada cordão de solda.

TABELA 24 - Valores médios da largura de cada cordão de solda em função do ângulo de vértice e intensidade de corrente para chapas de 6.4 mm.

Intensidade de corrente, A	Largura do cordão, mm			
	30°	60°	90°	120°
100	5.40	4.20	4.20	3.80
165	8.30	7.50	7.20	6.80
215	10.00	9.30	9.20	9.00
245	11.20	10.85	10.80	10.00

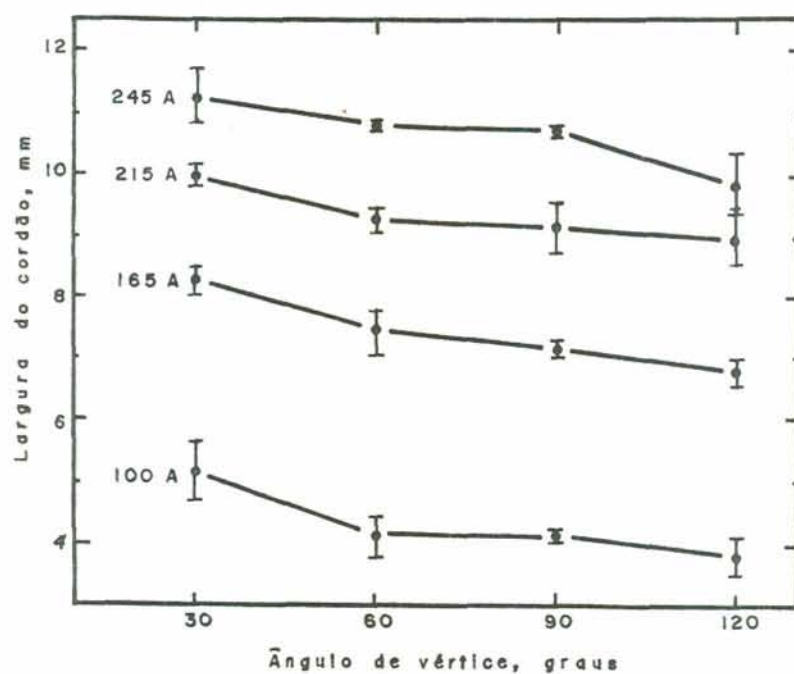


FIGURA 43 - Largura do cordão de solda para vários ângulos do eletrodo e intensidades de corrente. Média de 10 medidas sobre cada cordão. Chapa com 6.4 mm.

Outro ponto interessante observado foi que com a velocidade fixada de 125 mm/min, os cordões de solda em baixas amperagens mostram um aspecto bastante melhorado em relação ao aumento da corrente. Para os ângulos menores (30° e 60°), o aspecto do cordão foi sempre melhor que para pontas de extremidade maiores. Isto se deve possivelmente ao fato de que com ângulos maiores e amperagens maiores a estabilidade do arco observada foi menor como já descrito por outros trabalhos [10].

Com amperagens elevadas nota-se que o cordão apresenta um aspecto mais irregular e muitas vezes uma depressão, ficando o metal da solda abaixo do nível da superfície da peça. Além da instabilidade já mencionada, outro fator seria a velocidade de avanço de soldagem muito alta para estes níveis de corrente.

Um outro parâmetro considerado para o estudo da largura do cordão de solda foi a velocidade de avanço da tocha. Aumentando-se a velocidade, diminui a largura do cordão para todos os ângulos estudados mas mantendo a característica já mencionada de que para ângulos mais obtusos, menor é a largura do cordão dentro de todas velocidades consideradas.

A Tabela 25 fornece os valores médios encontrados da largura do cordão de solda em função das velocidades. Somente foram pesquisados os valores em que poderia ocorrer a formação de corcova. Os valores máximos e mínimos das medições encontram-se no Anexo III.

A Figura 44 mostra as características desta variação. Observou-se também que a tensão do arco para um mesmo ângulo mantém-se constante com o aumento da velocidade.

A Tabela 26 indica os valores encontrados da tensão em função da velocidade de avanço.

Outra variação foi com relação a distância eletrodo-peça. Aumentando a distância eletrodo-peça (gap), aumentamos o arco e conseqüentemente a tensão.

TABELA 25 - Valores médios (10 medidas de cada cordão) da largura da solda em função da velocidade de avanço para corpos de prova com espessura de 6.4 mm (I=245A).

Velocidade de avanço, mm/min	Largura do cordão, mm			
	30°	60°	90°	120°
100	12.13	12.07	11.40	11.00
125	11.20	10.85	10.80	10.00
150	H	9.85	9.20	8.28
250	H	8.41	-	7.68

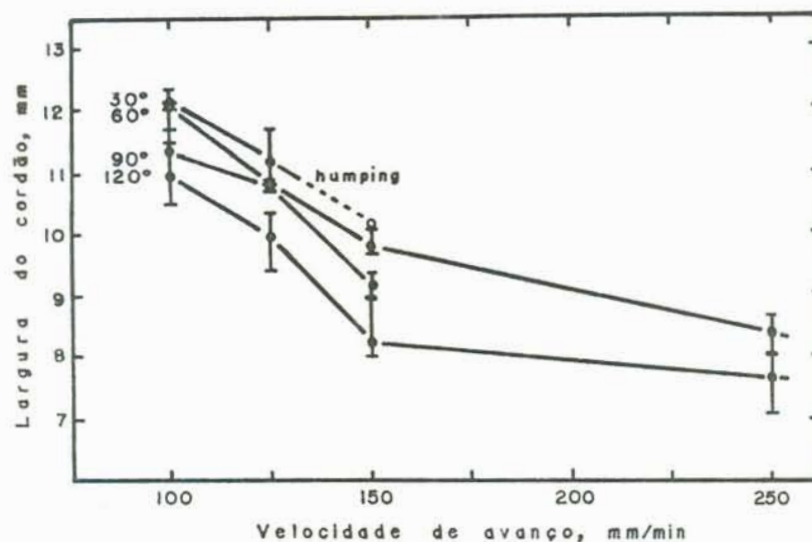


FIGURA 44 - Influência da velocidade de soldagem na largura do cordão de solda.

A Tabela 27, mostra os valores de tensão obtidos em função dos ângulos de ponta estudados, para uma mesma intensidade de corrente de 245 A. Pela tabela verifica-se novamente que a tensão diminui com o aumento do ângulo da extremidade do eletrodo. Com o aumento do comprimento do arco e da tensão, há um aumento na largura do cordão de solda o que pode ser verificado pelos dados da Tabela 28.

TABELA 26 - Valores da tensão do arco em função da velocidade de avanço para uma corrente constante de 245 A.

Velocidade de avanço, mm/min	Tensão do arco, V			
	30°	60°	90°	120°
100	20.6	19.5	19.3	18.0
125	20.8	19.5	19.5	19.0
150	20.8	19.5	-	19.0
250	H	-	-	19.1

H - humping

TABELA 27 - Valores da tensão para os ângulos do eletrodo em função do aumento do arco para uma intensidade de corrente constante (245 A).

Distância eletrodo-peça, mm	Tensão do arco, V			
	30°	60°	90°	120°
1.5	20.8	19.5	19.5	19.0
3.0	20.8	21.0	20.0	20.0
4.0	22.0	22.0	21.5	21.0

TABELA 28 - Valores da largura do cordão de solda em função dos ângulos e da distância eletrodo-peça com a corrente constante (245 A).

Distância eletrodo-peça, mm	Largura do cordão, mm			
	30°	60°	90°	120°
1.5	11.20	10.85	10.80	10.00
3.0	11.45	11.40	11.20	10.85
4.0	11.80	11.80	11.60	11.35

Os valores da Tabela 28 plotados na Figura 45, mostram que a medida que o arco é alongado a largura do cordão de solda aumenta para todos os ângulos mas é menor em relação aos ângulos mais obtusos como já afirmado anteriormente.

