

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SELEÇÃO DOS PARÂMETROS EM SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO DE AÇOS COMUNS  
AO CARBONO

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

JOSÉ PIOTROVSKI NETO

FLORIANÓPOLIS  
SANTA CATARINA - BRASIL  
AGOSTO - 1980

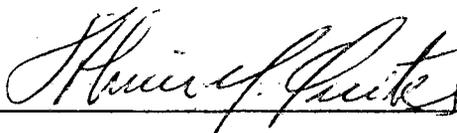
SELEÇÃO DOS PARÂMETROS EM SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO DE AÇOS COMUNS  
AO CARBONO

OSÉ PIOTROVSKI NETO

ESTA TESE FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PE  
LO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



PROF. ALMIR MONTEIRO QUITES, M.Sc.

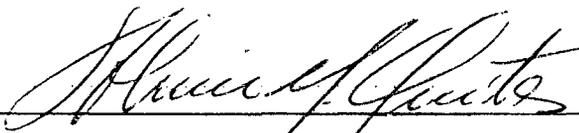
ORIENTADOR



PROF. ARNO BLASS, Ph.D.

COORDENADOR

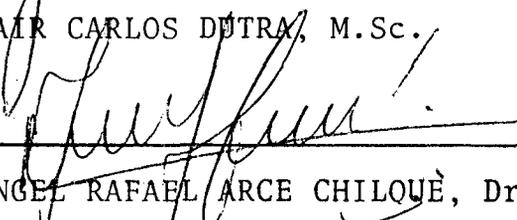
BANCA EXAMINADORA



PROF. ALMIR MONTEIRO QUITES, M.Sc.



PROF. JAIR CARLOS DUTRA, M.Sc.



PROF. ANGEL RAFAEL ARCE CHILOUÉ, Dr. Sc.

A . minha esposa Carla

Aos meus sogros Olegário e Terezinha

Aos meus pais Bento e Dorita

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

Ao Prof. Almir Monteiro Quites, pela orientação e participação a tiva neste trabalho, como também pelo estímulo e ensinamentos dis pensados.

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela cooperação e ensinamentos dispen sados.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, pelo apoio recebido.

A empresa Eutetic/Castolin, na pessoa do Sr. Pilade F. dos Santos, pelas análises químicas.

Ao pessoal do Laboratório de Soldagem que comigo trabalharam des de 1979.

Ao CNPq pela ajuda financeira.

Ao mestrando Sérgio Afonso Dias pelo coleguismo e apoio recebido.

R E S U M O

Este trabalho aborda inicialmente os aspectos gerais do processo de soldagem a arco submerso, envolvendo os equipamentos, os materiais de base, elétrodos e fluxos usados. Em segundo lugar é estudado o consumo de eletrodo em função dos parâmetros de soldagem. Em terceiro e quarto lugar este trabalho trata da geometria da solda, sendo que, em um, é feito um estudo da geometria da solda em função de cada parâmetro de soldagem e em outro, procura-se estabelecer campos de utilização através da imposição de critérios quanto à forma do cordão e quanto ao tipo de passe de soldagem, buscando determinar as condições ótimas de soldagem para os critérios estabelecidos. Em seguida faz-se uma análise da solda quanto às variações na composição química, na geometria, no consumo de eletrodo e do fluxo, na dureza em função do nível de energia e polaridade. Por último apresenta-se um estudo da susceptibilidade a trinca, em dois aços, em função do nível de energia.

SUMMARY

Initially general aspects of submersed arc welding are treated, regarding equipment, base materials, electrodes and fluxes. Next the electrode consumption is studied as a function of welding parameters. Welding geometry is dealt with, also as a function of welding parameters. Utilization fields are then established, by prescribing suitable criteria as regards the shape of the welding seam and kind of welding pass, in order to determine optimum welding conditions for the prescribed criteria. An analysis results, of the influence on welding of variations in chemical composition, geometry, flux and electrode consumption and hardness in terms of energy and polarity. Finally, two steels are studied with respect to cracking susceptibility in terms of energy level.

## I N T R O D U Ç Ã O

Embora a soldagem a arco submerso já venha sendo empregada desde os meados de 1930, pouco se conhece sobre as relações entre suas características operacionais, tecnológicas e econômicas. Por isso, neste trabalho se propõe estudar as características operacionais deste processo como parte integrante de um programa mais geral onde se objetiva o aprofundamento do estudo das relações entre estas características e as tecnológicas e econômicas.

Contudo, um trabalho desta natureza só é exequível se algumas restrições forem feitas. Neste, estas restrições impuseram o emprego de: (a) um único diâmetro de eletrodo, adequado tanto aos processos totalmente automáticos como semi-automáticos; (b) uma única combinação de eletrodo e fluxo, adequada à soldagem de aços não ligados de baixo teor de carbono; (c) apenas a corrente contínua, por ser a mais comumente empregada; (d) uma só espessura do metal de base.

S I M B O L O G I A

- A.A.C = área afetada pelo calor
- b = largura da solda
- C = consumo de eletrodo
- Cf = consumo de fluxo
- CC = corrente contínua
- CC<sup>-</sup> = polaridade direta
- CC<sup>+</sup> = polaridade inversa
- d = diâmetro do eletrodo
- e = espessura do metal de base
- f = folga da junta (junta I)
- I = corrente
- K(K<sub>1</sub>,K<sub>2</sub>,K<sub>3</sub>) = níveis de energia
- Kx = constante (bxr)
- Ke = coeficiente de forma externo
- Ki = coeficiente de forma interno
- n = número de rotações
- P = produção de material de adição
- p = penetração da solda
- r = reforço da solda
- S = área total da solda
- Sad = área adicionada da solda
- Sp = área penetrada da solda
- t = distância da tomada de corrente ao metal de base
- Va = velocidade de avanço do arame eletrodo
- Ve = velocidade equivalente
- Vs = velocidade de soldagem

SUMÁRIO

## CAPÍTULO I : ASPECTOS GERAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

1 . INTRODUÇÃO .....	01
2 . SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO .....	01
3 . PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO .....	02
4 . VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO .....	03
4.1 . Vantagens .....	04
4.2 . Limitações do Processo .....	04
5 . DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO .....	04
5.1 . Fontes de Energia .....	04
5.1.1 . Fontes de Energia do Tipo Correntē Constante .....	06
5.1.2 . Fontes de Energia do Tipo Tensão Constante .....	08
5.2 . Unidade de Controle .....	10
5.3 . Conjunto de Alimentação do Arame Elétrodo ..	11
5.4 . Alimentador de Fluxo .....	12
6 . ABERTURA DO ARCO .....	12
7 . MATERIAIS .....	12
7.1 . Material de Base .....	12
7.2 . Arame Elétrodo .....	13
7.3 . Fluxos .....	16

## CAPÍTULO II : ESTUDO DO CONSUMO DE ELÉTRODOD (kg/h) EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

1 . INTRODUÇÃO .....	24
----------------------	----

2 .	DEFINIÇÃO .....	24
3 .	CONSUMO DO ELÉTRODO EM FUNÇÃO DA CORRENTE: INTENSIDADE E POLARIDADE .....	24
4 .	CONSUMO DE ELÉTRODO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DO ELÉTRODO .....	30
5 .	CONSUMO DO ELÉTRODO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO ELÉTRODO .....	34
6 .	INFLUÊNCIA DA TENSÃO NO CONSUMO DO ELÉTRODO .....	34
7 .	INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FLUXO NO CONSUMO DE ELÉTRODO .....	35
8 .	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM SOBRE O CONSUMO DO ELÉTRODO .....	36
9 .	LINHAS DE IGUAL CONSUMO .....	37
10 .	CONCLUSÕES .....	40

### CAPÍTULO III : GEOMETRIA DA SOLDA EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

1 .	INTRODUÇÃO .....	42
2 .	DEFINIÇÕES .....	42
3 .	FATORES QUE AFETAM A GEOMETRIA DA SOLDA .....	43
4 .	INFLUÊNCIA DA FOLGA NA GEOMETRIA DA SOLDA .....	50
5 .	CONCLUSÕES .....	52

### CAPÍTULO IV : SELEÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM QUANTO O CRITÉRIO DE PASSES.

1 .	INTRODUÇÃO .....	55
2 .	GEOMETRIA DA SOLDA .....	55
3 .	MORFOLOGIA DA SOLDA .....	65

3.1 . Linhas de Regularidade .....	65
3.2 . Linhas de Isopenetração .....	65
3.3 . Linhas de Iso-Ki e Iso-Ke .....	65
4 . SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM PELO CRITÉRIO DE PASSES .....	71
4.1 . Passes de Enchimento .....	71
4.2 . Passes de Recobrimento .....	72
4.3 . Passes de Penetração .....	72
4.4 . Critérios de Passes .....	72
4.4.1 . Passes de Enchimento .....	72
4.4.2 . Passes de Penetração .....	78
4.5 . Seleção das Condições de Soldagem para Pas- ses de Enchimento .....	80
4.6 . Seleção das Condições de Soldagem para Pas- ses de Penetração .....	87
4.7 . Conclusões .....	90

CAPÍTULO V : IMPORTÂNCIA DO NÍVEL DE ENERGIA NAS PROPRIEDADES DA SOLDA.

1 . INTRODUÇÃO .....	92
2 . ESPECIFICAÇÕES .....	92
3 . ESTUDO EXPERIMENTAL DA GEOMETRIA DA SOLDA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE ENERGIA E POLARIDADE .....	93
3.1 . Análise dos Resultados .....	95
3.1.1 . Quanto a Área Adicionada .....	98
3.1.2 . Quanto a Área Penetrada .....	95
3.1.3 . Quanto a Área Afetada pelo Calor ...	96
3.1.4 . Quanto a Largura do Solda .....	96
3.1.5 . Quanto ao Reforço da Solda .....	97

3.1.6 . Quanto a Penetração da Solda .....	97
4 . METALURGIA DA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO .....	97
4.1 . Análise dos Resultados .....	100
4.1.1 . Quanto ao Comportamento do Si e Mn.	100
4.1.2 . Quanto ao Comportamento do C .....	102
4.1.3 . Quanto ao Fósforo e o Enxôfre .....	103
4.1.4 . Quanto ao Mg e Ti .....	104
5 . ESTUDO EXPERIMENTAL DA DUREZA DA SOLDA .....	104
5.1 . Procedimento Experimental .....	104
5.2 . Análise dos Resultados .....	107
6 . CONSUMO DE ELÉTRODO, PRODUÇÃO E MATERIAL DE ADIÇÃO E CONSUMO DE FLUXO EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE ENERGIA.	108
7 . ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS .....	109
7.1 . Passes de Enchimento .....	113
7.2 . Passes de Penetração .....	113
7.3 . Dureza .....	113
8 . CONCLUSÕES .....	113

CAPÍTULO VI : TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO DE AÇOS COMUNS AO CARBONO  
DURANTE O PROCESSO EM SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

1 . INTRODUÇÃO .....	115
2 . IDENTIFICAÇÃO DAS LINHAS DE SOLIDIFICAÇÃO .....	115
3 . MECANISMO E NATUREZA DA TRINCA DE SOLIDIFICAÇÃO.	116
4 . TESTE TEEKEN .....	120
6 . CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE TEEKEN COM A SOLDAGEM EM CASOS NORMAIS .....	121
7 . SUCEPTIBILIDADE A TRINCA DO AÇO SAE 1020 .....	122
8 . SUCEPTIBILIDADE A TRINCA DO AÇO SAE 1030 .....	123
9 . CONCLUSÕES .....	123

CAPÍTULO VII : CONCLUSÕES GERAIS .....	124
BIBLIOGRAFIA .....	125
ANEXO I : DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CURVAS DE CONSUMO DE ELÉTRODO EM FUNÇÃO DA CORRENTE .....	126
ANEXO II : DADOS EXPERIMENTAIS DO ESTUDO DA GEOMETRIA DA SOLDA EM FUNÇÃO DA CORRENTE .....	135
ANEXO III : EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO UTILIZADO NESTE ESTUDO .....	149
GLOSSÁRIO : .....	154

## CAPÍTULO I

### ASPECTOS GERAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

#### 1) INTRODUÇÃO

Os aspectos gerais do processo de soldagem a arco submerso, estudados neste capítulo, envolvem o equipamento, o arame elétrodo e o fluxo.

É feita uma análise geral do equipamento quanto as unidades que o compõe e a sua forma de utilização. Quanto ao arame elétrodo e o fluxo, a análise envolve as suas formas de utização, e também de como são compostos.

#### 2) SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

É um processo de soldagem a arco em que o calor necessário para a soldagem é suprido por um arco (ou arcos), de desenvolvido entre o elétrodo (consumível) e a peça-obra. O arco é envolto por uma camada de fluxo glanular e fusível, que cobre o metal da solda fundido próximo a junta, e protege o metal da solda fundido da contaminação atmosférica.

### 3) PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

Na soldagem a arco submerso, a corrente elétrica escoia através do arco e da poça fundida, que consiste de fluxo fundido e metal da solda fundida. O fluxo fundido é altamente condutivo, enquanto que no estado sólido não conduz eletricidade. O fluxo além de atuar como uma camada protetora, pode conter desoxidantes e elementos de limpeza que reagem quimicamente com o metal fundido. Fluxos para a soldagem de aços ligas podem conter elementos de liga que modificam a composição do metal soldado.

A figura 1.1 mostra como uma soldagem a arco submerso é realizada. A corrente elétrica de um gerador, transformador-retificador, ou transformador passa através do tubo de contato, e deste ao arame elétrodo, para produzir um arco entre este e o metal de base. O calor do arco funde o elétrodo, o fluxo, e também o metal de base, formando uma poça fundida que preenche a junta. Em todos os tipos de equipamentos, mecanismos acionam o arame-elétrodo, consumível, através de um tubo de contato (bico) e através da cobertura de fluxo para a junta a soldar. O elétrodo, geralmente um aço de baixa liga de composição química rigorosamente controlada, é enrolado em um carretel ou em um tambor. O elétrodo funde-se na zona de solda e é depositado ao longo da junta. O fluxo glanular é depositado adiante do arco, e, após a solidificação do metal, o fluxo não fundido pode ser recuperado e reusado.

A soldagem a arco submerso pode ser semi-automática, bem como totalmente automática, embora esta última, devido às vantagens inerentes, seja mais amplamente empregada.

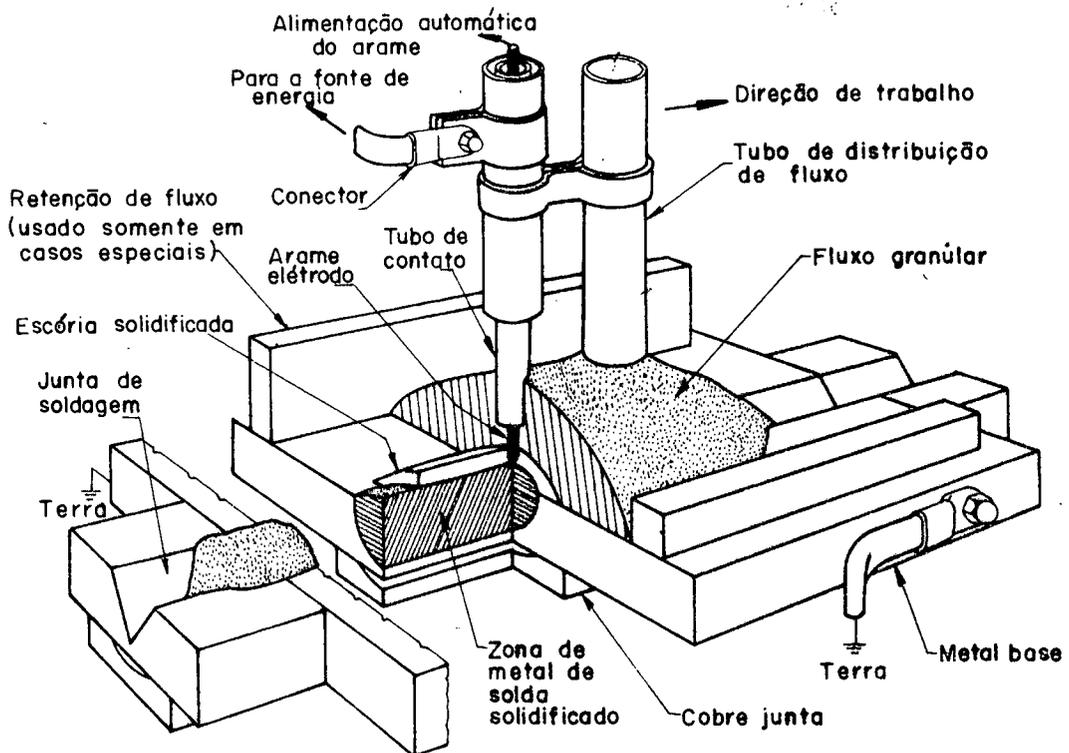


Fig. 1.1: Vista em corte de uma solda em junta e V, mostrando elementos de uma operação de soldagem a arco submerso.

Na soldagem semi-automática, o soldador guia a pistola de soldagem que alimenta o fluxo e o eletrodo para a junta. Na soldagem completamente automática, o equipamento automaticamente alimenta e guia o eletrodo e o fluxo ao longo da junta, controlando o consumo. Uma máquina típica para a soldagem automática a arco submerso é mostrado esquematicamente na Fig. 1.2.

Na mesma aplicação de soldagem a arco submerso automático, dois ou mais arames eletrodos podem ser alimentados simultaneamente para a mesma junta, sendo estes dispostos em paralelo ou em fila em relação a junta a ser soldada.

#### 4) VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO

#### 4.1) Vantagens

Em virtude do arco encontra-se confinado dentro de um líquido e este dentro de um pó, evitam-se excessivas perdas de calor por radiação e por isso, é o processo de soldagem a arco que propicia a menor perda de calor para o ambiente. Disso resulta que:

- a) Obtem-se uma elevada produção específica de material de adição, (Kg/h) que em consequência, propicia uma grande velocidade de soldagem.
- b) A penetração é grande, o que, além de cooperar para aumentar ainda mais a velocidade de soldagem, pode evitar em muitos casos a operação de chanframento ou diminuir a abertura das juntas em V.

Além dessas vantagens pode-se citar ainda que:

- O operador não precisa usar protetores visuais;
- O rendimento de deposição é mais elevado que nos outros processos.

#### 4.2) Limitações do processo

- a) A soldagem pode somente realizar-se nos limites da posição plana, ou na posição horizontal, desde que haja um suporte para o pó.
- b) O processo não é usado para soldagem de chapas finas.
- c) Impossibilidade de soldar juntas de difícil acesso.

#### 5) DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO

O equipamento para esse processo, basicamente consta das seguintes unidades, que é mostrado esquematicamente na Fig. 1.2.

- 5.1) Fonte de energia;
- 5.2) Unidade de controle;
- 5.3) Conjunto de alimentação do arame-eléctrodo, composta da bobina de arame e do dispositivo tracionador;
- 5.4) Pistola de soldagem;
- 5.5) Alimentador de fluxo.

#### 5.1) Fontes de energia

As fontes de energia para a soldagem à arco submerso podem ser:

a) Transformador, constituído basicamente por dois enrolamentos denominados primário e secundário. Neste caso ter-se-á um arco de corrente alternada.

b) Conversor, composto de um motor-gerador, que alimenta o arco com corrente contínua.

c) Um conjunto transformador retificador, que proporciona uma alimentação do arco também com corrente contínua.

Cada tipo de fonte diferencia-se com a necessidade de satisfazer a certos requisitos básicos que dependerão do processo de soldagem, e também do tipo de controle do cabeçote. Um desses requisitos refere-se ao comportamento da mesma, tendo em vista a tensão e a corrente, quando ela é submetida a uma variação de carga em regime estático. Este comportamento, chamado de característica estática, é representado por um gráfico, cujos pontos

que o constituem tem como coordenadas os pares tensão-corrente, que a fonte fornece quando dela é solicitada energia em regime estático. As fontes de energia, segundo suas características estáticas, classificam-se em fontes de tensão constante e fontes de corrente constante.

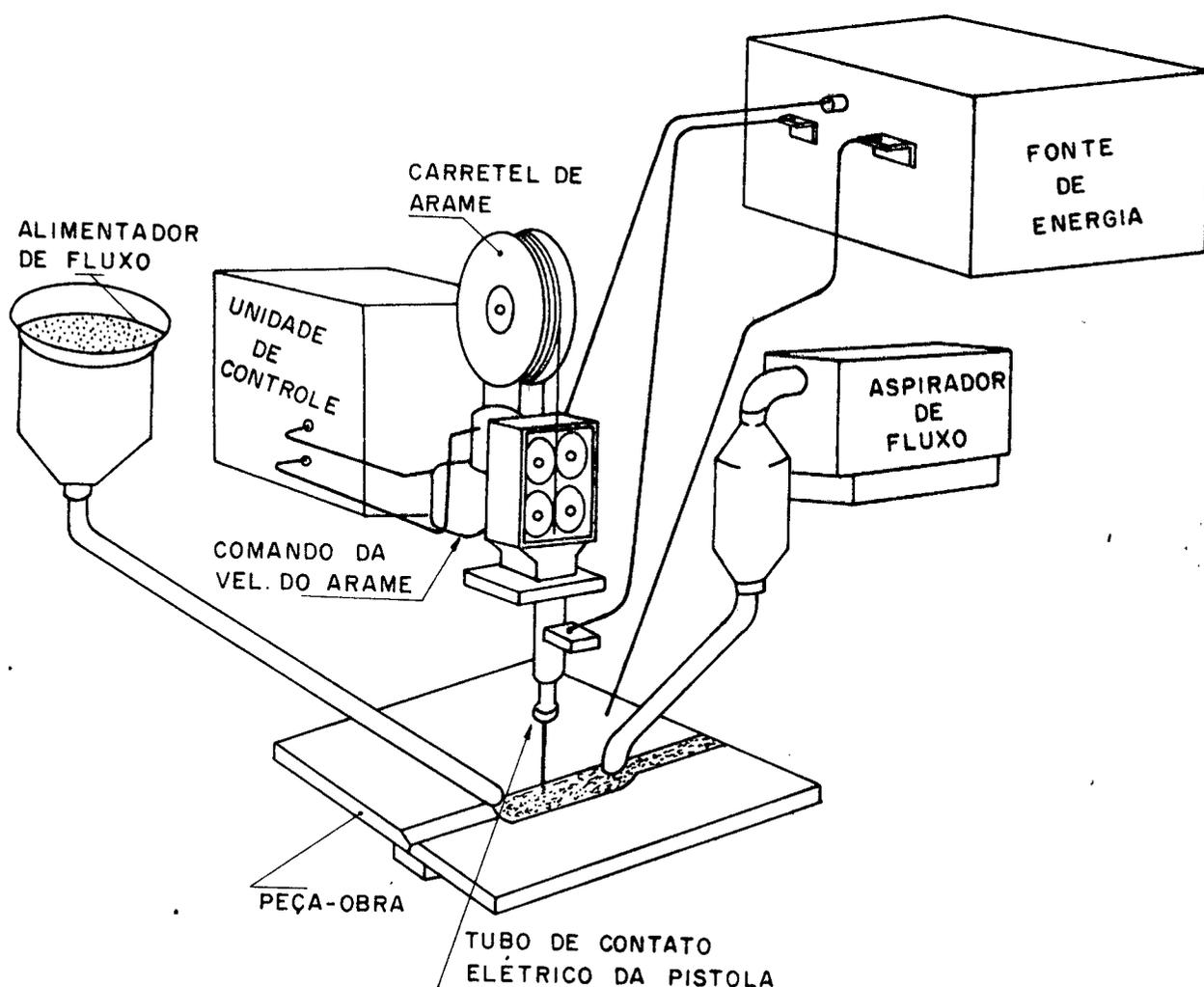


Fig. 1.2: Componentes essenciais de uma máquina de solda automática a arco submerso.

#### 5.1.1) Fontes de energia de corrente constante (Fig. 1.3)

Estes tipos de fontes apresentam características estáticas muito tombantes, e nota-se que uma grande variação ( $\Delta V$ )

de tensão ocasiona uma pequena variação ( $\Delta I$ ) na corrente. Como na soldagem manual, não se consegue manter o comprimento do arco constante, num determinado valor, uma variação no comprimento do mesmo corresponde a uma variação na tensão. Assim, uma variação no comprimento do arco voltaico, o que é sempre provável em soldagem manual, provocará uma variação na tensão, não havendo uma grande variação na corrente de soldagem. Logo, este tipo de fonte presta-se muito bem à soldagem manual.

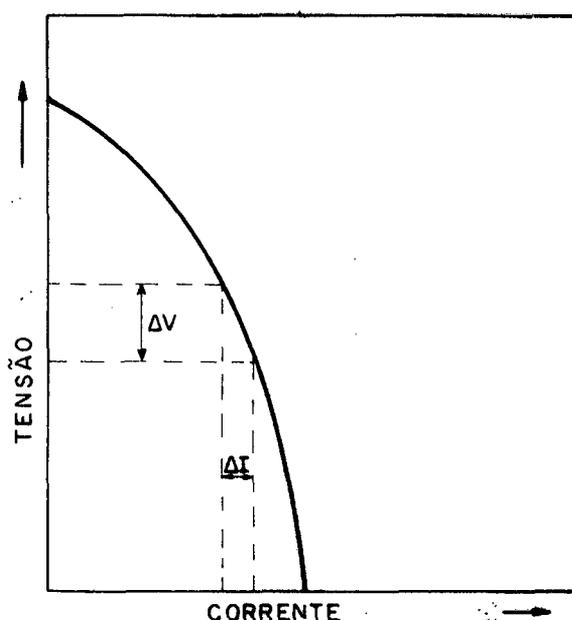


Fig. 1.3: Curva característica estática de fontes do tipo corrente constante.

Estas fontes também podem ser usadas para as soldagens automáticas, devendo o equipamento, neste caso, ser dotado de um dispositivo compensador na velocidade de alimentação do arame-elétrodo. Se por qualquer motivo a tensão do arco variar, imediatamente o motor de acionamento do arame-elétrodo recebe um estímulo no sentido de aumentar ou diminuir a taxa de alimentação do mesmo, conforme a tensão do arco aumente ou diminua, respecti-

vamente. A este sistema chama-se "Controle de Velocidade de Alimentação do Arame" ou "Controle Externo".

### 5.1.2) Fontes de energia de tensão constante (Fig. 1.4)

Estes tipos de fontes apresentam características estáticas pouco tombantes, e nota-se que uma pequena variação na tensão (V) ocasiona uma grande variação na corrente (I).

Como exposto anteriormente, na soldagem manual é difícil manter o comprimento do arco num valor constante e, uma variação do comprimento do arco voltaico corresponde a uma variação na tensão. Assim, para uma pequena variação no comprimento do arco voltaico, haverá uma grande variação na corrente de soldagem, daí conclui-se que tais fontes não se prestam a soldagem manual .

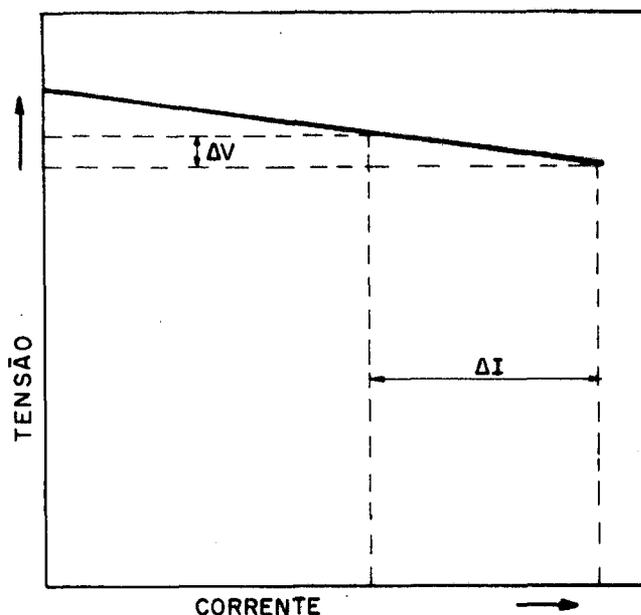


Fig. 1.4: Curva característica estática de fontes de energia do tipo tensão constante.

Tais tipos de fontes prestam-se muito bem para soldagens automáticas e semi-automáticas, nas quais o elétrodo sendo consumível é alimentado automaticamente ao arco voltaico, e deve-se isto ao próprio formato da característica estática. Para melhor compreensão disto, supõe-se, por exemplo, que o comprimento tenda a diminuir em um determinada instante, em resposta, a tensão de cresce um pouco, mas a corrente aumentará rapidamente fazendo com que a velocidade de fusão aumente tendendo a estabelecer o comprimento inicial do arco. Chama-se este sistema de "Controle da Velocidade de Fusão" ou "Controle Interno" e nele, o dispositivo de a limentação do arame-elétrodo não altera sua velocidade ao longo da soldagem.

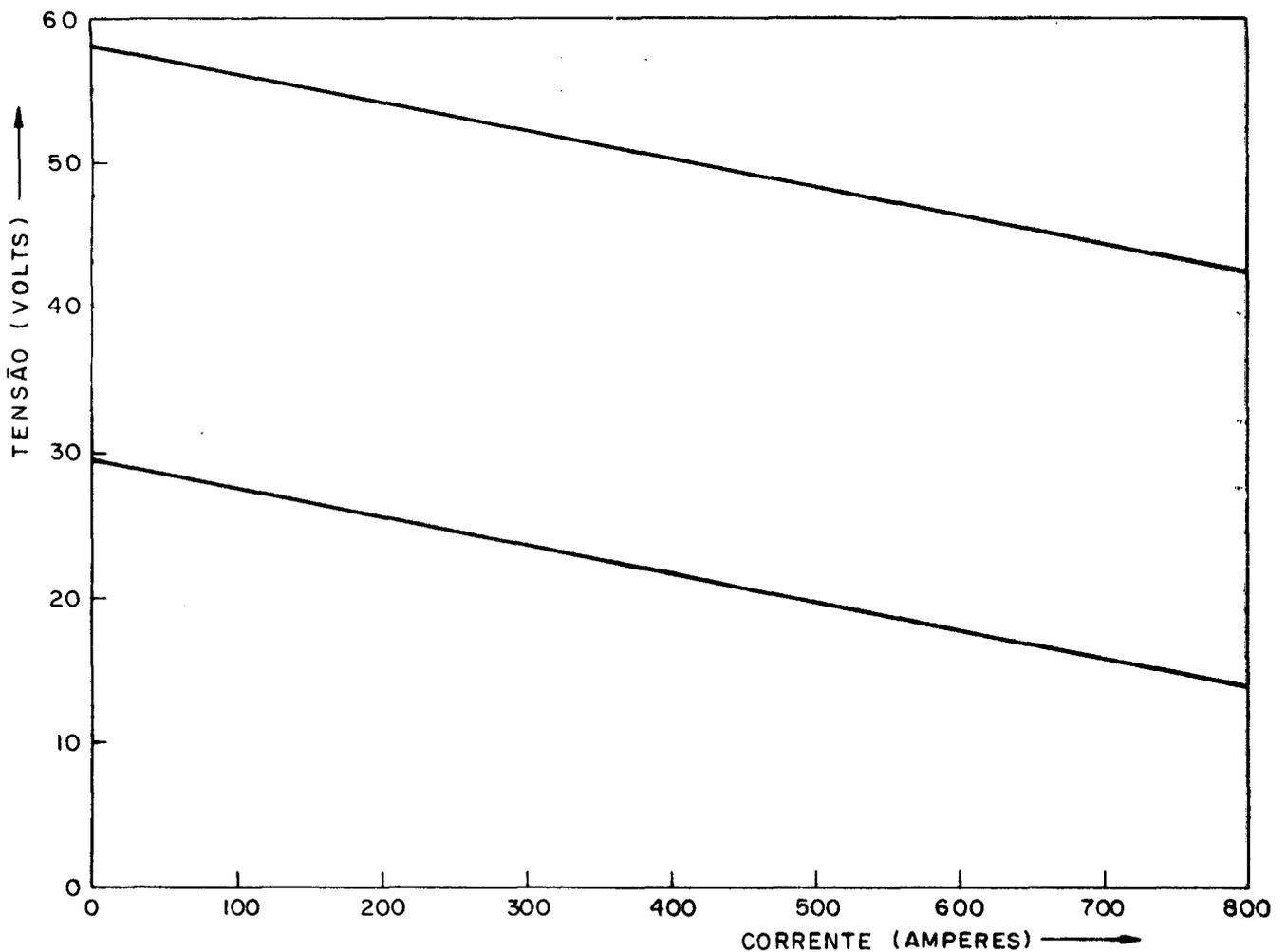


Fig. 1.5: curva característica estática da fonte de energia utilizada neste estudo. Fabricante S.A White Martins V-800.

Sendo a soldagem a arco submerso um processo próprio para ser empregado em soldagens automáticas, as fontes de energia mais adotadas neste processo são as de característica estática, pouco tombante (Fig. 1.4), ou seja, tensão constante. Neste estudo foi utilizado uma fonte de energia com característica estática de tensão constante (Fig. 1.5).

No gráfico da Fig. 1.5, mostram-se algumas das várias características estáticas da fonte de energia. A tensão, no caso, é ajustada continuamente na fonte de energia que a mantém aproximadamente constante ao longo da soldagem e a intensidade da corrente é ajustada pela velocidade de alimentação do arame no controle.

## 5.2) Unidade de controle

Geralmente nessa unidade localizam-se as chaves que controlam a alimentação do arame e ajustam a velocidade de soldagem e por vezes a fonte de energia. Nessa unidade também estão localizados um voltímetro e um amperímetro.

Essa unidade de controle apresenta-se em dois tipos, cada qual, como já mencionado anteriormente, adequado para um tipo de característica estática da fonte de energia, que são:

### a) Controle da velocidade de fusão

A tensão, no caso, é ajustada na fonte de energia que a mantém aproximadamente constante ao longo da soldagem, e a intensidade de corrente é ajustada pela velocidade de alimentação do arame no controle. Ao aumentar-se a velocidade do arame, aumenta-se a intensidade de corrente porque diminui a resistência elétrica do arco pela diminuição de seu comprimento, e de modo contrário, cai

a intensidade de corrente porque aumenta a resistência do arco pelo aumento de seu comprimento.

#### b) Controle da velocidade de alimentação

A velocidade de alimentação do arame é agora constantemente ajustada durante a soldagem, de forma a manter uma tensão previamente ajustada. No caso, a intensidade de corrente é regulada na fonte de energia.

### 5.3) Conjunto de alimentação do arame eletrodo

É composto por uma bobina de arame-eletrodo e um sistema de alimentação do eletrodo. Este sistema de alimentação é composto por um motor, redutor, e um sistema de rolos acionadores, e através de guias alimentam a zona de fusão de arame-eletrodo (Fig. 1.6).

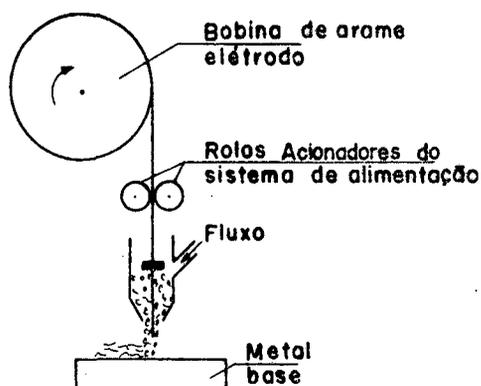


Fig. 1.6: Esquema mostrando a bobina de elimentação e rolos acionadores do arame eletrodo.

#### 5.4) Alimentador de fluxo

Para alimentar fluxo à zona de solda (geralmente por gravidade) tem-se um reservatório montado diretamente na estrutura do cabeçote ou fora, sendo a alimentação por tubos. No caso de solda semi-automática um pequeno reservatório de fluxo vai acoplado diretamente à tocha manuseada pelo operador.

#### 6) ABERTURA DO ARCO

Na abertura do arco pode ser usado os seguintes métodos, tanto na soldagem automática como semi-automática, que são:

- a) alta frequência
- b) retração instantânea do arame eletrodo
- c) fusão de uma pequena esfera de tela de aço
- d) arraste
- e) arame apontado
- f) com eletrodo de carbono

#### 7) MATERIAIS

##### 7.1) Material de base

A soldagem a arco submerso é usada para unir metais não ferrosos, ferrosos e ligas. É também usada para aplicar revestimento a metais de base para prover resistência a corrosão ou

outras propriedades<sup>3</sup>. As classes gerais de metais de base soldados são:

- a) Aços carbonos até 0,29% de carbono
- b) Aços carbonos a quente (normalizado ou temperado e recozido)
- c) Aços de baixa liga, temperados e recozidos
- d) Aços cromo-molibidênio (1/2% a 9% de Cr e 1/2% a 1% de Mo)
- e) Aços inoxidáveis cromo-níquel austeníticos
- f) Níquel e ligas de níquel (tipo solução sólida)

Sendo que as ligas enumeradas anteriormente, que podem ser soldadas pelo processo a arco submerso, dependem da utilização adequada de elétrodos e fluxos.

## 7.2) Arame-elétrodo

As bitolas de arames-elétrodos mais usadas situam-se na faixa entre 1,6 e 6,4mm (especificados segundo a AWS - A5 . 17-69).

Estes são produzidos em várias composições de liga ferrosas, que vai desde aços de baixo carbono não ligados a aços especiais de alta liga.

### Composição

A composição do arame-elétrodo é um fator para estabelecer e controlar a composição do metal da solda. Outros importantes fatores são a composição do fluxo e do metal de base, e os procedimentos de soldagem.

C.S.B.M.	AWS A5.17-69	COMPOSIÇÃO (%)			DIÂME- TROS	
		C	Mn	Si		
	EL8	0,10 MÁX	0,30 - 0,55	0,15 MÁX	1,59	ELÉTRODOS DE AÇO CARBONO (BAIXO Mn)
	EL8K	0,10 MÁX	0,30 - 0,55	0,10 - 0,20	1,98	
BMAS, 121	EL12	0,70-0,15	0,35 - 0,60	0,05 MÁX	2,38	
	EM5K	0,06 MÁX	0,90 - 1,40	0,40 - 0,70	3,18	ELÉTRODOS DE AÇO CARBONO (MÉDIO Mn)
	EM12	0,07-0,15	0,85 - 1,25	0,05 MÁX	3,97	
BMAS, 122	EM12K	0,07-0,15	0,85 - 1,25	0,15 - 0,35	4,76	
	EM13K	0,07-0,19	0,90 - 1,40	0,45 - 0,79	5,56	ELÉTRODO DE AÇO C/ 2% Mn
	EM15K	0,12-0,20	0,85 - 1,25	0,15 - 0,35	6,35	
BMAS, 126	EH14	0,10-0,18	1,75 - 2,25	0,05 MÁX		

Tabela 1.1: Classificação AWS com a composição limite de elétrodos para a soldagem a arco submerso.

A Tabela 1.1 lista a classificação AWS, a classificação da Companhia Belgo Mineira, os diâmetros de elétrodos comercialmente distribuídos e a composição limite para nove diferentes tipos de arames elétrodos que são largamente usados na soldagem a arco submerso de aços de baixo carbono. Esses elétrodos podem ser usados em adequadas combinações com classes AWS de fluxo, para produzir metal soldado com propriedades mecânicas especificadas.

A Tabela 1.2 mostra seis tipos de elétrodos de aço liga, com a sua composição química, que são empregados em soldagem a arco submerso.

#### Condições superficiais

A maioria dos arames elétrodos de aço não ligados de baixo carbono é levemente revestido com cobre. O revestimento de cobre protege contra a oxidação e garante bom contato elétrico entre o elétrodo e o tubo de contato da pistola de soldagem. O bom contato elétrico é essencial para a manutenção satisfatória das características do arco.

Oxidações ou outras contaminações superficiais podem produzir porosidades na solda, causa desgaste excessivo no tubo de contato, e efeitos adversos à característica do arco.

DESIGNAÇÃO COMUM	COMPOSIÇÃO %							
	O	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
1/2 Mo	0,13	1,95	0,04	0,010	0,020	—	—	0,53
1/2 Mo - 1Ni	0,14	1,85	0,04	0,010	0,015	—	1,00	0,51
1/4 Cr - 1/2 Mo	0,10	0,65	0,15	—	—	1,53	—	0,56
2/4 Cr - 1 Mo	0,10	0,62	0,20	—	—	2,47	—	0,95
4130	0,30	0,50	0,31	0,024	0,021	0,90	—	0,21
8620	0,21	0,78	0,32	0,020	0,023	0,50	0,60	0,22

Tabela 1.2: Composição de elétrodos de aço de baixa liga, comumente usados na soldagem a arco submerso.

#### Seleção do diâmetro do eletrodo

Esta seleção depende das condições do equipamento e aplicação. Diâmetros pequenos (1,6 a 2,0mm) é usado quase exclusivamente em equipamentos de soldagem semi-automáticos. O diâmetro de 2,38mm é usado tanto com equipamento semi-automático como com equipamentos totalmente automáticos. Os diâmetros grandes (3,2 e superiores) são usados somente com equipamentos totalmente automáticos, porque seu uso com equipamento semi-automático torna o cabo guia do arame mais rígido e difícil de manobrar.