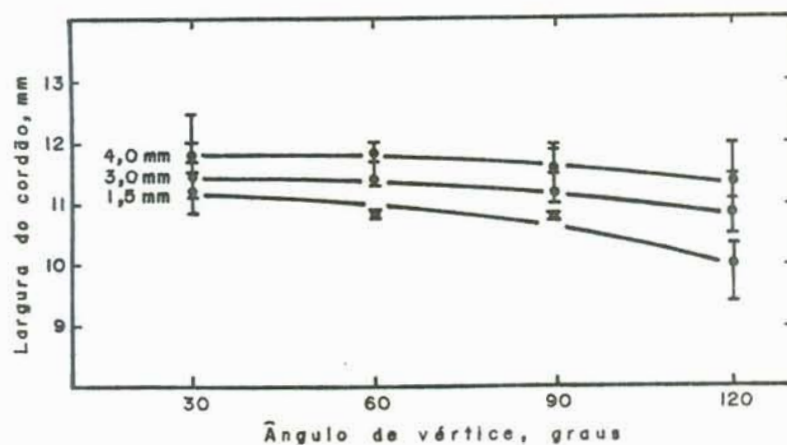


FIGURA 45 - Relação do comprimento do arco em função dos ângulos de ponta e influência na largura do cordão.

Trabalhando com arcos mais longos verifica-se que é melhor a aparência da ponta do eletrodo no final da soldagem, levando a crer que não haveria muita concentração de calor na mesma e portanto, manteria por mais tempo sua forma original.

Alguns pesquisadores [6, 10] trabalharam com pontas truncadas dos eletrodos, ou seja, afiaram as pontas em ângulos e seccionaram a parte mais aguda da extremidade. No trabalho experimental, operando com eletrodos não truncados, verificou-se principalmente para as pontas afiadas com ângulos menores, que após um certo tempo ao iniciar o cordão de solda, a extremidade sofre uma pequena fusão e depois estabiliza com o formato aproximadamente truncado. Quando o eletrodo é utilizado no trabalho, a ponta será fundida para trás sobre si mesma até a

tendência da massa do eletrodo resfriar a extremidade equilibrando o calor do arco tendendo a fundi-la. Então a secção fundida da extremidade do eletrodo terá o diâmetro ideal para o serviço específico e o diâmetro desta secção será raramente identificado com algum tamanho de eletrodo disponível [15]. Segundo SPILLER & MacGREGOR [4], o efeito da variação do arco dentro de limites sensíveis não alteraria a tendência dos resultados.

Outro parâmetro que levou-se em conta no trabalho experimental foi a influência exercida pelo fluxo de gás de proteção na aparência e qualidade da solda. Trabalhando com vazões de 5, 10 e 15 l/min, não se verificou nenhuma mudança significativa no cordão de solda. A largura permaneceu aproximadamente constante bem como a tensão do arco para uma intensidade de corrente com um valor fixo (245 A). Com a vazão maior (15 l/min), o acabamento do cordão foi um pouco melhor e mais estável para ângulos maiores (90° e 120°). As Tabelas 29 e 30 mostram os valores obtidos para a largura do cordão e tensão para as três vazões a uma corrente fixa.

TABELA 29 - Valores médios da largura do cordão para os ângulos estudados com variações da vazão do gás a uma corrente constante de 245 A.

Vazão do gás, l/min	Largura do cordão, mm			
	30°	60°	90°	120°
5	11.25	11.10	11.10	10.20
10	11.20	10.85	10.80	10.00
15	11.25	10.95	11.20	10.25

TABELA 30 - Valores médios das tensões para os ângulos estudados com variações da vazão do gás a uma corrente constante de 245 A.

Vazão do gás, l/min	Tensão do arco, V			
	30°	60°	90°	170°
5	20.8	19.5	19.3	19.0
10	20.8	19.5	19.5	19.0
15	20.8	19.3	19.5	18.5

Os resultados acima achou-se não ser necessário colocar-se na forma gráfica, pois a única comprovação seria a da diminuição da largura com o aumento do ângulo.

Profundidade de penetração

Para verificar a penetração, cada corpo de prova foi cortado perpendicular ao cordão de solda próximo ao final do mesmo (onde o arco foi extinguido), em três partes diferentes com um afastamento entre eles de 5.0 mm. A razão do corte em 1/3 da parte final foi para obterem-se as medidas do cordão de solda em uma região em que estaria mais próxima do regime térmico estacionário (no comprimento entre 8 e 9 mm do corpo de prova).

Primeiramente analisam-se os corpos de prova de menor espessura (4.5 mm). Todas secções cortadas foram atacadas com reativo de iodo e analisadas em uma máquina de "Medir Perfis", ver Figura 46, com um aumento de 10 vezes fornecendo uma precisão de 1/10 de mm, reduzindo assim sensivelmente o erro das medições. Foram desenhados os contornos dos perfís dos cordões para posterior análise do efeito dos ângulos estudados. Das três medidas feitas foi obtida uma média da penetração cujos valores estão dados na Tabela 31.

Com os valores obtidos pode-se notar que a penetração aumenta com o aumento do ângulo da extremidade do eletrodo e diminui ligeiramente para o ângulo maior (120°). Foram também analisados os valores máximos e mínimos separadamente para cada corpo de prova e a tendência dos resultados é a mesma acima mencionada. Este comportamento está de acordo com o trabalho de

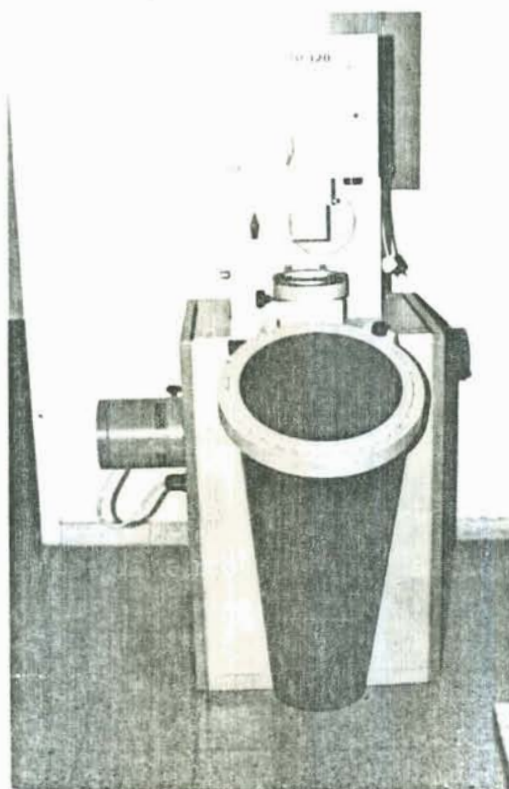


FIGURA 46 - Equipamento utilizado para medições da profundidade de penetração e largura dos cordões de solda.

KEY [10] que obteve resultados semelhantes. Para valores baixos de corrente verifica-se que a variação da penetração não é muito acentuada para os ângulos estudados, sendo que com estes valores obteve-se uma penetração máxima de aproximadamente 13,5% no corpo de prova de 4,5 mm o qual seria considerado espesso [4].

TABELA 31 - Relação da profundidade do cordão de solda em função dos ângulos de ponta estudados.

Intensidade de corrente, A	Penetração, mm			
	30°	60°	90°	120°
50	0.55	0.58	0.60	0.36
75	0.95	1.15	1.16	1.05
100	1.21	1.90	1.90	1.76
160	2.45	2.68	3.50	3.25
205	4.10	*	*	3.75
230	**	**	**	**

* Os corpos de prova apresentam penetração total

** Houve vazamento (furo) nos corpos de prova

À medida que aumentou-se a amperagem acentua-se a diferença na penetração. Possivelmente isto seja em função da energia imposta ao arco ser pequena para baixas intensidades de corrente e portanto, a dissipação de calor ser tridimensional (pelos lados e fundos do corpo de prova), não afetando muito a penetração. Aumentando a energia do arco, acentua-se esta diferença pois a chapa comporta-se como bidimensional com a retirada de calor somente pelos lados e com isto aumentando a penetração. Plotando os valores da Tabela 31 na forma gráfica, obtiveram-se as curvas da Figura 47.

Pela figura nota-se que com a intensidade de corrente de 160 A, a curva mostra um aspecto mais acentuado para os ângulos de 90° e 120°. Com os ângulos menores, 30° e 60°, os corpos de prova apresentaram-se como de espessura média com uma penetração máxima de 60% e com as pontas mais obtusas, comportaram-se como de espessura fina com penetração de 78%. Para correntes maiores todos os corpos de prova apresentaram-se com características de finos com penetração total, inclusive com o vaza-

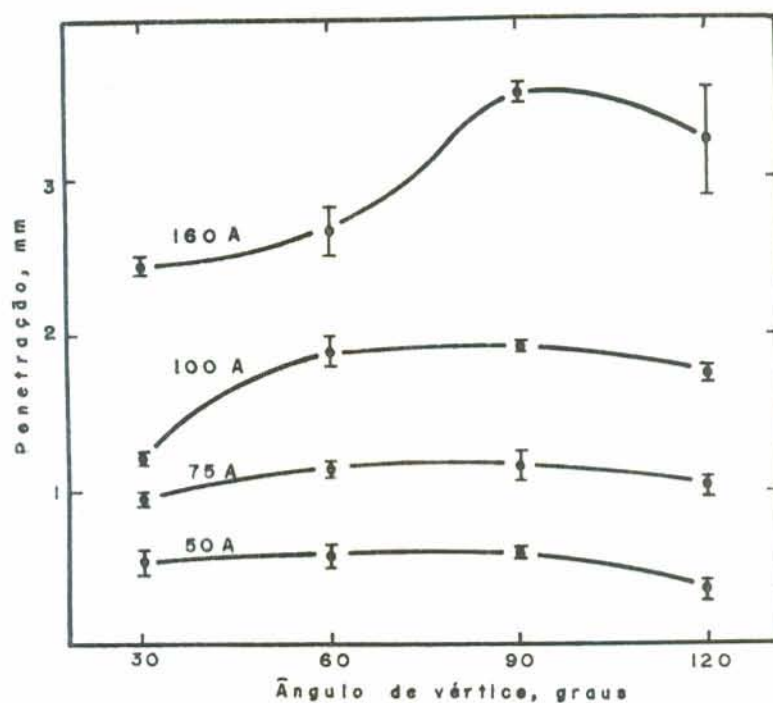


FIGURA 47 - Curvas de penetração em função do aumento do ângulo do eletrodo para uma chapa de 4.5 mm.

mento dos mesmos. Para chapas finas (penetração maior do que 70%), SPILLER & MacGREGOR [4] encontraram as maiores penetrações para ângulos de 30° e 60° e um decréscimo para os ângulos mais obtusos e a largura independente do ângulo da extremidade. No trabalho experimental pode-se analisar o comportamento de dois modos diferentes. Primeiramente, em função da espessura constante de 4.5 mm do corpo de prova, cujo resultado já apresentou-se e contrários aos resultados de SPILLER [4] em relação a penetração. Quanto a largura do cordão para estas chapas, encontrou-se serem dependentes dos ângulos da ponta. Por outro lado, se analisados somente em relação a considerada chapa fina (no caso para os ângulos de 90° e 120° com 160 A), pode-se notar que realmente há um decréscimo na penetração e em relação a largura (ver Figura 39) para estes mesmos ângulos nota-se que apesar de variar estes valores, são menos acentuados do que os

ângulos menores. Acima de 160 A não pode-se avaliar os resultados pois houve fusão total dos corpos de prova.

SHAW [25], caracteriza um arco produzido por um eletrodo de ângulo de extremidade mais fino como uma fonte de calor de linha que é distribuída fracamente. As temperaturas seriam altas ao longo do eixo, mas muito baixas em qualquer outra parte. Para eletrodos obtusos, produz uma fonte de calor distribuída que é maior e mais eficiente na produção de soldas de penetração profunda.

Na Figura 48, estão os comportamentos dos arcos elétricos para os ângulos estudados, notando-se que a medida que aumentamos o ângulo, o formato do jato de plasma modifica-se de uma forma de "sino" espalhada até uma concentração para os ângulos maiores.

A Figura 49, mostra as características dos cordões para várias intensidades de corrente e ângulos de extremidade. Analisando os desenhos, notou-se que à medida que o ângulo de vértice aumentou passando de 30° a 90° houve um maior aumento na penetração com o cordão de solda tornando-se mais estreito, acentuando-se a diferença com maiores intensidades de corrente.

O desenho (f), mostra o formato do cordão de solda para uma amperagem de 230 A e um ângulo de 90°. Houve uma depressão do cordão e o metal fundido fluiu para baixo da superfície do corpo de prova. Em outras regiões o metal vazou formando buracos no cordão.

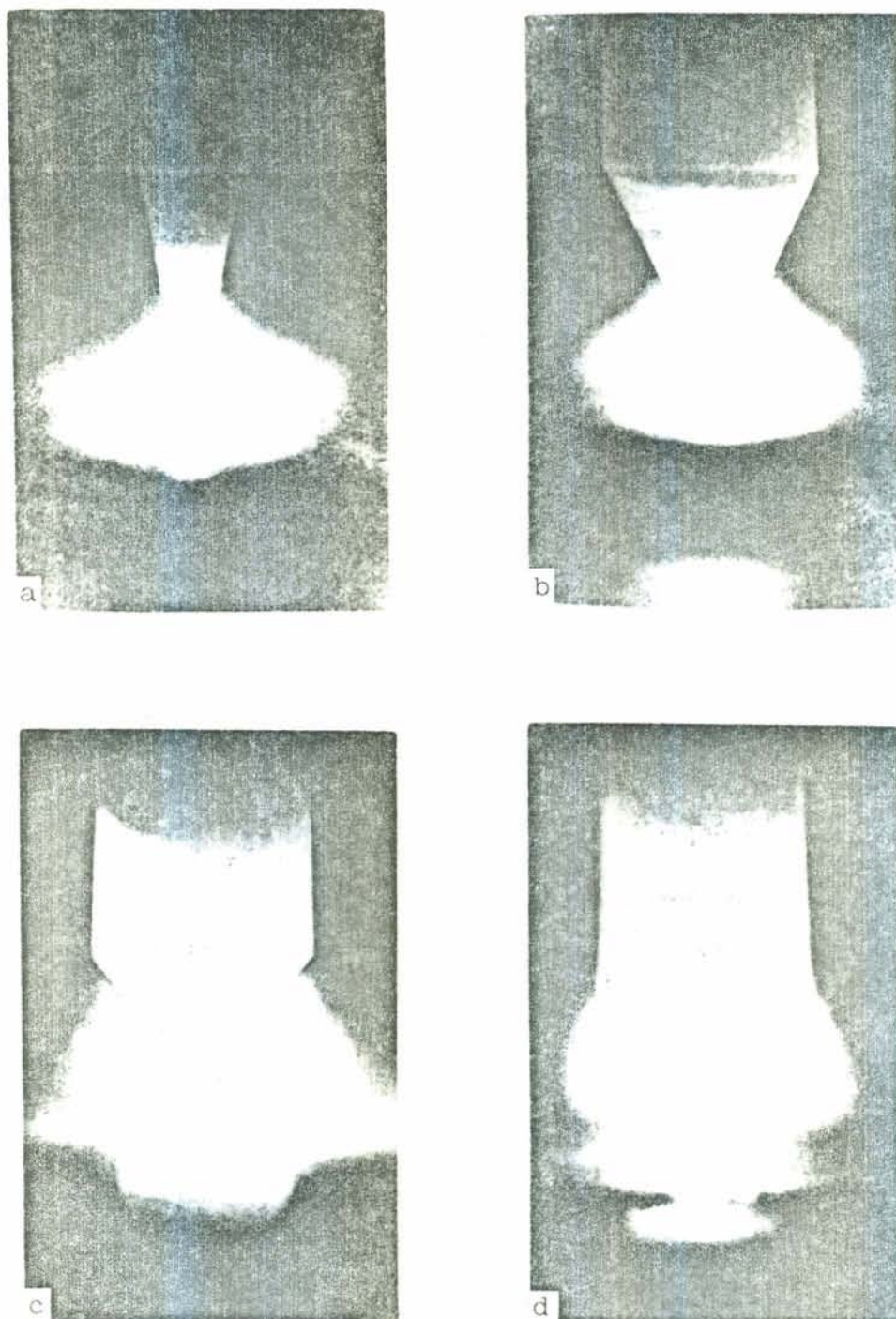


FIGURA 48 - Aparência de arcos estacionários para vários ângulos de vértice em 150 A com um gap de 1.4 mm; ângulo de vértice: (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° e (d) 120° . Aumento de $17 \frac{1}{2}x$, [4]. Redução nas fotos de $1,2x$.