#### Faixas de correntes

Na soldagem a arco submerso, um eletrodo de um diâmetro especificado pode operar dentro de uma faixa de corrente,

como mostrado na Tabela 1.3. A sobreposição de faixas de corrente torna possível o uso de diâmetros diferentes em uma particular corrente de soldagem. Mudando-se para um arame-elétrodo de diâmetro menor, em uma determinada corrente, pode servir para aumentar a penetração e reduzir o tamanho da gota de solda.

DIÂMETRO DO ARAME (mm)	SÉRIES DE CORRENTES (Ampers)
1,59 (1/16 in)	115 a 500
1,98 (5/64 in)	125 a 600
2,38 (3/32 in)	150 a 700
3,18 (1/8 in)	220 a 1000
3,96 (5/32 in)	340 a 1100
4,76 (3/16 in)	400 a 1300
5,55 (7/32 in)	500 a 1400
6,35 (1/4 in)	600 a 1600

Tabela 1.3: Faixas de correntes para arames elétrodos, usados em soldagem a arco submerso.

Com arames-elétrodos de diâmetros pequenos, o arco é iniciado mais facilmente do que com arames de diâmetros maiores, e arames de diâmetros pequenos são particularmente adequados para início de arco com alta frequência. Quando a corrente de soldagem é maior do que as indicadas na Tabela 1.3, um arame-elétrodo de diâmetro maior (resultando em uma alta densidade de corrente) proverá uma maior estabilidade do arco e uma alta produção de material de adição.

### 7.3) Fluxos

Os fluxos usados na soldagem a arco submerso são

materiais granulares e fusíveis, contendo óxidos de magnésio, sílício, titânio, alumínio, cálcio, zircônio e outros componentes. Eles são fundidos pelo arco e, na condição líquida, cobrem o metal da solda, protegendo-o da contaminação atmosférica. Os fluxos são geralmente quimicamente neutros, com respeito ao metal soldado, devendo não emitir grande quantidade de gases durante a soldagem, e devem ter características eletricamente estáveis de soldagem.

Os fluxos são classificados pela AWS com base nas propriedades mecânicas do metal depositado, segundo uma particular combinação de fluxo e eletrodo. Um fluxo usado em combinação com um eletrodo, de algumas das classes mostradas na Tabela 1.1, deve produzir metal fundido que combina com os requisitos na Tabela 1.4.

RESISTÊNCIA A TRAÇÃO:			
CLASSES	F60 até F64	62.000	a 80.000 psi
CLASSES	F70 até F74	72.000	a 95.000 psi
RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO:			
CLASSE	F60 até F64		50.000 psi
CLASSE	F70 até F74		60.000 psi
ALONGAMENTO - EM 2 in/min (TODAS AS CLASSES)			22 %
CHARPY - RESISTÊNCIA AO IMPACTO COM ENTALHE EM V			
CLASSES	F60 e F70	NÃO REQUERIDO	
CLASSES	F61 e F71	20 ft-lb em 0°F	
CLASSES	F62 e F72	20 ft-lb em 20°F	
CLASSES	F63 e F73	20 ft-lb em 40°F	
CLASSES	F64 e F74	20 ft-lb em 60°F	

Tabela 1.4: Propriedades mecânicas requeridas para a classificação de fluxos (AWS A5 17-69).

Segundo a Tabela 1.4, as propriedades mecânicas, são aquelas do metal soldado, produzido por uma das classes de fluxo em combinação com uma das classes mostradas na Tabela 1.1.

A designação do fluxo consiste da classe numérica, como mostrado na Tabela 1.4, seguida pela designação do eletrodo usado em combinação (por exemplo, F60-EL8).

#### Tamanho das partículas

Os fluxos para a soldagem a arco submerso são utilizados em uma variedade de tamanhos, que oscilam desde 8x48 a 8x325, malhas por polegada linear; a especificação, por exemplo, de 8x48 significa que este tamanho de partícula abrange as peneiras de 8 até 48 malhas por polegada linear.

O tamanho das partículas de fluxo, portanto, corresponde a malhas por polegadas linear em uma sequência de peneiras tabeladas, tais como mostrado na Tabela 1.5. Tamanhos de partículas de 250 malhas por polegada linear, são algumas vezes referidas por  $p\phi$  e podem ser apresentadas pela letra D, em vez do tamanho especificado da partícula. Assim, muitos fabricantes usam a designação de 48 x D em vez de 48x25, portanto, o "D" pode apresentar partículas de iguais tamanhos a 250 malhas por polegadas linear e menores.

A escolha do tamanho da partícula do fluxo para uma particular aplicação de soldagem depende da corrente usada, tipo de fluxo, velocidade de trabalho, e o tipo da solda sendo feita. A Tabela 1.6 fornece uma série de correntes de soldagem para um número de tamanhos padrões de fluxo. Por exemplo, tamanhos pequenos são desejáveis para altas correntes de soldagem, sendo que, tamanhos grandes são usados em pequenas correntes, devido a eles darem boas superfícies soldadas.

MALHA POR IN ou cm LINEARES		ABERTURA DA FENEIRA		DIÂMETRO DO EXAME	
IN	cm	IN	cm	IN	cm
8	3,15	0,093	2,36	0,032	0,813
9	3,54	0,078	1,98	0,033	0,838
10	3,94	0,065	1,65	0,035	0,889
12	4,72	0,055	1,40	0,028	0,711
14	5,51	0,046	1,17	0,025	0,635
16	6,30	0,039	0,991	0,0235	0,597
20	7,87	0,0328	0,833	0,0172	0,437
24	9,45	0,0276	0,701	0,0141	0,357
28	11,02	0,0232	0,589	0,0125	0,318
32	12,60	0,0195	0,495	0,0118	0,300
35	13,78	0,0164	0,417	0,0122	0,310
42	16,54	0,0138	0,351	0,0100	0,254
48	18,90	0,0116	0,295	0,0092	0,234
60	23,62	0,0097	0,246	0,0070	0,178
65	25,50	0,0082	0,208	0,0072	0,183
80	31,50	0,0069	0,175	0,0056	0,142
100	39,37	0,0058	0,147	0,0042	0,107
115	45,28	0,0049	0,124	0,0038	0,097
150	59,06	0,0041	0,104	0,0026	0,066
170	66,93	0,0035	0,089	0,0024	0,061
200	78,74	0,0029	0,074	0,0021	0,053
250	98,43	0,0024	0,061	0,0016	0,041
270	106,3	0,0021	0,053	0,0016	0,041
325	128,0	0,0017	0,043	0,0014	0,036

Tabela 1.5: Tabela mostrando malhas lineares, abertura da peneira e diâmetro do arame.

Para a soldagem sobre superfícies oxidadas ou oleosas, tamanhos grosseiros são preferidos, porque, eles são mais permeáveis e liberam gases mais livremente.

#### Tipos de fluxos

Os fluxos para a soldagem a arco submerso são produzidos em três formas:

- a) fundidos
- b) mistura mecânica, e

## c) aglomerados

Tamanho das Partículas de fluxo	Corrente (Ampers)
8 x 48; 14 x 48; 12 x 65; 10 x 150	Até 1100
12 x 150	600 a 1100
12 x 200	600 a 1750
20 x 200; 35 x 200	600 até acima de 1750

Tabela 1.6: Correntes indicadas para tamanhos comuns de grãos de fluxo, em soldagem a arco submerso.

## a) Fluxos fundidos

São fluxos, em que os ingredientes são misturados a seco e após fundido em um forno elétrico, pelo aquecimento generalizado da passagem de altas correntes através do banho líquido. Após o fluxo líquido pode ser salpicado em água ou salpicado em chapa fria para prover a forma granular do fluxo.

## Vantagens do fluxo pré-fundido:

- Possui boa homogeneidade química;
- Finos podem ser removidos através da mudança de composição do fluxo;
- O produto não é hidrocópico, assim elimina o problema da estocagem;
- As porções não fundidas podem ser reusadas muitas vezes;
- São adequadas para altas velocidades em operações de soldagem.

A principal desvantagem dos fluxos pré-fundidos é que desoxidantes e ferros-ligas não podem ser adicionados sem segregação ou proibitivas perdas durante o processo, devido as altas temperaturas envolvidas.

#### b) Fluxos misturados mecanicamente

São fluxos onde os componentes são misturados a frio juntamente com a adição de silicato de potássio ou silicato de sódio. A mistura resultante é pelletizada, secada em uma baixa temperatura e fragmentada por meios mecânicos.

#### Vantagens do fluxo caucionado:

- Devido as baixas temperaturas envolvidas no processo de caucionação, desoxidantes metálicos e ferros-ligas podem ser adicionados ao fluxo;
- A densidade do fluxo é menor, permitindo assim o uso de camadas mais grossas na zona da solda;
- A escoria solidificada é facilmente destacável após a solda.

Uma desvantagem de um fluxo caucionado é que finos não podem ser removidos sem alguma alteração do fluxo. Outra desvantagem é que estes fluxos são prováveis absorventes de umidade.

#### c) Fluxos aglomerados

São fluxos similares aos fluxos misturados exceto que um aglutinante cerâmico é usado. As altas temperaturas de cura do aglutinante ( $2.550^{\circ}\text{F}$  ou  $1.400^{\circ}\text{C}$ ) limita o uso de desoxidantes e ferro-ligas, como com fluxos fundidos.

#### Composição dos fluxos

No desenvolvimento do processo de soldagem a arco

submerso, nos meados de 1930, fluxos pré-fundidos consistindo de silicatos complexos, foram usados. As formulações foram principalmente silicatos de alumina, magnésio, manganês e cálcio.

A Tabela 1.7, mostra como exemplo, uma composição típica de fluxo pré-fundido e misturado mecânicamente.

SUBSTÂNCIA	FLUXO % FUNDIDO	FLUXO MISTURA MEC. %
MnO	42,0	36,5
MnO <sub>2</sub>	—	5,2
SiO <sub>2</sub>	45,0	38,0
CaF <sub>2</sub>	6,9	3,9
CaO	1,2	0,8
MgO	0,3	2,7
BaO	0,1	0,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0	1,1
FeO	1,5	—
F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	2,7
TiO <sub>2</sub>	0,1	0,1
K <sub>2</sub> O	0,4	1,5
Na <sub>2</sub> O	0,4	0,1
PbO	0,1	0,1
Fe Si (50%)	—	7,1
TAXA DE MnO/SiO <sub>2</sub>	$\frac{42,0}{45,0} = 0,93$	$\frac{40,7}{45,6} = 0,89$

Tabela 1.7: Composição típica de fluxo de silicato de manganês para a soldagem a arco submerso.

#### Condutividade e viscosidade dos fluxos

A viscosidade de fluxo deve ser adequada de forma a impedir o escorrimento do metal da solda líquida, permitir a rápida solução dos constituintes não metálicos, tais como óxidos, e permitir a saída dos gases do metal soldado.

Os fluxos granulares para a soldagem a arco sub

merso, em temperatura ambiente são isolantes elétricos, a resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura, e os fluxos são altamente condutivos nas temperaturas dominantes durante a soldagem.

#### BIBLIOGRAFIA:

- 1.1. Almir M. Quites e Jair C. Dutra - Tecnologia da Soldagem a arco voltaico.
- 1.2. Metals Handbook - ASM - Vol. 6 - Welding and Brazing.
- 1.3. Welding Handbook - AWS - Vol. 2 - Welding Processes - ARC and gas Welding and Cutting, Brazing, and Soldering.

## CAPÍTULO II

ESTUDO DO CONSUMO DE ELÉTRODO (Kg/h) EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM1) INTRODUÇÃO

Devido ao fato de ser comum referir-se ao consumo de elétrodo em função apenas da corrente de soldagem, este estudo apresenta uma análise da influência, além da corrente, da polaridade, da distância de tomada de corrente ao metal de base, do diâmetro do elétrodo, da velocidade de soldagem, da tensão e da composição química do fluxo no consumo do elétrodo. Esses outros aspectos são possivelmente importantes na seleção de processos e parâmetros de soldagem na obtenção de uma soldagem econômica.

2) DEFINIÇÃO

O consumo do elétrodo no processo de soldagem a arco submerso, trabalhando-se com fluxo sem pó de ferro, é a quantidade de material fundido de elétrodo por unidade de tempo.

3) CONSUMO DO ELÉTRODO EM FUNÇÃO DA CORRENTE: Intensidade e pola-

ridade.

O comportamento do consumo de elétrodo em função da corrente, nas duas polaridades ( $CC^+$  e  $CC^-$ ), foi determinado experimentalmente em quatro tensões diferentes ( $V = 30, 35, 40$  e  $45$  volts) e nas condições de soldagem da Tabela 2.1. O método experimental e seus resultados pode ser visto no anexo I.

O resultado desse estudo, e isto é universalmente aceito, mostrou que o consumo de elétrodo aumenta com o aumento da intensidade da corrente. As figuras 2.1 e 2.2 mostram a variação do consumo do elétrodo em função da corrente, mantendo-se constante a tensão ( $V = 30, 35, 40$  e  $45$  volts) e a distância da tomada de corrente ao metal de base ( $t = 32\text{mm}$ ), na polaridade direta (fig. 2.1) e polaridade inversa (fig. 2.2).

MATERIAL DE BASE	- Aço SAE 1010 de 12,7mm de espessura												
FLUXO	- F 70 (ARMCO 780)												
PROCESSO	- Soldagem plana, deposição sobre face - Elétrodo de 2,38mm de diâmetro com movimento retilíneo (sem oscilações transversais) - Velocidade de soldagem = 20cm/min												
ARAME	- AWS - EL 12 (EMAS 121) <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>C(%)</td> <td>Mn(%)</td> <td>Si(%)</td> <td>P(%)</td> <td>S(%)</td> <td>Cu(%)</td> </tr> <tr> <td>0,12</td> <td>0,40</td> <td>0,05</td> <td>0,03</td> <td>0,035</td> <td>0,15</td> </tr> </table>	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	0,12	0,40	0,05	0,03	0,035	0,15
C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)								
0,12	0,40	0,05	0,03	0,035	0,15								
FONTE DE ENERGIA	- Retificador do tipo tensão constante												
CORRENTE UTILIZADA	- Corrente contínua												

Tabela 2.1: condições de soldagem usada na determinação das curvas de consumo em função dos parâmetros de soldagem.

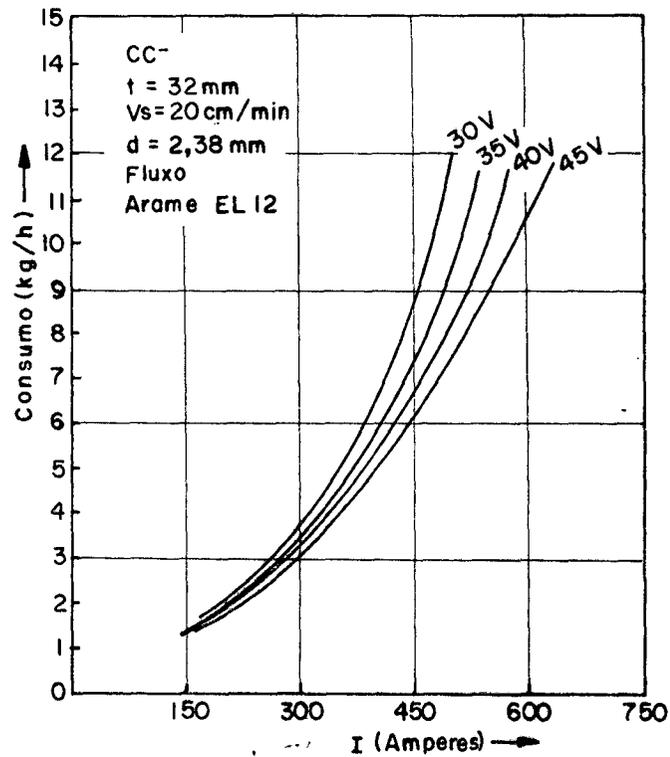


Fig. 2.1: consumo de eletrodo em função da intensidade da corrente na polaridade direta (CC<sup>-</sup>).

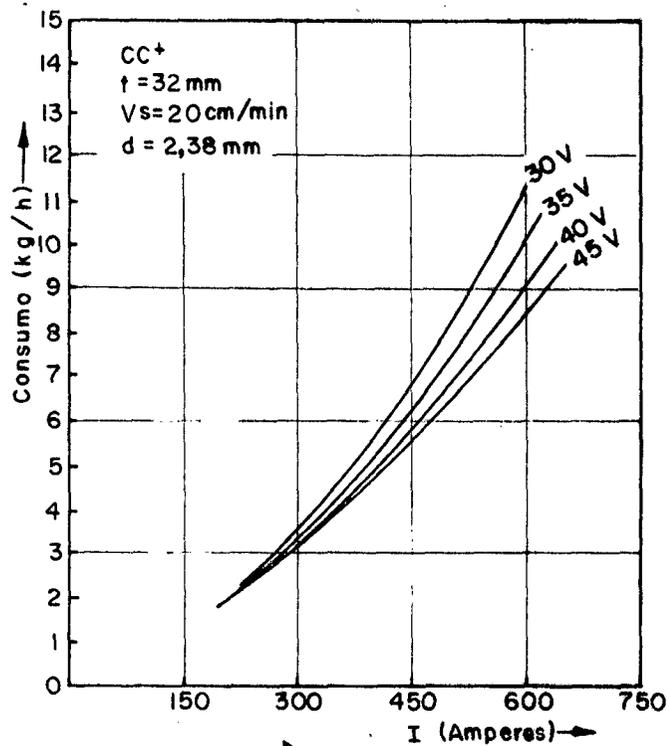


Fig. 2.2: consumo de eletrodo em função da corrente na polaridade inversa (CC<sup>+</sup>).

Observou-se também, e isto pode ser visto na figura 2.3, que, para uma determinada tensão ( $V = 30$  e  $45$  volts) e uma mesma distância da tomada de corrente ao metal de base ( $t = 32\text{mm}$ ) obtém-se maiores consumos de elétrodo em polaridade direta ( $CC^-$ ) do que em polaridade inversa ( $CC^+$ ). Segundo W. Mantel<sup>2.1</sup>, quando se utiliza corrente alternada o consumo é intermediário entre a polaridade direta e a inversa. Para tentar explicar o maior consumo associado à polaridade direta ( $CC^-$ ) deve-se considerar as características gerais do arco elétrico, para um elétrodo consumível. A figura 2.4 ilustra a concepção básica desta característica, mostrando as formas do arco para um arame nú em atmosfera inerte, em baixas intensidades de correntes e conectados ao polo positivo ( $CC^+$ ) e ao polo negativo ( $CC^-$ ). Em cada caso o arco está uniformemente distribuído sobre a superfície do ânodo, e o foco do cátodo se encontra em liberdade para mover-se erráticamente sobre a superfície disponível<sup>2.6</sup>. Aceita-se que em ( $CC^+$ ) transfere-se uma gota em baixas densidades de corrente (transferência globular - gotejamento), quando pelo aumento da temperatura se reduz a tensão superficial da gota líquida a um valor inferior a força de Lorenz. Acima de uma certa temperatura e intensidade de corrente (corrente de transição) produz-se ebulição na superfície do ânodo e não podem formar-se gotas grandes; começa a existir uma evaporação parcial na ponta do elétrodo projetando metal líquido através do arco em formas de gotas pequenas (transferência por aerossol). Devido a ponta do elétrodo, conectado ao polo positivo ( $CC^+$ ), receber eletrons durante a manutenção do arco, se sustenta que as gotas que são transferidas através do arco estão uniformemente superaquecidas, e que a elevada temperatura da gota metálica promove uma rápida reação com a escória de soldagem.

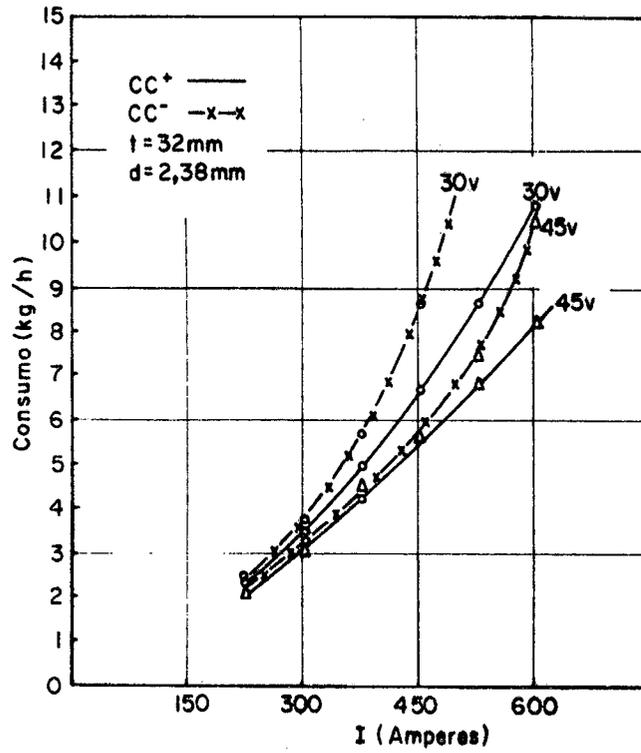


Fig. 2.3: influência da polaridade no consumo do elétrodo.

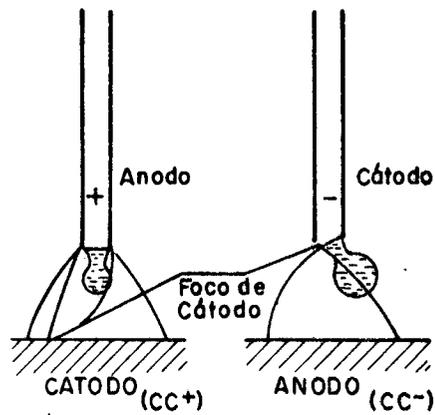


Fig. 2.4: características da forma do arco, e baixas intensidades de corrente em CC<sup>+</sup> e CC<sup>-</sup>.

Quando o elétrodo é conectado ao polo negativo ( $CC^-$ ), considera-se que a transferência da gota é governada pelo efeito errático do foco do cátodo. Devido a gota não se manter em um ponto fixo, e a velocidade do movimento aumentar com o aumento da intensidade da corrente, o arco elétrico entra em contato direto com a ponta do elétrodo. Este contato direto do arco provoca um maior aquecimento do elétrodo e, portanto, um aumento na quantidade de elétrodo que funde. Por outro lado, as gotas que se transferem através do arco estão relativamente frias, devido ao fato de o cátodo utilizar a maior parte do calor sobre o elétrodo sólido.

O arco de soldagem dividi-se em três zonas em termos de queda de potencial<sup>2,3</sup> (Fig. 2.5), as quedas de potencial do ânodo, plasma e cátodo, e a tensão do arco será a soma destas três quedas. Sendo a queda de potencial de cátodo sensivelmente maior que a correspondente do ânodo, deve desenrolar-se maior energia no cátodo, o que explicaria maior consumo em  $CC^-$ .

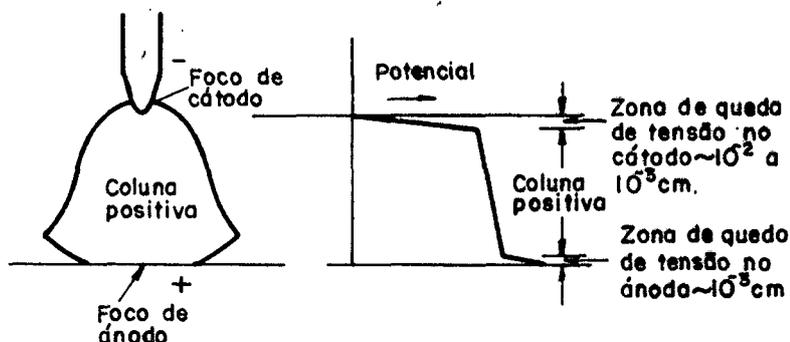


Fig. 2.5: queda de potencial entre o cátodo, plasma e ânodo.

Como exposto, e estas são as hipóteses explicativas atuais, o maior consumo em CC<sup>-</sup> é devido ao fenômeno do foco de cátodo errático e a existência de um maior gradiente de voltagem no cátodo do que no ânodo.

#### 4) CONSUMO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DO ELÉTRODO

Chama-se de comprimento do eletrodo, como mostrado na figura 2.6, a distância entre a tomada de corrente e a ponta do eletrodo (ou o lugar onde ocorre o contato arco-eletrodo). Como na prática não é possível medir esta distância, devido ao arco e a ponta do eletrodo estarem imersos no fluxo, o que se ajusta é a distância entre a tomada de corrente e o material de base.

O fator que limita a intensidade da corrente, em que o eletrodo pode ser utilizado, é o auto-aquecimento; este auto-aquecimento é o calor dissipado ao longo do eletrodo, entre a tomada de corrente e o arco elétrico.

Existem três mecanismo básico pelos quais o eletrodo pode aquecer, que são:

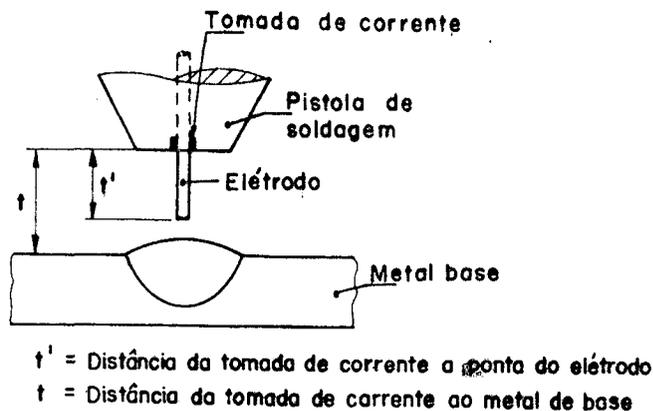


Fig. 2.6: representação esquemática do extremo da pistola de soldagem a arco submerso.

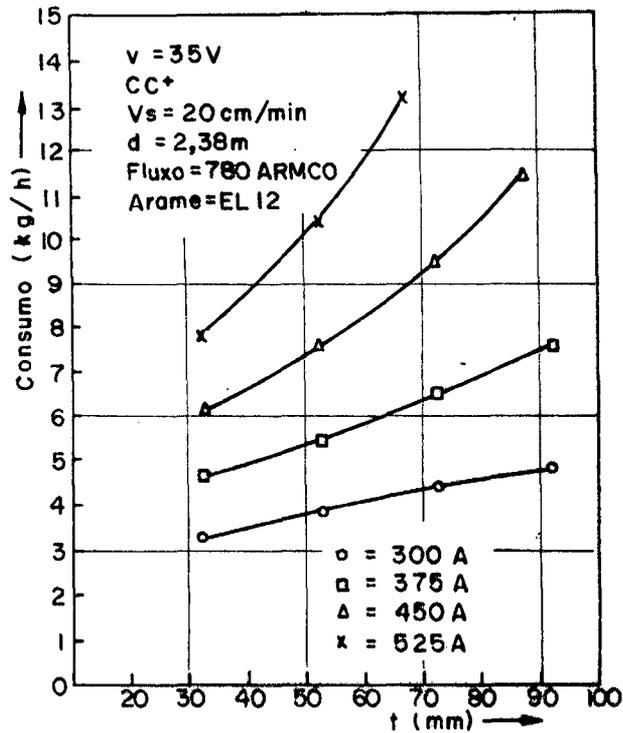


Fig. 2.7: influência da distância da tomada de corrente ao metal de base (t) no consumo de eletrodo.

a) Por absorção de calor por convecção ou radiação. Estas quantidades de calor são desprezíveis na maioria dos casos práticos de soldagem elétrica;

b) Por condução desde a ponta do eletrodo (arco elétrico) até a tomada de corrente; foi demonstrado<sup>2,4</sup> que este efeito é desprezível para eletrodos revestidos e para eletrodos contínuos;

c) Por geração de calor ao circular uma certa intensidade de corrente I por uma resistência R (comprimento útil do eletrodo), o calor gerado é  $I^2R$ , expressando I em amperes e R em ohms.

Esta quantidade de calor varia com a temperatura da

mesma maneira que a resistividade do condutor varie.

As curvas das figuras 2.7 e 2.8 mostram que, para uma determinada tensão ( $V = 35$  volts) e corrente ( $I = 300, 375, 450$  e  $525$  amperes) constante, tanto em polaridade direta ( $CC^-$  fig. 2.8) ou inversa ( $CC^+$  fig. 2.7), o consumo do eletrodo (Kg/h) aumenta com o aumento da distância entre a tomada de corrente e o metal de base ( $t$ ). Sendo que, estas curvas foram obtidas do estudo experimental do consumo em função da corrente em diferentes distâncias da tomada de corrente ao metal de base, e isto é mostrado em anexo I.

A distância da tomada de corrente ao metal de base ( $t$ ) é limitado na prática. Com  $t$  muito grande, a resistência mecânica descrece, e haverá uma solicitação muito grande sobre o sistema de guias do arame. Encontrou-se uma fórmula empírica <sup>2.5</sup> para o máximo extremo livre de arame  $t$ , que é:

$$t = d^2 (140 - 0,08 \times I) - 2$$

Embora não se tenha feito um estudo sistemático a respeito deste assunto acredita-se que além do decréscimo da resistência mecânica, a distância da tomada de corrente ao metal de base também pode ser limitada pelo auto-aquecimento do eletrodo e as condições físicas do arco. Portanto, o aumento da distância da tomada de corrente ao metal de base além de produzir um auto-aquecimento excessivo do eletrodo, por efeito Joule, resultando em instabilidade do arco e mesmo em fusão do eletrodo que não se encontra em contato com o arco. Produz, também, uma grande queda de tensão, resultando em uma diminuição necessária para a existência do arco ou continuidade do mesmo.

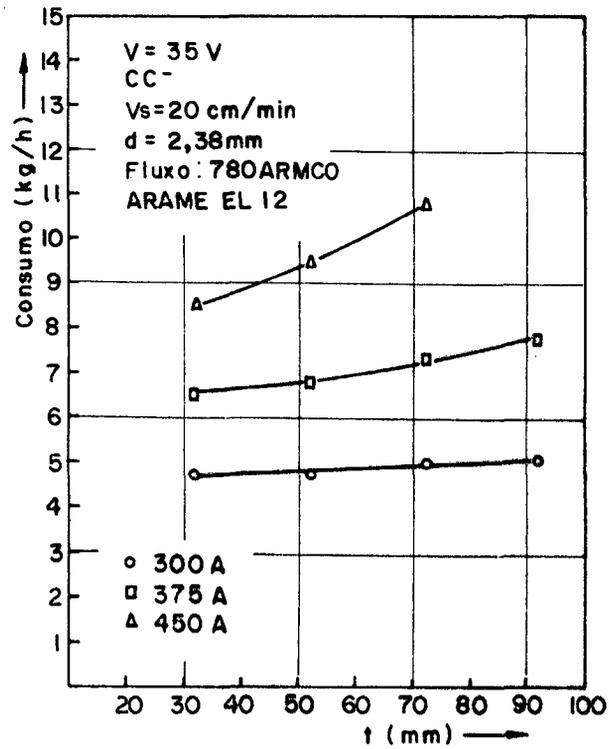


Fig. 2.8: influência da distância da tomada de corrente ao metal de base (t) no consumo de eletrodo.

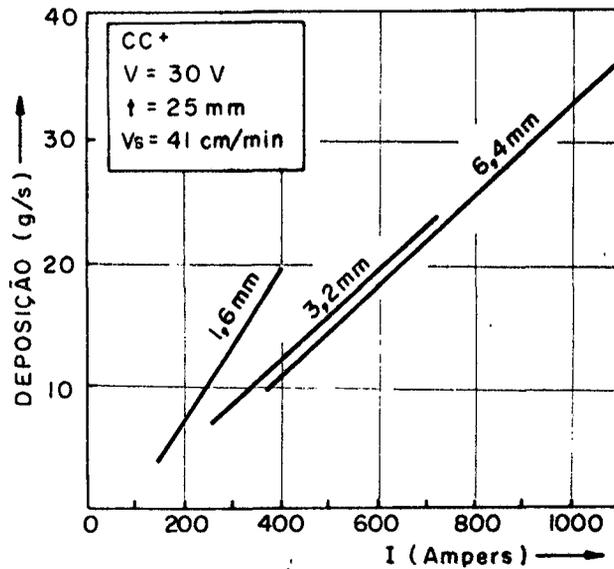


Fig. 2.9: consumo versus corrente, para três diferentes diâmetros de arame, segundo Renwick

## 5) CONSUMO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO ELÉTRODO

A figura 2.9<sup>2.6</sup>, mostra a influência do diâmetro do eletrodo nas curvas de consumo x corrente, para três diferentes diâmetros, que são 1,6, 3,2 e 6,4mm. Nestas curvas, nota-se que para os diâmetros 3,2 e 6,4mm, o consumo é aproximadamente e quivalente, e sensivelmente maior para o diâmetro de 1,6mm. Este efeito, de maior consumo com diâmetros menores é explicado pelo fato de que, com diâmetros pequenos o fator de aquecimento  $I^2 R$  é maior. Portanto, para uma mesma corrente e mesma distância entre a tomada de corrente e o metal de base é preferível trabalhar com diâmetros de eletrodos menores.

## 6) INFLUÊNCIA DA TENSÃO NO CONSUMO DE ELÉTRODO

Entende-se como tensão de trabalho, a soma da queda de tensão no extremo livre do arame mais a do arco elétrico.

A tensão, como é mostrado nas figuras 2.10 e 2.11, influencia no consumo do eletrodo; tanto em polaridade direta ( $CC^-$ ) como em polaridade inversa ( $CC^+$ ) o consumo diminui com o aumento da tensão, mantidos constantes a corrente e a distância da tomada de corrente ao metal de base. Estas curvas foram obtidas do estudo do consumo versus a corrente em quatro tensões ( $V = 30, 35, 40$  e  $45$  volts), que é mostrado no anexo I.

Para uma dada intensidade de corrente e composição química do fluxo<sup>2.1</sup> o comprimento do arco aumenta linearmente com

a tensão (fig. 2.12). Portanto, quando aumenta a tensão mais fluxo funde, devido a um maior comprimento efetivo do arco e uma maior quantidade de energia total e disponível se dissipa para fundir o fluxo e se dissipa por radiação e convecção. Logo, se supõe, que a redução no consumo ao aumentar a tensão no arco, se deve a diminuição do efeito do aquecimento  $I^2 R$  que quando aumenta o comprimento do arco diminui o extremo livre do arame; e pode ser visto, nas figuras 2.10 e 2.11, que este efeito é mais pronunciado em intensidades de correntes mais elevadas.

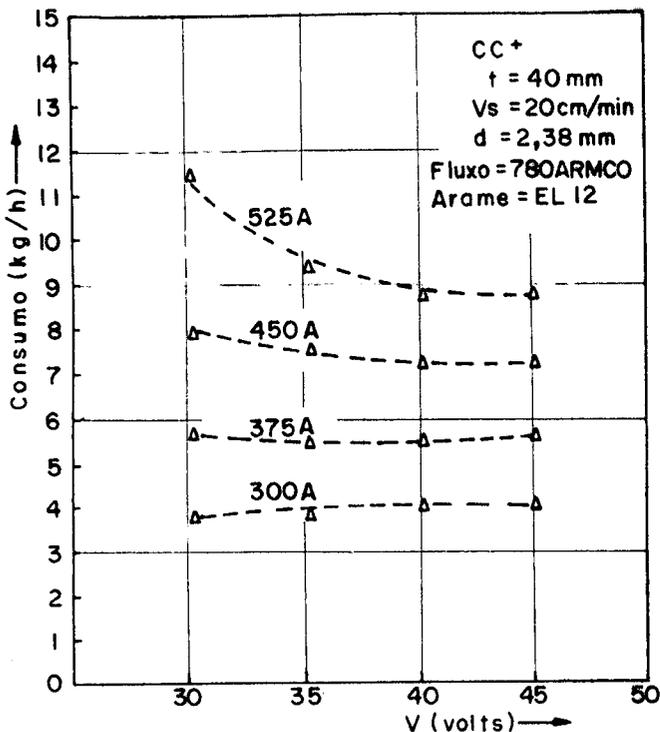


Fig. 2.10: consumo de eletrodo (Kg/h) em função da tensão (volts) em polaridade inversa (CC<sup>+</sup>)

## 7) INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FLUXO NO CONSUMO DE ELÉTRODO

Os dados que se encontram na literatura afirmam

que a composição química do fluxo exerce influência sobre a velocidade de deposição. Mantel<sup>2.1</sup> diz que isto ocorre quando se trabalha com corrente contínua polo negativo (CC<sup>-</sup>).

## 8) INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM SOBRE O CONSUMO DE ELÉTRODO

Velocidade de soldagem significa a velocidade de execução de um único passe.

A velocidade de soldagem não altera o consumo do eletrodo, tratando-se de uma variável independente ao consumo do eletrodo.

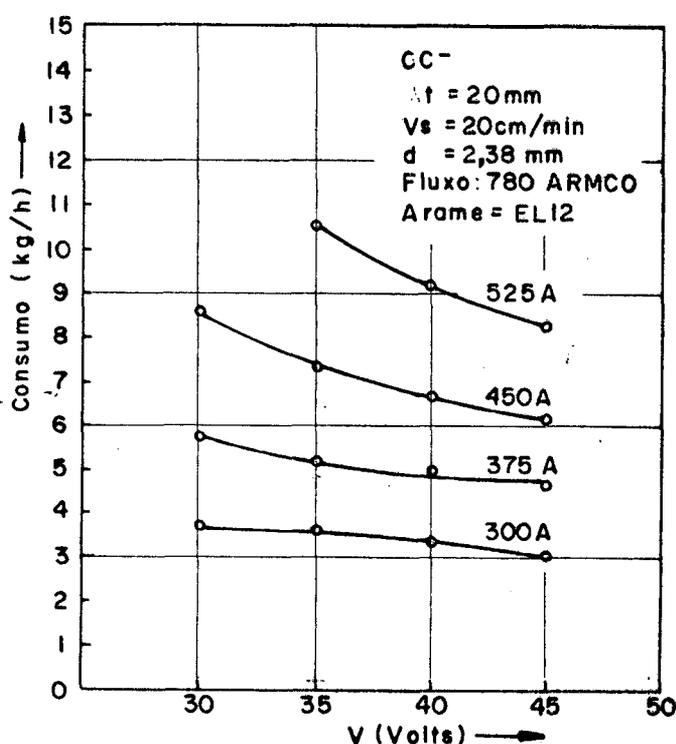


Fig. 2.11: consumo de eletrodo (Kg/h) em função da tensão (volts), em polaridade direta (CC<sup>-</sup>).

## 9) LINHAS DE IGUAL CONSUMO

Quando se utilizam fontes de energia do tipo "tensão constante", que é o tipo de fonte utilizada nesse estudo, a regulagem da corrente de soldagem se efetua continuamente através da velocidade de alimentação do arame.

Para se escolher a priori o par "tensão-corrente", deve-se ter sobre as curvas características da fonte, as linhas de igual consumo de arame. Estas curvas independem do projeto da fonte de energia, sendo porém dependentes do elétrodo (metal constituinte e bitola), do metal de base e sobre tudo do tipo de atmosfera ionizante.

As figuras 2.13 e 2.14, mostram as linhas de igual consumo em polaridade direta ( $CC^-$ ) e polaridade inversa ( $CC^+$ ), respectivamente. Essas curvas foram determinadas a partir do estudo experimental, do consumo em função da corrente, em quatro tensões e quatro distâncias da tomada de corrente ao metal de base, que é mostrado no anexo I.

A explicação da forma da curva é muito difícil por que envolve uma série de variáveis interdependentes. Nota-se, por exemplo, que o comprimento do arco é diferente em cada ponto constituinte de uma mesma curva e que, por isso, o comprimento do elétrodo também o é. Assim sendo, a variação da resistência elétrica do circuito não é simplesmente a variação devido ao comprimento do elétrodo. Se por um lado a diminuição do comprimento do arco diminua a resistência elétrica do circuito, o aumento do comprimento do elétrodo tem efeito contrário.

Todavia, uma explicação razoável pode ser tentada

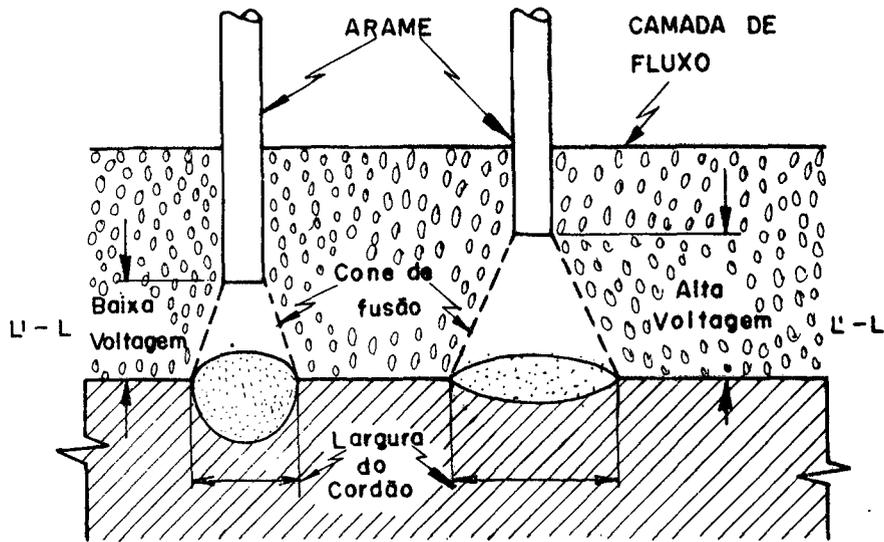


Fig. 2.12: esquema da relação entre tensão e fluxo fundido.

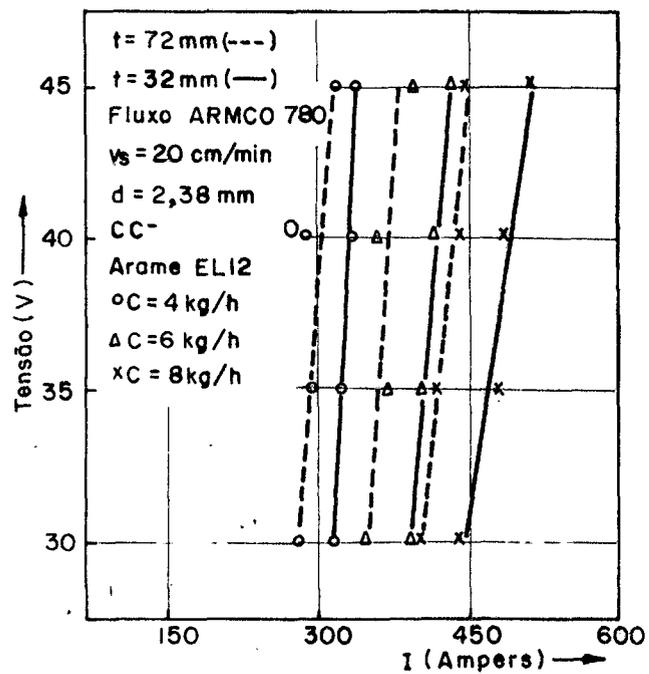


Fig. 2.13: linhas de igual consumo para a polaridade direta (CC<sup>-</sup>).

em termos qualitativos tendo-se em vista que a velocidade de fusão sobre uma mesma curva é constante. A medida que se abaixa a característica estática da fonte, o que corresponde a um abaixamento da tensão aplicada nos terminais das mesmas, teoricamente a corrente deveria aumentar para que a quantidade de energia permanecesse a mesma e assim a mesma quantidade de eletrodo continuasse a ser consumido. Isto não acontece. A corrente também diminui, ocasionando um decrescimo na energia gerada. Sabe-se, por outro lado que sendo constante o consumo de eletrodo numa mesma curva, também o é a energia dispensada para fundi-lo em qualquer ponto. Fica evidenciado, então, que outras parcelas de energia são diminuidas em favor da manutenção da energia para fundir o arame. Uma dessas parcelas é a perda para o ambiente e para o material de base, o qual varia de acordo com o comprimento do arco, que por sua vez é função da tensão do arco<sup>2.7</sup>

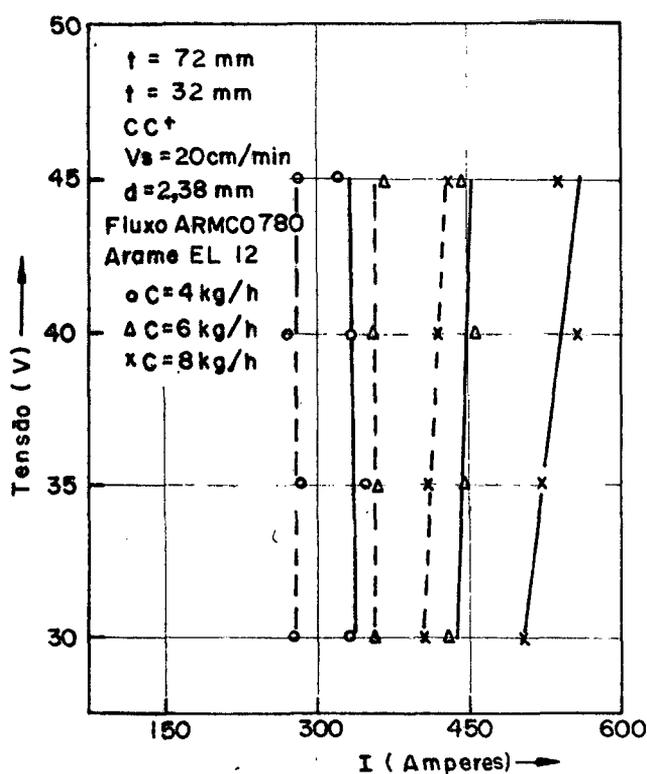


Fig. 2.14: linhas de igual consumo para a polaridade inversa ( $CC^+$ ).

10) CONCLUSÕES

Esse estudo experimental e bibliográfico, mostra que além da corrente, o consumo de eletrodo também é afetada pela polaridade, distância da tomada de corrente ao metal de base, do diâmetro do eletrodo, da velocidade de soldagem, tensão e composição química do fluxo, da seguinte forma:

- a) O consumo do eletrodo é maior quanto maior for a corrente. A polaridade também influencia no consumo, sendo que, quando se trabalha com corrente contínua polo negativo ( $CC^-$ ) obtém-se maiores consumos de eletrodos do que em corrente contínua polo positivo ( $CC^+$ ) e que, o consumo de eletrodo em corrente alternada (CA) é intermediário às duas anteriores.
- b) Aumentando-se a distância da tomada de corrente ao metal de base aumenta-se o consumo de eletrodo.
- c) Com a mesma corrente, distância do bico de contato ao metal de base e mesma tensão, para se obter maior consumo é preferível trabalhar com diâmetros de eletrodos menores.
- d) A tensão também afeta o consumo de eletrodo, ou seja, com o aumento de tensão ocorre uma diminuição no consumo do eletrodo.
- e) Com o aumento da potência ( $P = IV$ ) há uma diminuição do consumo de eletrodo, mantidas as demais condições de soldagem constante.
- f) A composição química do fluxo também altera o consumo do eletrodo.
- g) A velocidade de soldagem não altera o consumo do eletrodo, tra

tando-se de uma variável independente do consumo de eletrodo.

Disto pode-se dizer, que os parâmetros de soldagem podem ser determinados para cada trabalho, em ensaios experimentais prévios ao trabalho final com o intuito de obter-se uma soldagem econômica.

### BIBLIOGRAFIAS

- 2.1) Mantel, W.: "The Physic of the Welding Ar". Achucissem and Schneider, B, (1956), pgs. 280-287.
- 2.2) Pokhodnyo, I.K.: "Fusion of Eletrod Met. and its Interation With the Slag Ducing Sub Arc. Welding". Art. Sudekam 1965, n° 10, pgs. 16-22.
- 2.3) Lesnewick, A: Control of Melting Rate and Metal Transf. in gas Shielded metal welding, Weld Iourn. 37 (8), Res. Suppl. pg. 418-s/ 425 s.
- 2.4) Rosental, D.: "Transn. Am. Soc. Mech. Eng., 68, pgs. 849 - 850.
- 2.5) Timerman, R.: Inf. dos parâmetros no proces. de sold. a arco Sub., pg. 9. 1977.
- 2.6) Renwick, G.B. et al: "Operating characteristics of the sub. Arc. Proc.", Weld Journ 55 (3), março 1976, Res. Suppl. , pgs. 70-5/76-5.
- 2.7) Quites, A.M. e Dutra, J.C.: "Tecnologia da Soldagem a arco voltaico", pags. 134-196, 1979.

## CAPÍTULO III

GEOMETRIA DA SOLDA EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM1) INTRODUÇÃO

O capítulo abrange o estudo do comportamento da geometria da solda em função dos parâmetros de soldagem. Além da influência dos parâmetros, tensão, corrente, distância da tomada de corrente ao metal de base (t) e velocidade de soldagem é analisado também a influência da folga da junta na geometria da solda.

2) DEFINIÇÕES

Entende-se por solda<sup>3.1</sup> o volume de metal fundido e solidificado no processo de soldagem, constituído de metal adicionado e metal base solubilizados, e que forma a junção permanente entre as partes.

Como mostrados nas figuras 3.1 e 3.2, a geometria da seção transversal de uma solda é composta pela penetração (p), largura (b) e reforço (r) e são definidos da seguinte forma:

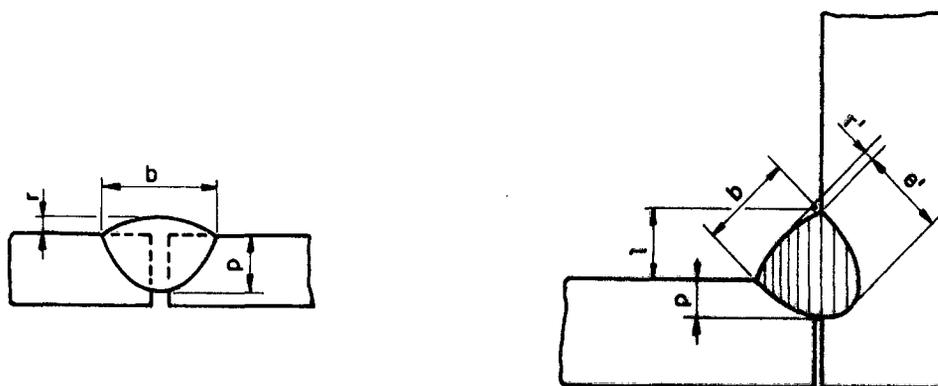


Fig. 3.1: geometria da solda de topo:  
 a) bordos retos  
 b) bordos chanfrados.

Fig. 3.2: geometria da solda de ângulo onde  $e$  = espesura e  $l$  = lado ou perna da solda.

Penetração ( $p$ )<sup>3.1</sup> máxima profundidade alcançada pela fusão, medida perpendicularmente a superfície do material base

Reforço ( $r$ )<sup>3.1</sup> máxima altura alcançada pelo excesso de material de adição, medida a partir da superfície do material de base.

Largura ( $b$ )<sup>3.1</sup> máxima distância entre pontos externos alcançados pela fusão, sobre a superfície do material de base.

### 3) FATORES QUE AFETAM A GEOMETRIA DA SOLDA

Os fatores que influem nas características da solda são inúmeros. Todos estes fatores refletem-se na solda através do consumo de eletrodo e da forma e comportamento do arco. A seleção

ção das condições ótimas de soldagem não é fácil, pois todas as variáveis são acentuadamente interdependentes, com exceção da velocidade de soldagem que guarda um certo grau de independência.

Este estudo foi feito com o propósito de se conhecer o comportamento da geometria da solda em função dos parâmetros de soldagem. Nesse estudo tomou-se como variáveis independentes, a distância da tomada de corrente ao metal de base, a corrente e a velocidade de soldagem. As variáveis dependentes, determinadas experimentalmente, foram: a penetração, a largura e o reforço da solda, bem como a área adicionada e a área total da solda. Todas as demais condições foram mantidas constantes e são apresentadas na Tabela 2.1.

As curvas da figura 3.3 ilustram a variação da largura ( $b$ ), da penetração ( $p$ ), do reforço ( $r$ ), da área adicionada ( $S_{ad}$ ) e da área total da solda ( $S$ ) em função da velocidade de soldagem. Na determinação experimental dessas curvas foram mantidas constantes a corrente ( $I = 400A$ ), a tensão ( $V = 40v$ ) e a distância do bico de contato ao material de base ( $t = 37mm$ ).

Destas curvas (figura 3.3) pode ser notado que a velocidade de soldagem ( $V_s$ ) afeta diretamente a geometria da solda. Com o aumento da velocidade de soldagem há uma diminuição da penetração ( $p$ ) até uma certa velocidade, em que após não ocorre variação, do reforço ( $r$ ), da largura ( $b$ ), bem como das áreas adicionada e das áreas totais das soldas resultantes.

As curvas da figura 3.4 mostram o comportamento da geometria da solda, ou seja, da penetração ( $p$ ), do reforço ( $r$ ) e da largura ( $b$ ), bem como da área adicionada ( $S_{ad}$ ) e área total da solda ( $S$ ) em função da corrente de soldagem. Essas curvas obtidas, experimentalmente, mantendo-se constante as condições de ensaio

da Tabela 2.1, a tensão (40 volts), a distância entre o bico de contato e o metal de base ( $t = 32\text{mm}$ ) e velocidade de soldagem ( $V_s = 20\text{cm/min}$ ). Como pode ser visto a corrente afeta também diretamente a geometria da solda, isto é, com o aumento da corrente há um aumento quase que linear na penetração ( $p$ ), reforço ( $r$ ) e largura ( $b$ ), bem como da área adicionada ( $S_{ad}$ ) e área total ( $S$ ).

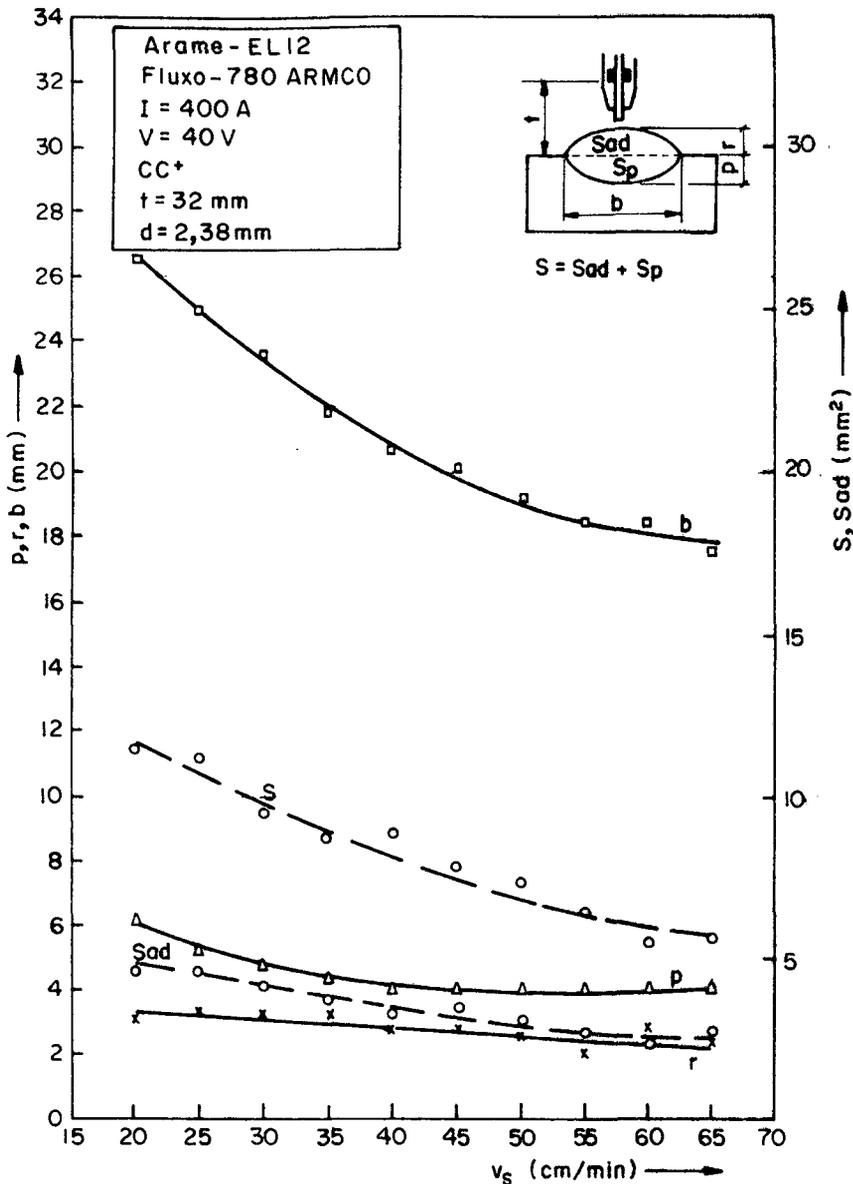


Fig. 3.3: geometria da solda em função da velocidade de soldagem, em 400 amperes e 40 volts

Outro parâmetro de soldagem que afeta a geometria da solda é a distância entre o bico de contato e o metal de base ( $t$ ). A influência do  $t$  na geometria da solda foi determinada exper

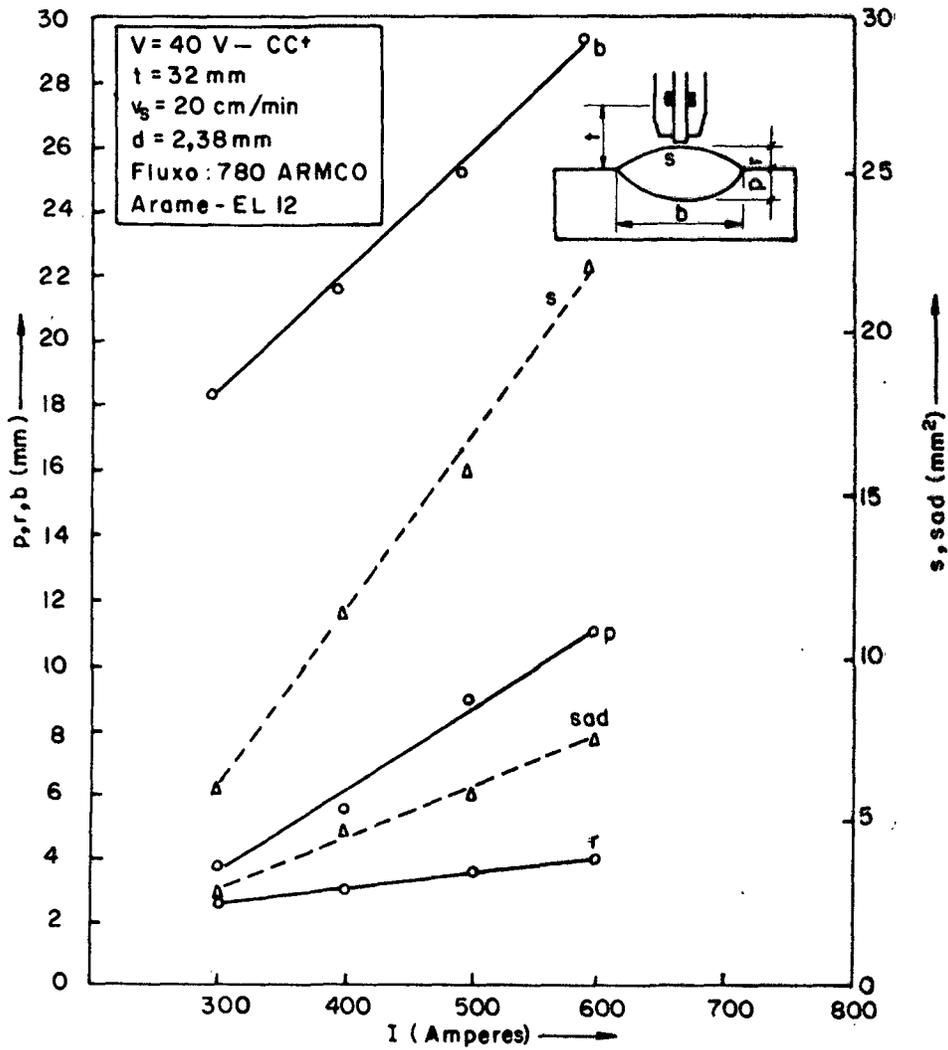


Fig. 3.4: geometria da solda em função da corrente (amperes) em 40 volts, velocidade de soldagem igual a 20 cm/min. e  $t = 25 \text{ mm}$ .

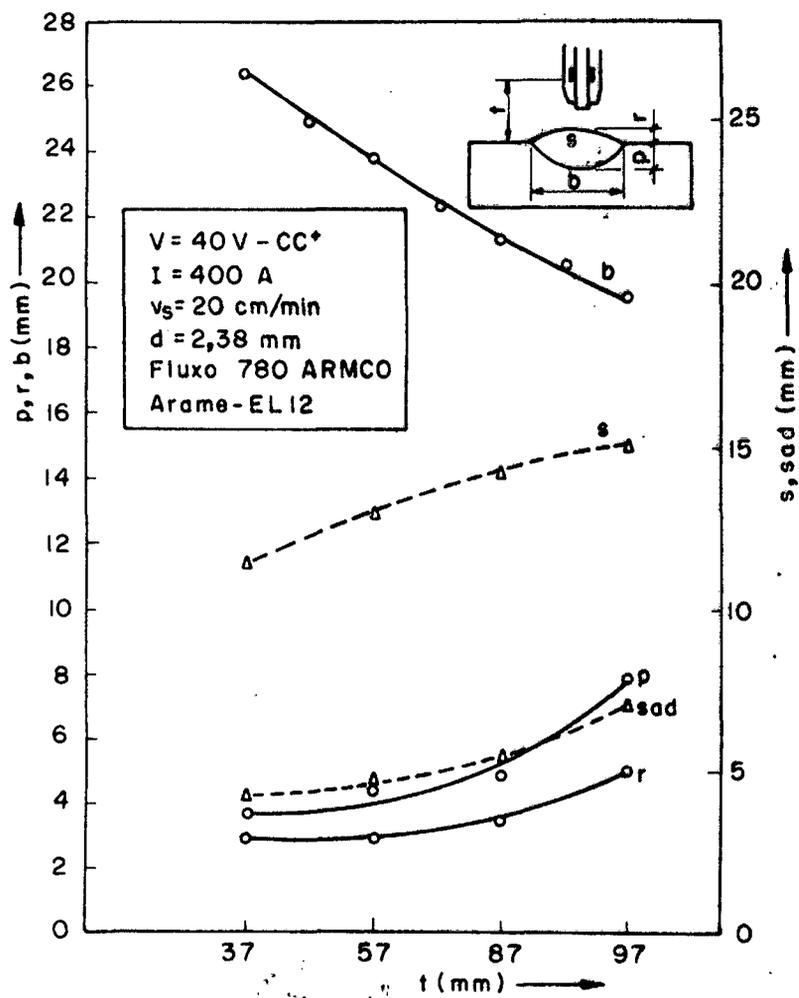


Fig. 3.5: geometria da solda em função da distância entre o bico de contato e o metal em 40 volts, 400 amperes e velocidade de soldagem igual a 20 cm/min.

rimentalmente e é mostrada na figura 3.5. Na determinação dessas curvas manteve-se constante, nas condições da Tabela 2.1, a tensão (40 volts), a corrente (400 amperes) e a velocidade de soldagem ( $V_s = 20\text{cm/min}$ ).

Observa-se (figura 3.5) que o aumento da distância entre o bico de contato e o metal base proporciona um leve aumento na penetração ( $p$ ) e no reforço ( $r$ ), enquanto que, o aumento do  $t$  produz uma diminuição na largura ( $b$ ) da solda. A área adicional ( $S_{ad}$ ) e área total ( $S$ ) aumentam com o aumento do  $t$ .

Entende-se que a penetração ( $p$ ) o reforço ( $r$ ) devem ser estudados em conjunto porque são interdependentes<sup>3.1</sup>.

As figuras 3.6 e 3.7 mostram que a penetração varia linearmente com o reforço, para uma mesma relação  $I/V_s$  constante. Essas curvas foram determinadas experimentalmente, segundo as condições de soldagem da Tabela 2.1, sendo mantidas constantes a tensão (35 volts), para três relações  $I/V_s$  ( $I/V_s = 10, 15, \text{ e } 20$ ).

Na figura 3.6 estudou-se a variação da penetração versus o reforço, na polaridade inversa ( $CC^+$ ); o comportamento observado foi o de que, para um mesmo  $I/V_s$ , com o aumento da penetração o reforço diminui, sendo que, como é mostrado nesta figura a variação é linear. Observa-se também nesta figura, que nesta polaridade as curvas de mesmo  $I/V_s$  guardam um certo paralelismo entre elas ou seja, possuem o mesmo ângulo  $\alpha$  com o eixo coordenado do reforço.

A figura 3.7 mostra a variação da penetração versus o reforço em polaridade direta ( $CC^-$ ); nesta polaridade a variação de penetração com o reforço também é linear, Observa-se, que com o aumento da relação  $I/V_s$  o ângulo ( $\alpha$ ) entre a curva e o eixo do reforço aumenta, ou seja, aumentando-se a relação  $I/V_s$  há a

tendência de ocorrer o aumento da penetração com o aumento do reforço.

Portanto, das curvas das figuras 3.6 e 3.7 pode-se concluir que:

- a) a variação da penetração ( $p$ ) versus o reforço ( $r$ ) é linear;
- b) em polaridade inversa ( $CC^+$ ) as curvas do mesmo  $I/V_s$  possuem o mesmo ângulo de inclinação e, portanto, o comportamento é idêntico em todos  $I/V_s$ ; por outro lado, na polaridade direta ( $CC^-$ ) o comportamento das curvas, com mesmo  $I/V_s$  é diferente, ou seja, com o aumento da relação  $I/V_s$  o reforço tende a aumentar com o aumento da penetração.

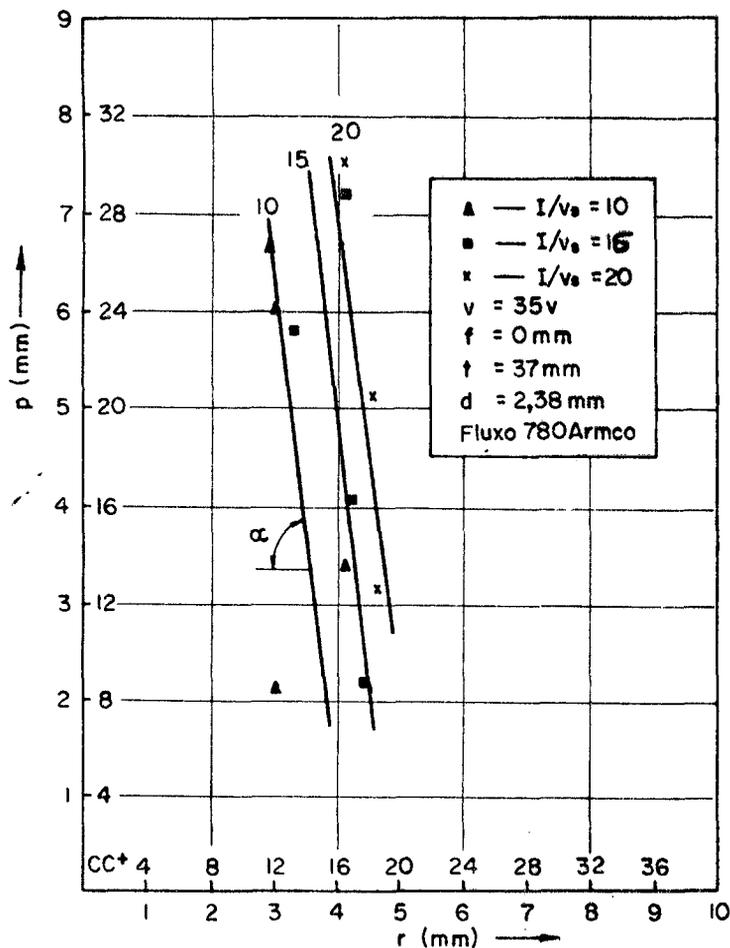


Fig. 3.6: influência da corrente, da velocidade de soldagem sobre o reforço e a penetração em polaridade inversa ( $CC^+$ ).

Como conclusão geral desse estudo, podemos dizer que a geometria da solda, ou seja, penetração ( $p$ ), reforço ( $r$ ) e

largura (b), pode ser pré-determinada, a partir dos parâmetros pré-reguláveis da soldagem.

#### 4) INFLUÊNCIA DA FOLGA NA GEOMETRIA DA SOLDA

A distância entre os bordos é chamada folga (f), e é mostrada na fig. 3.8.

O efeito da folga na geometria da solda foi estudada nas condições de soldagem da Tabela 3.1, com exceção da folga que variou de 0 (zero) a 4 (quatro) milímetros.

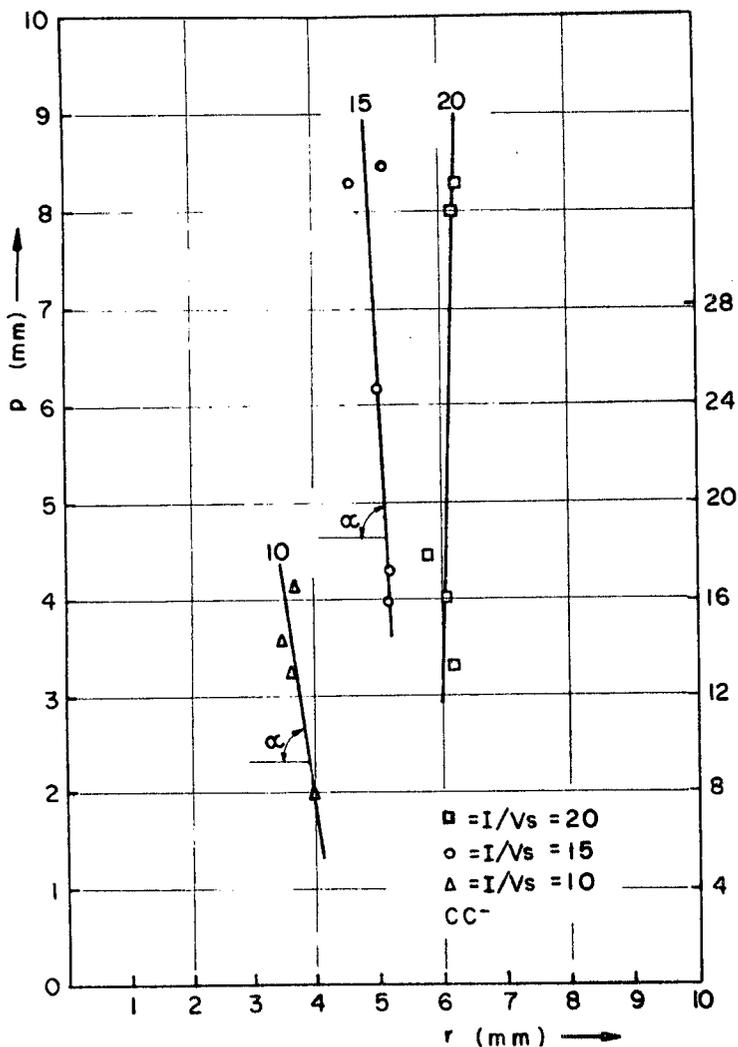


Fig. 3.7: influência da corrente e da velocidade de soldagem sobre o reforço e a penetração em polaridade direta.

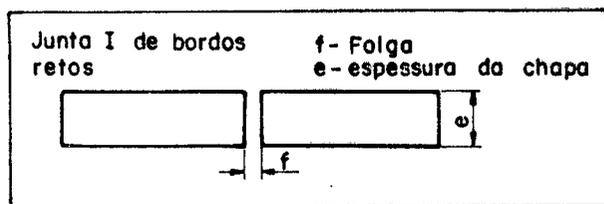


Fig. 3.8 - geometria do bordo

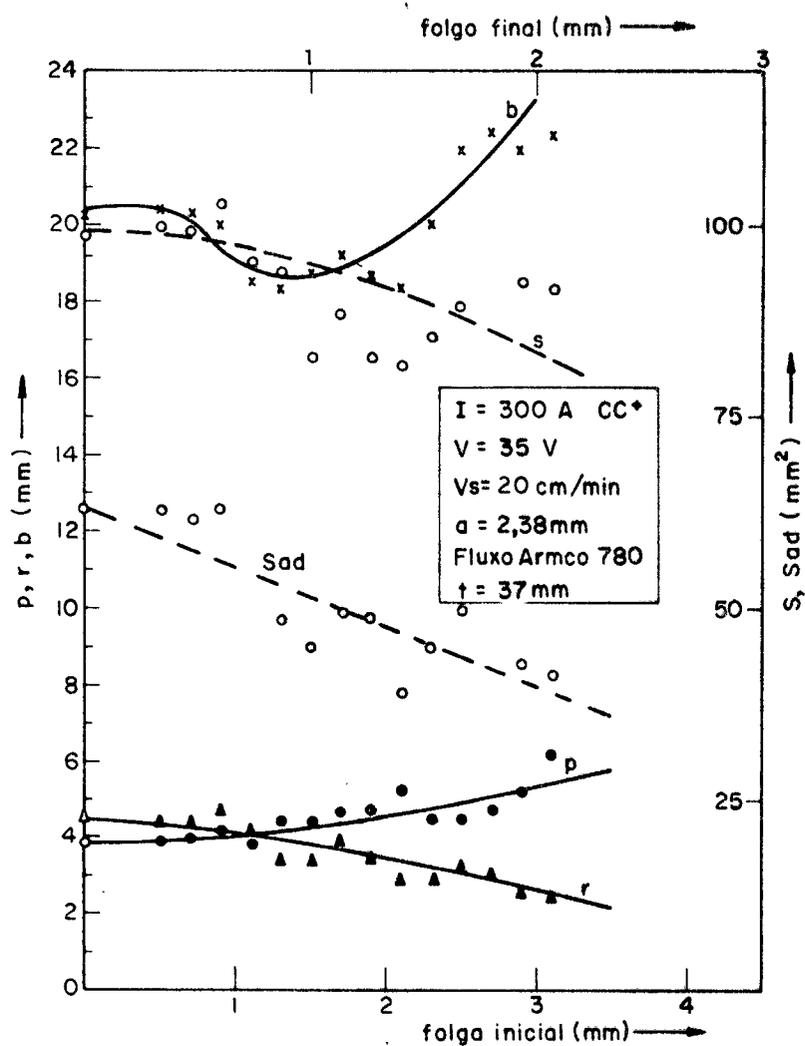


Fig. 3.9 - influência da folga inicial e final na geometria da solda.

Foram mantidas constantes a corrente (300 amperes), a tensão (35 volts), a velocidade de soldagem (20cm/min) e a distância entre o bico de contato e o metal de base ( $t = 37\text{mm}$ ), em polaridade inversa ( $\text{CC}^+$ ).

Os resultados experimentais, desse estudo são mostrados na figura 3.9.

Nela, observa-se que, com o aumento da folga inicial a geometria da solda é afetada, ou seja, a penetração sofre um pequeno aumento, o reforço diminui e a largura não sofre alteração com pequenas folgas (até 0,6mm), sendo que aumentando a folga, a largura diminui bruscamente e aumenta a seguir. A área adicionada ( $S_{ad}$ ) e a área total ( $S$ ) diminuem com o aumento da folga e, isto se deve ao fato, de que, com aumento da folga menor é a resistência que ela (folga) oferece ao escoamento de metal liquefeito da poça de soldagem através da junta.

Observou-se, e isto também é indicado na figura 3.9 (escala superior), que a folga medida após a soldagem é menor em relação a folga inicial.

## 5) CONCLUSÕES

Os parâmetros de soldagem afetam a geometria da solda da seguinte forma:

a) O aumento da velocidade de soldagem, mantidos os demais parâmetros de soldagem constantes, provoca a diminuição da largura ( $b$ ), da penetração ( $p$ ), até uma certa velocidade em que não ocorre mais variação, e do reforço ( $r$ ) e, portanto, da área adicionada

(Sad), e área total da solda (S).

b) O aumento da corrente, mantendo-se os demais parâmetros constantes, provoca variações na geometria da solda, ou seja, um aumento quase que linear na largura (b), no reforço (r) e penetração (p) e portanto, na área adicionada (Sad) e área total da solda (S).

c) A distância da tomada da corrente ao metal de base também afeta a geometria da solda, ou seja, mantendo-se os demais parâmetros de soldagem constante, aumentando-se o  $t$  obtém-se uma diminuição na largura da solda (b), um aumento na penetração (p), um leve aumento no reforço (r), e um leve aumento na área adicionada (Sad) e na área total da solda (S).

d) Para uma mesma relação  $I/Vs$  a penetração varia linearmente com o reforço. Observou-se também que, em polaridade inversa ( $CC^+$ ) as curvas de mesmo  $I/Vs$  mantêm um paralelismo entre elas e que, em polaridade direta ( $CC^-$ ) o ângulo de inclinação da curva aumenta com o aumento da relação  $I/Vs$ .

e) A abertura da folga da junta é outro fator que altera a geometria da solda, sendo que, aumentando-se a abertura da folga diminui o reforço (r) e aumenta a penetração, diminuindo também a área adicionada (Sad) e a área total da solda (S). Em pequenas aberturas da folga a largura (b) não é alterada, sendo que, aumentando-se esta abertura a largura diminui ligeiramente e em seguida sofre um grande aumento.

Disto pode-se dizer que a geometria da solda ótima para uma determinada aplicação, poderá ser determinada através de um estudo prévio ao trabalho final.

BIBLIOGRAFIA

- 3.1) Quides, Almir M. e Dutra, Jair C.: Tecnologia da soldagem a arco voltaico, 1979.

## CAPÍTULO IV

SELEÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM QUANTO A CRITÉRIOS DE  
PASSES1) INTRODUÇÃO:

Neste estudo propõem-se critérios para a seleção de parâmetros para a obtenção de uma determinada junta soldada a tendendo tanto à finalidade de cada passe quanto à necessidade de uma execução econômica.

2) GEOMETRIA DA SOLDA (p.r.b):

Como o grande campo de aplicação do processo de soldagem a arco submerso é a união de chapas espessas, é especialmente importante conhecer o comportamento da geometria da solda de forma que, se possa obter as características desejadas com a menor potência ( $P = VI$ ) e a maior velocidade de soldagem ( $V_s$ ) possível.

São duas as razões que levam a impor a condição de uma baixa potência associada a maior velocidade de soldagem ( $V_s$ ) possível, na obtenção da geometria desejada da solda. Uma das razões seria a de que, com uma pequena potência associada a uma

grande velocidade de soldagem, menor será a quantidade de calor imposta ao metal de base; como essa quantidade de calor tem influência no fenômeno de fusão e solidificação, dissipando-se pelo metal de base e provocando transformações estruturais, alterações volumétricas, deformações plásticas e elásticas, etc., quanto menor a quantidade de calor imposta menores serão as alterações no metal de base.

A segunda razão é econômica, ou seja, o emprego de uma baixa potência associada a uma alta velocidade de soldagem implica, respectivamente, em um menor consumo de energia e um menor tempo na obtenção, dentro de certas especificações, da solda desejada.

O estudo que é apresentado a seguir foi realizado nas condições de soldagem da Tabela 2.1 com exceção da distância da tomada de corrente ao metal de base, em duas tensões (24 e 40 volts), para duas distâncias entre a tomada de corrente e o metal de base ( $t = 25\text{mm}$  e  $37\text{mm}$ ) e em 5 velocidades de soldagem ( $V_s = 20, 30, 40, 50$  e  $60\text{cm/min}$ ), sendo que os resultados, experimentais, são mostrados em anexo II.

Como primeiro passo foram traçadas as curvas de isopenetração, isoreforço e isolargura, a partir dos dados obtidos experimentalmente, em relação a velocidade de soldagem e corrente.

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 mostram as curvas de mesma penetração (isopenetração), tendo como eixos coordenados a velocidade de soldagem e a corrente, nas tensões de 24 e 40 volts e em duas distâncias da tomada de corrente ao metal de base. ( $t = 25$  e  $37\text{mm}$ ).

Nas figuras 4.1 e 4.2, manteve-se a tensão constante ( $V = 24$  volts), variando a distância da tomada de corrente ao

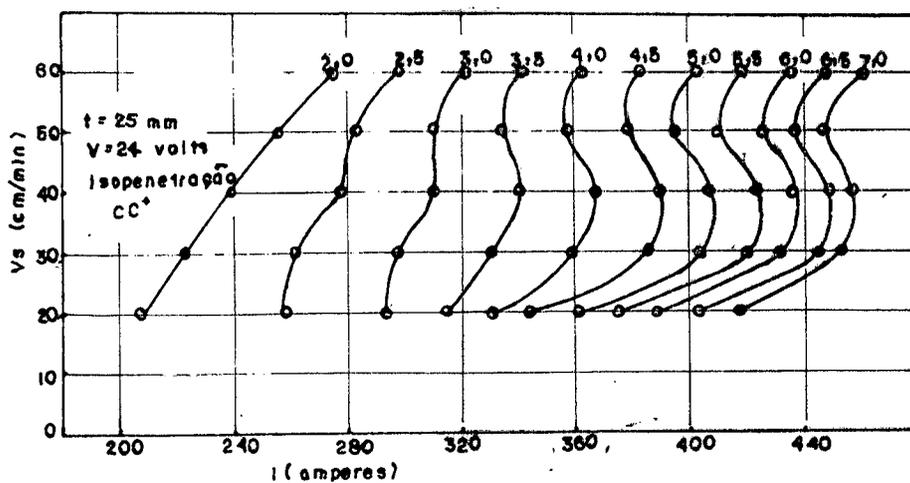


Fig. 4.1: curvas de isopenetração, em relação a velocidade de soldagem e a corrente, em 24 volts e  $t = 25 \text{ mm}$ .