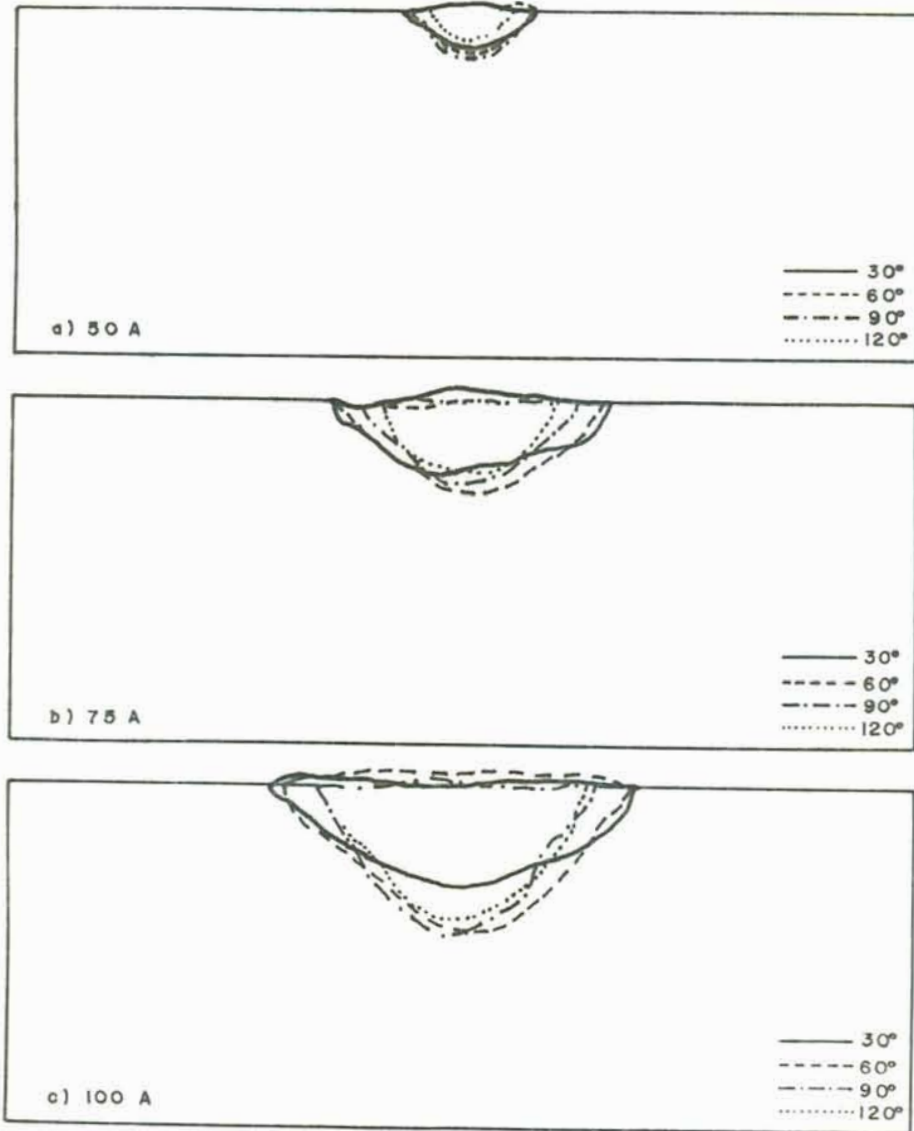


FIGURA 49 ...

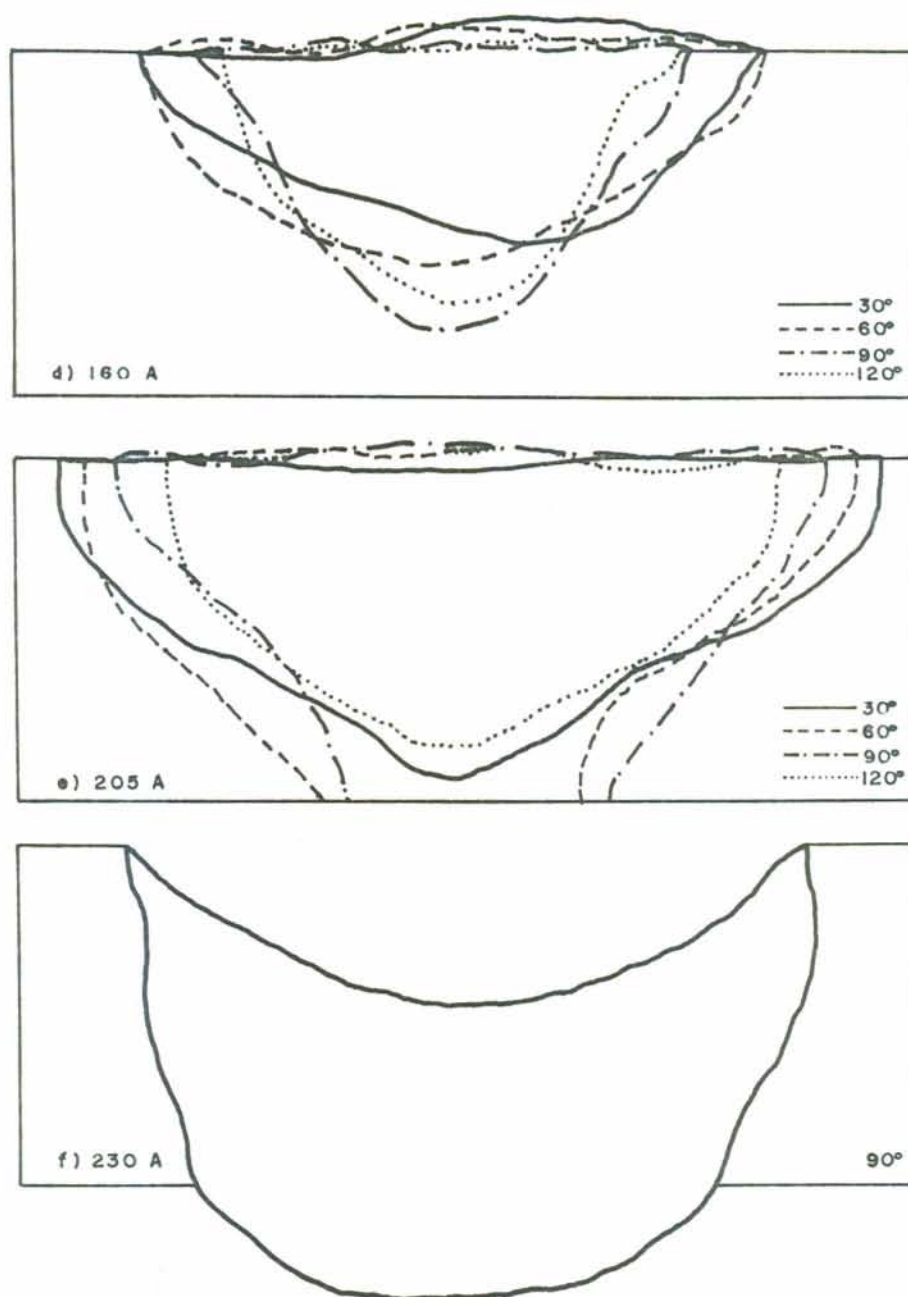


FIGURA 49 - Características do formato de vários cabos em função da amperagem e ângulos da extremidade. Aumento 10x.

A Figura 50, mostra alguns formatos dos cordões de solda para uma chapa de 4.5 mm de espessura.

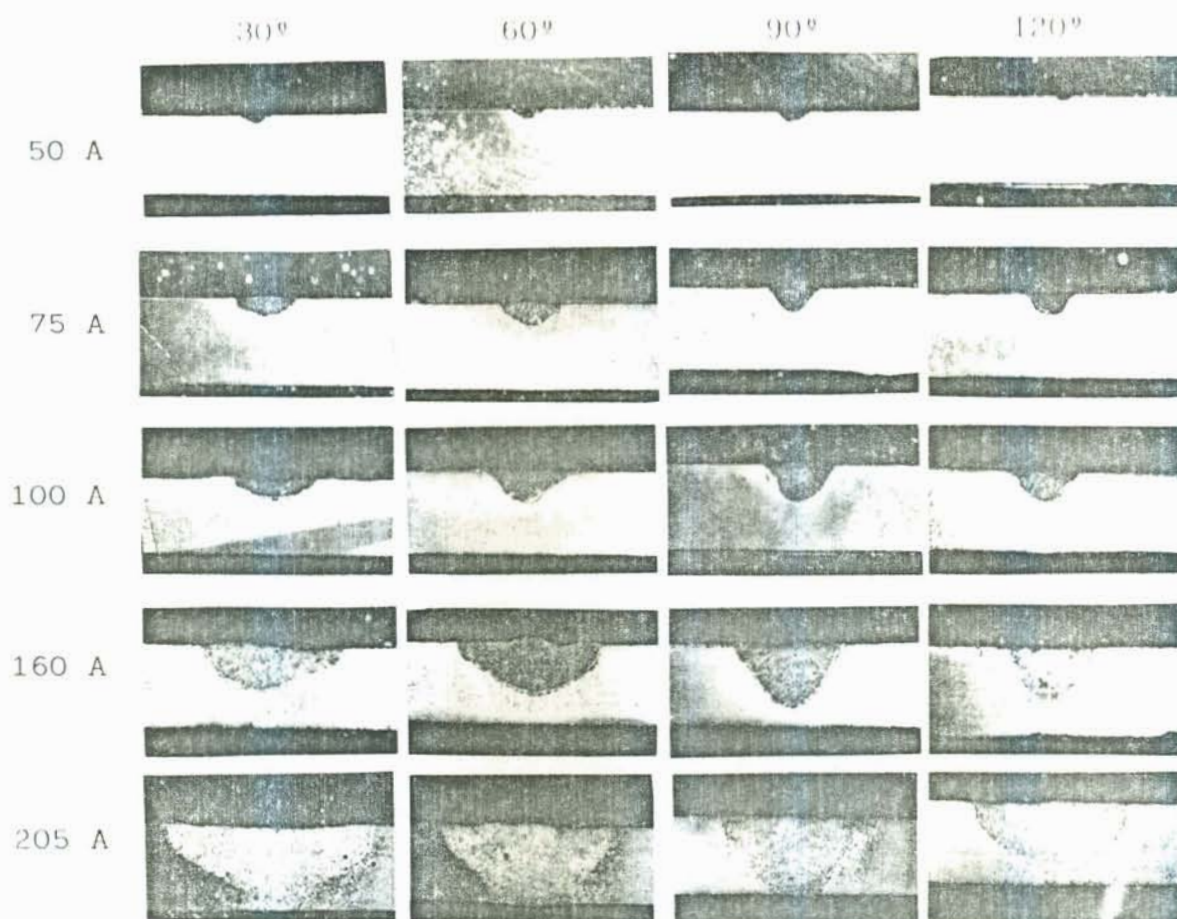


FIGURA 50 - Macrofotografias dos cordões de solda obtidos para uma chapa de 4.5 mm de espessura, com uma velocidade de soldagem de 125 mm/min e várias intensidades de corrente. Ataque com reativo de iodo. Aumento 2,4x.

Para estudar se haveriam variações no comportamento da solda em peças espessas, foram utilizados corpos de prova obtidos de chapas de aço carbono com 6.4 mm de espessura, retificadas e desengraxadas. Os cordões de solda foram feitos sem deposição de material somente passando o arco sobre os corpos de

prova. O estudo da secção transversal foi feito seccionando os corpos de prova próximo a zona considerada em regime térmico estacionário (final do cordão), e após polido e atacado. As medições da profundidade foram feitas considerando a distância da superfície da peça até o ponto máximo abaixo da mesma. Foram efetuados 3 cortes do mesmo cordão e obtida uma média dos mesmos. Os resultados encontram-se na Tabela 32, para os ângulos considerados. Da tabela pode-se verificar que há de modo geral um aumento na penetração com o aumento do ângulo de vértice do eletrodo. A única exceção é o valor do ângulo de 60° para uma intensidade de corrente de 100 A e que pode-se considerar como um erro experimental. Considerando os valores máximos e após os mínimos, verificou-se as mesmas tendências de aumento da penetração com o aumento do ângulo. Somente os valores para a amperagem de 100 A comportaram-se como espessos. Os restantes comportaram-se como de espessura média.

TABELA 32 - Valores médios da profundidade do cordão de solda em chapas de 6.4 mm para os ângulos considerados.

Intensidade de corrente, A	Penetração, mm			
	30°	60°	90°	120°
100	1.70	1.85	1.70	1.90
165	2.00	2.25	2.55	2.85
215	2.65	2.75	2.85	3.15
245	3.00	3.10	3.15	3.80

Os valores da tabela acima, plotados na Figura 51 fornecem as curvas de penetração em função dos ângulos considerados.

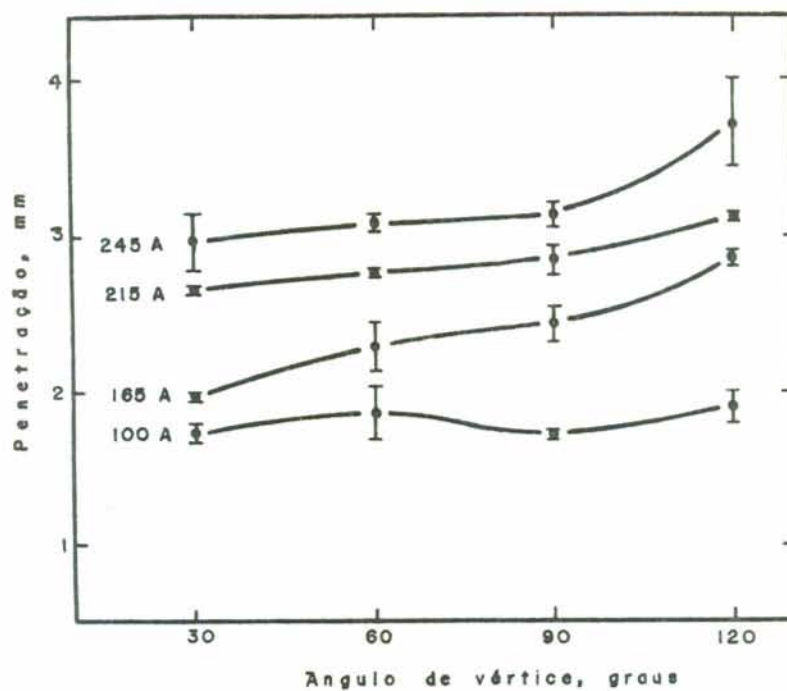


FIGURA 51 - Características da penetração em função do ângulo de ponta do eletrodo para uma chapa de 6.4 mm de espessura.

A. Figura 52, mostra alguns formatos dos cordões obtidos.

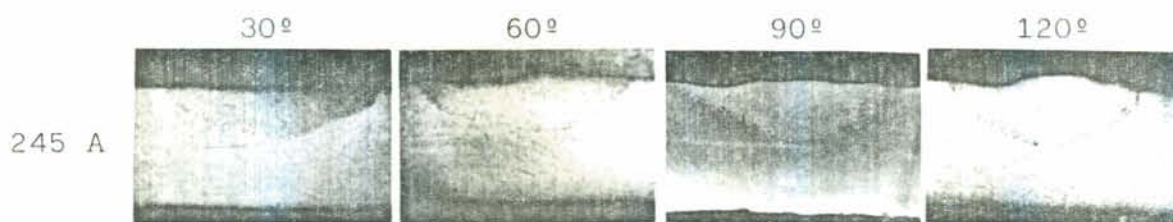


FIGURA 52 - Macrofotografias dos cordões de solda obtidos para uma chapa de 6.4 mm de espessura, com uma velocidade de soldagem de 125 mm/min e intensidade de corrente de 245 A. Ataque com reativo de iodo. Aumento 2,4x.