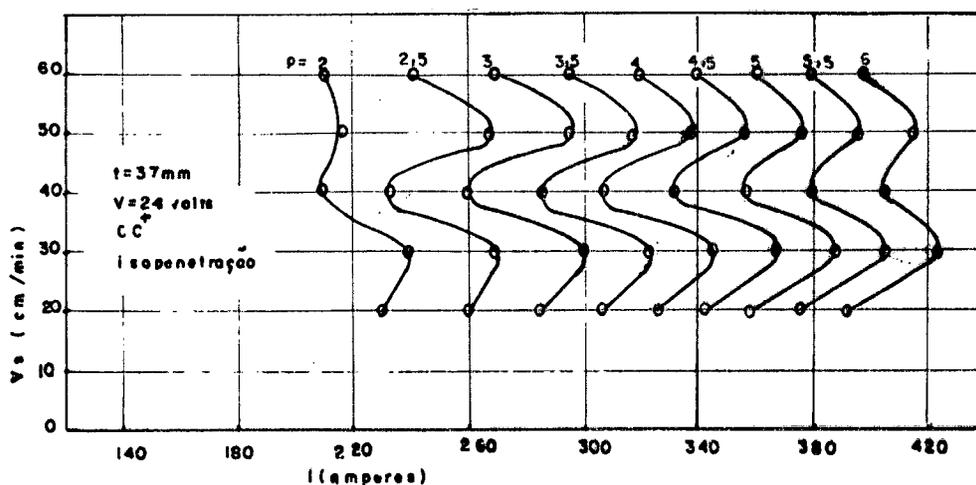


Fig. 4.2: curvas de isopenetração, em relação a velocidade de soldagem e a corrente, em 24 volts e  $t = 37 \text{ mm}$ .

metal de base ( $t = 25$  e  $37\text{mm}$ ). Observa-se que o comportamento é a proximadamente a mesma. Por exemplo, se tomarmos como base a penetração igual a  $3,5\text{mm}$ , em  $t = 25\text{mm}$  (fig. 4.1), veremos que, se aumentarmos a velocidade de soldagem, teremos que aumentar a corrente; agora, com  $t = 37\text{mm}$  (fig. 4.2), podemos obter a penetração de  $3,5\text{mm}$  com velocidade de soldagem igual a  $60\text{cm}/\text{min}$  associada a uma corrente menor, comparada à velocidade de soldagem igual a  $20\text{cm}/\text{min}$ .

Em tensões maiores, ou seja,  $40$  volts, que é o caso da figura 4.4 comparada à fig. 4.3, a forma das curvas é aproximadamente a mesma, sendo que, para distâncias da tomada de corrente ao metal de base menores, em uma mesma velocidade de soldagem, maior será a corrente para se obter a mesma penetração. Na figura 4.3,  $t = 25\text{mm}$ , observa-se que a maior velocidade de soldagem associada a uma menor corrente, para se obter uma determinada penetração, está entre  $40$  e  $50\text{cm}/\text{min}$ . Agora, na figura 4.4 onde o  $t = 37\text{mm}$ , a maior velocidade de soldagem associada a uma menor corrente situa-se entre  $40$  e  $50\text{cm}/\text{min}$ ; porém, neste caso, as curvas mostram que há uma acentuada diminuição na corrente de soldagem com velocidades de soldagem inferiores a  $30\text{cm}/\text{min}$ .

Tomando-se um t constante, por exemplo  $t = 37\text{mm}$  (fig. 4.2 e 4.4), a variação da tensão provoca uma variação na corrente, para se obter uma determinada penetração em uma velocidade de soldagem adequada.

As figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 mostram as curvas de isoreforço em relação a velocidade e corrente de soldagem, em duas distâncias da tomada de corrente ao metal de base em cada tensão, ou seja,  $24$  e  $40$  volts.

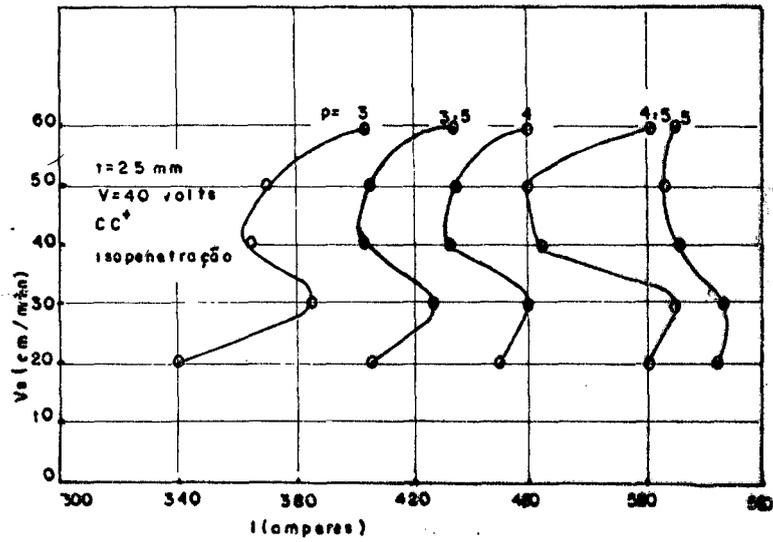


Fig. 4.3: curvas de isopenetração, em relação a velocidade de soldagem e a corrente, em 40 volts e  $t = 25$ mm.

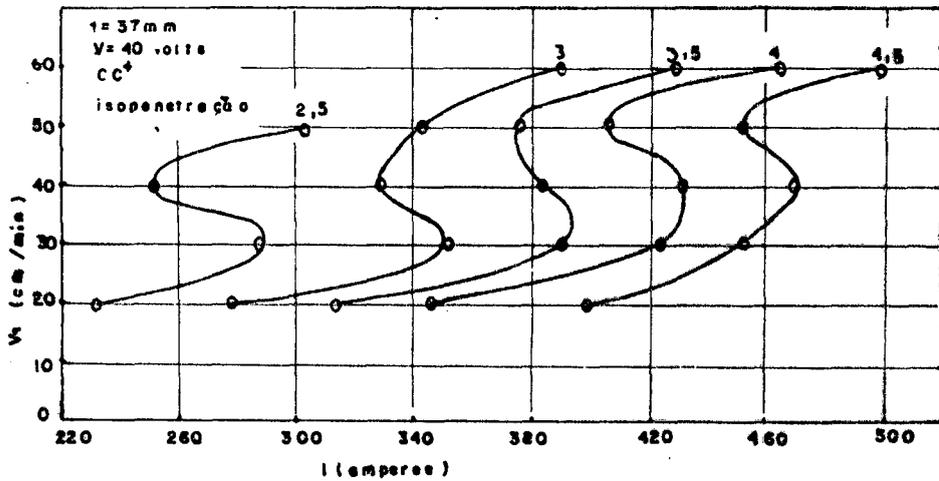


Fig. 4.4: curvas de isopenetração, em relação a velocidade de soldagem e a corrente, em 40 volts e  $t = 37$ mm.

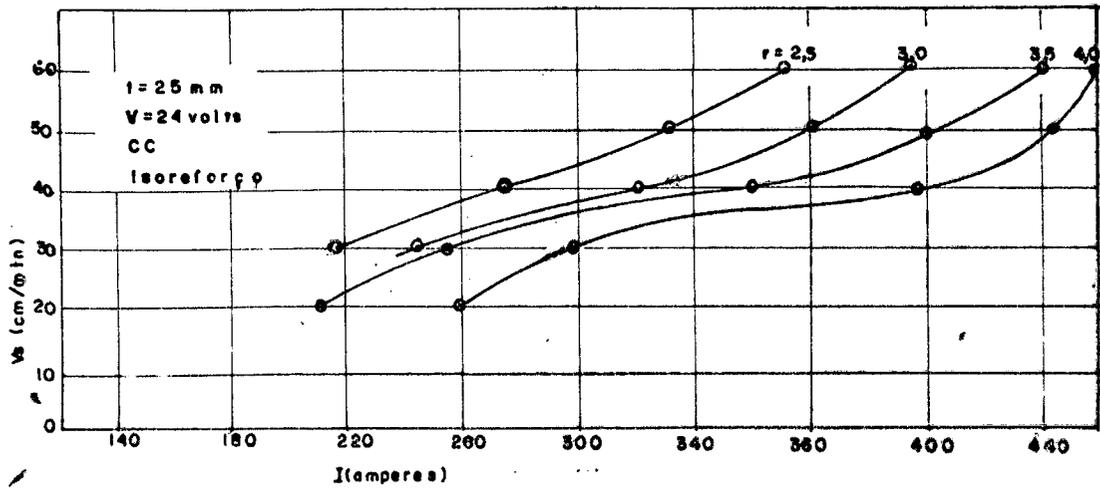


Fig. 4.5: curvas de isoreforço ( $r$ ) em relação a velocidade e a corrente de soldagem, em 24 volts e  $t = 25\text{mm}$ .

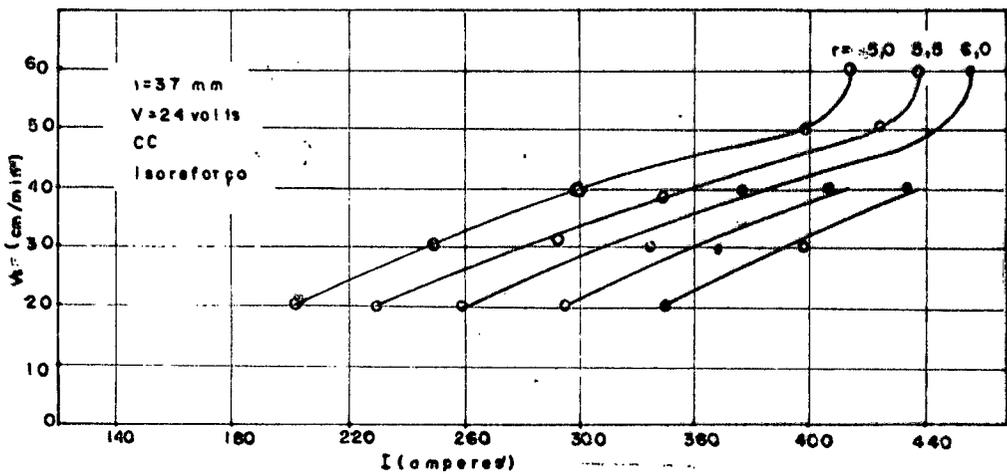


Fig. 4.6: curvas de isoreforço ( $r$ ) em relação a velocidade e a corrente de soldagem, em 24 volts e  $t = 37\text{mm}$ .

Na tensão de 24 volts, nas duas distâncias da tomada de corrente ao metal de base ( $t = 25$  e  $37\text{mm}$ ), figuras 4.5 e 4.6, o comportamento das curvas de mesmo reforço é semelhante, ou seja, o aumento da velocidade implica em um aumento na corrente de soldagem para que se possa obter o mesmo valor do reforço ( $r$ ).

Na tensão de 40 volts, figuras 4.7 e 4.8, variando-se a distância da tomada de corrente ao metal de base as curvas de isoreforço comportam-se distintamente. Observa-se aqui, também, que o aumento da distância da tomada de corrente ao metal de base implica em uma diminuição na corrente para se obter um determinado reforço, em uma mesma velocidade de soldagem.

O aumento da tensão, de 24 para 40 volts, como pode ser observado comparando as figuras 4.5 e 4.7, mantendo-se o  $t$  constante (no caso  $t = 25\text{mm}$ ), implica em um aumento na corrente para se obter um determinado reforço em uma mesma velocidade de soldagem.

O comportamento da largura também é mostrado através de linhas de igual largura em relação a velocidade e corrente de soldagem, em duas tensões, 24 e 40 volts e para duas distâncias da tomada de corrente ao metal de base, 25 e 37mm (figura 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12). Como no caso do reforço e da penetração, o comportamento da largura da solda é influenciada pela variação de  $t$  e da tensão. Mantendo-se a tensão constante, o aumento na distância da tomada de corrente ao metal de base provoca um aumento na corrente de soldagem para se obter uma determinada largura em uma mesma velocidade de soldagem. Por outro lado, mantendo-se o  $t$  constante, o aumento na tensão provoca também um aumento na corrente de soldagem, para se obter uma determinada largura em uma mesma velocidade de soldagem.

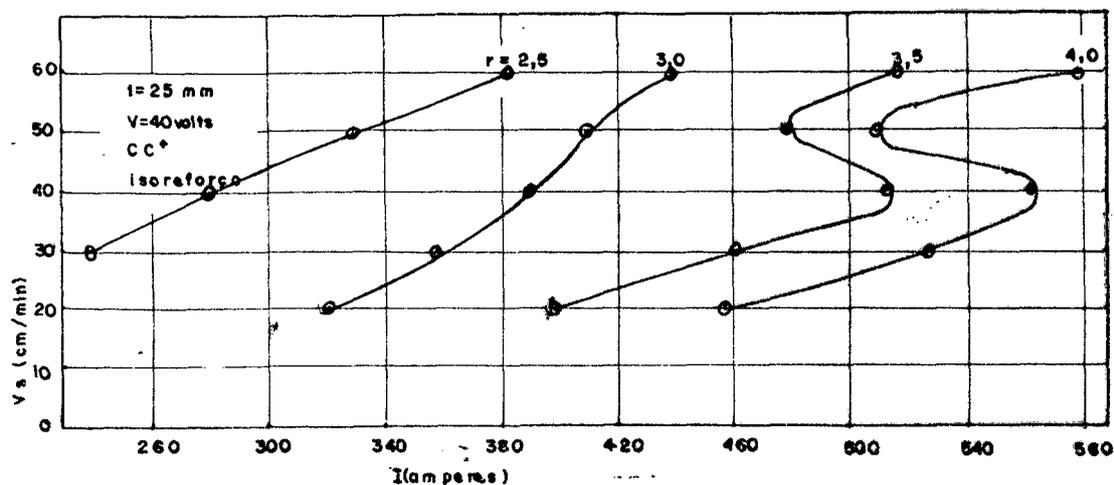


Fig. 4.7: curvas de isoreforço ( $r$ ) em relação a velocidade e corrente de soldagem, em 40 volts e  $t = 25$ mm.

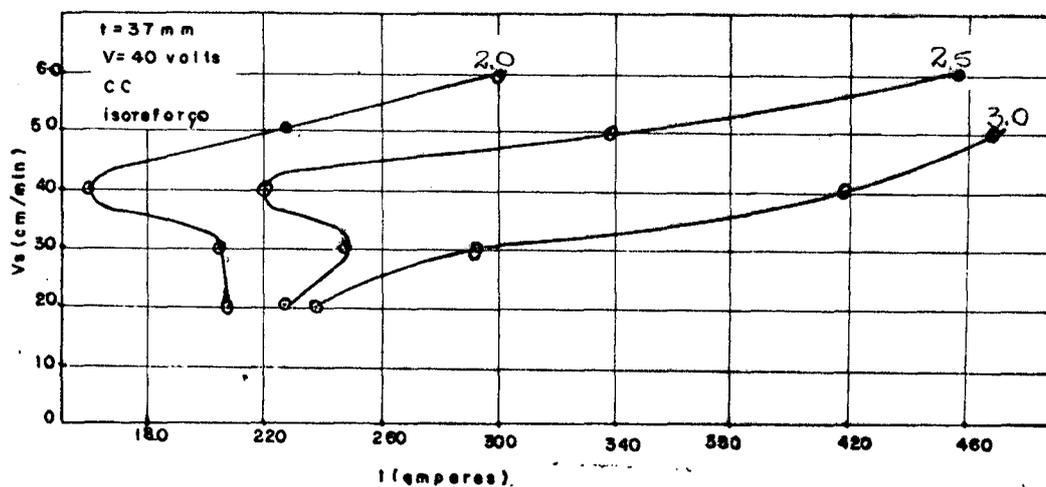


Fig. 4.8: curvas de isoreforço ( $r$ ) em relação a velocidade e corrente de soldagem, em 40 volts e  $t = 37$ mm.

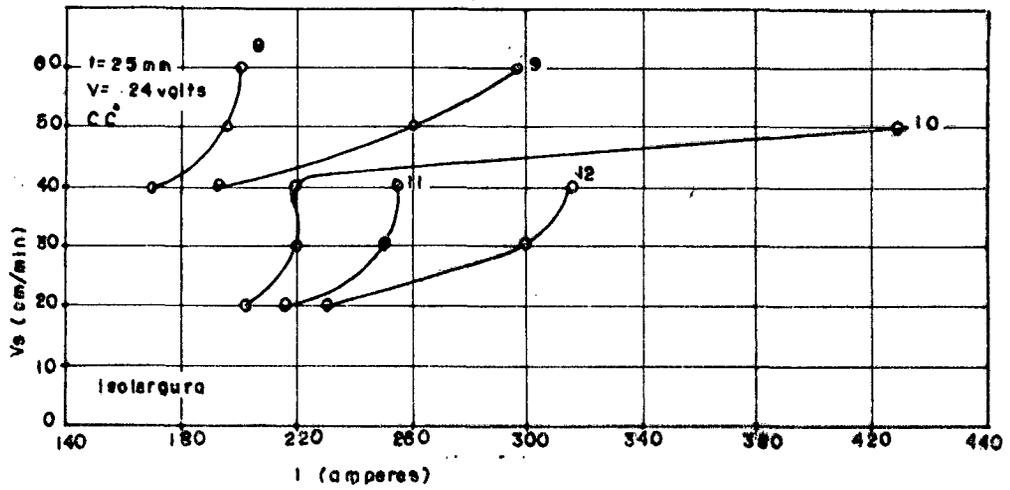


Fig. 4.9: curvas de isopenetração (b) em relação a velocidade e corrente de soldagem, em 24 volts e  $t = 25 \text{ mm}$ .

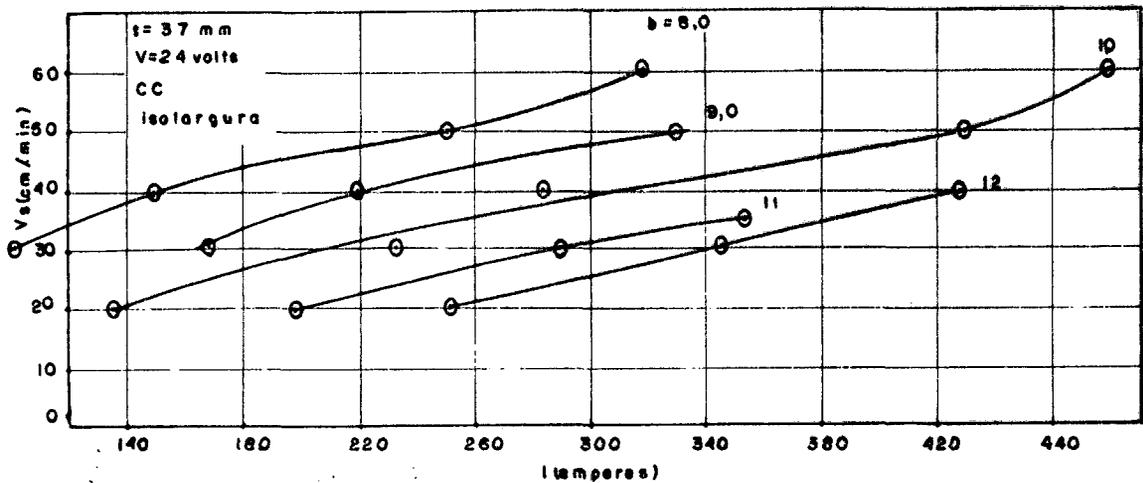


Fig. 4.10: curvas de isolargura (b) em relação a velocidade de soldagem, em 24 volts e  $t = 25 \text{ mm}$ .

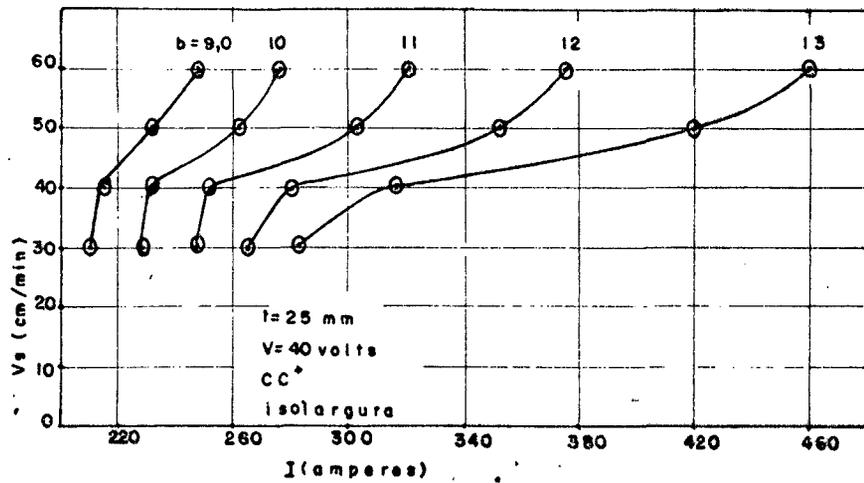


Fig. 4.11: curvas de isolargura ( $b$ ) em relação a velocidade e corrente de soldagem, em 40 volts e  $t = 25$ mm

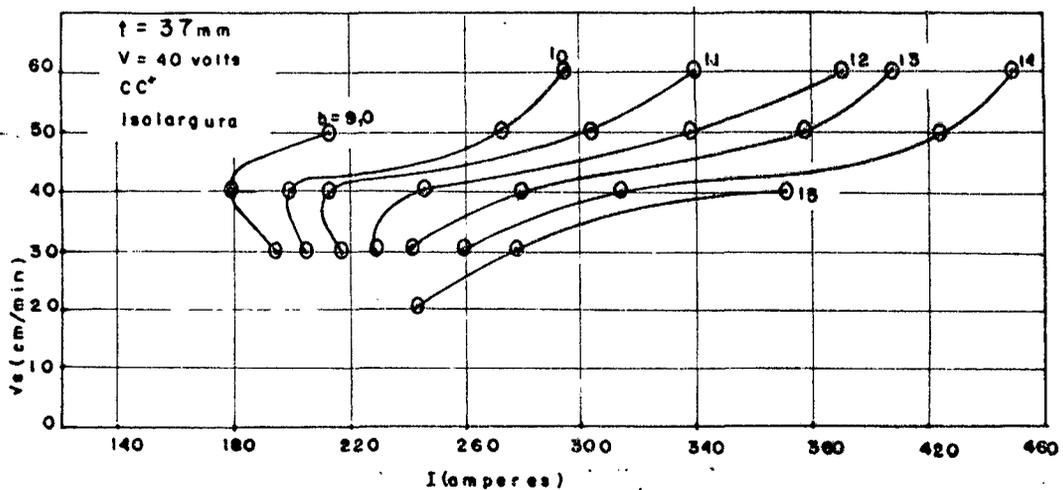


Fig. 4.12: curvas de isolargura ( $b$ ) em relação a velocidade e corrente de soldagem, em 40 volts e  $t = 37$ mm.

Das curvas de isopenetração, isoreforço e isolargura podem ser obtidos os campos de ocorrência, para o processo.

### 3) MORFOLOGIA DA SOLDA

Denomina-se, aqui, por morfologia da solda, o estudo dos campos de ocorrência de diferentes formas de solda, obtidas em passe único num diagrama cartesiano de corrente e velocidade de soldagem, delimitados pelas linhas de regularidade, de isopenetração, iso-ki e iso-ke, que passa-se a definir:

#### 3.1) Linhas de regularidade do arco:

Essas linhas demarcam o início de uma soldagem que proporciona um cordão de solda regular, ou seja, sem que a instabilidade do arco afete a largura e o reforço.

#### 3.2) Linhas de isopenetração:

São linhas que sobre elas a solda tem a mesma penetração em relação a velocidade de soldagem ( $V_s$ ) e a corrente ( $I$ ).

#### 3.3) Linhas de iso-ki e iso-ke:

Define-se como as constantes  $k_i$  ( $b/p$ ) e  $k_e$  ( $b/r$ ), respectivamente, como coeficientes de forma interna e externa.

Linhas de iso-ki e iso-ke são aquelas em que os va

lores de  $K_e$  e  $K_i$  são constantes. Convencionou-se que para ambos os fatores ( $K_e$  e  $K_i$ ), o valor quatro serve como referência e desta forma, pode-se estabelecer campos de ocorrência do processo em que essas relações ( $K_e$  e  $K_i$ ), são menores ou maiores que quatro (anexo II, figs. 21 à 24), caracterizando a geometria da solda (figs. 4.13 e 4.14). A determinação dessas linhas (iso- $K_e$  e iso- $K_i$ ) podem ser feitas a partir das curvas, obtidas experimentalmente (anexo II, figs. 1 à 20), da geometria da solda em função da corrente para diversas velocidades de soldagem, ampliando-se de quatro, as curvas de penetração e reforço ( $p$  e  $r$ ) em relação às curvas de largura. Assim, na intersecção das curvas de largura e penetração, para uma determinada velocidade de soldagem, tem-se a corrente na qual se obtém a relação  $K_i = 4$ . Igualmente, na intersecção da curva de reforço com a largura, obtém-se a relação  $K_e = 4$ . Procedendo-se sucessivamente nos diversos gráficos, teriam-se pares de velocidade de soldagem e corrente, que configuram a linha de iso- $K_i$  e iso- $K_e$  nos campos de ocorrência (anexo II, figuras 21 à 24).

Portanto, estipulando-se os valores de  $K_i$  e  $K_e$  iguais a quatro, tem-se uma solda de referência (fig. 4.15). Assim, pode-se estabelecer os seguintes critérios:

- quando;

$K_e = b/r < 4$  tem-se um excesso relativo de reforço

$K_i = b/p > 4$  tem-se um excesso relativo de largura

Portanto, as linhas descritas acima, são fronteiras que delineiam o campo de ocorrência, caracterizando a forma da solda, permitindo compará-las à solda de referência. Porém, nessa comparação, deve-se levar em conta a espessura da chapa em

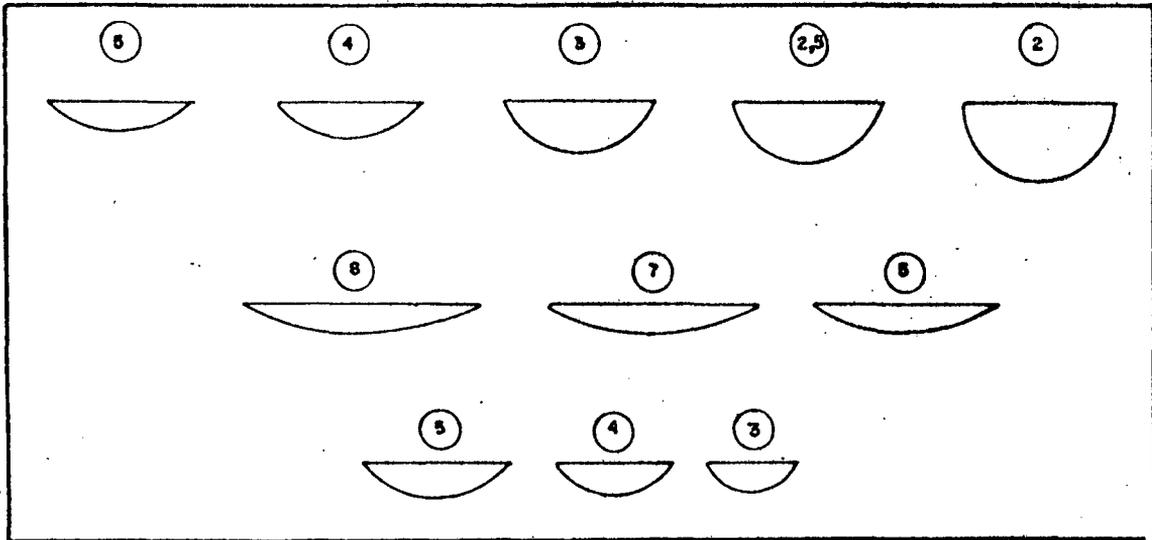


Fig. 4.13: variação do fator  $K_i$

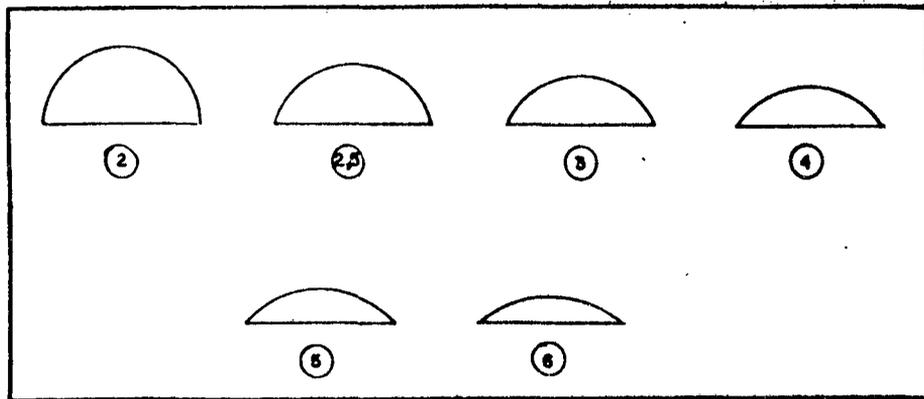


Fig. 4.14: variação do fator  $K_e$

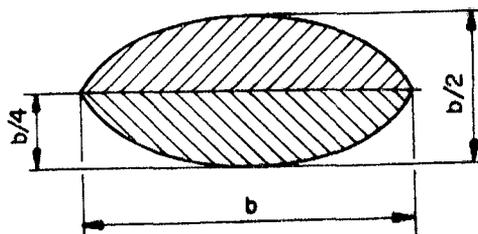


Fig. 4.15: solda de referência

que foi realizado os experimentos, pois, a geometria da solda, nas mesmas condições de soldagem, modifica-se com a espessura. Assim, com o aumento da espessura, a largura e a penetração tende a diminuir, enquanto que, o reforço tende a aumentar, alterando os valores de  $K_i$  e  $K_e$ , sendo que, o  $K_i$  sofrerá pequena variação e o  $K_e$  uma variação um pouco mais significativa (fig. 4.16). Como se observa o  $K_e$  diminui com o aumento da espessura, o que significa uma tendência da linha de  $K_e=4$  tender a se deslocar no sentido de menores valores de corrente.

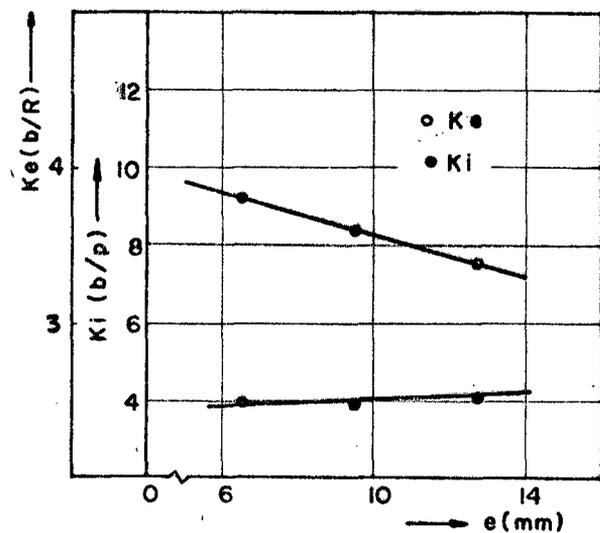


Fig. 4.16: variação de  $K_e$  e  $K_i$  com a espessura, em

$V=24$  volts,  $t=25$ mm,  $V_s=40$ cm/min e  $I=300$  amperes.

As figuras 4.17 e 4.18 mostram os campos de ocorrência para o processo, em duas tensões ( $V=24$  e  $40$  volts) e duas distâncias da tomada de corrente, ( $t = 25$  e  $37$ mm), em relação ao fator  $K_i$ . Observa-se, na figura 4.17, relativo aos campos com fator  $K_i > 4$ , que os campos onde se obtém um excesso relativo de largura ( $K_i > 4$ ) são ampliados com aumento da tensão. Enquanto que, como mostram os campos de ocorrência ( $K_i < 4$ ) da figura 4.18, as relativas maiores penetração são características de menores tensões, sendo que, o aumento do "t" nesta mesma tensão, contribui para aumentar o campo em que se obtém esta característica.

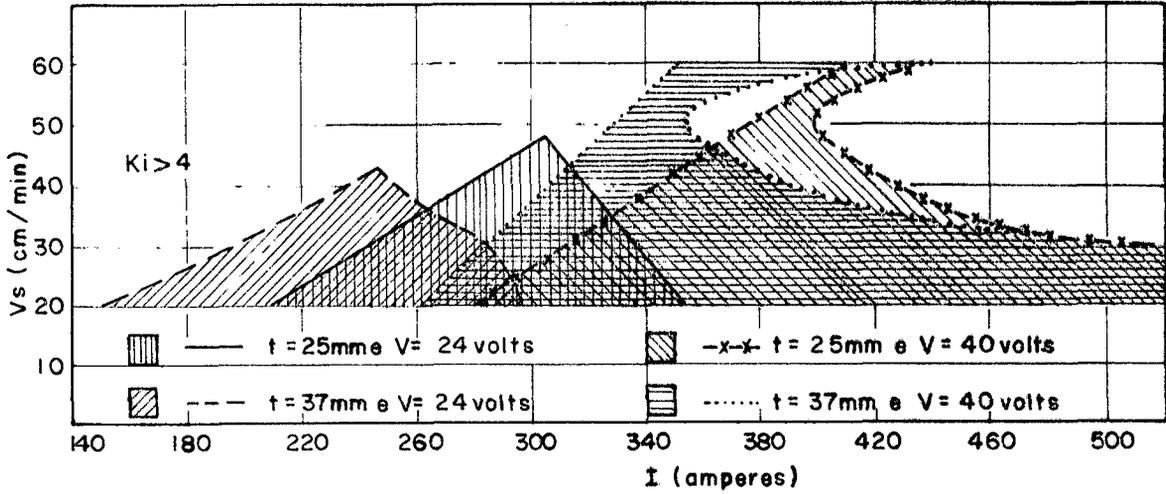


Fig. 4.17: campo de ocorrência quanto a forma do cordão, em relação ao fator  $K_i > 4$ .

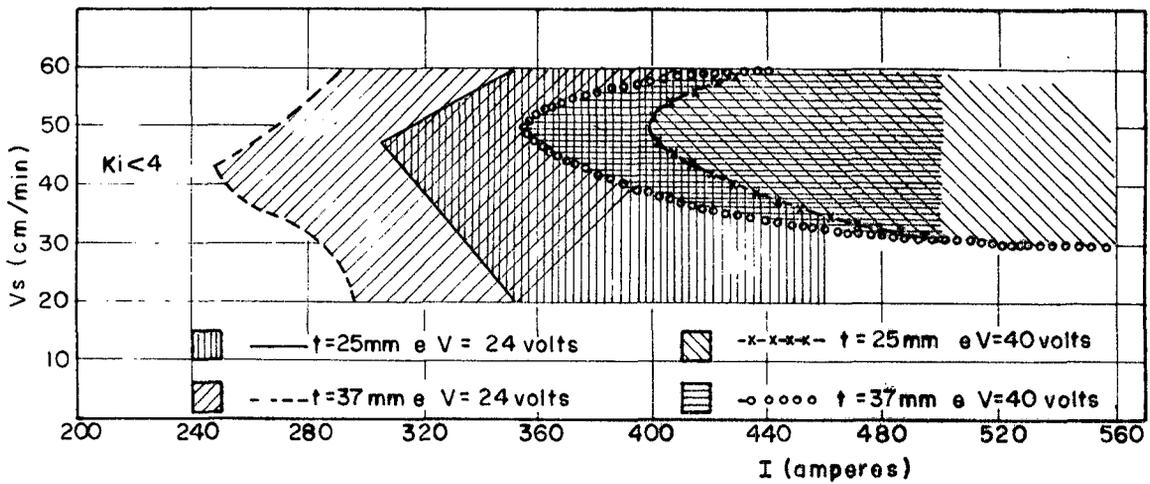


Fig. 4.18: campo de ocorrência quanto a forma do cordão, em relação ao fator  $K_i < 4$ .

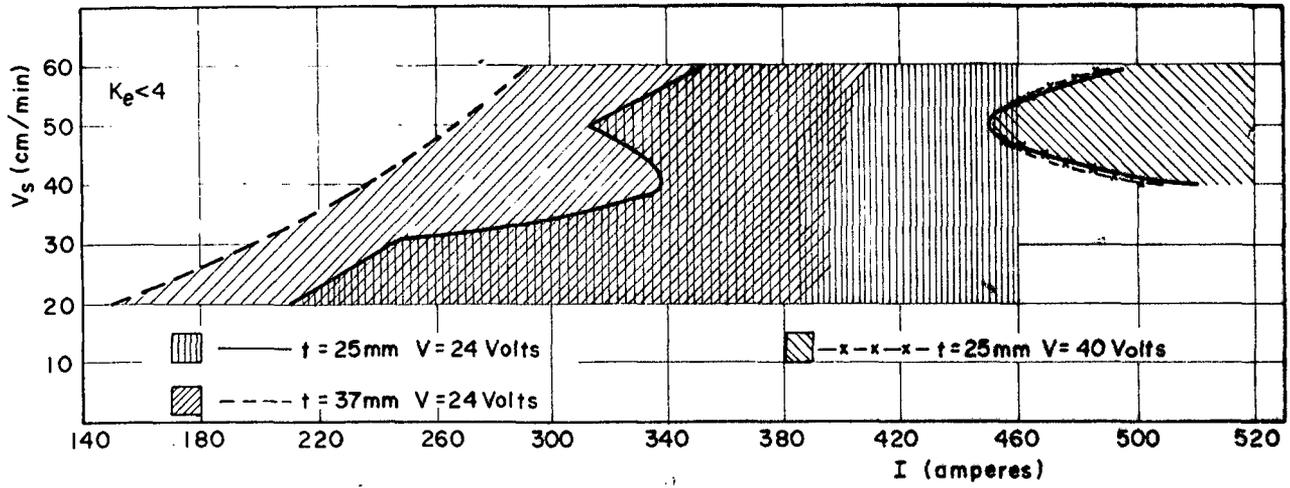


Fig. 4.19: campos de ocorrência quanto a forma do cordão em relação ao fator de forma  $K_e < 4$ .

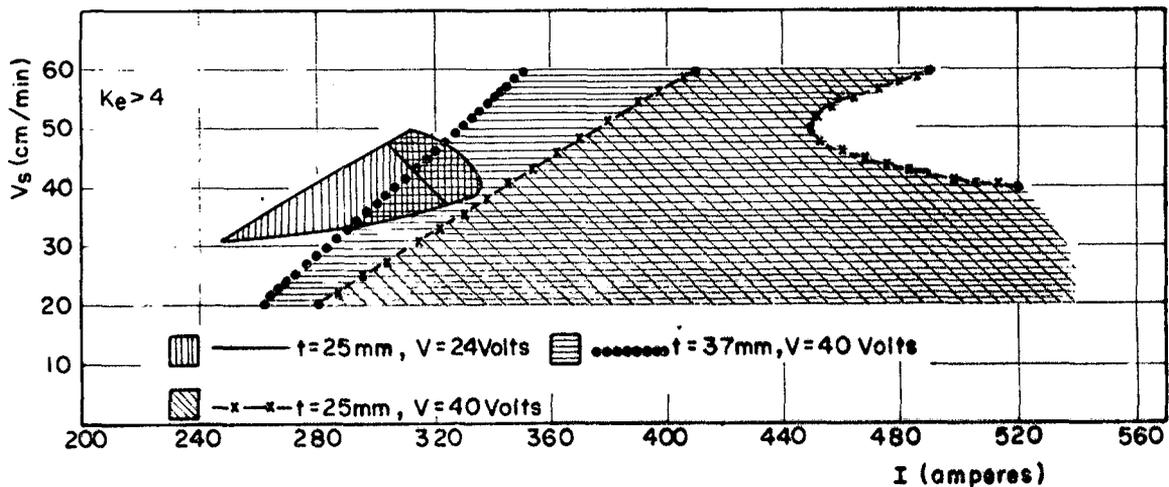


Fig. 4.20: campos de ocorrência quanto a forma do cordão em relação ao fator de forma  $K_e > 4$ .

Em relação ao fator de forma  $K_e$ , as figuras 4.19 e 4.20 mostram os respectivos campos de ocorrência para os fatores de forma  $K_e < 4$  e  $K_e > 4$ , em duas tensões ( $V = 24$  volts e  $40$  volts) e em duas distâncias do metal de base a tomada de corrente ( $t = 25\text{mm}$  e  $37\text{mm}$ ). Portanto, comparando-se os campos de ocorrência quanto a forma do cordão nas figuras 4.19 e 4.20, pode-se dizer que com menores tensões obtém-se um aumento relativo do reforço ( $K_i < 4$ ), e que, o aumento do "t", em uma mesma tensão, provoca um aumento no campo de ocorrência e, conseqüentemente, um aumento relativo do reforço ( $K_i < 4$ ).

Ressalta-se a existência de uma área, na figura 4.20, na tensão de  $24$  volts e  $t = 25\text{mm}$ , onde  $K_e > 4$  e  $K_i < 4$ , ou seja, proporciona uma solda sem excesso relativo de reforço ou largura.

#### 4) SELEÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PELO CRITÉRIO DE PASSES

Costuma-se classificar os passes de solda em: passes de enchimento, passes de recobrimento e passes de penetração.

##### 4.1) Passes de enchimento:

São aqueles utilizados para preencher chanfros com material de adição, para completar o cordão de solda. Comumente são aplicados sobre um passe de penetração executado no fundo do chanfro.

#### 4.2) Passes de recobrimento:

São aqueles que são aplicados como último passe, com função de acabamento, em condições de múltiplos passes, ou aqueles cuja função é recobrir uma superfície com um material de solda com propriedades especiais, diferentes das do material de base.

#### 4.3) Passes de penetração:

São aqueles que visam a máxima profundidade de fusão do material de base (com máxima diluição). São os passes em geral usados nas juntas em I e no fundo dos chanfros.

#### 4.4) Critérios de passes:

A seleção dos parâmetros de soldagem para cada tipo de passe depende de critérios específicos, conforme os exemplos que se seguem:

##### 4.4.1) Passes de enchimento:

Para os passes de enchimento do chanfro, como apresentados na figura 4.21, os critérios podem ser estabelecidos a partir da mínima área necessária para o enchimento do chanfro.

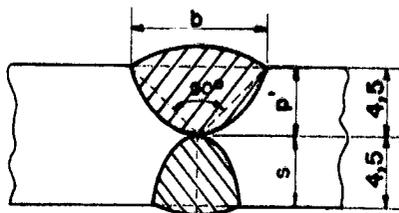


Fig. 4.21: junta em chanfro, soldada em dois passes.

$$S_{ad} = \frac{p' \cdot b}{2} \cdot 1,3 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (1)$$

- na equação 1, 1,3 significa o valor estimado do reforço (30%). Para o exemplo (fig. 4.21) a área adicionada ( $S_{ad}$ ) é igual a  $26,3\text{mm}^2$ . Verificou-se, experimentalmente, que a área adicionada é igual a:

$$0,7 K_x = S_{ad}$$

- sendo que, o  $K_x$  é definido pelo produto  $b \times r$ , então:

$$K_x = S_{ad} \cdot 1,43 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2)$$

- no exemplo em questão (fig. 4.21), tem-se  $K_x = 37\text{mm}^2$ .

Com o auxílio dos gráficos que mostram a variação da geometria da solda ( $b$ ,  $r$  e  $p$  - anexo II) com a corrente e velocidade de soldagem é também possível ter-se curvas de iso- $K_x$ , da mesma forma como foram obtidas as curvas de iso- $K_i$  e iso- $K_e$ .

Com o valor pré-determinado de  $K_x$  e sobrepondo a respectiva curva de iso- $K_x$  nos campos de utilização, pode-se selecionar as condições de soldagem para uma penetração menor ou igual a largura do encosto ( $s$ ) na máxima velocidade de soldagem. Essa condição adicional ( $p \leq s$ ), se dá em virtude de se acreditar que seja suficiente para se evitar uma perfuração na junta a ser soldada, pois as curvas de isopenetração apresentadas são para junta em I, não podem ser levadas em conta para junta em chanfro, necessitando-se assim, de levantamentos em passes de raiz para o

chanfro em estudo, mas, acredita-se que a condição de  $p \leq s$  seja suficiente, devido ao fato de que, como mostrado na figura 4.22, a penetração a partir do fundo do chanfro é bem inferior à obtida, nas mesmas condições de soldagem, na deposição em junta I, sem folga. Assim, no exemplo segundo a figura 4.21, teria-se, além do  $Kx$  pré-determinado ( $= 37\text{mm}^2$ ), o critério adicional de  $p \leq 4,5\text{mm}$ .

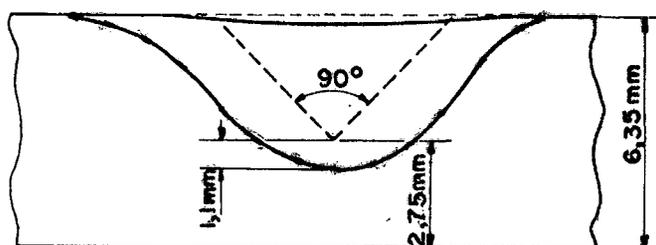


Fig. 4.22: junta em chanfro soldada em um único passe, com  $Kx = 19\text{mm}^2$  e  $p = 2,3\text{mm}$ , em  $V = 24$  volts,  $t = 25\text{mm}$ ,  $Vs = 60\text{cm/min}$ ,  $I = 300$  amperes e  $CC^+$ .

O passe de raiz possui a característica de passe de penetração e o critério adequado será estipulado posteriormente.

Em caso de chanfros para chapas muito espessas, onde não é possível o preenchimento do chanfro em um único passe, procura-se maximizar o produto " $Kx.Vs$ ", para que se alcance, no conjunto dos diversos passes, a máxima velocidade equivalente, conforme indicam as relações que se seguem:

$$V_e = \frac{P \sum S_{adp}}{1 S_{adt}} \cdot V_{sp} ; \text{ mas como viu-se anteriormente } a S_{adp} = 0,7 \cdot Kx = 0,7Kxp.$$

Onde:

$p$  = número de passes;

$V_e$  = velocidade equivalente;

$V_{sp}$  = velocidade de soldagem em cada passe;

$S_{adp}$  = área adicionada por passe;

$S_{adt}$  = área adicionada total.

Assim, têm-se:

$$V_e = 0,7 \cdot \frac{p \sum K_{xp} \cdot V_{sp}}{S_{adt}} \quad (3)$$

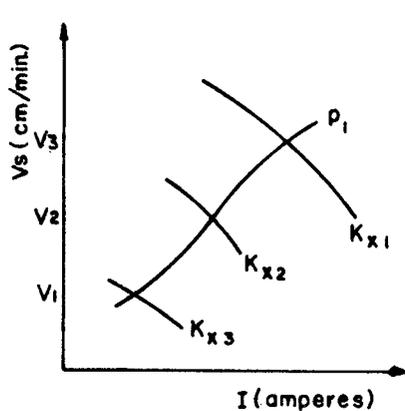
Em suma, tem-se para passes de enchimento que considerar os seguintes casos com seus respectivos critérios. Está se admitindo no caso o mesmo encosto ( $S = 4,5\text{mm}$ ) (fig. 4.21), para o passe inicial no caso de múltiplos passes.

Condição	Critérios
- único passe	- $K_x$ calculado - $p \leq 4,5\text{mm}$
- passe inicial de um cordão de solda obtido em múltiplos passes.	- máximo " $K_x \cdot V_s$ " $p \leq 4,5\text{mm}$

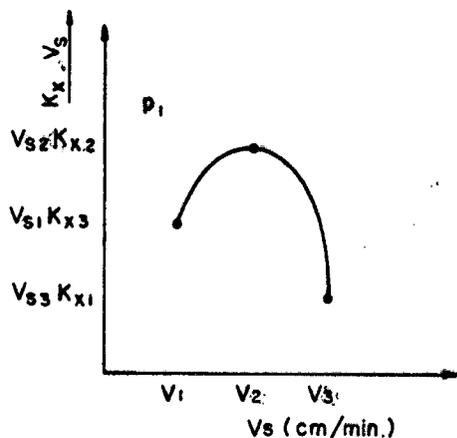
O máximo produto " $K_x \cdot V_s$ ", como é mostrado no exemplo hipotético da figura 4.23b é conseguido do gráfico cartesiano, " $K_x \cdot V_s$  versus " $V_s$ " (b) na penetração exigida ( $p = 4,5\text{mm}$ ). Estas curvas (" $K_x \cdot V_s$ " x  $V_s$ ) são obtidas dos gráficos cartesianos " $V_s \times I$ " (figura 4.23a), onde é mostrado o comportamento das linhas de

iso- $K_x$  e a linha de iso-penetração na qual consegue-se o produto " $K_x.V_s$ " na correspondente velocidade de soldagem, e estes valores são transportados para o gráfico cartesiano " $K_x.V_s$  versus a  $V_s$ ".

Este levantamento é necessário para o passe inicial (passe do fundo de chanfro), mas nos demais passes, onde a penetração é irrelevante, explorar-se-ia dentro do campo de utilização, o máximo produto " $K_x.V_s$ ", independente da penetração. Portanto seria necessário ter-se levantamentos da variação do produto " $K_x.V_s$ " em todo campo de utilização, e um meio de obter-se é realizar um gráfico da variação do produto " $K_x.V_s$ " com a corrente em diversas velocidades de soldagem. Este gráfico mostraria a velocidade de soldagem e a corrente onde o produto " $K_x.V_s$ " fosse máximo, como mostram as curvas hipotéticas da figura 4.24.



(4.23a)



(4.23b)

Fig. 4.23: exemplo hipotético, mostrando a forma de se determinar o maior produto " $K_x.V_s$ ".

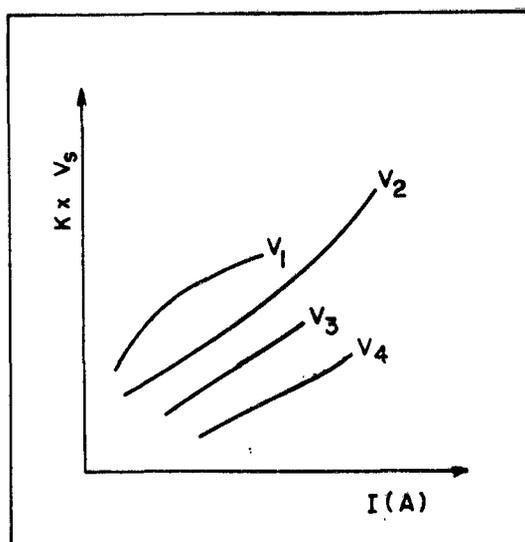


Fig. 4.24: exemplo hipotético, mostrando a forma de se determinar o maior produto " $K \times V_s$ " em uma determinada  $V_s$ .

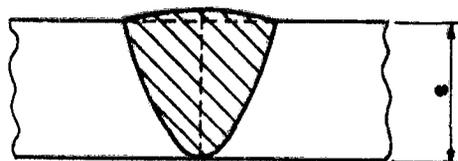
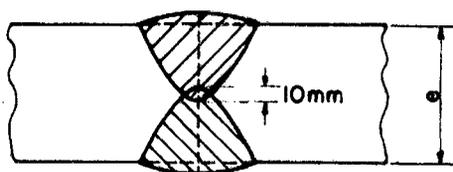


Fig. 4.25: junta em I, soldada em dois passes

Fig. 4.26: junta em I, soldada em um único passe.

#### 4.4.2) Passes de penetração:

Seja, por exemplo, uma junta em I de 9,0mm de es pessura a ser soldada com dois passes (figura 4.25) ou em um único passe (figura 4.26).

O critério a ser seguido, no caso de junta em I, soldada em dois passes, seria o de fixar a penetração a ser alcançada de modo a garantir a sobreposição dos cordões de pelo menos 1,0mm. No presente caso, procura-se as condições de soldagem que permitam obter uma penetração igual a 5,0mm.

Para solda em um único passe, seria fixado a penetração mínima exigida, que no presente exemplo é de 9,0mm, pois com valores superiores à penetração exigida pode ocorrer perfurações na junta a ser soldada. Para garantir a mínima penetração exigida, admite-se um repasse de acabamento no verso da junta.

Em ambos os casos, procuraria-se satisfazer os critérios na maior velocidade de soldagem possível, por ser economicamente interessante, e com o mínimo  $Kx$  (b.r), evitando-se uma diluição demasiada do material de base (em outras palavras, mínima fusão do material de base, proporcionada pela menor largura) e um reforço excessivo.

Porém, para se aplicar a metodologia citada acima, seria necessário ter-se levantamentos da variação da geometria da solda (p, b e r) com a corrente, em diversas velocidades de soldagem, na espessura em questão, pois a geometria varia com a espes

sura da chapa, como é mostrado nos gráficos da figura 4.27, onde com o aumento da espessura, na  $V_s = 40\text{cm/min}$  e  $I = 300$  amperes, a penetração e a largura diminuem, enquanto que o reforço aumenta.

No presente trabalho não se efetuou um levantamento de modo que abrangesse diversas espessuras. Fez-se levantamentos apenas numa determinada espessura (9,0mm) de modo que se conseguisse uma metodologia para se selecionar adequadamente as condições de soldagem, segundo os critérios impostos inicialmente, que seriam na máxima velocidade de soldagem para:

$e = 9,0\text{mm}$

Condição	Critério
único passe	- mínimo $K_x$ - $p = 9,0\text{mm}$
duplo passe	- mínimo $K_x$ - $p = 5,0\text{mm}$

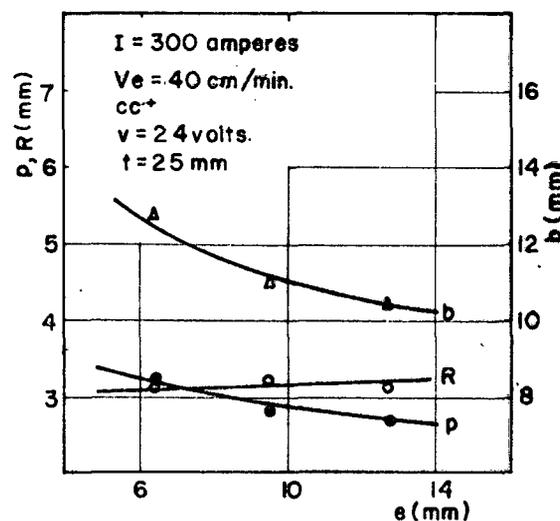


Fig. 4.27: variação da geometria da solda com a espessura.

Nas condições de soldagem da Tabela 2.1, com exceção da distância da tomada ao metal de base, o critério de um único passe torna-se difícil de conseguir, em virtude de não se conseguir a penetração de 9,0mm. Disto, resta-nos adotar somente a soldagem em duplo passe (figura 4.26).

Agora, para o passe de raiz da junta em chanfro, mostrado no exemplo da figura 4.21, em que trata de passe de penetração, exigindo uma penetração mínima de 4,5mm. Assim, os seguintes critérios devem ser satisfeitos:

Condição	Critério
passe de raiz:	- Kx mínimo - p = 4,5mm

Em suma, têm-se:

$$e = 9,0\text{mm}$$

Condição	Critério
duplo passe (fig. 4.26)	- mínimo Kx - p = 5,0mm
passe de raiz (fig. 4.27)	- mínimo Kx - p = 4,5mm

#### 4.5) Seleção de condições de soldagem para passes de enchimento:

As figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31 mostram, em duas tensões (V = 24 e 40 volts) e em duas distâncias da tomada de

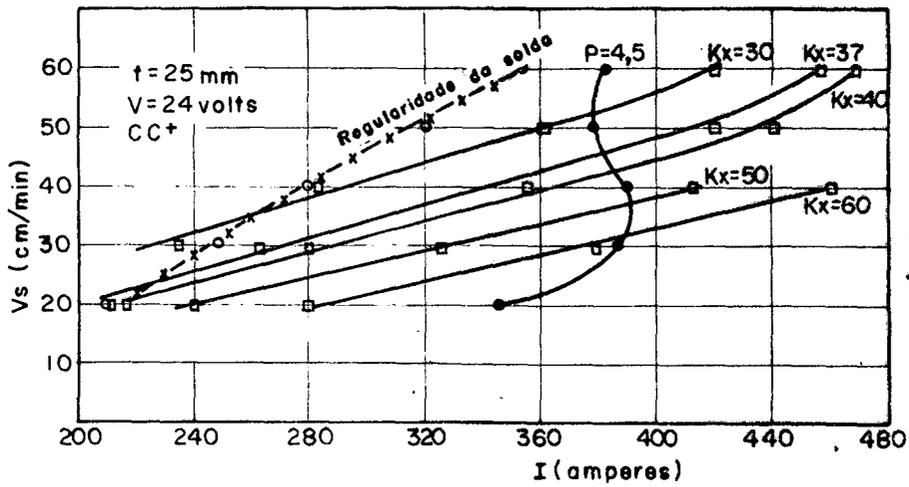


Fig.4.28: critério para passes de enchimento, em relação a  $I$  (A) e  $V_s$  (cm/min), em  $V = 24$  volts e  $t = 25$ mm.

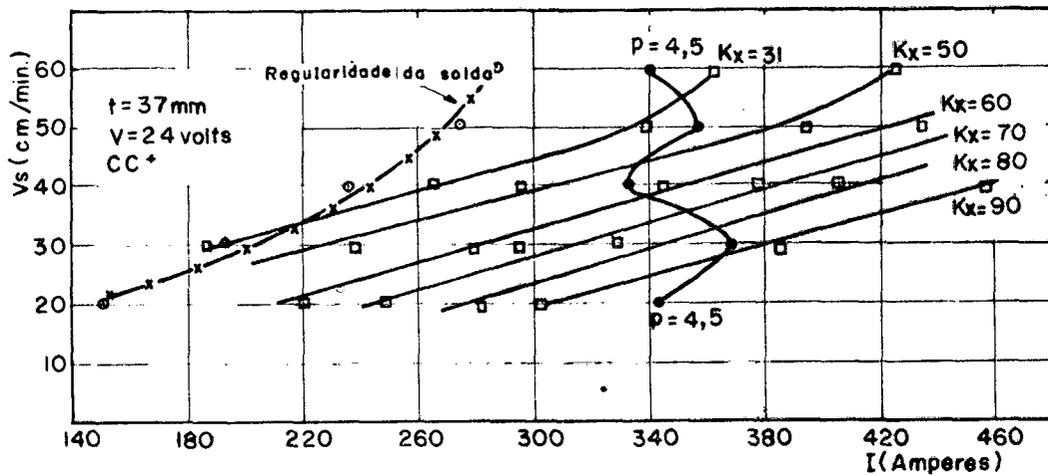


Fig.4.29: critério para passes de enchimento, em relação a  $I$  (A) e  $V_s$  (cm/min), em  $V = 24$  volts e  $t = 37$ mm.

corrente ao metal de base ( $t = 25$  e  $37\text{mm}$ ), as curvas de iso-Kx e, sobrepostas a estas, a curva de isopenetração, para  $p = 4,5\text{mm}$ .

Para mostrar a funcionabilidade dos critérios adotados para passes de enchimento através das figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31, tomou-se como exemplo uma junta chanfrada (fig.4.21), de área igual a  $26,6\text{mm}^2$  (Sad). Da equação (2) obtém-se o  $Kx=37\text{mm}^2$  necessário para o enchimento do chanfro que terá de ser acompanhado, como é determinado pelo critério de enchimento, de uma penetração menor ou igual ao encosto, e que no exemplo tomou-se  $p \leq 4,5\text{mm}$ .

Portanto, este critério pré-estabelecido,  $Kx=37\text{mm}^2$  e  $p = 4,5\text{mm}$ , para o enchimento do chanfro em um único passe é conseguido diretamente (nas figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31), pela intersecção das curvas de iso-Kx ( $37\text{mm}^2$ ) e isopenetração ( $4,5\text{mm}$ ). Porém, pode ser observado que este critério não é satisfeito numa  $p = 4,5$  em altas tensões ( $V = 40$  volts) e, portanto, a solução nestas tensões seria de  $Kx = 37\text{mm}^2$ , mas com uma penetração menor do que  $4,5\text{mm}$ . As soluções para o critério imposto, nas duas tensões e nos dois "t", são mostradas na Tabela 4.1.

TENSÃO (volts)	t (mm)	CORRENTE (amperes)	Vs (cm/min)	Kx ( $\text{mm}^2$ )
24	25	381	46	37
	37	351	55	37
40	25	438	60	37
	37	490	60	37

Tabela 4.1: resultados obtidos do critério de enchimento em um único passe.

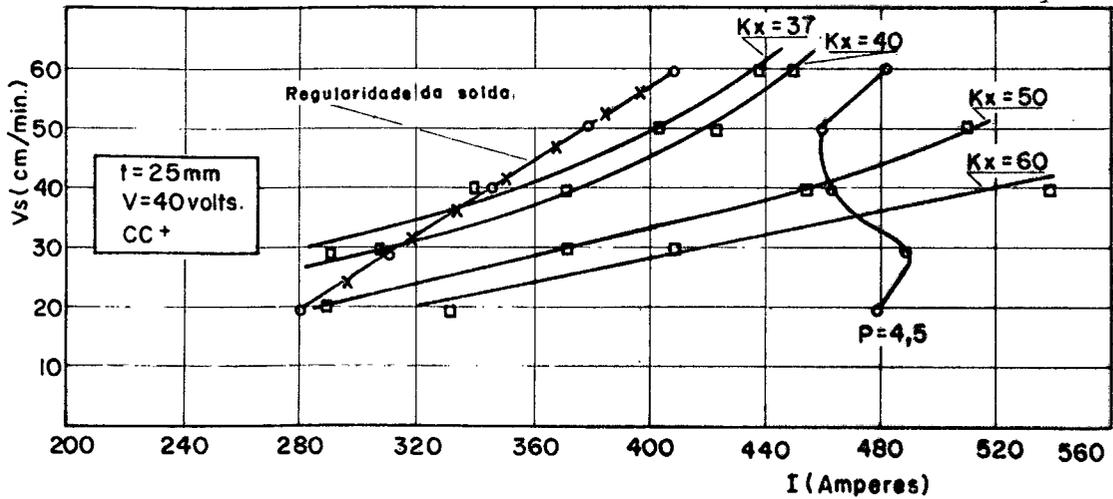


Fig. 4.30: critério de passes de enchimento, em relação a  $I$  (A) e  $V_s$  (cm/min), em  $V = 40$  volts e  $t = 25\text{mm}$ .

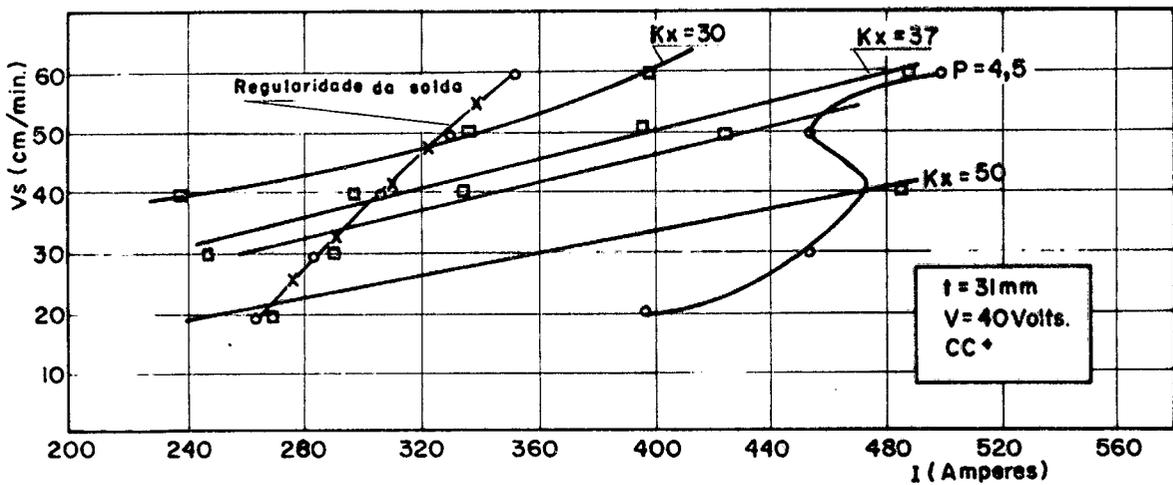


Fig. 4.31: critério de passes de enchimento, em relação a  $I$  (A) e  $V_s$  (com/min), em  $V = 40$  volts e  $t = 37\text{mm}$ .

No caso de enchimento de chanfros, que necessitam mais de um passe, adota-se um critério que para o primeiro passe (passe de fundo do chanfro) um máximo produto " $Kx.Vs$ ", seja associado, neste exemplo, de uma penetração,  $p \leq 4,5\text{mm}$ . Para se obter o máximo " $Kx.Vs$ " lança-se mão das curvas de " $Kx.Vs$ " em função da velocidade de soldagem (figuras 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35), de onde pode-se obter a velocidade de soldagem em que ocorre o máximo produto " $Kx.Vs$ " na penetração exigida.

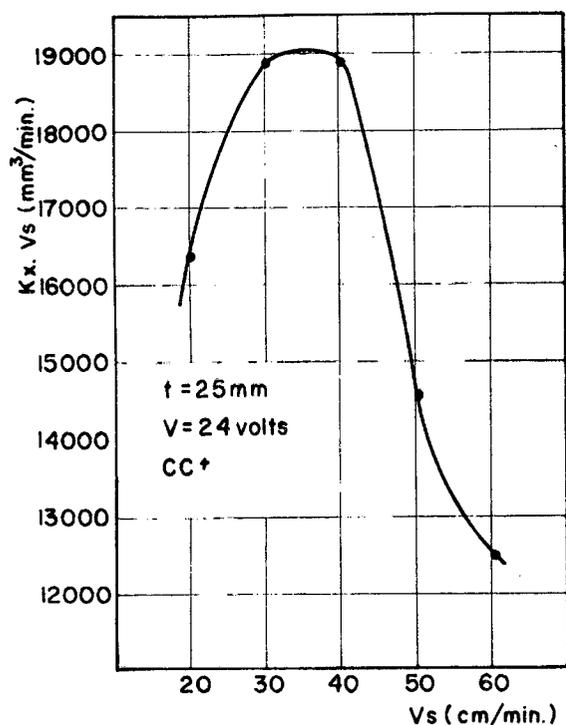


Fig. 4.32: curvas de " $Kx.Vs$ " em função de  $Vs$ , em  $t = 25\text{mm}$  e  $V = 24\text{ volts}$ .

A Tabela 4.2 mostra, segundo as curvas das figuras 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32, 4.33, 4.34, os dados obtidos experimentalmente para o critério estabelecido para o primeiro passe no caso de enchimento do chanfro em vários passes.

Portanto, no de enchimento de chanfros em vários passes, em que é primordial maximizar o produto " $Kx.Vs$ ", os resultados (Tabela 4.2) mostram que em maiores tensões e maiores distâncias da tomada de corrente ao metal de base, maior será o pro

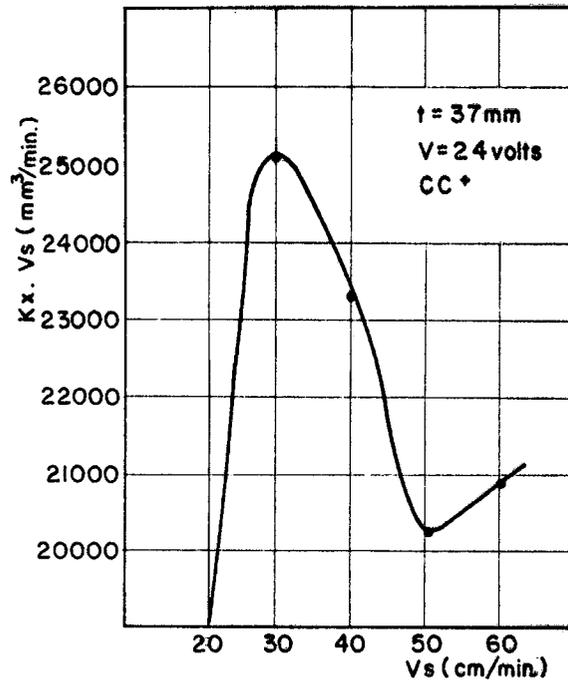


Fig. 4.33: curva de " $Kx \cdot Vs$ " em função de  $Vs$ , em  $t = 37$  mm e  $V = 24$  volts.

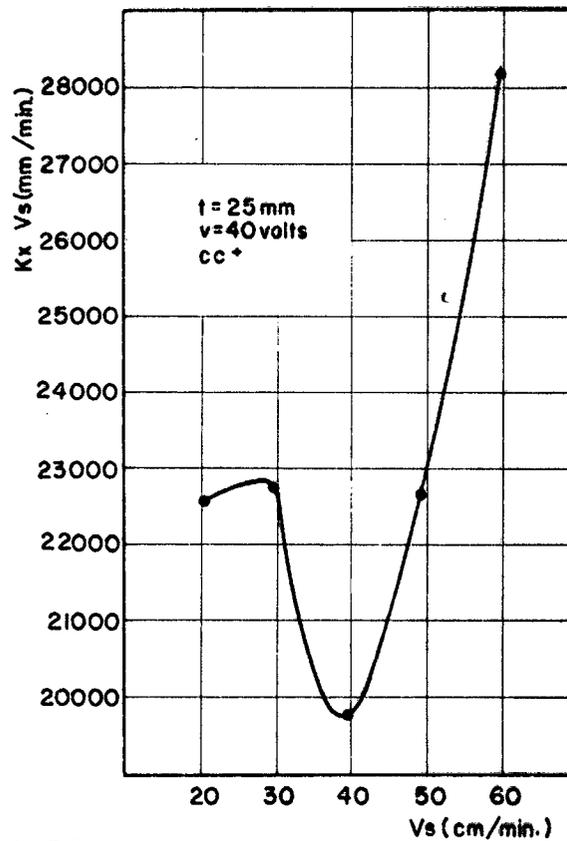


Fig. 4.34: curva de " $Kx \cdot Vs$ " em função de  $Vs$ , em  $t = 25$  mm e  $V = 40$  volts.

duto "Kx.Vs" e que é também associado a uma maior velocidade de soldagem. Para os critérios estabelecidos para um único passe, as condições que melhor os satisfazem (Tabela 4.1) ocorre nas menores tensões com a distância da tomada de corrente ao metal de base maior.

TENSÃO (volts)	t (mm)	CORRENTE (amperes)	Vs (cm/min)	Kx.Vs (mm <sup>3</sup> /min)
24	25	391	35	19000
	37	368	30	25100
40	25	482	60	28150
	37	500	60	54000

Tabela 4.2: resultados obtidos para o primeiro passe, para o enchimento de um chanfro em vários passes.

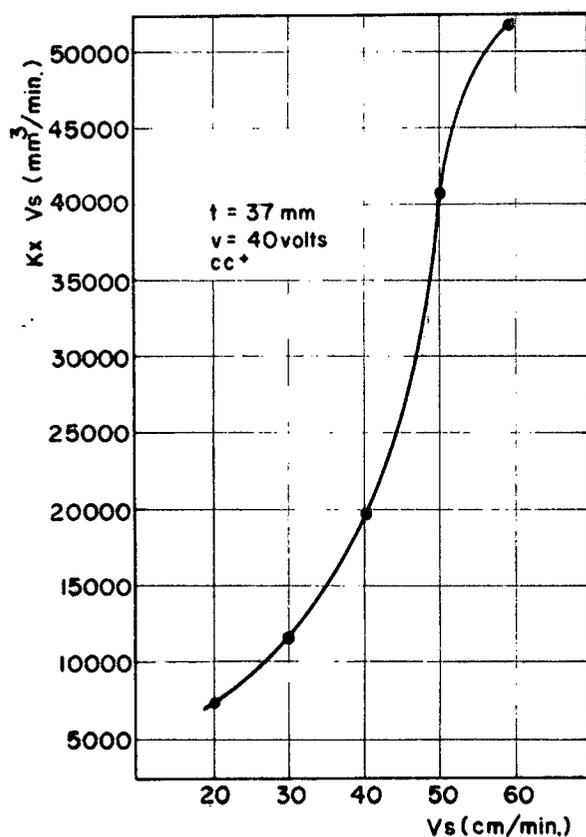


Fig. 4.35: curva de "Kx.Vs" em função de Vs, em t = 37mm e V = 40 volts.

#### 4.6) Seleção das condições de soldagem para passes de penetração:

As figuras 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39 mostram, em duas tensões ( $V = 24$  volts e  $40$  volts) e em duas distâncias da tomada de corrente ao metal de base ( $t = 25$  e  $37$ mm), as linhas de isopenetração igual a  $4,5$  e  $5,0$ mm e as linhas de iso- $K_x$ , que são necessárias para determinar as condições de ótimas soldagens para os critérios estabelecidos nos passes de penetração, conforme a seção 4.4.2.

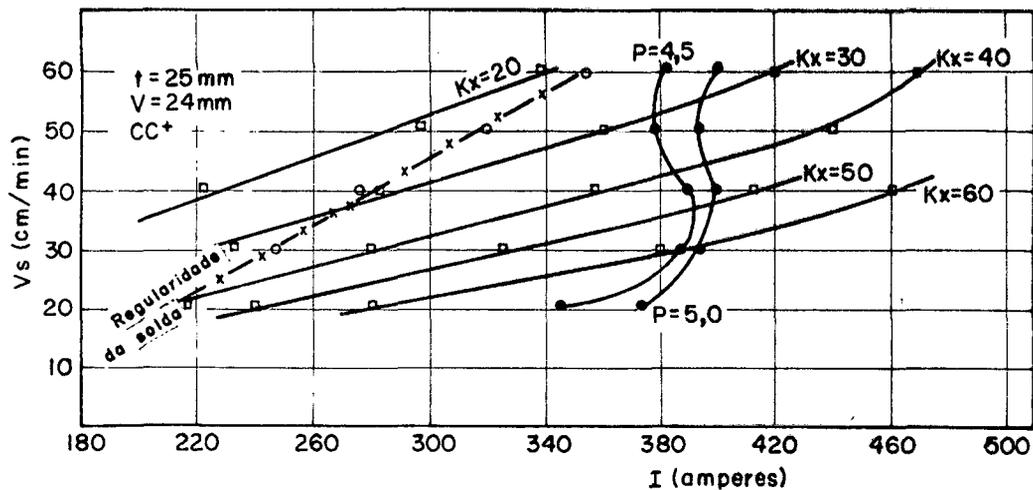


Fig. 4.36: critérios para passes de penetração, em relação a  $I$  (A) e  $V_s$  (cm/min), em  $t = 25$ mm e  $V = 24$  volts.

Para mostrar a funcionabilidade dos critérios estabelecidos para passes de penetração, foi tomada como exemplo uma junta I de  $9,0$ mm de espessura e que, como mostram as curvas de isopenetração, nestas condições de soldagem, só é possível obter

esta junta soldada em dois passes de 5,0mm de penetração, de cada lado da junta. Como segundo exemplo tomou-se o passe de raiz da junta em chanfro da figura 4.21, onde é exigida uma penetração mínima de 4,5mm. O critério estabelece uma penetração mínima associada a um mínimo  $K_x$ , na maior velocidade de soldagem possível.

TENSÃO (volts)	t (mm)	CORRENTE (amperes)	Vs (cm/min)	$K_x$ (mm <sup>2</sup> )
24	25	400	60	26
	37	360	60	36
40	25	492	60	45
	37	530	60	40

Tabela 4.3: resultados obtidos para passes de penetração, para  $p = 5,0\text{mm}$ .

TENSÃO (volts)	t (mm)	CORRENTE (amperes)	Vs (cm/min)	$K_x$ (mm <sup>2</sup> )
24	25	382	60	24
	37	340	60	35
40	25	482	60	44
	37	500	60	40

Tabela 4.4: resultados obtidos para passes de penetração,  $p = 4,5\text{mm}$ .

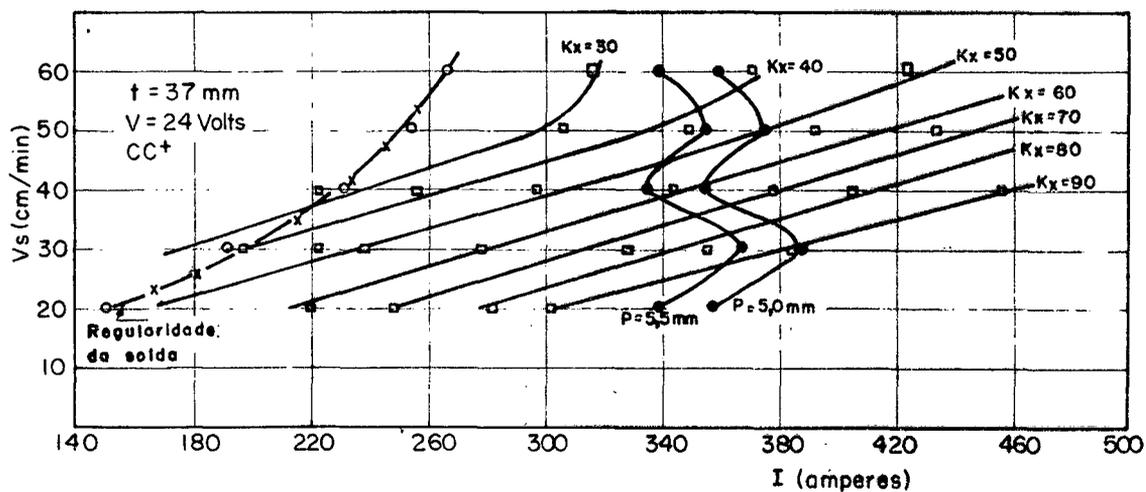


Fig.4.37: critério de passes de penetração, em relação a  $I$  (A) e  $V_s$  (cm/min), em  $t = 37$ mm e  $V = 24$  volts.

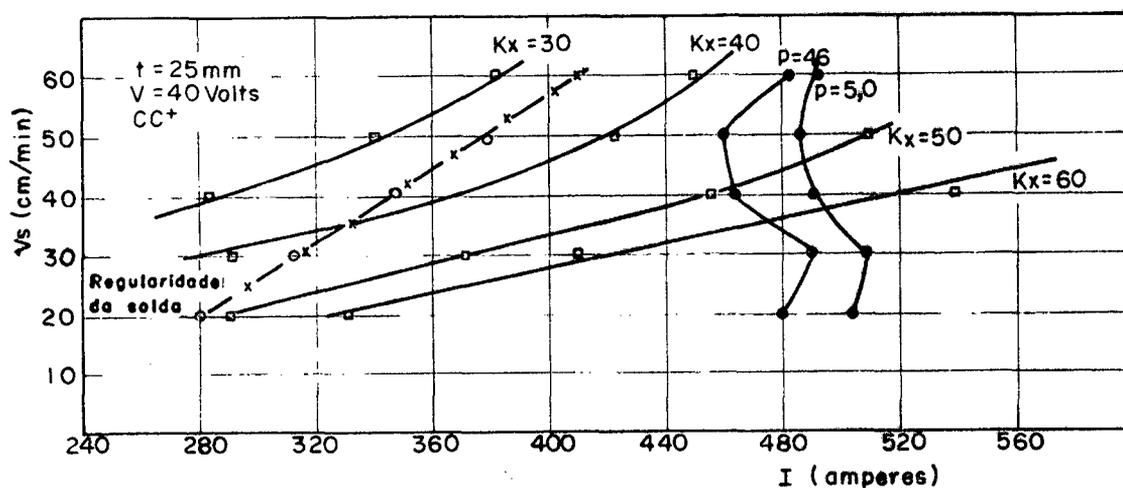


Fig.4.38: critério de passes de penetração, em relação a  $I$  (A) e  $V_s$  (cm/min), na  $V = 40$  volts e  $t = 25$ mm.

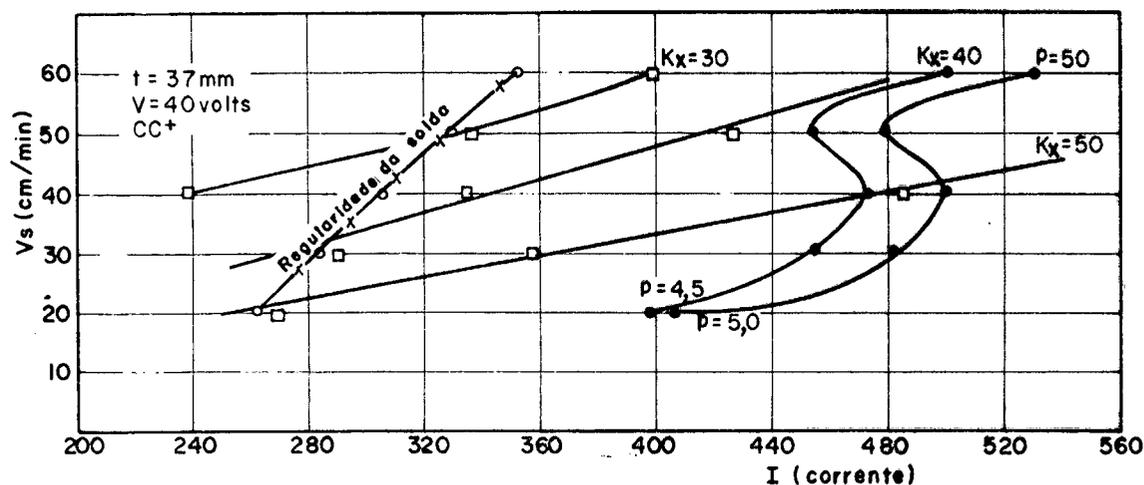


Fig. 4.39: critério para passes de penetração, em relação a I (A) e Vs (cm/min), na V = 40 volts e t = 37mm.

As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram, segundo as figuras 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39, as condições de soldagem que melhor satisfazem os exemplos em questão, nos critérios de passes de penetração. Portanto, os critérios estabelecidos são conseguidos na maior velocidade estudada como o menor Kx na menor tensão e menor "t".

#### 4.7) Conclusões:

4.7.1) Quanto ao campo de ocorrência quanto a geometria da solda:

- o aumento da tensão provoca um excesso relativo de reforço

- numa mesma tensão, o aumento de "t" provoca, tam  
bém, um aumento excessivo do reforço.

- a diminuição da tensão provoca um excesso relati  
vo de penetração.

#### 4.7.2) Quanto ao critério de passes:

##### 4.7.2.1) Para passes de enchimento:

- único passe: o critério é melhor satisfeito nas  
menores tensões e com "t" maiores.

- vários passes: o critério é melhor satisfeito  
nas maiores tensões com "t" grandes.