Na Figura 53, tem-se os desenhos das macrosecções dos cordões de solda obtidos para os ângulos de vértice utilizados e várias intensidades de corrente, com um aumento de 10x.

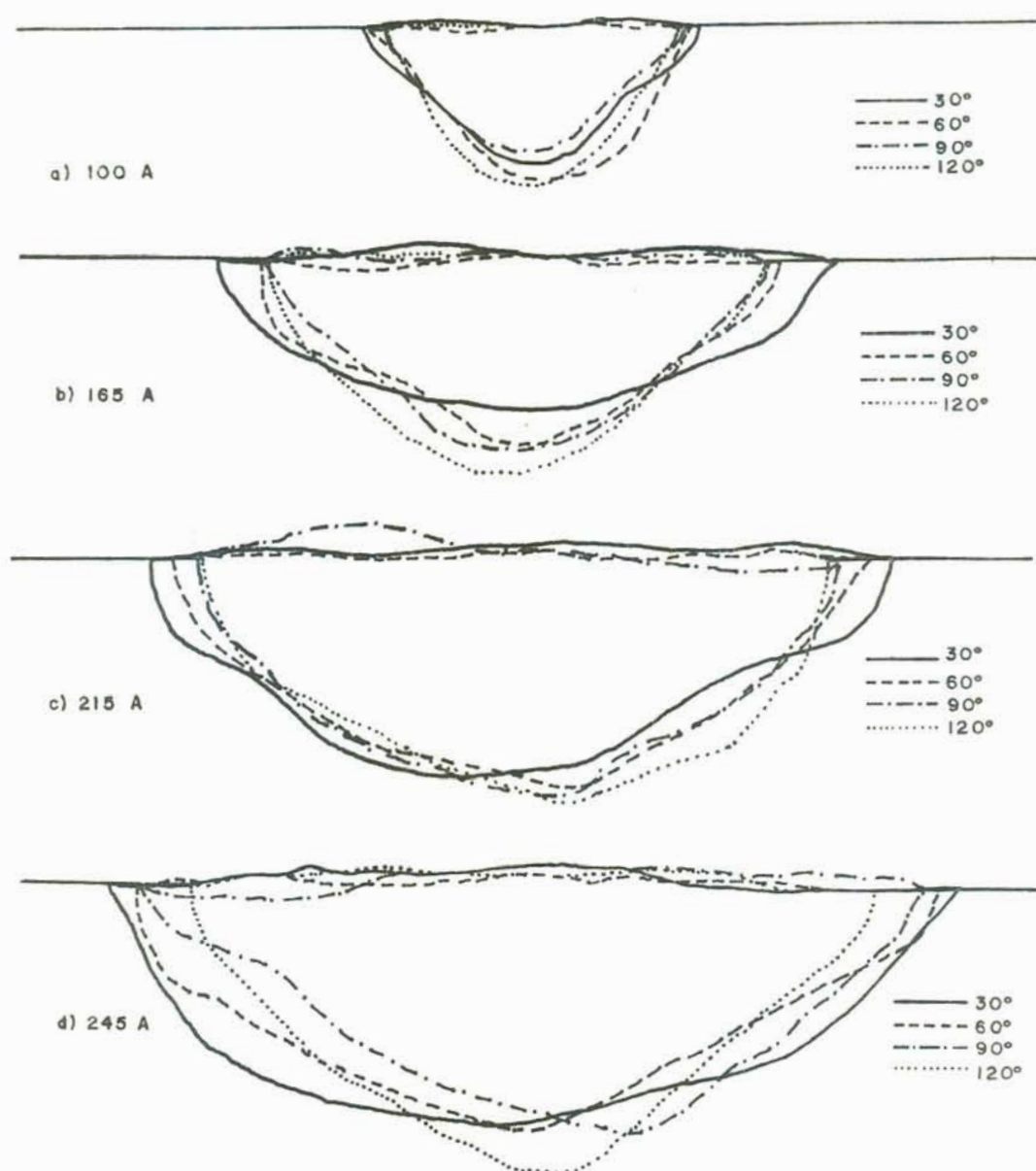


FIGURA 53 - Características do formato de vários cordões de solda, em função da amperagem e ângulos de extremidade. Chapa com espessura de 6.4 mm. Aumento 10x.

Área da secção transversal

Após o corte e o ataque químico dos corpos de prova, obteve-se das microfotografias o desenho do perfil de cada cordão. Aplicando-se a regra de SIMPSON para cálculo de áreas planas por aproximação, HUDSON [26], determinou-se dos desenhos as diversas áreas dos cordões de solda obtidos para os parâmetros utilizados, Figura 54. Para facilidade de comparação, colocou-se os dados em função da amperagem e dos ângulos estudados na Tabela 33.

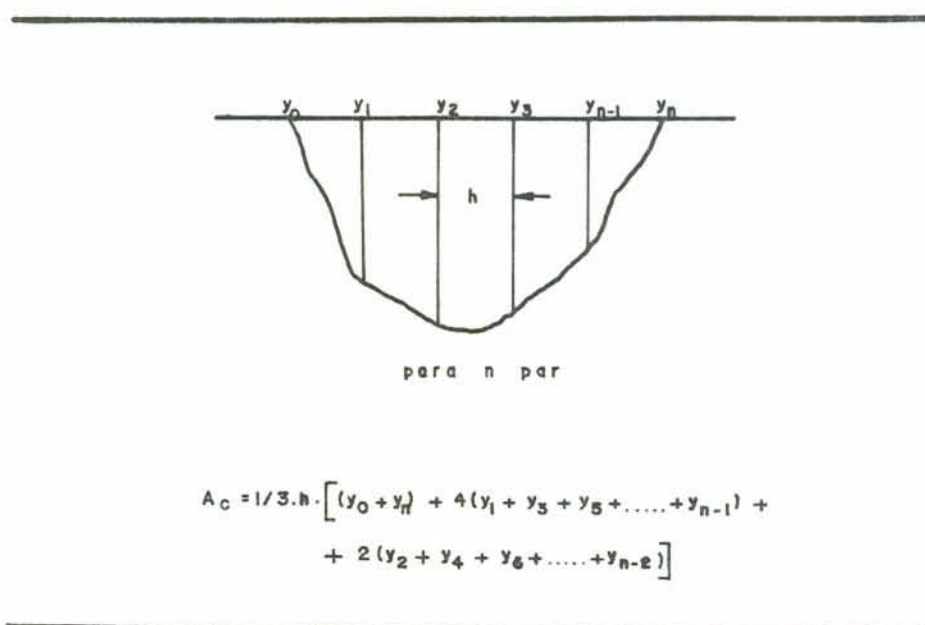


FIGURA 54 - Método de Simpson para o cálculo da área da secção transversal [26].

A área considerada foi apenas à abaixo da superfície da peça e com um aumento de 10x a fim de diminuir-se a grandeza do erro de medição para 1/10 de mm. Analisando os valores das medidas, verifica-se que aumentando a intensidade de corrente aumentou a área da secção transversal, como já era esperado, pelo

acrécimo na energia imposta. Em relação ao ângulo de vértice, a área da secção transversal (com excessão para a intensidade de corrente de 50 A), apresentou um valor máximo para o ângulo de 60° e um decréscimo para os ângulos maiores. Portanto, com este ângulo obteve-se o maior volume de metal fundido por comprimento de solda.

TABELA 33 - Valores calculados das áreas das secções transversais dos cordões de solda para chapas de 4.5 mm.