##### 4.7.2.2) Para passes de penetração:

As melhores condições para satisfazer os critérios  
de passes de penetração são obtidas nas menores tensões e menores  
"t".

## CAPÍTULO V

IMPORTÂNCIA DO NÍVEL DE ENERGIA NAS PROPRIEDADES DA SOLDA1) INTRODUÇÃO:

Neste estudo é feito, além de uma análise global, uma análise parcial da geometria da solda, das reações metalúrgicas e variações estruturais que ocorrem na solda e zona afetada pelo calor (Z.A.C.), da dureza e das variações que ocorrem no consumo de fluxo e elétrodo, em função do nível de energia e polaridade.

2) ESPECIFICAÇÕES (ou condições de soldagem):

As condições de soldagem, usadas neste estudo, são mostradas na tabela 5.1, sendo que, o material de base, o fluxo e o elétrodo são expostos pela sua designação comercial. A composição real, dos materiais, mencionados, são apresentados no decorrer desse estudo, com exceção do fluxo o qual em termos quantitativos, por se tratar de um segredo industrial, não se conseguiu a composição.

Porém, o que se pode dizer, é que, como visto na tabela 1.7, eles são constituídos de silicatos compostos que são

formados por fusão de ingredientes contendo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ).

Material de base	- Aço SAE 1020 de 12,7mm de espessura
Fluxo	- F70 (ARMCO 780)
Processo	- Soldagem plana sobre face - Elétrodo de 2,38mm de diâmetro, com movimento retilíneo (sem oscilações transversais) - Distância do bico de contato ao metal de base $t = 25\text{mm}$ .
Arame	- BMAS 121 (AWS EL 12)
Fonte de ener..	- Retificador do tipo tensão constante
Corrente utilizada	- Corrente contínua

Tabela 5.1: condições de soldagem

### 3) ESTUDO EXPERIMENTAL DA GEOMETRIA DA SOLDA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE ENERGIA E POLARIDADE:

Para melhor compreensão e para ampliar a capacidade de análise, os níveis de energia usados neste estudo ( $\frac{I \cdot V}{V_s}$ ) são mostrados, em separado, na tabela 5.2, com os valores dos parâmetros usados:

NÍVEL DE ENERGIA $K = \frac{I \cdot V}{V_s}$	CORRENTE I (A)	TENSÃO V (volts)	VEL. DE SOLDAGEM Vs (cm/min)
$K_1=400$	400	40	40
$K_2=600$	300	40	20
$K_3=800$	400	40	20

Tabela 5.2: níveis de energia (Watts.min/cm)

Esta tabela mostra que, para se obter uma variação de  $K_1$  para  $K_2$  houve uma variação na corrente e velocidade de soldagem, de  $K_1$  para  $K_3$  variou-se apenas a velocidade de soldagem e de  $K_2$  para  $K_3$  há uma variação na corrente (A) de soldagem.

POLARIDADE	NÍVEL DE ENERGIA K	ÁREAS (mm <sup>2</sup> )			COMPRIMENTOS (mm)		
		Sad	Sp	S.A.A.C	b	R	P
CC <sup>-</sup>	$K_1=400$	44,68	35,78	201,9	18,0	3,4	3,8
	$K_2=600$	64,59	20,77	526,3	20,0	3,7	2,0
	$K_3=800$	70,24	74,72	>852	26,8	4,1	4,0
CC <sup>+</sup>	$K_1=400$	51,26	37,31	192,8	18,8	3,0	4,9
	$K_2=600$	56,57	37,00	419,8	26,7	3,2	2,4
	$K_3=800$	59,55	61,09	>1278	30,7	3,4	5,2

Tabela 5.3: dados experimentais da geometria da solda em função do nível de energia e polaridade.

### 3.1) Análise dos resultados

#### 3.1.1) Quanto a área adicionada (Sad)

Observa-se, na tabela 5,3, que o nível de energia e a polaridade, mantidas constantes as outras condições de soldagem, afetam diretamente o comportamento da área adicionada, isto é, o aumento do nível de energia implica em um aumento na área adicionada, tanto na polaridade direta como na inversa, e que, com a polaridade direta se obtém, geralmente, as maiores áreas adicionadas.

#### 3.1.2) Quanto a área penetrada (Sp)

Como pode ser observado na tabela 5.3, o nível de energia não pode ser tomado como regra na avaliação do comportamento da área penetrada, isto porque, o aumento ou a diminuição do nível de energia não implica em uma constância no aumento ou diminuição da área penetrada. Desta forma é necessário fazer-se uma análise do comportamento da área penetrada e relação aos parâmetros que compõe o nível de energia.

Como a variação no nível energético foi conseguido, tabela 5.2, através de variações da corrente e velocidade de soldagem, o que se pode afirmar, é que, dos valores, experimentalmente obtidos, da área penetrada em  $K_2$  para  $K_3$  e  $K_3$  para  $K_1$ , mostram

que, mantidas as demais condições de soldagem constantes, a variação de 100 amperes na corrente produz um maior efeito na área penetrada do que a variação de 20 cm/min na velocidade de soldagem.

A polaridade, por sua vez, afeta de modo direto a área penetrada, ou seja, os maiores valores de área penetrada de modo geral, é conseguida em polaridade inversa.

### 3.1.3) Quanto a área afetada pelo calor (S.A.A.C.)

O comportamento da área afetada pelo calor, como no caso da área adicionada, é influenciada diretamente pelo nível de energia e polaridade. Portanto, o aumento do nível de energia implica em um aumento da área afetada pelo calor (A.A.C), nas duas polaridades. Por sua vez, os resultados experimentais mostram que as A.A.C. serão, de maneira geral, sempre superiores em polaridade direta.

### 3.1.4) Quanto a largura da solda (b)

Os resultados experimentais mostram, tabela 5.3, que a largura da solda cresce com o aumento do nível de energia, e que, seus valores (b) são sempre superiores em polaridade direta.

### 3.1.5) Quanto ao reforço da solda (r)

Aqui, como no caso da largura, o aumento do nível de energia implica em um aumento no reforço da solda e que seus valores são sempre superiores em polaridade direta.

### 3.1.6) Quanto a penetração da solda (p)

Como no caso da área penetrada, a penetração é regida pelos parâmetros que compõe o nível de energia, ou seja, como pode ser observado na tabela 5.3, a variação de 100 amperes de  $K_2$  para  $K_3$  tem um efeito maior sobre a penetração do que a variação de 20 cm/min de  $K_3$  para  $K_1$ .

## 4) METALURGIA DA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO:

Em soldagem a arco submerso, a análise química final e, conseqüentemente, as propriedades do material soldado são funções dos materiais utilizados e das reações metalúrgicas ocorridas durante a soldagem, isto é, da interação do metal fundido, escória e fases gasosas.

A natureza e direção dessas reações podem mudar a composição esperada, calculada pela regra de diluição (Eq. 1).

A composição esperada (Mse)<sup>5.1</sup> do metal soldado é determinada pela equação.

$$Mse = \frac{(Me\ell \times Sad) + (Mmb \times Sp)}{Sad + Sp} \quad (1)$$

Onde:

Mse = concentração esperada de um dado elemento, na solda em percentagem.

Me $\ell$  = concentração do mesmo elemento no elétrodo, em percentagem.

Mmb = concentração do mesmo elemento no metal de base, em percentagem.

Sad = área adicionada.

Sp = área penetrada da solda.

A diferença ( $\Delta M$ ) entre a composição real do metal soldado (Mre), determinado pela análise química, e a composição esperada (Mse).

$$\Delta M = Mre - Mse \quad (2)$$

mostra a variação de composição de um dado elemento no metal soldado durante a soldagem. Como na equação 1 só é levado em consideração a composição do elemento no metal de base e elétrodo, a diferença  $\Delta M$  indicará se o fluxo adiciona ou retira o elemento do metal soldado. Desta forma, as reações metalúrgicas, que ocorrem durante a soldagem, podem ser controladas pela escolha correta dos materiais de adição e procedimentos de soldagem, a fim de obter uma solda com a composição química e propriedades desejadas.

Os fluxos empregados em soldagem a arco submerso, como já mencionado, são compostos de silicatos que são formados pela fusão de ingredientes contendo  $SiO_2$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  e  $Al_2O_3$ .

O fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ) é também introduzido a fim de reduzir a viscosidade da escória e melhorar a sua condutibilidade elétrica. Este fluxo, quando fundido, molha constantemente o metal do e léttrodo fundido, a superfície do metal fundido e as bordas fundidas do metal de base.

Quando soldagem a arco submerso é aplicada a aços carbonos, as reações mais importantes entre a escória e o metal fundido são aquelas envolvendo manganês, silício e carbono, e também, enxôfre e fôforo, que são impurezas nocivas.

O teor dos elementos, acima mencionados, influi na resistência do metal soldado e na possibilidade de obter-se uma junta soldada sã e livre de trincas e vazios.

A velocidade e direção das reações em aços carbonos são determinadas por uma variedade de fatores, sendo os principais a concentração desses elementos no metal fundido e de seus óxidos na escória, a temperatura na zona de reação e a área de contato entre o metal e escória, fazendo parte na reação.

Preferivelmente, a concentração dos elementos no metal e escória dependem dos tipos de materiais empregados (material de base, eléttrodo e fluxo).

A partir dos elementos contidos no metal de base, no eléttrodo e no fluxo faz-se uma análise do teor desses elementos no metal soldado em função do nível de enérgia e polaridade, como exposto na tabela 5.4.

A tabela 5.4 mostra as composições químicas esperada na solda com diluição do metal de base, esperada e reais da solda sem a diluição do metal de base, real do metal de base ( $C_3$ ), da zona afetada pelo calor ( $C_2$ ) e da solda ( $C_1$ ), e também a composição química real do eléttrodo. As composições químicas esperadas

foram calculadas por meio da equação 1 e as reais obtidas, por meio de análise química.

#### 4.1) Análise dos resultados

##### 4.1.1) Quanto ao comportamento do silício e manganês

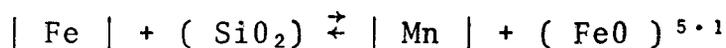
A tabela 5.4 mostra que as pequenas variações que o correm nos teores de silício e manganês na solda, tanto na composição esperada como na real, é função da taxa de diluição, isto é, há um aumento dos teores de silício e manganês com o aumento da taxa de diluição. A afirmação de que os teores desses elementos varia com a taxa de diluição é confirmada pelo fato, de que, mantidas as demais condições de soldagem constantes, os teores de silício e manganês são sempre superiores na polaridade que oferece, no mesmo nível de energia, a maior diluição.

Por outro lado, observa-se que ocorre uma variação desses elementos, tanto em soldas obtidas sem diluição como com diluição do metal de base, entre a composição real e a esperada. Esta diferença mostra que, além do arame eletrodo e do material de base, o fluxo também adiciona silício e manganês ao metal sol dado.

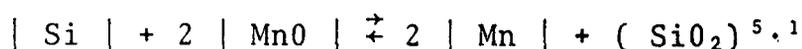
A escória que sobrenada a poça fundida, durante a soldagem, contém  $MnO$  e  $SiO_2$  provenientes da composição do fluxo adicionado ao processo, e as reações entre o metal fundido e a es cória, são os seguintes:

POLARIDADE	NÍVEL ENERGÉTICO	$f_R = \frac{A_1}{A_1 + A_2}$	TAXA DE DILUIÇÃO (1-f <sub>R</sub> ) (%)	ELEMENTOS	COMPOSIÇÃO ESPERADA (%)	COMPOSIÇÃO S/ DILUIÇÃO (%)		COMPOSIÇÕES REAIS (%)			COMPOSIÇÃO REAL DO ELETRODO (%)
					$\frac{(M_{EL} \times A_1) + (M_{MB} \times A_2)}{A_1 + A_2}$	ESPERADA	REAL	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	
CC <sup>-</sup>	400	0,555	44,5	C	0,142	0,12		0,10	0,17	0,17	0,12
				Si	0,068	0,05		0,44	0,09	0,09	0,05
				Mn	0,59	0,4		1,32	0,84	0,83	0,40
				Mg	V	—		0,01	V	V	—
				Ti	V	—		0,004	V	V	—
				P	0,016	0,030		V	V	V	0,030
				S	0,019	0,035		V	V	V	0,035
				Cu	0,083	0,15		V	V	V	0,15
	600	0,756	24,3	C	0,132	0,12	0,051	0,10	0,17	0,17	0,12
				Si	0,059	0,05	0,97	0,43	0,10	0,09	0,05
				Mn	0,49	0,4	2,02	1,22	0,84	0,81	0,40
				Mg	V	—		0,01	V	V	—
				Ti	V	—		0,006	V	V	—
				P	0,007	0,030		V	V	V	0,030
				S	0,008	0,035		V	V	V	0,035
				Cu	0,036	0,15		—	—	—	0,15
	800	0,485	51,5	C	0,146	0,123	0,06	0,11	0,17	0,17	0,12
				Si	0,075	0,05	1,0	0,45	0,10	0,10	0,05
				Mn	0,62	0,40	1,88	1,36	0,83	0,83	0,40
				Mg	V	—		0,05	V	V	—
				Ti	V	—		0,004	V	V	—
				P	0,015	0,030		V	V	V	0,030
				S	0,016	0,035		V	V	V	0,035
				Cu	0,07	0,15		—	—	—	0,15
CC <sup>+</sup>	400	0,578	42,1	C	0,141	0,120		0,12	0,17	0,17	0,12
				Si	0,071	0,029		0,45	0,12	0,10	0,05
				Mn	0,58	0,232		1,29	0,86	0,83	0,40
				Mg	V	—		0,05	V	V	—
				Ti	V	—		0,004	V	V	—
				P	0,017	0,030		V	V	V	0,030
				S	0,020	0,035		V	V	V	0,035
				Cu	0,086	0,15		—	—	—	0,15
	600	0,605	39,5	C	0,139	0,12	0,06	0,12	0,17	0,17	0,12
				Si	0,066	0,05	0,95	0,45	0,09	0,09	0,05
				Mn	0,56	0,40	2,0	1,22	0,82	0,81	0,40
				Mg	V	—		0,01	V	V	—
				Ti	V	—		0,004	V	V	—
				P	0,018	0,030		V	V	V	0,030
				S	0,021	0,035		V	V	V	0,035
				Cu	0,091	0,15		—	—	—	0,15
	800	0,494	50,6	C	0,145	0,12	0,07	0,13	0,17	0,17	0,12
				Si	0,075	0,05	1,00	0,47	0,12	0,10	0,05
				Mn	0,62	0,40	1,70	1,32	0,82	0,84	0,40
				Mg	V	—		0,01	V	V	—
				Ti	V	—		0,004	V	V	—
				P	0,015	0,030		V	V	V	0,030
				S	0,017	0,035		V	V	V	0,035
				Cu	0,074	0,15		—	—	—	0,15

Tabela 5.4: taxa de diluição, composição esperada com diluição do metal e sem diluição do metal de base, e as composições reais das soldas com e sem diluição do metal de base em três (3) níveis de energia e nas duas polaridades, bem como, as composições reais da zona afetada pelo calor, do metal de base e do arame eletrodo.



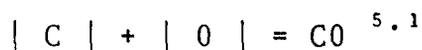
Estas reações mostram como o silício e o manganês são adicionados ao metal soldado através do fluxo, sendo que no caso do manganês, tem que ser levados em consideração também as reações que ocorrem entre o silício do eletrodo e MnO da escória, da seguinte forma:



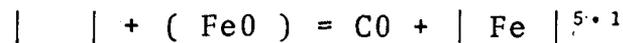
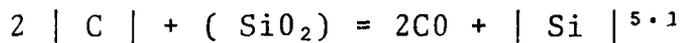
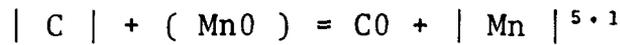
#### 4.1.2) Quanto ao comportamento do carbono

A composição real mostra (tabela 5.4) que o teor de carbono manteve-se quase que constante, sofrendo um pequeno acréscimo nas maiores taxas de diluição, e que, este comportamento é o mesmo nas duas polaridades. Contudo, na polaridade inversa, onde se obtêm as maiores taxas de diluição, os teores de carbono são um pouco superiores, em relação a polaridade inversa. Portanto, pode-se afirmar que há uma tendência de aumento do teor de carbono na solda com o aumento da taxa de diluição.

A diminuição no teor de carbono real em relação ao esperado, tanto em polaridade direta como na inversa, é devido a oxidação sofrida pelo carbono com o oxigênio no metal fundido, da seguinte forma:



Além dessa oxidação do carbono com o oxigênio no metal fundido, ele também pode ser oxidado pelos óxidos contidos na escória, diminuindo, desta forma, o seu teor no metal soldado, como segue:



#### 4.1.3) Quanto ao fósforo e o enxôfre.<sup>5.1</sup>

Observa-se na tabela 5.4 que apesar de o eletrodo possuir estes elementos na sua composição, eles aparecem somente como vestígios na composição real do metal soldado, em qualquer nível de energia e nas duas polaridades.

Como o fósforo e, notavelmente, o enxôfre são impurezas nocivas ao metal soldado, é essencial levar a um mínimo os teores desses elementos no metal soldado.

O fósforo, devido as condições de temperatura do processo de soldagem a arco submerso e os materiais (fluxo e eletrodo) empregados, está presente na solda na quase totalidade dos casos de soldagem. E este fósforo é adicionado ao metal soldado pela escória, através do fluxo, como uma impureza do minério de manganês. Portanto, quanto menor o teor de MnO na escória, menor será a quantidade de fósforo recuperado pelo metal fundido.

A redução no teor de enxôfre real, em relação ao esperado, se deve ao fato de o fluxo conter CaO em sua composição,

e este elemento tem a finalidade de promover a desulfurização do metal soldado.

#### 4.1.4) Quanto ao Mg e Ti

Observa-se na tabela 5.4 que, tanto o metal de base como o elétrodo, não possuem em sua composição esses elementos. Constata-se porém, que eles aparecem na composição real do metal soldado, sendo que, os teores são constantes, independentes do nível de energia e polaridade. Portanto, conclui-se que são introduzidos ao metal soldado através de seus óxidos contidos no fluxo e, conseqüentemente, na escória na poça fundida.

### 5) ESTUDO EXPERIMENTAL DA DUREZA DA SOLDA:

#### 5.1) Procedimento experimental:

Para estudar as variações de durezas e texturas fez-se corpos de provas soldados nos três níveis de energia (tabela 5.2), nas duas polaridades e sobre eles realizou-se as micrográfias da solda e zona afetada pelo calor (Z.A.C.).

Para melhor caracterização de condições comparáveis, adotou-se como critério a medição da dureza ao longo de uma linha reta, paralela a superfície das chapas, e 0,5mm acima do

ponto de maior penetração. Conforme se observa na figuras 5.1 e 5.2, a dureza varia desde a dureza do material de base ( $\sim 125$  Hv) até um máximo, quando a linha de referência passa através da solda.

Convém esclarecer que em todos os corpos de prova, e também nas figuras 5.1 e 5.2 e tabela 5.5, cada ponto do diagrama de distribuição de durezas é realmente a média de, no mínimo, sete (7) medidas:

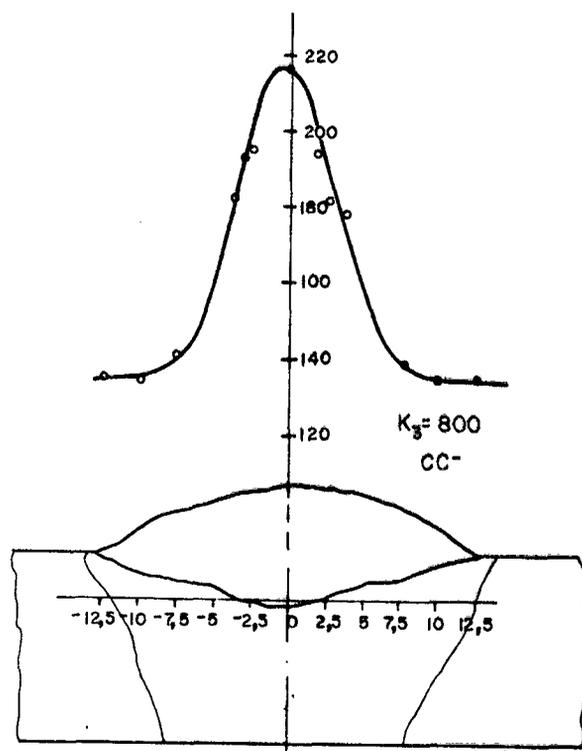


Fig. 5.1: distribuição de durezas e geometria da solda, obtida, nas condições de soldagem da tabela 2.1, com  $k_3 = 800$  e em polaridade direta.

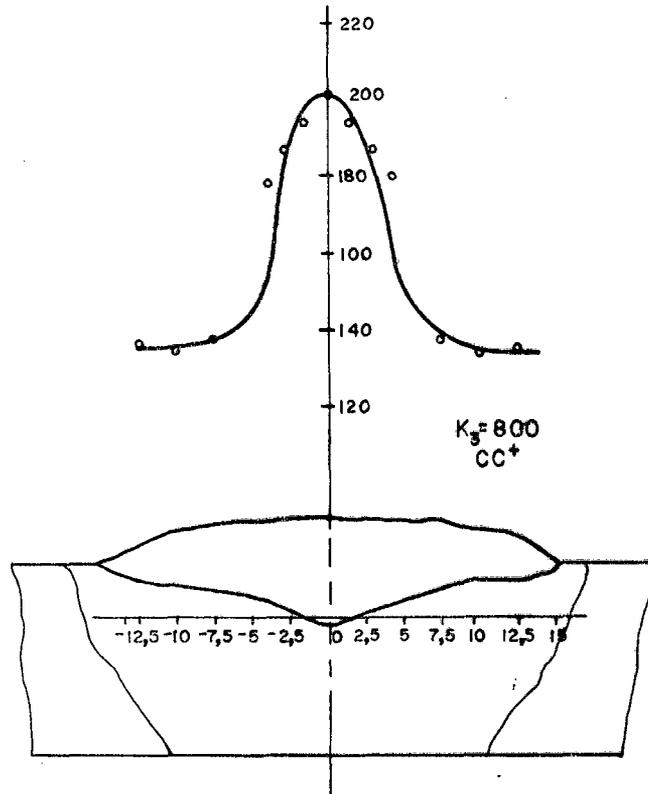


Fig. 5.2: distribuição de dureza e geometria da solda, obtida, nas condições de soldagem da tabela 2.1, com  $k_3 = 800$  em polaridade inversa.

POLARIDADE	NÍVEL ENERÉTICO-K	Hv (Máx)
CC <sup>-</sup>	$K_1 = 400$	221
	$K_2 = 600$	217
	$K_3 = 800$	215
CC <sup>+</sup>	$K_1 = 400$	210
	$K_2 = 600$	204
	$K_3 = 800$	201

Tabela 5.5: durezas máximas (Hv), medidas na solda em função do nível de energia e polaridade.

Solda :  $K_1 = 400$ Z.A.C :  $K_1 = 400$ Solda :  $K_2 = 600$ Z.A.C :  $K_2 = 600$ Solda :  $K_3 = 800$ Z.A.C :  $K_3 = 800$ 

Figura 5.3 : micrografias mostrando as microestruturas da solda, composta de uma textura acicular de ferrita mais perlita, e Z.A.C, composta de uma textura de Widmastätten. Aumento 100 x . Polaridade inversa.

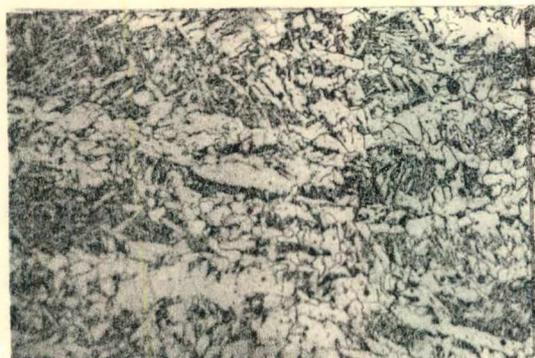
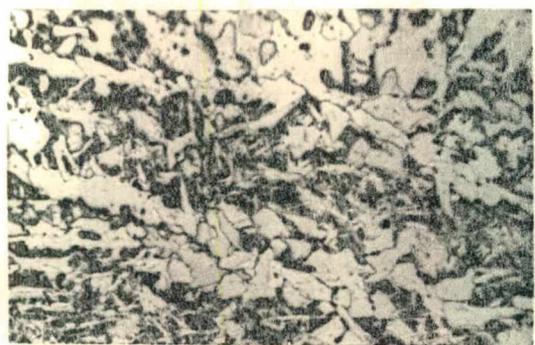
Solda :  $K_1 = 400$ Z.A.C :  $K_1 = 400$ Solda :  $K_2 = 600$ Z.A.C :  $K_2 = 600$ Solda :  $K_3 = 800$ Z.A.C :  $K_3 = 800$ 

Figura:5.4: micrografias mostrando as microestruturas da solda, composta de uma textura acicular de ferrita mais perlita, e Z.A.C, composta de uma textura de Widmastâttten. Aumento 100 x . Polaridade direta.

## 5.2) Análise dos resultados

A tabela 5.5, mostra uma leve diminuição dos valores de dureza na solda com o aumento do nível de energia, nas duas polaridades, sendo que, a polaridade direta mostra valores de dureza, no mesmo nível de energia, um pouco superiores à polaridade inversa. Esta pequena variação pode ser explicada pela variação que ocorre no tamanho médio de grão em função do nível de energia. Como pode ser observado nas micrografias da solda e Z.A.C, nas figuras 5.3 e 5.4, o tamanho de grão aumenta com o aumento do nível de energia, e em qualquer dos três níveis de energia, o tamanho do grão é maior na polaridade inversa. Dos fatos expostos, pode-se concluir que, mantidas as demais condições de soldagem constantes, há uma tendência do aumento da dureza com a diminuição do tamanho de grão da solda.

Por outro lado, observa-se, nas micrografias das figuras 5.3 e 5.4, que na zona afetada pelo calor (Z.A.C) há formação de estruturas aciculares, do tipo Widmastätten, sendo que, por afetarem negativamente as propriedades mecânicas do metal soldado, são indesejáveis. Observa-se também que estas estruturas são bem mais definidas quanto maior for o nível de energia, nas duas polaridades, tornando o material mais suscetível a trincas.

6) CONSUMO DE ELÉTRODO, PRODUÇÃO DE MATERIAL DE ADIÇÃO E CONSUMO DE FLUXO EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE ENERGIA:

Como já foi exposto no capítulo II, a corrente e a polaridade influem diretamente no consumo do eletrodo, enquanto a velocidade não o altera. Isto é reafirmado neste estudo, como pode ser observado na tabela 5.6, em que ocorre variações tanto no consumo de eletrodo como na produção de material de adição somente quando se processa uma variação de corrente no nível de energia, ou seja, de  $K_1$  para  $K_2$  (400 → 300 amperes) e de  $K_2$  para  $K_3$  (300 → 400 amperes).

POLARIDADE	NÍVEL DE ENERGIA	$C_{EL}$ (Kg/h)	PRODUÇÃO	C fluxo (Kg/m)
CC <sup>-</sup>	$K_1 = 400$	7,5	6,86	3,09
	$K_2 = 600$	4,5	4,24	3,92
	$K_3 = 800$	7,5	6,94	4,14
CC <sup>+</sup>	$K_1 = 400$	5,5	5,0	3,17
	$K_2 = 600$	4,1	3,87	4,02
	$K_3 = 800$	5,5	5,2	4,25

Tabela 5.6: consumo de eletrodo, produção de material de adição e consumo de fluxo em função do nível de energia.

Os resultados, experimentais (tabela 5.6) de consumo de eletrodo e produção de material de adição, mostram que, nestas condições de soldagem, o rendimento de deposição do pro-

cesso é de aproximadamente 93%.

O consumo de fluxo (tabela 5.6) aumenta com o aumento do nível de energia, nas duas polaridades. E isto ocorre pelo fato de que, com o aumento do nível de energia aumenta a largura e o reforço da solda, e portanto, maiores áreas superficiais de metal fundido são obtidos, conseqüentemente, maiores serão a quantidade de fluxos que funde, e que, na polaridade inversa são obtidos os maiores consumos de fluxos devido a se obter maiores áreas superficiais nesta polaridade.

#### 7) ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS:

Os principais resultados encontram-se integrados na figura 5.5. Nesta, tem-se seis eixos coordenados formando ângulos de 60° entre si. Em cada eixo apresentou-se uma das variáveis estudadas em escala conveniente. Cada solda pode então ser representada por um polígono de seis lados, definido pelos pontos que indicam os valores do consumo de eletrodo e da produção de material de adição na execução desta solda, da área penetrada e da área adicionada da solda, da penetração e da dureza alcançada. Quando o polígono se alonga para baixo, significa que a solda tem boas características para passes de enchimento; quando se alonga para cima, significa boas características para passes em que se requer penetração; quando se alonga para a direita, significa que a solda tem maior dureza.

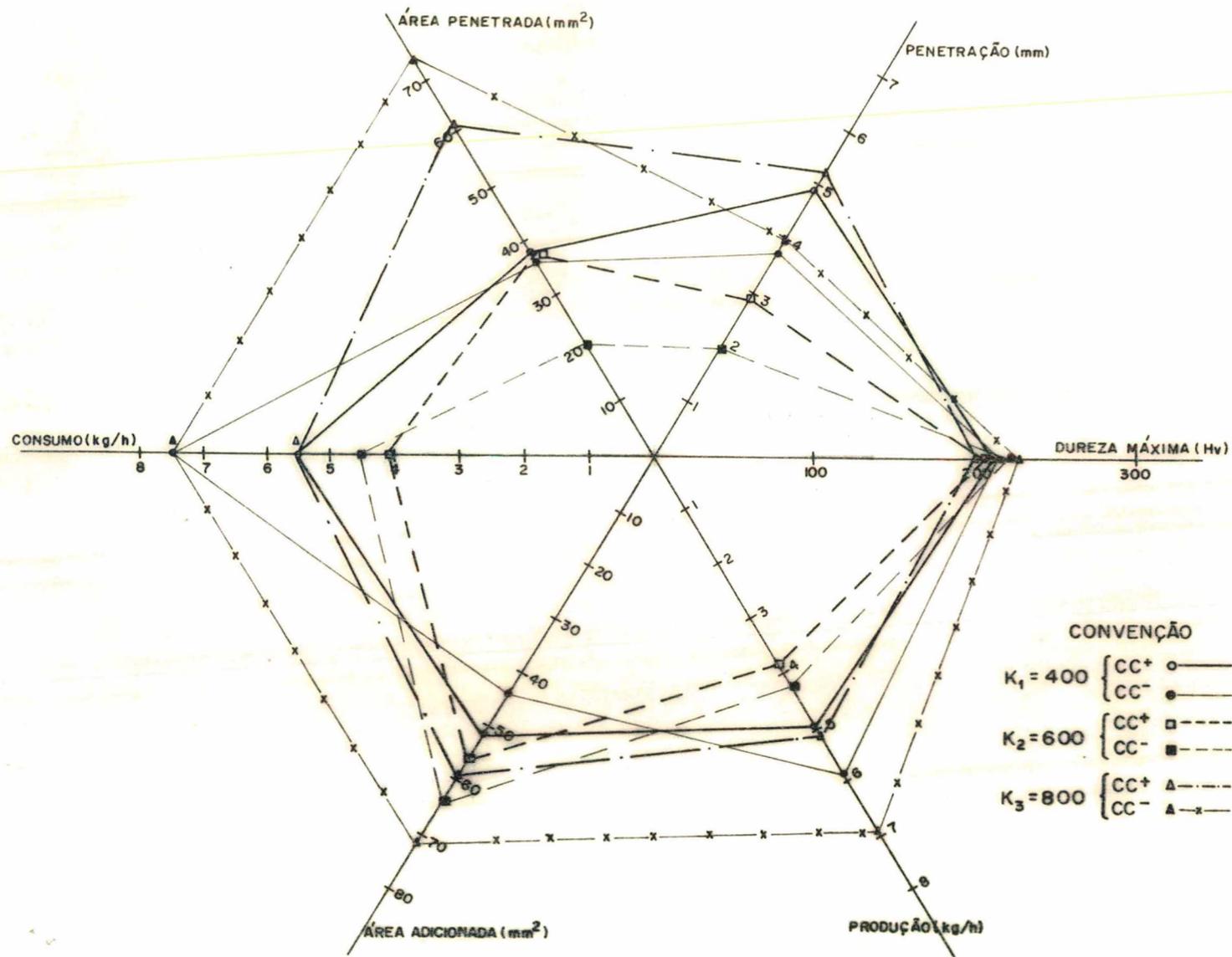


Fig. 5.5: polígono de resultados nas duas polaridades e nos três níveis de energia.

Examinando-se a figura 5.5, verifica-se que é vantajoso utilizar:

- 7.1) Passes de enchimento: polaridade direta ( $CC^-$ ) nos maiores níveis de energia.
- 7.2) Passes de penetração: polaridade inversa ( $CC^+$ ), nos maiores níveis de energia.
- 7.3) Para alcançar maior dureza: há uma tendência de se alcançar maior dureza com ( $CC^-$ ) e nos menores níveis de energia.

#### 8) CONCLUSÕES:

- 8.1) Os resultados mostram que há uma tendência de variação da composição química com a taxa de diluição, mantidas as demais condições de soldagem constante.
- 8.2) O estudo experimental de dureza, mostrou que há uma tendência, mantidas as demais condições de soldagem constantes, de aumento da dureza com a diminuição do tamanho de grão, e estes valores são um pouco superiores na polaridade direta ( $CC^-$ ).

- 8.3) O consumo de elétrodo é dependente da corrente e polaridade, sendo independente da velocidade de soldagem, mantidas as demais condições de soldagem constantes.
- 8.4) Dos resultados obtidos, experimentalmente, de consumo de elétrodo e produção de material de adição o rendimento do processo é de aproximadamente 93%.
- 8.5) O consumo de fluxo aumenta com o nível de energia, isto porque, com maiores níveis de energia, maior é a área superficial do metal fundido e conseqüentemente, maior é a quantidade de fluxo fundido no processo.
- 8.6) Quando se requer passes de penetração é vantajoso usar polaridade inversa associada a um nível alto de energia.
- 8.7) Quando se requer passes de enchimento é vantajoso usar polaridade direta associada a um alto nível de energia.

#### BIBLIOGRAFIAS

- 5.1) "Electric Slag Welding", Edited by B.Paton, president of the UKEAINIAN ACADEMY OF SCIENCES.
- 5.2) Quites, Almir M. e Dutra Jais C, "TECNOLOGIA DA SOLDAGEM A ARCO VOLTAICO".

## CAPÍTULO VI

TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO DE AÇOS COMUNS AO CARBONO DURANTE O  
PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO1) INTRODUÇÃO:

Embora as trincas de solidificação não sejam normalmente consideradas como um sério problema quando se soldam aços comuns ao carbono, os aperfeiçoamentos no processo de soldagem a arco submerso, que permitem usar alta produção de material de adição e grandes velocidades de soldagem, levam a soldagem a condições onde as trincas tornam-se mais prováveis.

O propósito desse estudo é, através do teste TEKEM, medir e avaliar as trincas de solidificação em soldas realizadas pelo processo de soldagem a arco submerso em aços SAE 1020 e 1030.

2) IDENTIFICAÇÃO DAS TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO:

Quando os problemas de trinca ocorrem, é importante saber identificar o tipo de trinca, de maneira que a causa possa ser encontrada e um remédio de ação eficiente possa ser determinado.

Trincas abertas na linha central do cordão de sol

da são normalmente do tipo "solidificação" e trincas transversais, perpendiculares ao eixo da solda, do tipo "hidrogênio". Para a confirmação dessas e para a identificação de trincas de diferentes orientações é necessário um exame microscópico.

Na seção transversal, trincas de solidificação são normalmente largas, como mostrado nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3, devido a considerável contração sofrida pela solda após a solidificação ter sido completada. Se a trinca é somente parcialmente desenvolvida, como mostra a figura 6.4, será muito fina. Tais trincas devem ser abertas e a superfície examinada para a sua identificação (microscópio eletrônico). Em todos os casos, trincas de solidificação são interdênticas e normalmente intergranulares com respeito aos grãos solidificados.

Usando essas notas na identificação, será razoavelmente fácil distinguir trincas de solidificação das trincas de hidrogênio. Trincas de segregação são distinguidas por sua localização nos grãos grosseiros da zona afetada pelo calor.

### 3) MECANISMO E NATUREZA DA TRINCA DE SOLIDIFICAÇÃO:

A trinca de solidificação é uma forma de trinca à quente que ocorre durante os estágios posteriores a solidificação se o metal for incapaz de acomodar as contrações de solidificação e sólida. Durante a solidificação, cristais colunares crescem dentro da solda a partir dos grãos grosseiros da zona afetada pelo calor. A contração de solidificação, frequentemente empedida pela rigidez da estrutura a soldar, tende a abrir fendas contendo lí

quido de baixo ponto de fusão entre esses cristais. Essas fontes pontenciais em trincas são normalmente enchidas por líquido proveniente da poça de solda que se move contra a direção de crescimento do cristal. Forma-se-á uma trinca se uma quantidade suficiente de líquido não escoar internamente para compensar a contração, sendo que, filmes de líquido em processo de solidificação não suportam apreciáveis deformações de contração. O escoamento insuficiente de líquido resulta de soldas que tem uma grande velocidade de resfriamento ou de solidificação que origina longos cristais colunares. Cristais longos são prováveis em soldagem a arco submerso.

Embora, as trincas sejam normalmente abertas na linha central do cordão, facilmente visível a olho, tais trincas podem ser subsuperficiais (figura 6.1) e podem existir em outras formas que são mais dificilmente visíveis. Essas incluem trincas tipo angular, cuja origem é o ângulo de "afunilamento" da solda (figura 6.2); esta região atua como um "ponto quente" e é também um lugar favorável a trincas de segregação, na zona afetada pelo calor.

A figura 6.2 também mostra pequenas trincas intergranulares e interdêntricas na solda. Trincas podem também originar-se de bandas segregadas (trincas 6.3), e aí o ângulo da trinca dependerá em onde a banda segregada encontrará o limite de fusão. Bandas enriquecidas de C, P e S são também prováveis lugares de trincas de segregação e na figura 6.3 pode ser observada uma trinca de solidificação originada de uma trinca de "segregação", na zona afetada pelo calor.

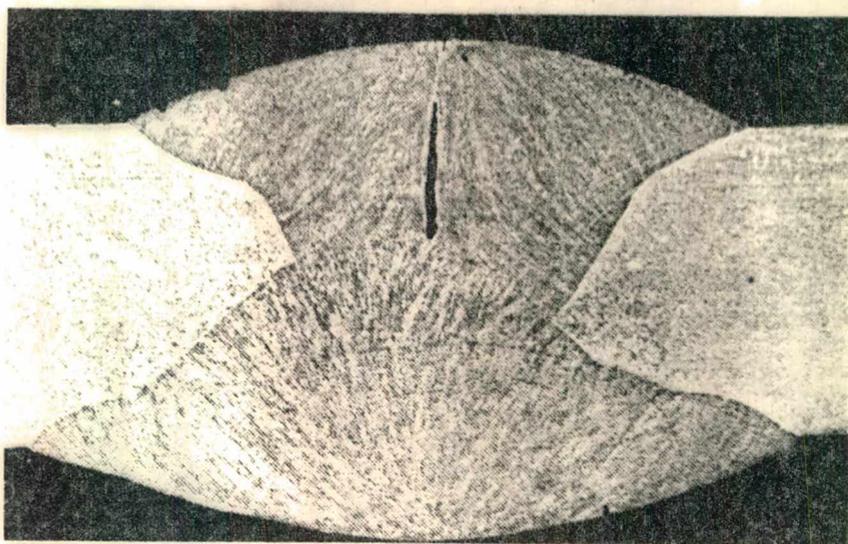


Fig. 6.1: Trinca de solidificação subsuperficial no primeiro passe por soldagem a arco submerso de uma solda de um aço de 11mm de espessura, atacado por  $\text{FeCl}_3$ , para revelar a estrutura solidificada.

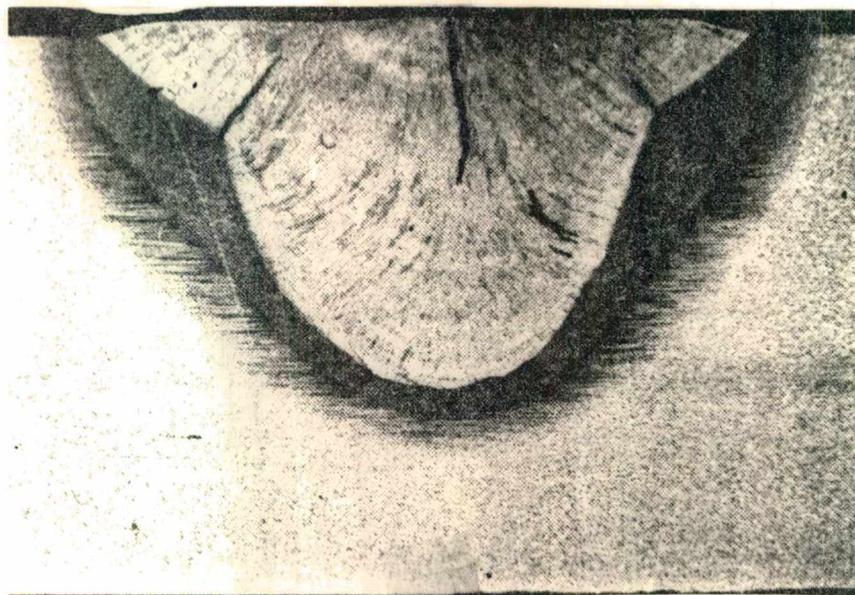


Fig. 6.2: Seção transversal de uma solda em aço C-Mn com alto teores de C, P e S de espessura igual a 15mm e que mostra trincas na linha central, trincas de flare ângulo e trincas interdêntricas subsuperficiais.

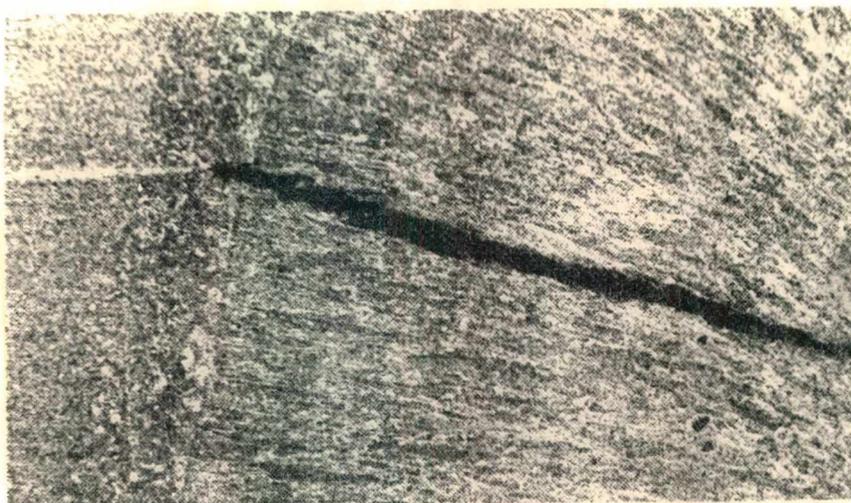


Fig. 6.3: trinca de solidificação de um aço C-Mn-Nb originada de uma trinca de segregação na banca enriquecida em S,P e Mn.

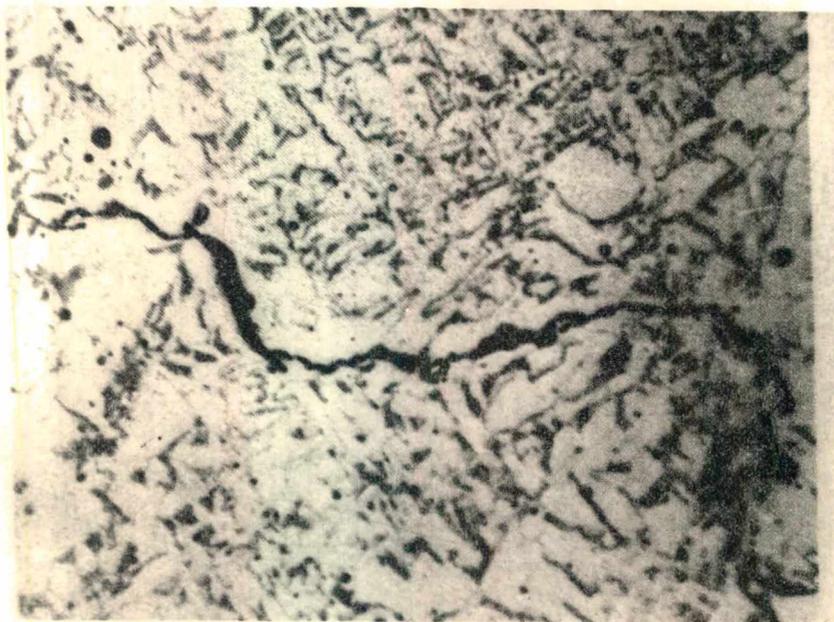


Fig. 6.4: parte de uma fina trinca de solidificação intermitente.

4) TESTE TEEKEN EM SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO:

Este tipo de ensaio, destina-se a revelar a sensibilidade a trinca do metal de base soldado. O teste, como mostra a figura 6.5, é composto de duas chapas de 200 x 75 x 12,7mm que são usinadas em uma lateral resultando, quando unidas, uma junta em X nas extremidades e uma junta em Y central, com 80mm de comprimento, limitada por dois entalhes, onde é aplicada a solda a ser testada.

O procedimento experimental, neste estudo, consistiu em determinar-se a susceptibilidade a trinca em função do nível de energia ( $I.V$ ), tabela 6.1, de soldas realizadas nas condições de soldagem da tabela 2.1 com exceção do  $t = 37\text{mm}$ , que neste caso é  $t = 25\text{mm}$ , e em dois aços comuns ao carbono (SAE 1020 e 1030).

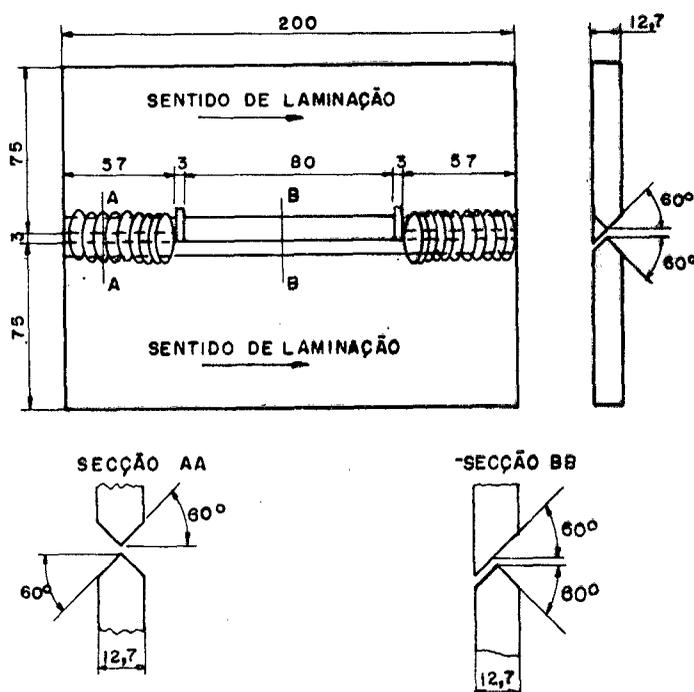


Fig. 6.5: elementos que compõe o teste Teeken.

A detecção da presença e quantidade de trincas no corpo de prova testado foi feita por meio de líquidos penetrantes e, devido a possibilidade de existir trincas subsuperficiais, foi feita uma análise microscópica em várias seções transversais de cada corpo de prova testado.

I (amperes)	V (volts)	Vs (cm/min)	K ( $\frac{I \cdot V}{V_s}$ )
550	40	30	1000
450	40	20	900
400	40	20	800
350	40	20	700
300	40	20	600
300	40	24	500
300	40	30	400
300	40	40	300
300	40	60	200
300	40	120	100
300	24	120	60

Tabela 6.1: níveis de energia ( $I \cdot V$ ) usados no teste.  
Vs

#### 6) CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE TEEKEN COM A SOLDAGEM EM CASOS NORMAIS:

Embora o teste TEEKEN pareça fornecer um valioso guia aos fatores reguladores da susceptibilidade a trinca, as condições são diferentes daquelas encontradas em soldagem normal. É portanto necessário obter uma correlação entre os resultados do teste TEEKEN e o desempenho de soldas práticas.

Os processos determinadores da quantidade de trin-

ca de solidificação durante o teste TEEKEN e em soldagem normal são intimamente relacionados. No teste TEEKEN, ocorre trincas em resposta a restrição imposta à junta onde a solda a ser testada é aplicada. Assim, o teste dará uma medida da facilidade com que trincas são iniciadas. Em soldas normais, feitas em condições simples de soldagem, mas usando materiais de diferentes susceptibilidade a trinca, as respostas seriam de não trinca, completamente isoladas e curtas trincas na linha central, múltiplas e extensas trincas na linha central e finalmente contínuas trincas na linha central ao longo de virtualmente toda a junta soldada. Em soldas normais, a iniciação da trinca é importante, mas a facilidade de propagação da trinca também o é. E a percentagem de trincas na linha central permite comparações da relativa susceptibilidade a trinca.

#### 7) SUCEPTIBILIDADE A TRINCA DO AÇO SAE 1020:

A susceptibilidade a trinca deste aço foi feita nas condições de soldagem dadas pela tabela 2.1, ou seja, manteve-se constante a polaridade, distância da tomada de corrente ao metal de base  $t = 25\text{mm}$ , espessura do metal de base, diâmetro e tipo de eletrodo e o tipo de fluxo. O estudo foi feito em onze níveis de energia distintos, que são expostos na tabela 6.1 e o procedimento de análise e quantificação das trincas, para cada teste em um nível de energia, foi por meio de líquidos penetrantes. Devido a possibilidade de existir trincas subsuperficiais efetuou-se uma análise microscópica em três seções transversais da solda testada.

Os resultados dos testes mostraram que, em qualquer dos níveis de energia estudados, não ocorreram trincas nas juntas soldadas. Portanto, sendo o teste TEEKEN um teste com um fator muito alto de restrição, conclue-se, que este aço (SAE 1020) possui uma susceptibilidade a trinca muito baixa.

#### 8) SUCEPTIBILIDADE A TRINCA DO AÇO SAE 1030:

O estudo da susceptibilidade a trinca neste aço, foi feito nas mesmas condições de soldagem usadas para o aço 1020 e nos mesmos níveis de energia. Os resultados dos testes também mostraram que, em qualquer um dos níveis de energia empregados, não ocorreram trincas nas juntas soldadas. Logo, sendo o teste TEEKEN um teste com um fator muito alto de restrição, este aço possui também uma susceptibilidade a trinca muito baixo.

#### 9) CONCLUSÕES:

Deste estudo de susceptibilidade a trinca, pelo teste TEEKEN, nos dois aços, em função do nível de energia imposto, nas condições de soldagem expostas na tabela 2.1 com exceção do t, que neste caso foi igual a 25mm, tendo-se em vista que este teste tem um alto fator de restrição, conclui-se que os aços comerciais, laminados, com teor de carbono até 0,30% são pouco susceptíveis a trinca.

## CAPÍTULO VII

CONCLUSÃO GERAL

Este estudo mostrou como os parâmetros de soldagem afetam as características operacionais do processo de soldagem a arco submerso e propôs, critérios bem definidos para selecionar as características operacionais que satisfizessem as condições e econômicas.

Recomenda-se:

a) ampliar este estudo sentido de relacionar as características operacionais e econômicas com as tecnológicas;

b) ampliar este estudo para outros diâmetros de eletrodos, outras combinações eletrodo-fluxo, outros tipos de corrente, outras espessuras e composições do material de base.

## B I B L I O G R A F I A S

1. Quites, Almir M. e Dutra, Jair C. - Tecnologia da Soldagem a arco voltaico.
2. Metals Handbook - ASM - Vol. 6 - Welding and Brazing
3. Welding Handbook - AWS - Vol. 2 - Welding Processes - ARC and gas Welding and Cutting, Brazing, and Aoldering.
4. Mantel, W.: "The Fhysic of the Welding Ar". Achucissem and Schneider, B, (1956), pgs 280-287.
5. Pokhodnyo, I.K.: "Fusion of Eletrod Met. and its Interation With the Slag Ducing Sub Arc. Welding". Art. Sudekam 1965, n° 10, pgs 16-22.
6. Lesnewick, A: Control of Melting Rate and Metal Transf. in gas Shielded metal arc welding, Weld Iourn. 37 (8), Res. Suppl. pg 418-s/ 425 s.
7. Rosental, D: "Transn. Am. Soc. Mech. Eng., 68, pgs. 849-850 .
8. Timerman, R: Inf. dos parâmetros no proces. de sold. a arco Sub., pg. 9. 1977.
9. Renwick, G.B. et al: "Operating characteristics of the sub. Arc. Proc.", Weld Journ 55 (3), março 1976, Res. Suppl., pgs. 70 - 5/76-5.
10. "Electric Slag Welding", Edited by B. Paton, president of the UKEAINIAN ACADEMY OF SCIENCES.

ANEXOS IDETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CURVAS DE CONSUMO VERSUS CORRENTE

O consumo de elétrodo em função da corrente foi de terminada experimentalmente, nas condições de soldagem da tabela 2.1 (capítulo II), em quatro níveis de tensão ( $V = 30, 35, 40$  e  $45$  volts), em quatro distâncias da tomada de corrente ao metal de base ( $t = 32, 52, 72$  e  $82\text{mm}$ ) e nas duas polaridades, ou seja, polaridade direta ( $CC^-$ ) e polaridade inversa ( $CC^+$ ).

As curvas das figuras 1, 2, 3 e 4 mostram o resultado destes estudos na polaridade direta ( $CC^-$ ) e as curvas das figuras 5, 6, 7 e 8 são referentes ao estudo em polaridade inversa ( $CC^+$ ).

Utilizou-se na determinação experimental dessas curvas um aparelho de soldagem a arco submerso com a unidade de controle, do tipo controle da velocidade de fusão e uma fonte de energia, do tipo tensão constante. Neste tipo de aparelho, a tensão e a corrente são medidas e controladas na unidade de controle, por meio de um amperímetro e um voltímetro, respectivamente, sendo que, o ajuste da tensão é feito na fonte de energia e a corrente é ajustada na unidade de controle pelo aumento da velocidade de alimentação do arame elétrodo.

A figura 9 mostra, esquematicamente, o procedimento experimental na determinação das curvas de consumo ( $\text{Kg/h}$ ) versus corrente; estas curvas foram traçadas por meio de um plotter, tendo no eixo  $x$  o consumo de elétrodo e no  $y$  a corrente.

O sinal da corrente para o plotter foi extraído di

retamente do ampímetro, sendo que, a escala para a corrente foi determinado da seguinte forma:

- A medida da corrente se realiza através de uma medida indireta, ou seja, medir-se a queda de tensão causada pela passagem de corrente através do "shunt" (resistência calibrada) . Com esse valor e através de uma regra de três, tem-se o valor da corrente, já que se sabe que no "shunt" para uma dada corrente, corresponde uma determinada queda de tensão. Assim, o "shunt", no qual uma corrente de 1500A corresponde uma tensão de 50mv.

Ex:                    1500A - 50mv

$$x - y = \text{valor medido}$$

$$x = \frac{1500y}{50} \quad x = 30y$$

Medindo-se 10mv, tem-se:  $x = 30 \times 10 \quad x = 300A$

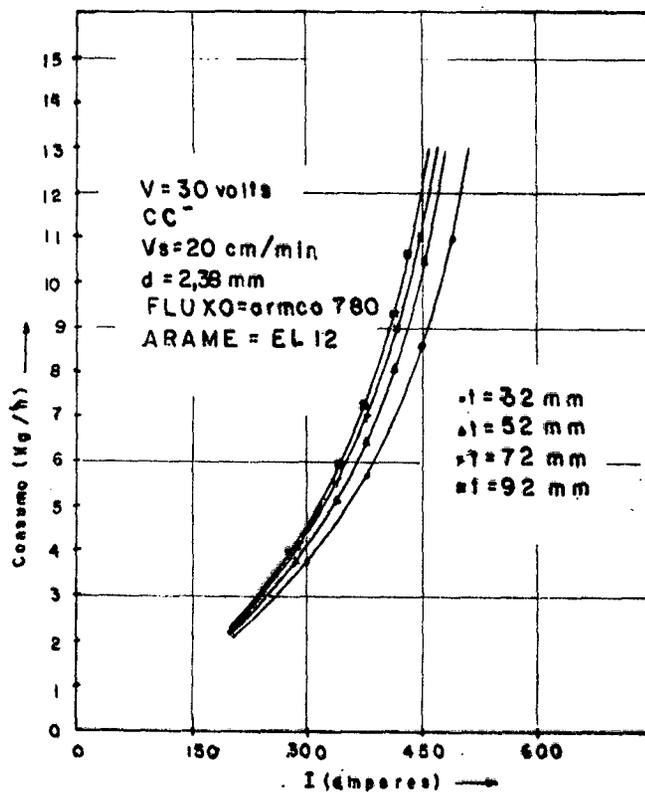


Fig. I.1: consumo x corrente em 30 volts e CC<sup>-</sup> para vários t.

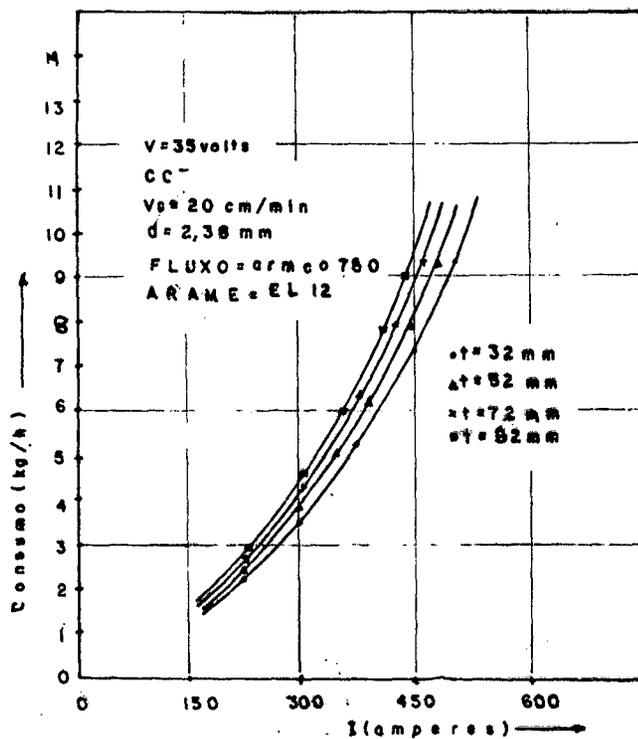


Fig. I.2: consumo x corrente em 35 volts e CC<sup>-</sup> para vários t.

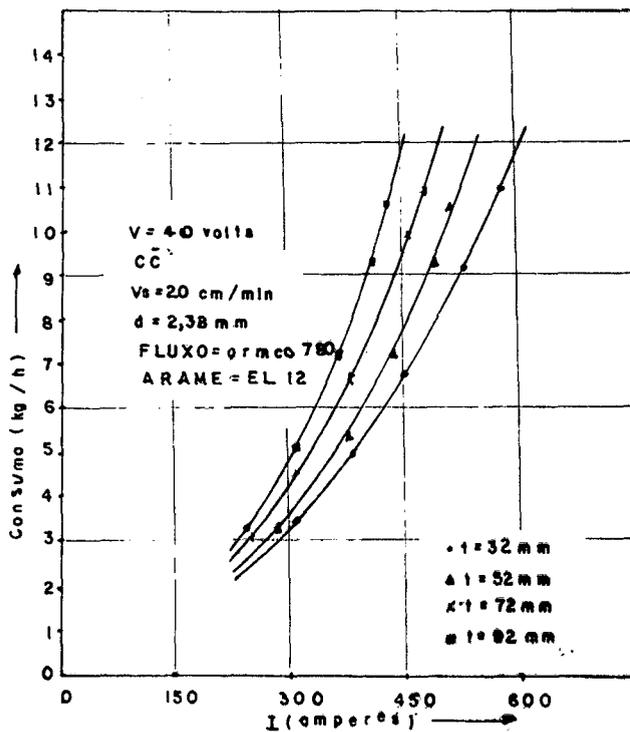


Fig. I.3: consumo x corrente em 40 volts e  $CC^-$  para vários t.

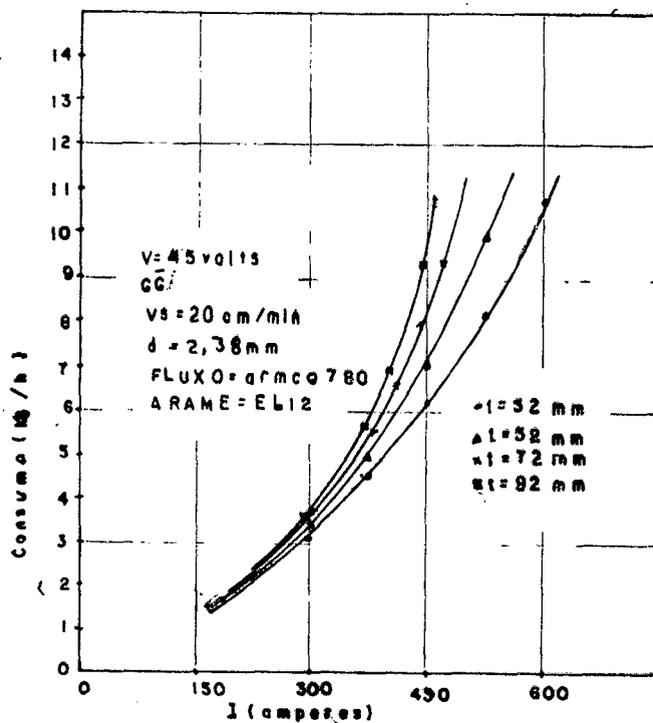


Fig. I.4: consumo x corrente em 45 volts e  $CC^-$  para vários t.

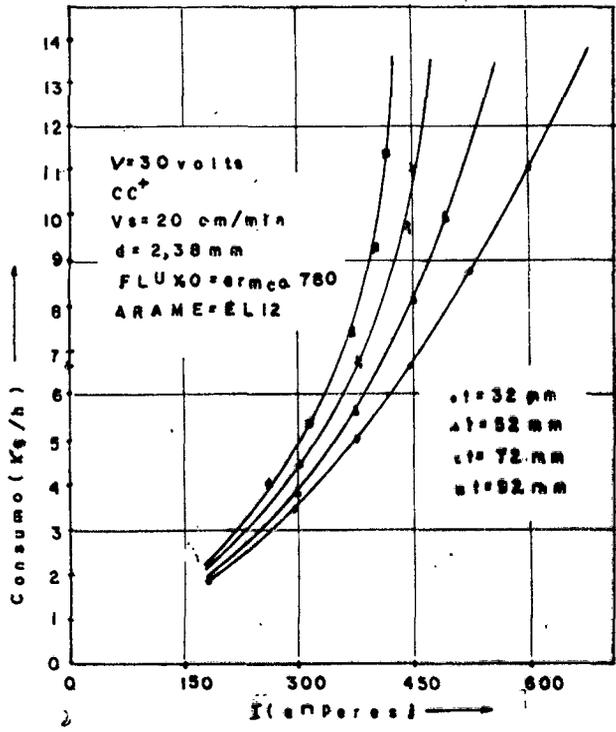


Fig. I.5: consumo x corrente em 30 volts e CC<sup>+</sup> para vários t.

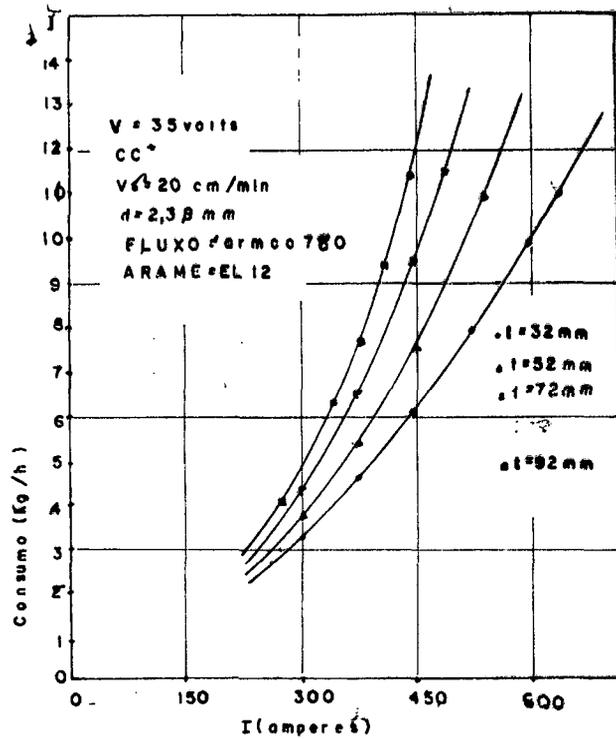


Fig. I.6: consumo x corrente em 35 volts e CC<sup>+</sup> para vários t.

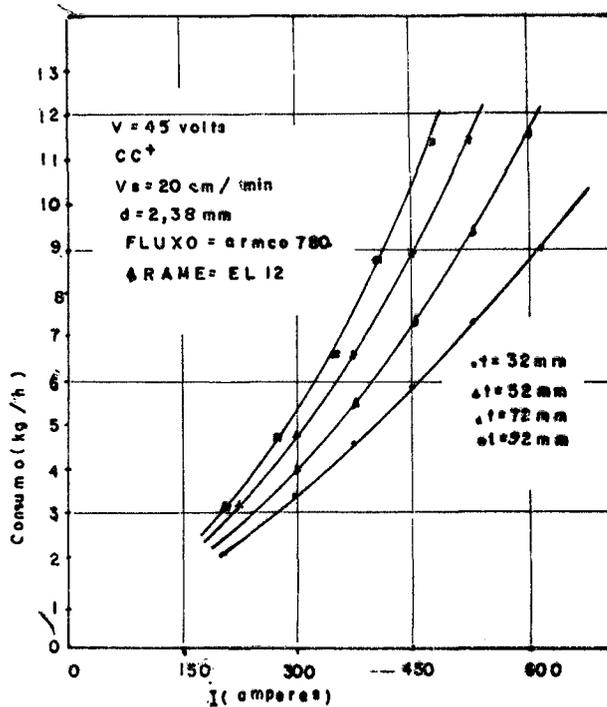


Fig. I.7: consumo x corrente em 40 volts e  $CC^+$  para vários t.

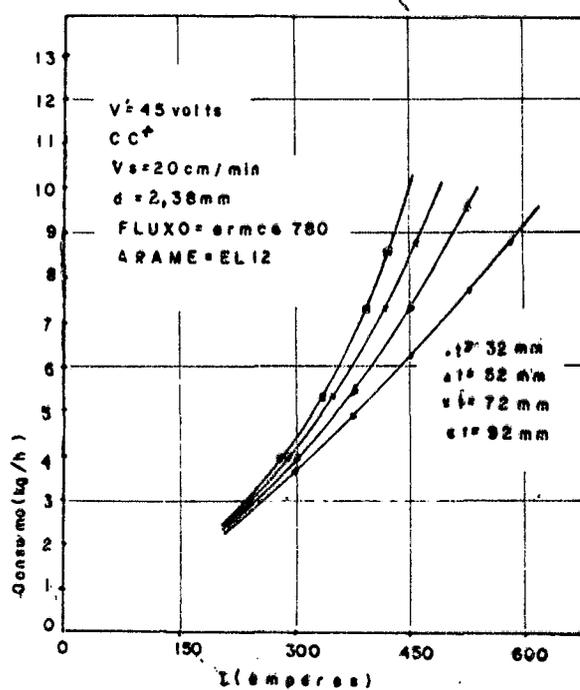


Fig. I.8: consumo x corrente em 45 volts e  $CC^+$  para vários t.

O consumo de eletrodo (Kg/h) registrado no eixo x do plotter, foi medido por um taco-dinamo fixo ao elemento fracionador de arame eletrodo (fig. 9), sendo que, a escala do consumo foi determinada da seguinte forma:

- fórmula do taco-dinamo (n):

$$(n) = \text{rpm} = 152,15v + 0,14 \rightarrow \text{rpm} = f(v)$$

v = tensão (volts)

n = n° de rotações

- fórmula da velocidade de alimentação (Va):

$$Va = \pi \cdot d \cdot n \cdot f(v) \rightarrow Va = f(v)$$

d = diâmetro do elemento fracionador do arame eletrodo (fig. 10) (cm)

Va = velocidade de alimentação (cm/min).

- fórmula do consumo (c):

$$c = 0,06 Va \rho$$

$$\rho = 35,26 \text{ gr/m}$$

$$\text{Como } Va = f(v) \rightarrow c = f(v)$$

- Cálculo:

$$Va = \frac{\pi \cdot 40 \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 40}{1000} (152,15v + 0,14)$$

$$|Va = 19,119731v + 0,0175929|$$

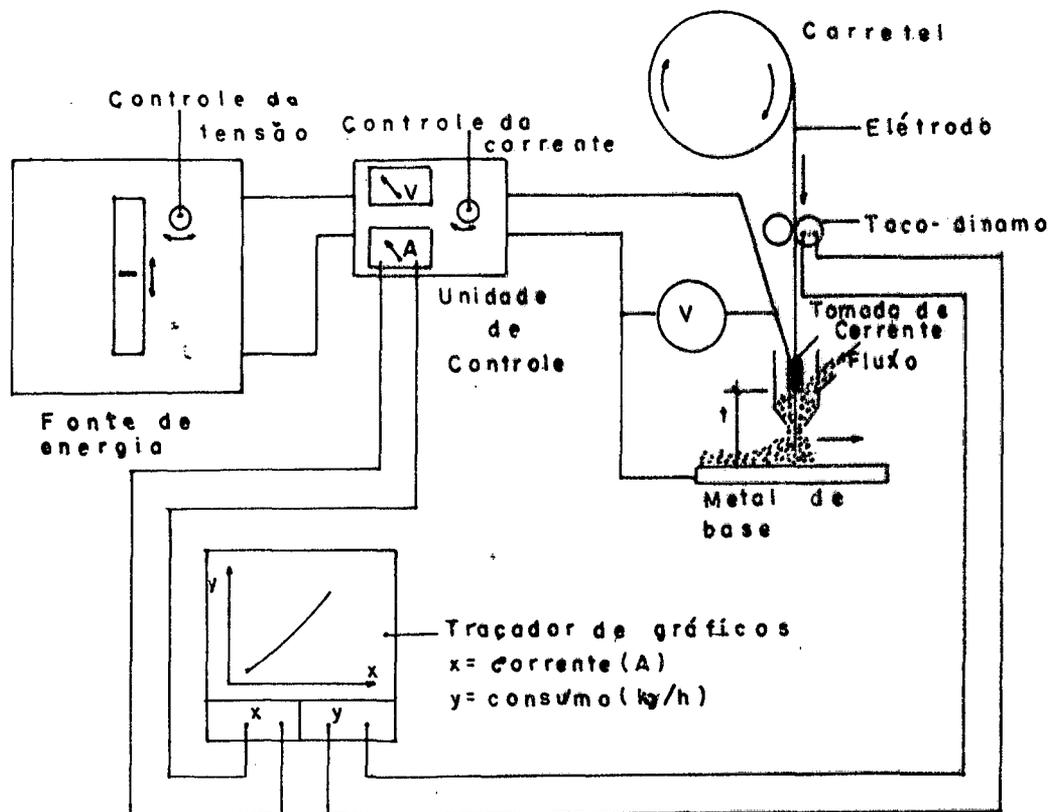


Fig. I. 9: esquema do procedimento experimental da obtenção das curvas de consumo x corrente.

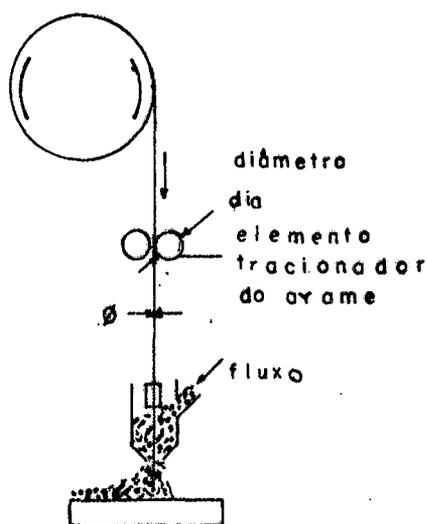


Fig. I. 10: esquema do sistema de alimentação do arame eléttrodo.

$$c = 0,06 \cdot V_{ap}$$

$$c = 0,06 (19,119731v + 0,0175929) + 35,26$$

$$|c = 40,4497v + 0,0372169|$$

C (Kg/h)	mv	mv/mv/cm = cm	DIFERENÇA NA ESCALA
1,0	23,8019	0,952076	0,988884
2,0	49,524	1,94096	0,988884
3,0	73,2461	2,929844	0,988880
4,0	97,9681	3,918724	0,988884
5,0	122,6902	4,907608	0,988880
6,0	147,4122	5,896488	0,988884
7,0	172,1343	6,885372	0,988883
8,0	196,8564	7,874255	0,988881
9,0	221,5784	8,863136	0,988884
10,0	246,3005	9,95202	

Tabela 1: dados resultantes da determinação da escala de consumo.

A tabela 1 foi calculada usando-se no plotter, 25mv/cm na escala de consumo, resultando em aproximadamente 1 centímetro para cada 1Kg/h de elétrodo depositado na solda.

## ANEXO II

DADOS EXPERIMENTAIS DO ESTUDO DA GEOMETRIA DA SOLDA EM FUNÇÃO DA CORRENTE

As curvas das figuras de II.1 à II.20 mostram o comportamento da geometria da solda (p,r,b) em função da corrente em cinco velocidades de soldagem, em duas distâncias da tomada de corrente ao metal de base e em duas tensões. Destas curvas, obtidas experimentalmente nas condições de soldagem da tabela 2.1 do capítulo II, obteve-se as curvas de isopenetração, isoreforço e isolargura, bem como as de iso-ke, iso-ki e iso-kx necessárias para a determinação, no capítulo IV, dos campos de utilização quanto a forma do cordão e passes de soldagem.

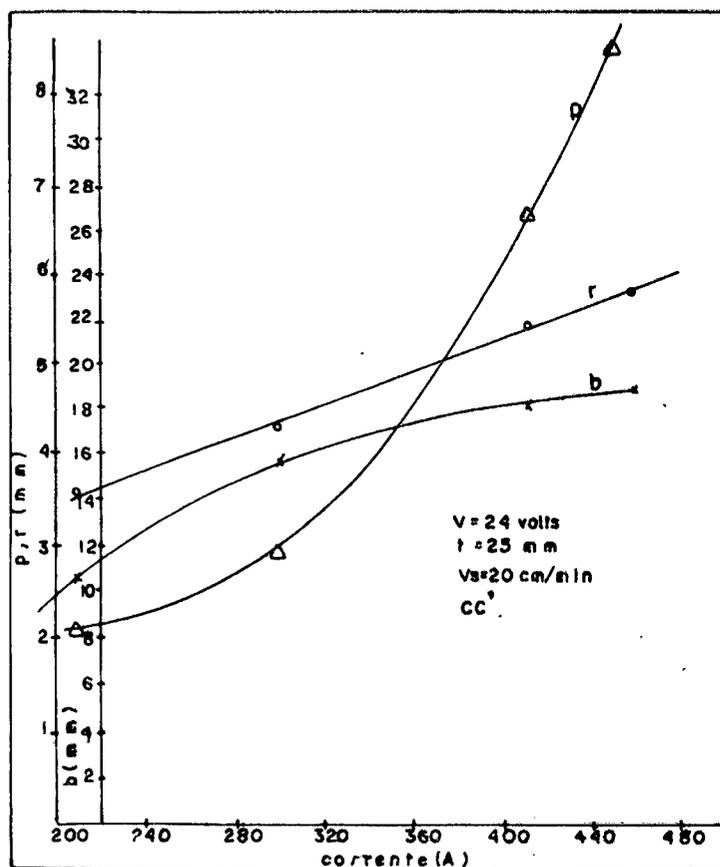


Fig. II.1: geometria da solda em função da corrente, em  $V = 20$  cm/min,  $t = 25$  mm e  $V = 24$  volts.

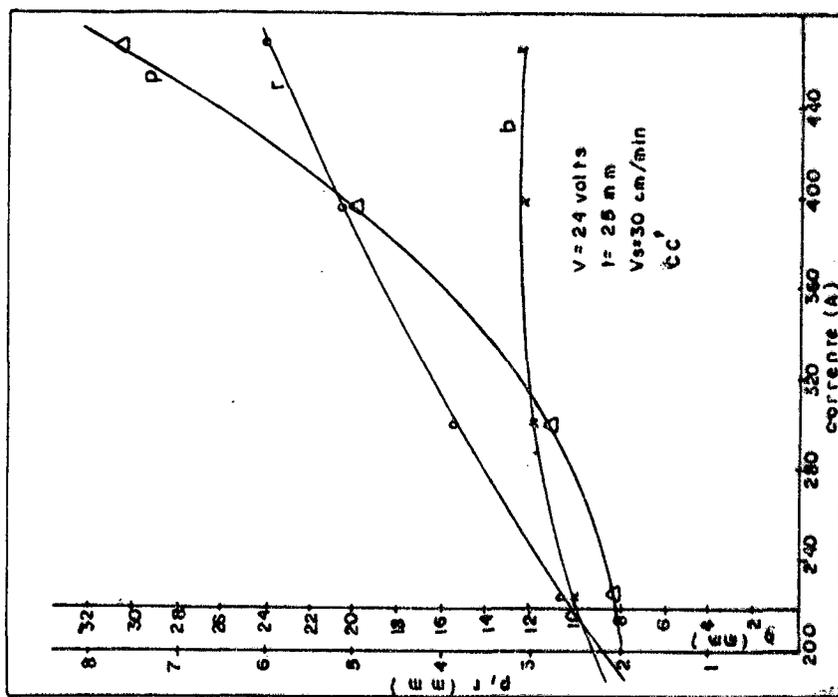


Fig. II. 2: geometria da solda em função da corrente, em  $V_s = 30 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 25 \text{ mm}$  e  $V = 24 \text{ volts.}$

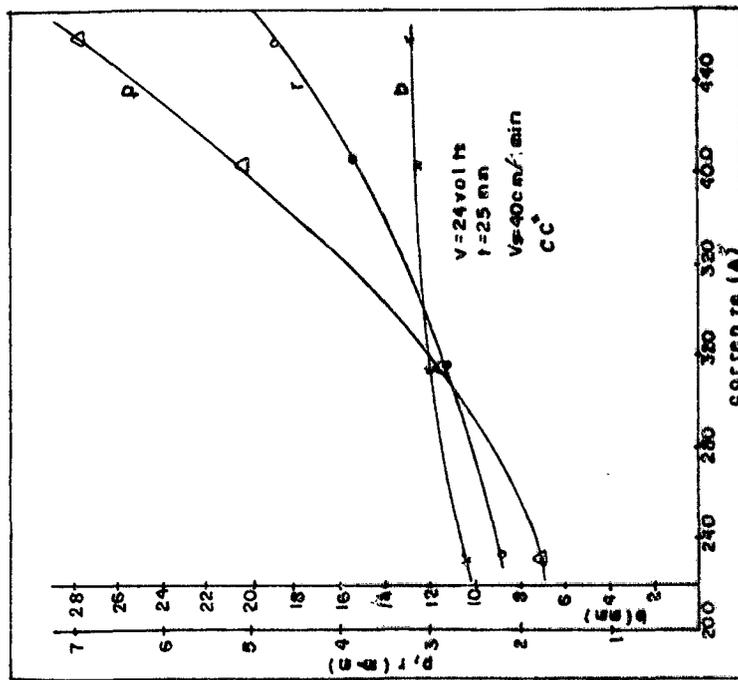


Fig. II. 3: geometria da solda em função da corrente, em  $V_s = 40 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 25 \text{ mm}$  e  $V = 24 \text{ volts.}$

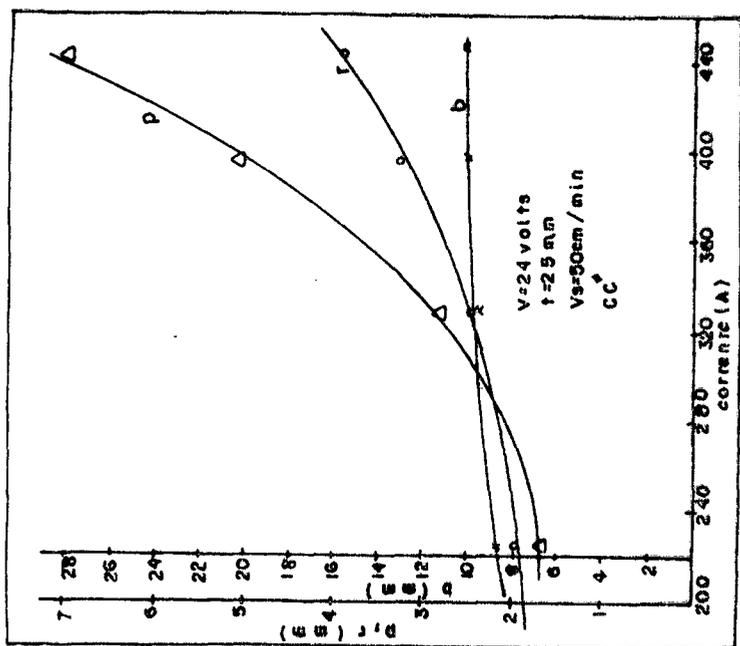


Fig.II.4: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 50$ cm/min.,  $t = 24$ mm e  $V = 24$  volts

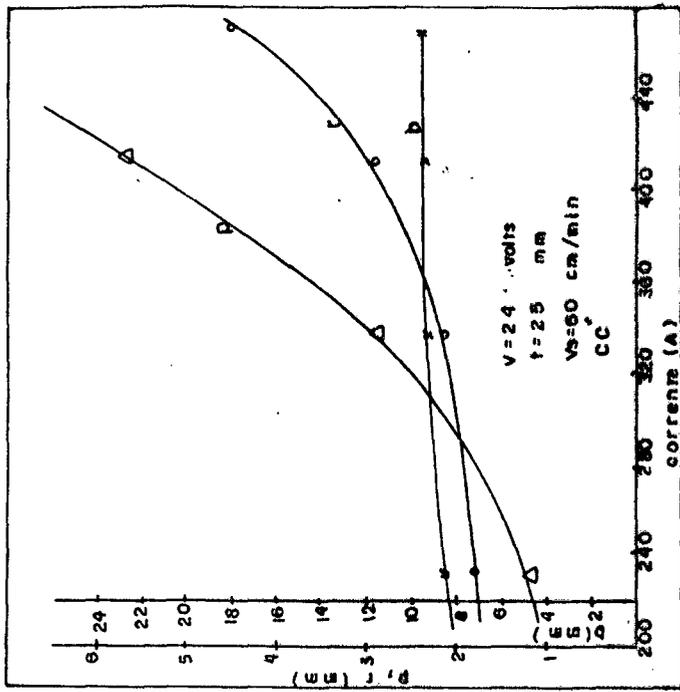


Fig.II.5: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 60$ cm/min.,  $t = 25$ mm e  $V = 24$  volts.