Intensidade de corrente, A	Área da secção transversal, mm ²			
	30°	60°	90°	120°
50	0.59	0.60	0.64	0.30
75	2.36	2.79	2.02	1.63
100	4.16	5.60	4.56	4.39
160	13.41	15.79	14.82	12.71
205	29.35	32.47*	29.29*	21.88

* Estes valores não indicam a área real pois houve fusão total dos corpos de prova (a penetração seria maior do que a espessura do corpo de prova, ver Figura 49e).

Aplicando a relação de SAVAGE et alii [2] para efeito de comparação, obtiveram-se os seguintes resultados:

$$A_c = 4,29 \cdot 10^{-4} \cdot I^2$$

I = 50 A	A _c = 1.07 mm ² média
I = 75 A	A _c = 2.41 mm ² média
I = 100 A	A _c = 4.29 mm ² média
I = 160 A	A _c = 10.98 mm ² média
I = 205 A	A _c = 18.03 mm ² média

Com estes resultados e os dados experimentais máximos e mínimos obtidos em função de cada ângulo de vértice, plotados na Figura 55, verificou-se que a taxa de 10% encontrada pela relação anterior não se aplica no trabalho. Neste caso, situa-se acima de $\pm 100\%$, tornando claro que a área da solda é dependente do ângulo de ponta do eletrodo, não tendo aplicabilidade a fórmula anteriormente proposta.

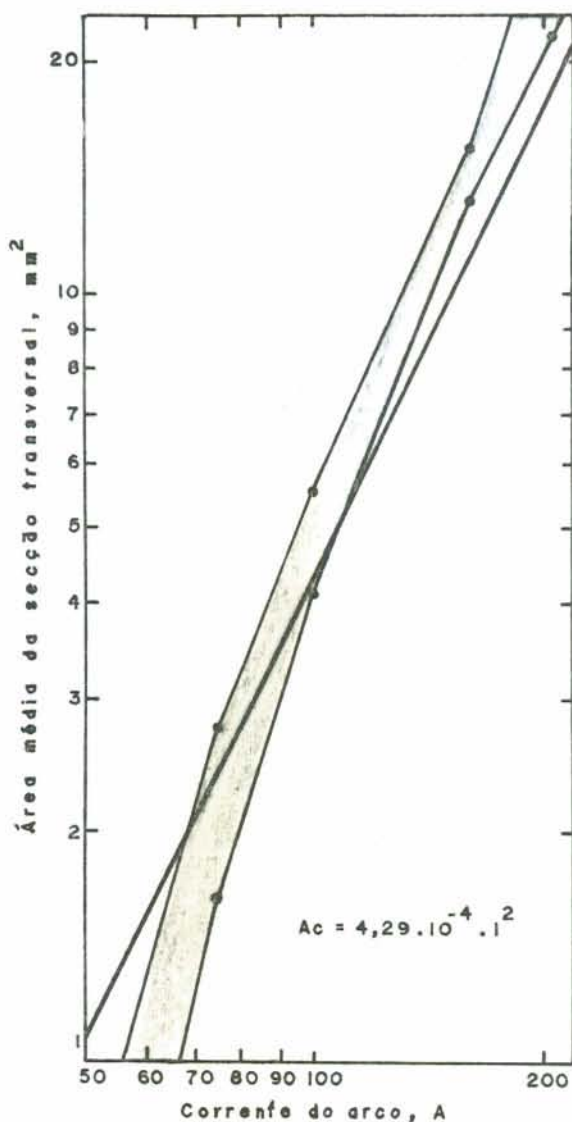


FIGURA 55 - Valores das áreas calculadas dos cordões de solda obtidos e relacionadas à aplicação da fórmula proposta por SAVAGE. Nota-se a variação com relação a linha cheia acima de 100%.

CONCLUSÕES

Verifica-se que a influência da ponta do eletrodo, no processo de soldagem TIG, é bastante significativa sobre o cordão de solda obtido. A importância do controle do ângulo como é afiado o eletrodo, manifesta-se sobre vários parâmetros da soldagem.

1) A primeira influência da ponta do eletrodo é sobre a característica tensão-corrente do arco de soldagem. Mantendo-se uma corrente constante, a tensão depende diretamente do ângulo de vértice, aumentando com a diminuição da extremidade. Portanto, operando com ângulos menores, maior é a tensão do arco para uma determinada corrente.

2) Outro parâmetro dependente da geometria da ponta do eletrodo é a velocidade de avanço da tocha (velocidade de avanço da soldagem). Com menores ângulos de vértice a soldagem deve efetuar-se de modo mais lento, pois acima de uma velocidade limite ocorrem a formação de defeitos. Este limite estaria diretamente ligado aos parâmetros utilizados.

3) Em relação a largura do cordão de solda obtido, há um decréscimo da mesma à medida que aumenta-se o ângulo de extremidade do eletrodo (para uma mesma amperagem). Estes resultados independem da espessura da chapa, mantendo as mesmas características da diminuição. A diferença de largura entre os ângulos extremos considerados, podem atingir até aproximadamente um valor de 70% para uma mesma intensidade de corrente. Com estes dados, é possível selecionar para a execução de um determinado trabalho o ângulo com que deve ser afiado o eletrodo. No caso

de soldas de grandes áreas (por exemplo, recobrimento superficial), seria interessante a utilização de um ângulo pequeno para obtenção de um cordão mais largo, poupando assim tempo de soldagem.

4) A vazão do gás de proteção não altera a largura do cordão que mantém-se constante.

5) Com o aumento da velocidade de avanço da soldagem, diminui a largura do cordão mas mantendo sempre a característica de menor largura para maiores ângulos de extremidade.

6) O Comprimento do arco (gap), afeta a largura do cordão mas mantém a característica anteriormente citada. Maiores comprimentos de arcos, maiores cordões de solda.

7) A penetração da solda aumenta com o aumento do ângulo da ponta do eletrodo. Para ambos os tipos de chapas utilizadas, 4.5 e 6.4 mm houve maior penetração com ângulos maiores. Para as chapas mais finas observou-se um pequeno decréscimo da penetração com o ângulo maior (120°). Quanto ao comportamento com relação a penetração em função da porcentagem da espessura, não conseguiu-se resultados satisfatórios para qualquer tipo de conclusão. Para o ângulo de 60° verificamos que a variação da penetração é maior, ou seja, o valor obtido é mais acentuado com respeito aos ângulos menores. Com ângulos maiores esta diferença não é muito evidente. Levando-se em conta a área da secção transversal, os maiores valores obtidos foram também para o ângulo de 60° .

A diferença observada nos diversos trabalhos pesquisados deve-se provavelmente ao material de base utilizado não ser o mesmo no estudo do efeito do ângulo de vértice do eletrodo.

Nota-se pelos resultados deste trabalho, que realmente existe a necessidade de controlar-se o formato da ponta do eletrodo no processo de soldagem TIG automatizado, pois sua influência é bastante significativa sobre o cordão de solda obtido.

6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1 - Estudar o comportamento do ângulo da extremidade do eletrodo com relação a soldagem automatizada de tubulações.

2 - Em função do ângulo de ponta analisar as propriedades mecânicas dos cordões de solda obtidos.

3 - Verificar a influência da ponta do eletrodo na macro e microestrutura resultante no cordão de solda com o registro do regime térmico.

4 - Trabalhar com materiais especiais (aço inoxidável, metais não ferrosos, etc...) verificando o comportamento dos elementos de liga na geometria do cordão de solda com variações da ponta do eletrodo.

5 - Pesquisar a influência da variação da ponta do eletrodo com deposição de material de adição (processo automatizado de alimentação do arame).

6 - Modificar o tipo de preparação das bordas a unir e verificar o comportamento do ângulo do eletrodo no cordão. Substituir a soldagem "bead-on-plate" por situações práticas com juntas de topo e chanfradas.

7 - Pesquisar a influência de vários gases e misturas de gases na geometria e característica do cordão de solda em função do ângulo de extremidade.

8 - Modificar o sistema utilizado neste trabalho (movimento da tocha) por um sistema em que o corpo de prova se desloca e a tocha é mantida fixa.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ROPER, J. R. & OLSON, D. L. Capillarity effects in the GTA weld penetration of 21-6-9 stainless steel. Welding Journal, 57(4):103s-107s, April 1978.
- 2 - SAVAGE, W. F. et alii. The effect of electrode geometry in gas tungsten arc welding. Welding Journal, 44(11):489s-496s, November 1965.
- 3 - MILNER, D. R. et alii. Arc characteristics and their significance in welding. British Welding Journal, 7(2):73-88, February 1960.
- 4 - SPILLER, K. R. & MacGREGOR, G. J. Effect of electrode vertex angle on fused weld geometry in TIG welding. Proc. of the conf. on advances in weld processes, Welding Institute. Cambridge, April 1970, p.82-88.
- 5 - CHIHOSKI, R. A. The rationing of power between the gas tungsten arc electrode. Welding Journal, 49(2):69s-82s, February 1970.
- 6 - GLICKSTEIN, S. S. et alii. Investigation of alloy 600 welding parameters. Welding Journal, 54(4):113s-122s, May 1975.
- 7 - HOULDCROFT, P. T. Tecnologia de los procesos de soldadura. Barcelona, CEAC, 1980. 365p.
- 8 - GOLDMAN, K. & WHITE, E. S. Effect of anode material on arc mechanism. British Welding Journal, 12(9):430-434, September 1965.
- 9 - CHASE JR, T. F. & SAVAGE, W. F. Effect of anode composition on tungsten arc characteristics. Welding Journal, 50(11), 467s-473s, November 1971.
- 10 - KEY, J. F. Anode/cathode geometry and shielding gas interrelationships in GTAW. Welding Journal, 59(12):364s-379s, December 1980.

- 11 - STEPANOV, V. V. & NECHAEV, V. I. On the pressure of the plasma arc. Svar. Proiz., v.11, p.4-5, 1974.
- 12 - SAVAGE, W. F. et alii. Effect of arc force on defect formation in GTA welding. Welding Journal, 58(7):212s-224s, July 1979.
- 13 - CHIHOSKI, R. A. The effects of varying electrode shape on arc, operations, and quality of welds in 2014-T6 aluminum. Welding Journal, 47(5):210s-222s, May 1968.
- 14 - MESSEGER, C. L'arc électrique en construction soudée, état actuel et perspectives. Soudage et Techniques Connexes, p.21-28, Janvier/Février 1983.
- 15 - AMERICAN SOCIETY OF METALS, ASM. Welding, Brazing and soldering. Ohio, v.6, 1983. 1152p.
- 16 - JACKSON, M. D. Welding, methods and metallurgy. Londres, Griffin, 1967. 422p.
- 17 - AMO, J. M. & DE PALÊNCIA, J. F. Recientes desarrollos del procedimiento TIG en el soldeo del aluminio y sus aleaciones. Revista de Soldadura, 1(1):37-43, 1971.
- 18 - WINSOR, L. P. & TURK, R. R. A comparative study of thoriated, zirconiated and pure tungsten electrodes. Welding Journal, 36(3):112s-118s, March 1957.
- 19 - CARY, H. B. Modern welding technology. New Jersey, Prentice-Hall, 1980. 736p.
- 20 - DAVIES, A. C. The science and practice of welding. Cambridge, University Press, 2v, 1984. 444p.
- 21 - BRADSTREET, B. J. Effect of surface tension and metal flow on weld bead formation. Welding Journal, 47(7): 314s-322s, July 1968.
- 22 - MILLS, G. S. Fundamental mechanisms of penetration in GTA welding. Welding Journal, 58(1):21s-24s, January 1979.
- 23 - NEEDHAM, J. C. Recommended practice for voltage and current measurement in arc welding. International Institute of Welding (IIW), COM II-084, p.1-7, 1984.
- 24 - INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING. The physics of welding. Oxford, Pergamon Press, 1984. 297p.

- 25 - SHAW, C. B. Diagnostic studies of the GTAW arc. Welding Journal, 54(3):81s-86s, March 1975.
- 26 - HUDSON, R. G. Manual do engenheiro. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1970. 369p.

ANEXO II - Valores máximos e mínimos encontrados para a largura e profundidade do cordão de solda. Chapa de 6.4 mm de espessura.

CORPO DE PROVA	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	CP VI	CP VII	CP VIII	CP IX	CP X	CP XI	CP XII	CP XIII	CP XIV	CP XV	CP XVI	
Ângulo do eletrodo	30°	30°	30°	30°	60°	60°	60°	60°	90°	90°	90°	90°	120°	120°	120°	120°	
I(A)	100	165	215	245	100	165	215	245	100	165	215	245	100	165	215	245	
U(V)	18.0	19.0	20.0	20.8	16.0	18.0	19.0	19.5	16.0	17.5	18.6	19.3	19.5	17.5	18.5	19.0	
Q (kJ/mm)	0.86	1.50	2.05	2.44	0.76	1.42	1.96	2.29	0.76	1.38	1.91	2.29	0.74	1.38	1.90	2.29	
Largura (mm)	Mín.	4.70	8.00	9.90	10.85	3.75	7.05	9.10	10.80	4.10	7.15	8.80	10.80	3.55	6.60	8.10	9.40
	Máx.	5.90	8.50	10.20	11.75	4.40	7.80	9.50	10.90	4.30	7.35	9.60	10.90	4.15	7.00	8.30	10.40
	\bar{M}	5.40	8.30	10.00	11.20	4.20	7.50	9.30	10.85	4.20	7.20	9.20	10.80	3.80	6.80	8.00	10.00
<p>Gás: Argônio - vazão 10 l/min Eletrodo: Tungstênio toriado 2% - EWTh 2 Diâmetro: 3.0 mm Gap: 1.5 mm Extensão fora do bocal: 3.0 mm Velocidade de soldagem: 125 mm/min Corpo de prova: Aço carbono, espessura: 6.4 mm \bar{M}: Média de todos os valores encontrados</p>																	
Profundidade (mm)	Mín.	1.68	1.95	2.65	2.80	1.70	2.15	2.75	3.05	1.70	2.31	2.75	3.05	1.80	2.80	3.11	3.45
	Máx.	1.80	2.00	2.70	3.15	2.05	2.45	2.79	3.15	1.75	2.65	2.95	3.10	2.00	2.90	3.16	4.00
	\bar{M}	1.70	2.00	2.65	3.00	1.85	2.25	2.75	3.10	1.70	2.55	2.85	3.15	1.90	2.85	3.15	3.80

ANEXO III - Valores máximos e mínimos encontrados para a largura do cordão de solda em função da velocidade.

CORPO DE PROVA	CP 1A	CP IV	CP 2A	CP 3A	CP 4A	CP VIII	CP 5A	CP 6A	CP 7A	CP XII	CP 8A	CP 9A	CP 10A	CP XVI	CP 11A	CP 12A		
Ângulo do eletrodo	30°	30°	30°	30°	60°	60°	60°	60°	90°	90°	90°	90°	120°	120°	120°	120°		
Velocidade (mm/min)	100	125	150	250	100	125	150	250	100	125	150	250	100	125	150	250		
I(A)	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245		
U(V)	20.6	20.8	20.8	-	19.5	19.5	19.5	-	19.3	19.5	19.4	-	18.0	19.1	19.0	19.1		
Largura (mm)		Mín.	12.00	10.85	H	H	11.70	10.80	9.70	8.10	11.00	10.80	9.00	-	10.50	9.40	8.00	7.10
		Máx.	12.40	11.75	H	H	12.20	10.90	10.10	8.70	11.75	10.90	9.40	-	11.50	10.40	8.00	8.10
		M	12.13	11.20	H	H	12.07	10.85	9.85	8.41	11.40	10.80	9.20	-	11.00	10.00	8.28	7.68

Gás: Argônio - vazão 10 l/min

Eletrodo: Tungstênio toriado 2% - EWTh 2

Diâmetro: 3.0 mm

Gap: 1.5 mm

Extensão fora do bocal: 3.0 mm

Corpo de prova: Aço carbono, espessura: 6.4 mm

M: Média de todos os valores encontrados