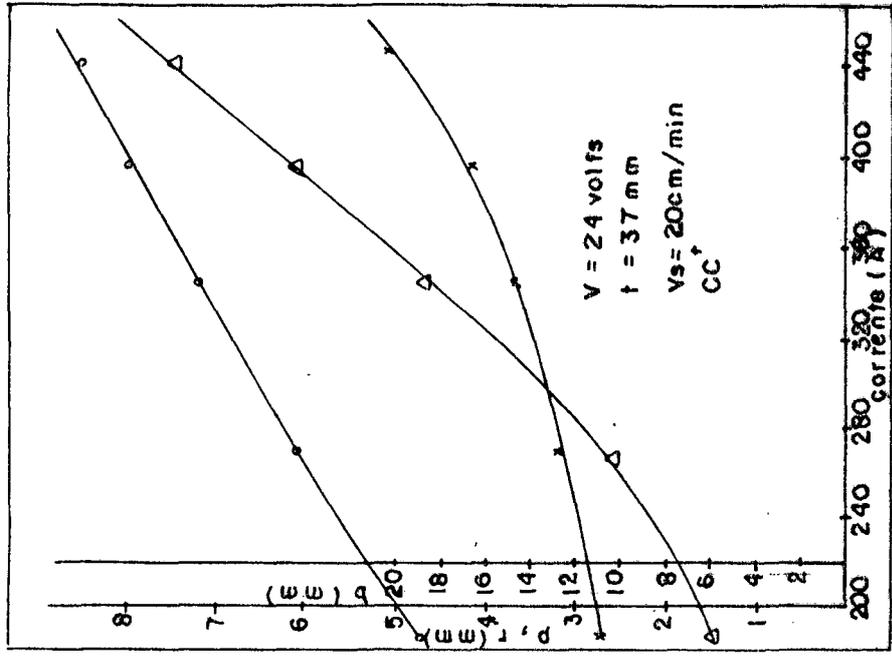


Fig. II.6: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 20$  cm/min.,  $t = 37$  mm e  $V = 24$  volts.

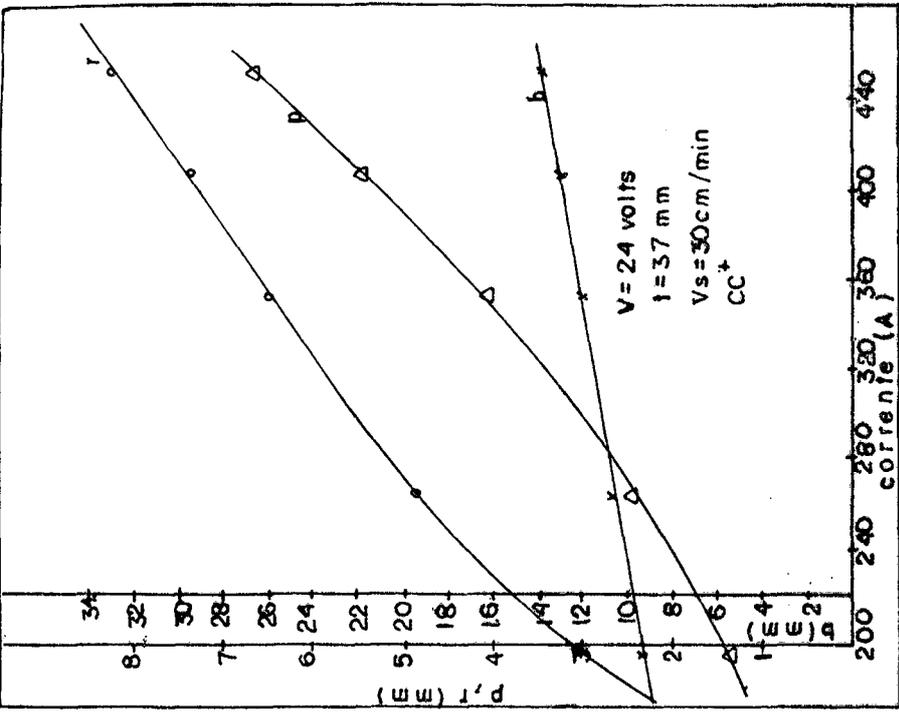


Fig. II.7: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 30$  cm/min.,  $t = 37$  mm e  $V = 24$  volts.

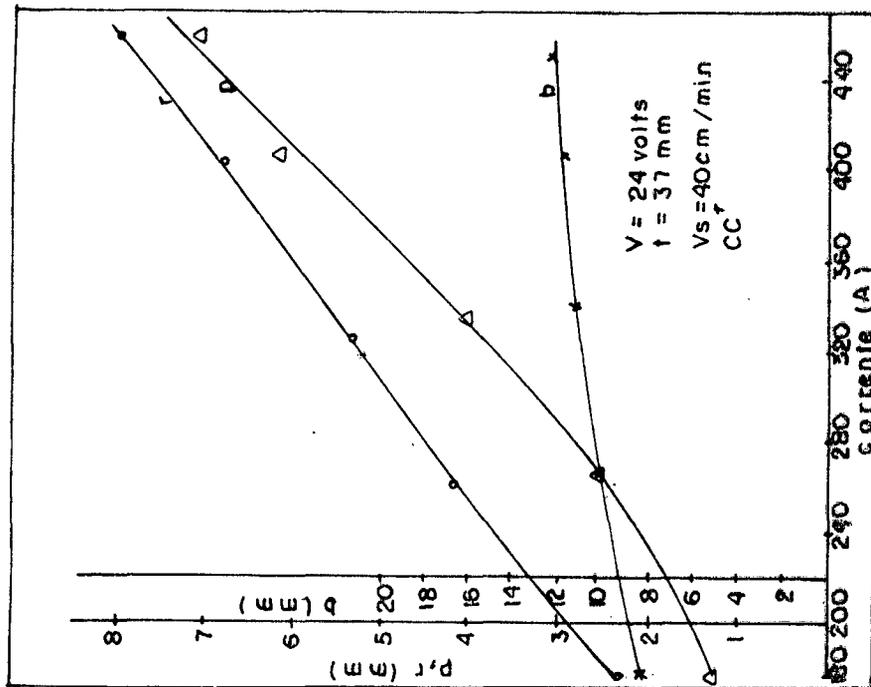


Fig.II.8: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 40$ cm/min.,  $t = 37$ mm e  $V = 24$  volts.

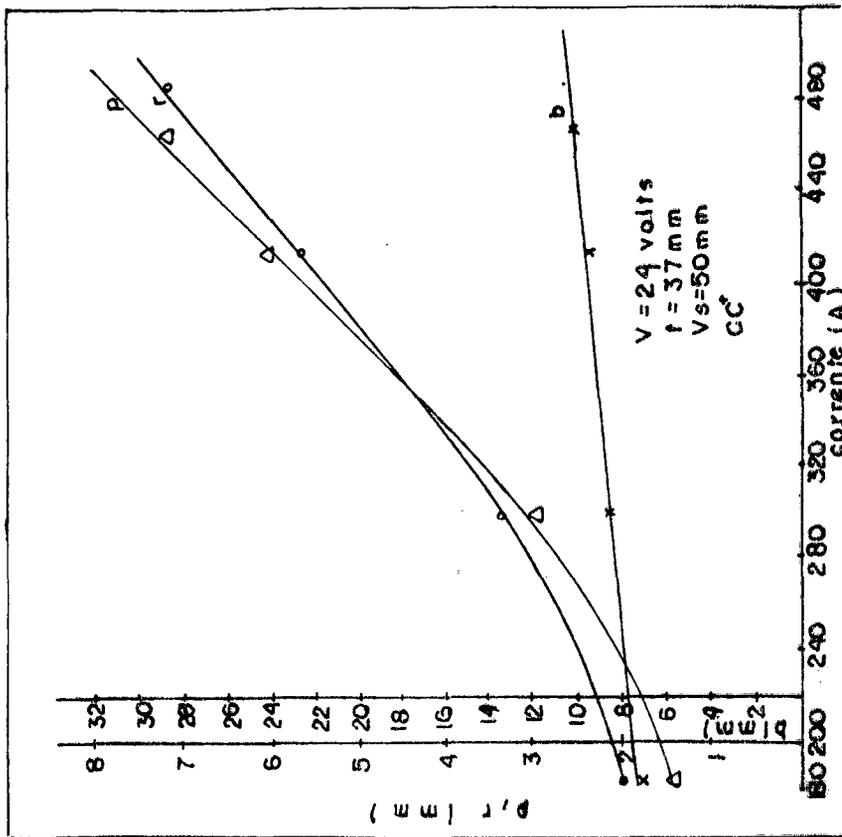


Fig.II.9: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 50$ cm/min.,  $t = 37$ mm e  $V = 24$  volts.

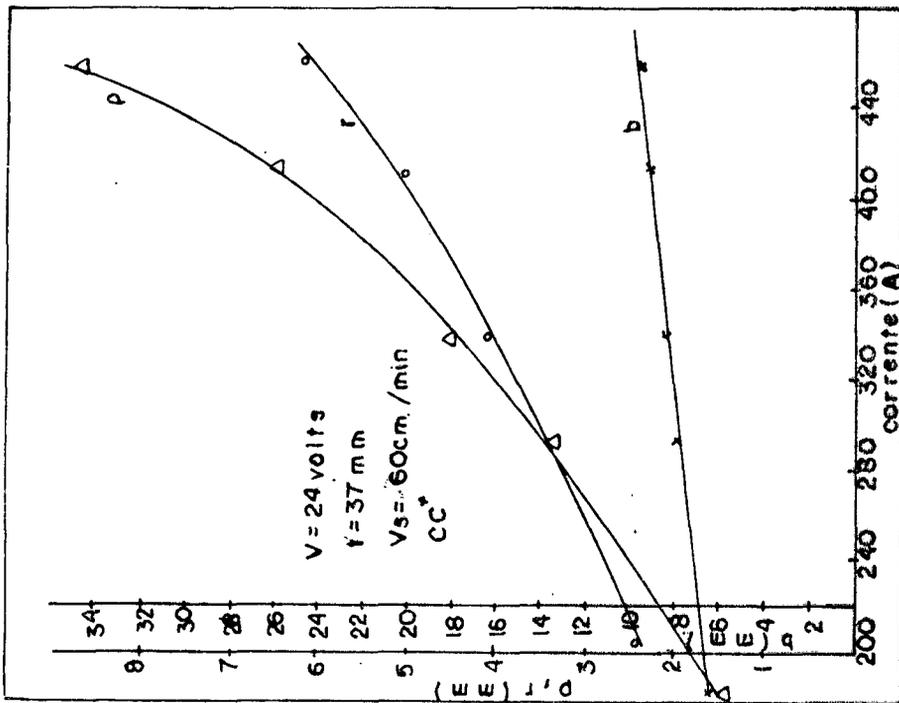


Fig.II.10: geometria da solda em função da corrente, em  $V_s = 60 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 37 \text{ mm}$  e  $V = 24 \text{ volts.}$

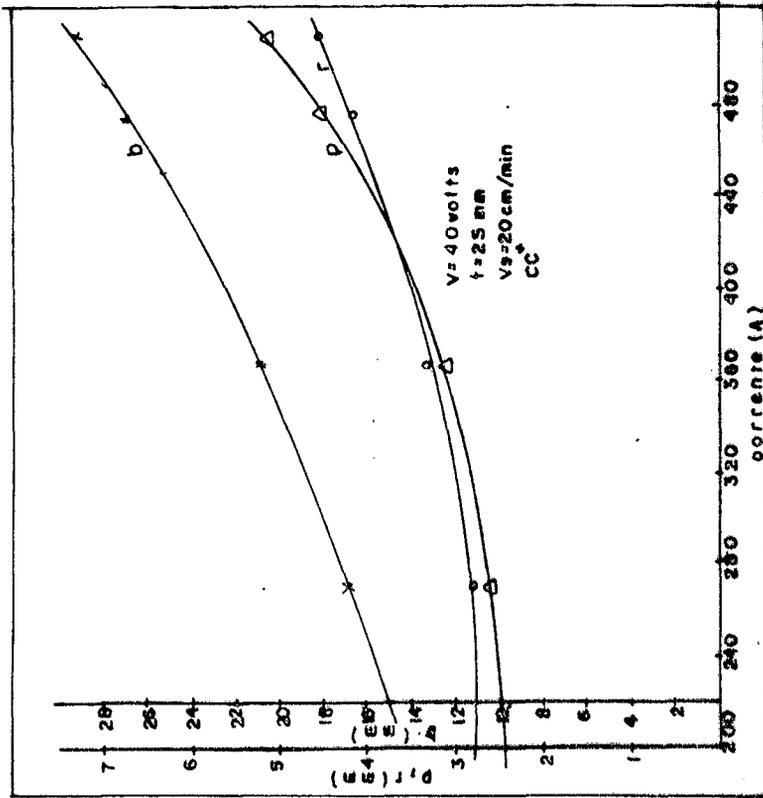


Fig.II.11: geometria da solda em função da corrente, em  $V_s = 20 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 25 \text{ mm}$  e  $V = 40 \text{ volts.}$

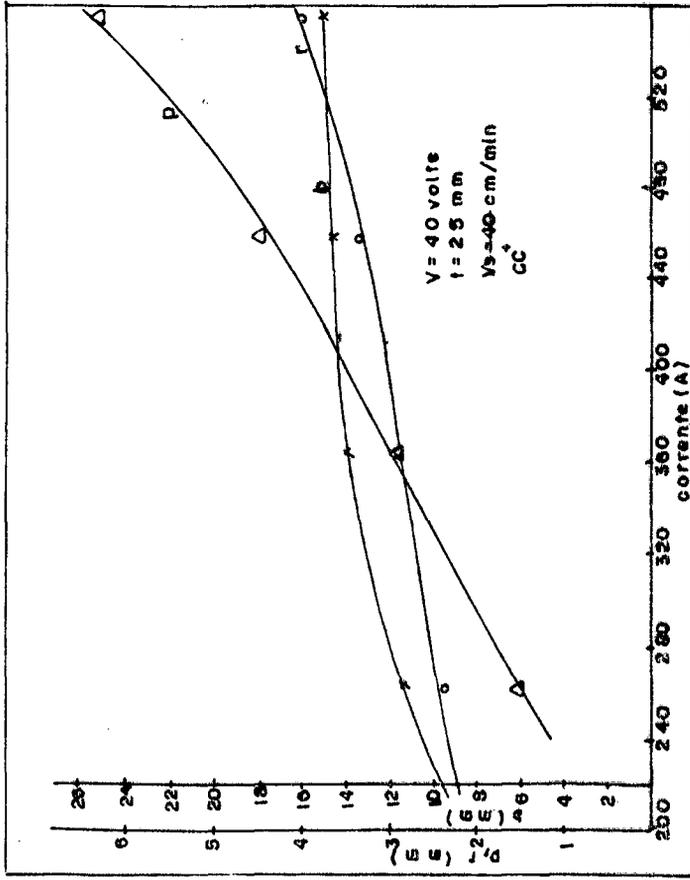


Fig. II.13: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 40$  cm/min.,  $t = 25$  mm e  $V = 40$  volts.

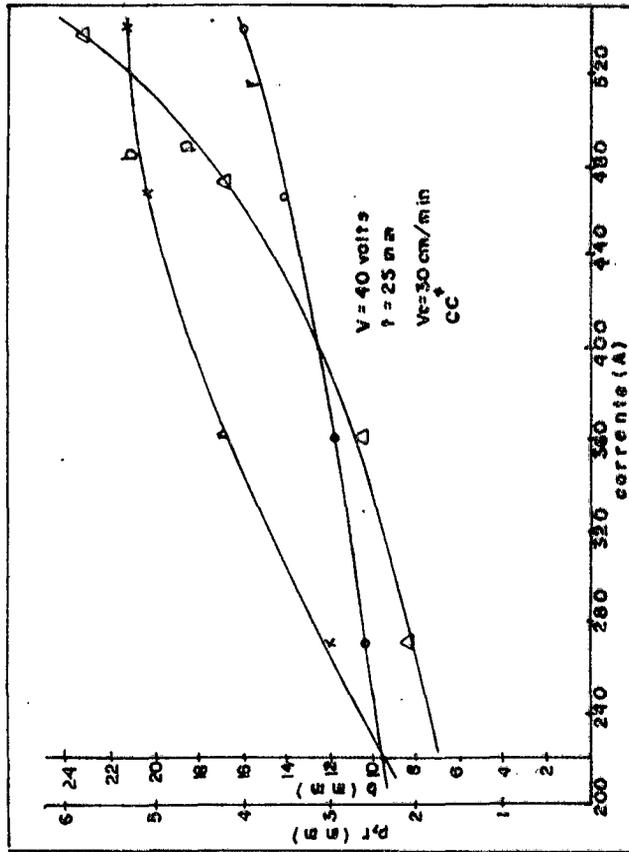


Fig. II.12: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 30$  cm/min.,  $t = 25$  mm e  $V = 40$  volts.

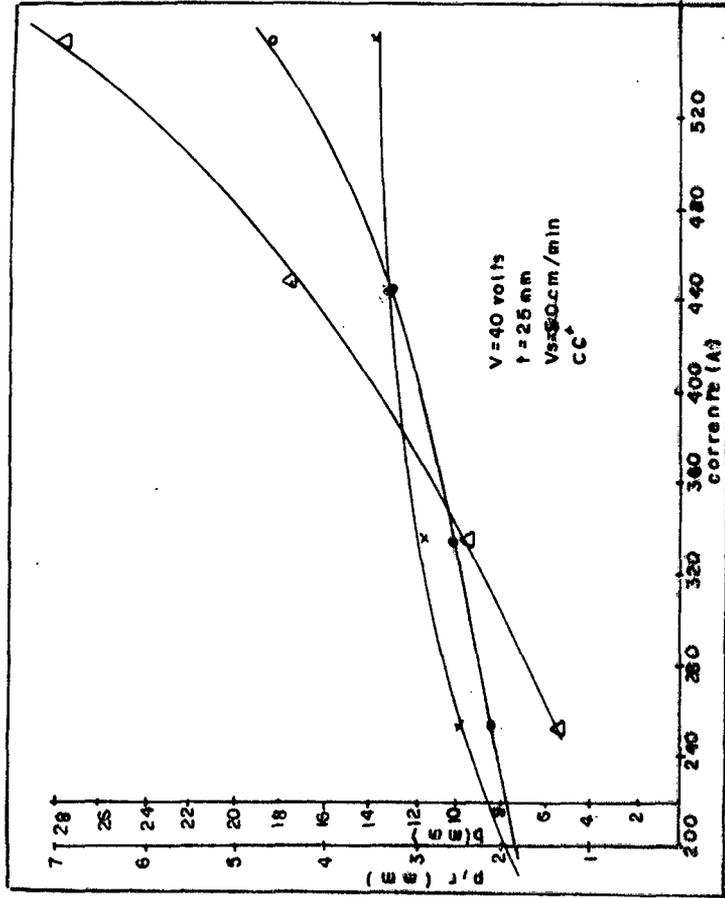
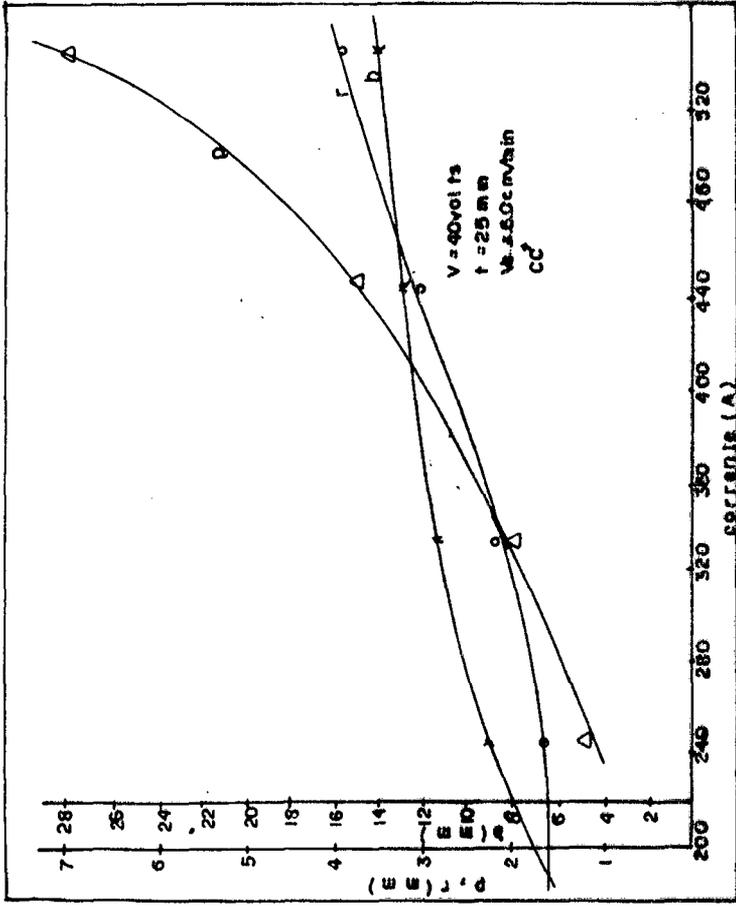


Fig.II.14: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 50 \text{ cm/min.}, t = 25 \text{ mm e } V = 40 \text{ volts.}$

Fig.II.15: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 60 \text{ cm/min.}, t = 25 \text{ mm e } V = 40 \text{ volts.}$

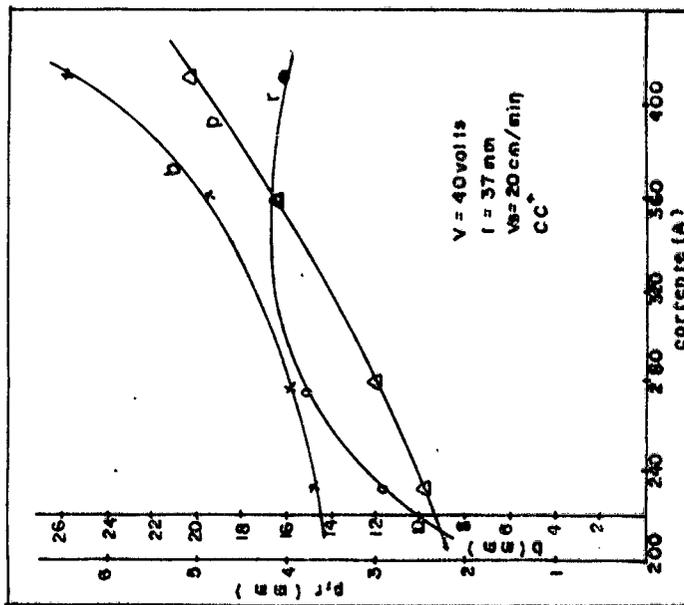


Fig.II.16: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 20 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 37 \text{ mm}$  e  $V = 40 \text{ volts}$ .

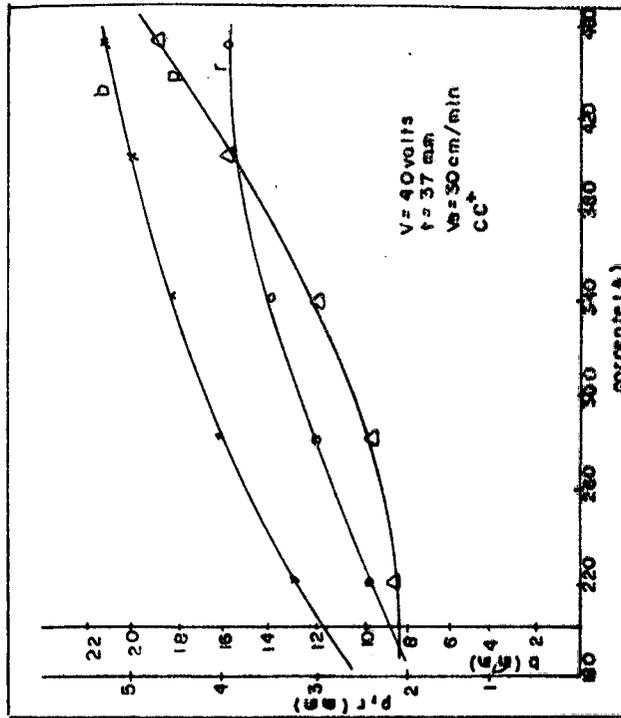


Fig.II.17: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 30 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 37 \text{ mm}$  e  $V = 40 \text{ volts}$ .

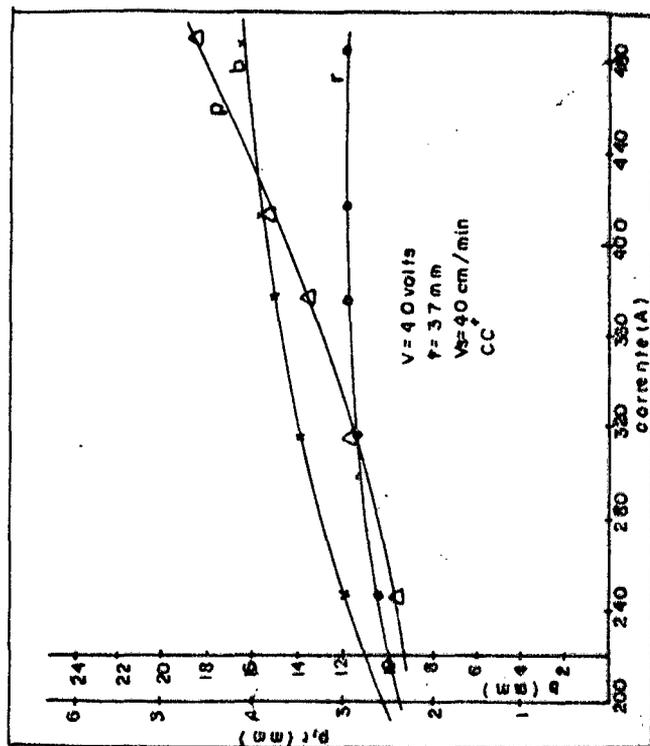


Fig. II.18: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 25 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 37 \text{ mm}$  e  $V = 40 \text{ volts}$ .

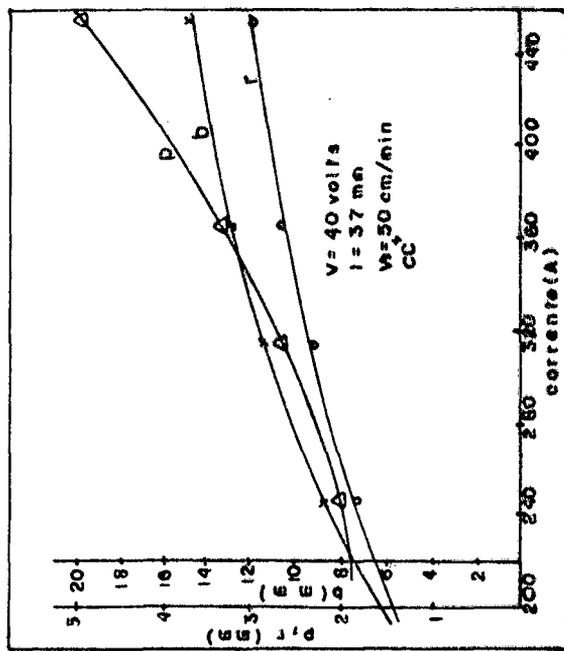


Fig. II.19: geometria da solda em função da corrente, em

$V_s = 50 \text{ cm/min.}$ ,  $t = 37 \text{ mm}$  e  $V = 40 \text{ volts}$ .

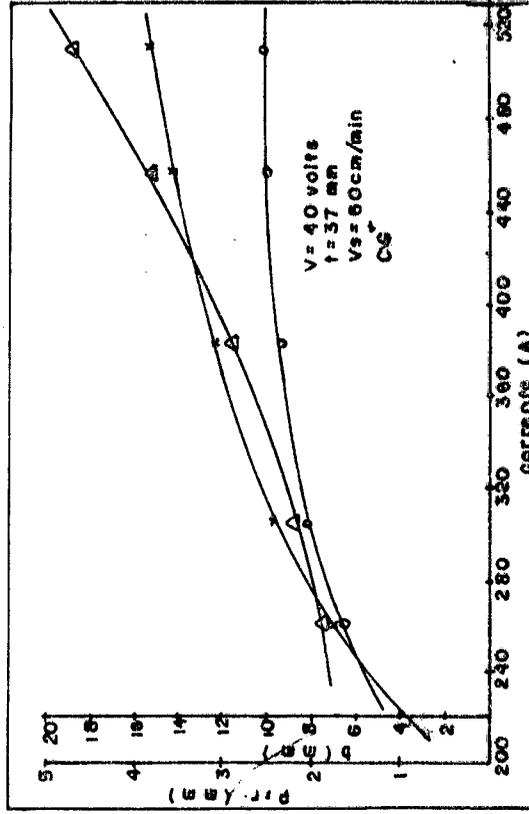


Fig.II.20: geometria da solda em função da corrente, em

Vs = 60cm/min., t = 37mm e V = 40 volts.

Agora as figuras II.20 à II.24 mostram os campos onde os  $K_e$  e  $K_i$  são maiores ou menores do que 4, e foram obtidas das curvas experimentais das figuras II.1 à II.20,

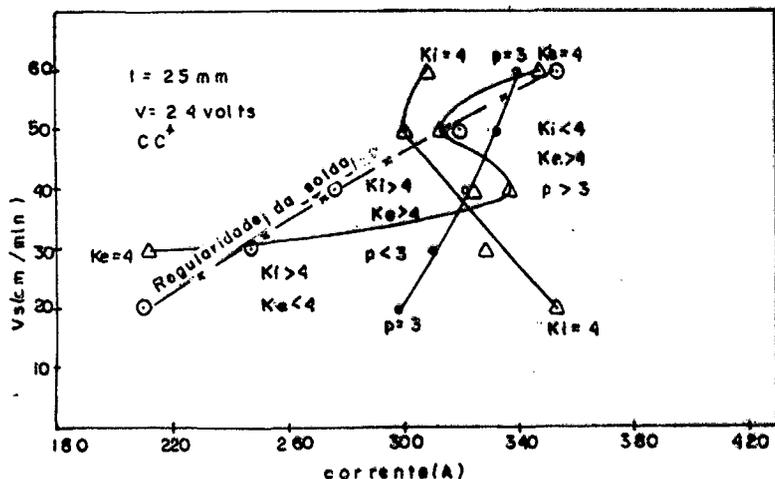


Fig.II.21: linhas de iso- $K_e$  e iso- $K_i$ , em  $V = 24$  volts e  $t = 25$  mm, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A).

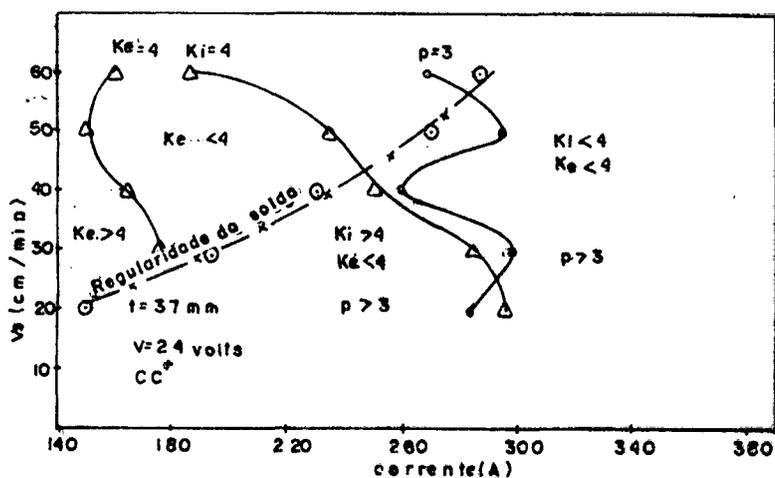


Fig.II.22: linhas de iso- $K_e$  e iso- $K_i$ , em  $V = 24$  volts e  $t = 37$  mm, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A)

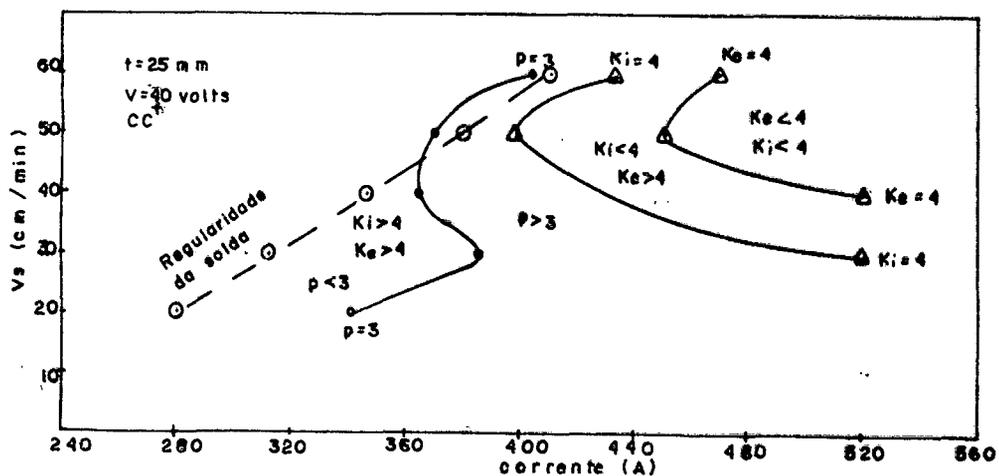


Fig.II.23: linhas de iso-Ke e iso-Ki, em  $V = 40$  volts e  $t = 25 \text{ mm}$ , em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A).

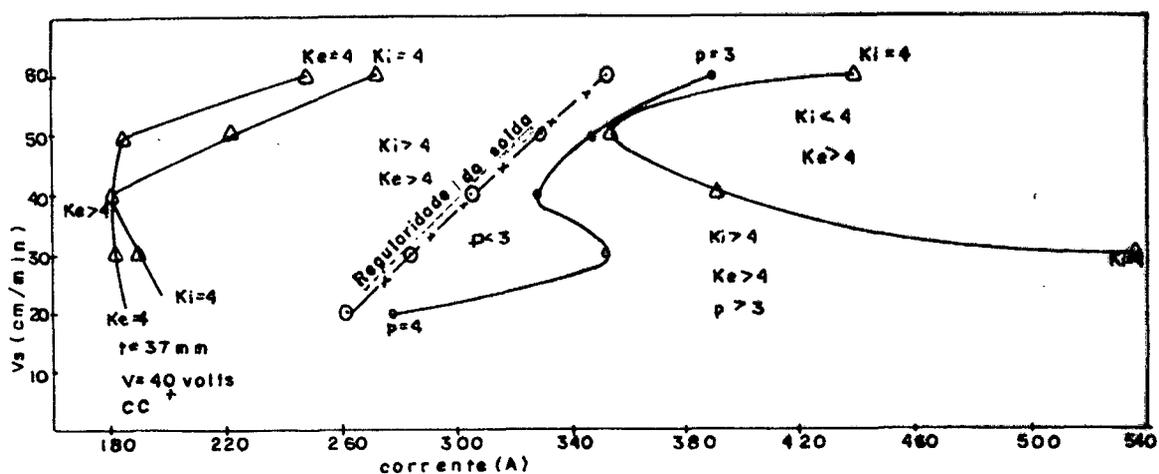


Fig.II.24: linhas de iso-Ke e iso-Ki, em  $V = 40$  volts e  $t = 37 \text{ mm}$ , em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A).

## ANEXO III

EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO UTILIZADO NESTE ESTU-  
DO

Este estudo de tese foi realizado num equipamento totalmente automático, composto de uma fonte de energia (a), fabricado pela S.A. White Martins (V - 800), e de um cabeçote de soldagem (b), fabricado pela The Lincoln Elétrica Company, como mostrado na figura III.1.

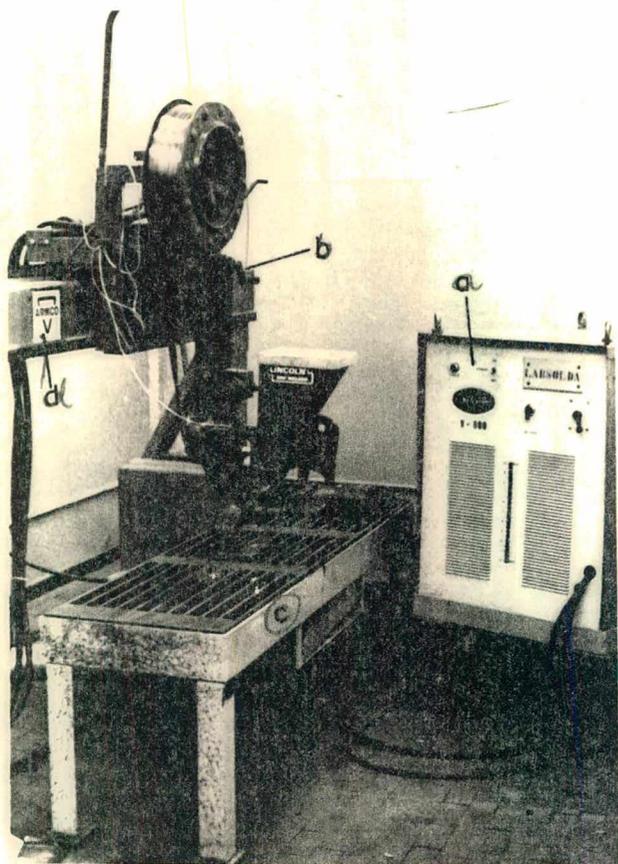


Fig. III.1: equipamento de soldagem a arco submerso, totalmente automático, composto pela fonte de energia (a) e cabeçote de soldagem (b). Observa-se também, a mesa de soldagem (c) e a guia suporte (d) do cabeçote de soldagem.

a) Fonte de energia:

A fonte de energia (figura III.2), composta basicamente de um transformador-retificador que fornece uma alimentação do arco com corrente contínua, possui a característica do tipo tensão constante. Neste caso, a tensão de trabalho é regulado na própria fonte de energia e, de acordo com a numeração indicada na figura III.2, os comandos são os seguintes:

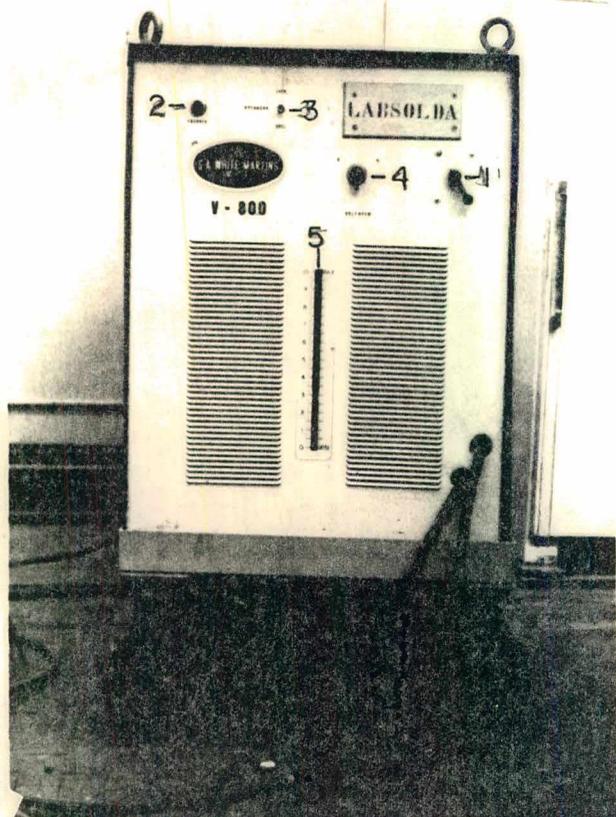


Fig. III.2:

... fonte de energia, S.A White Martins (V-800) composta basicamente de um transformador-retificador, com característica estática do tipo tensão constante.

- 1) chave energizadora da fonte
- 2) lâmpada indicadora de funcionamento
- 3) chave de comando do ventilador de refrigeração
- 4) chave de comando da variação de tensão de trabalho
- 5) dial indicador da característica estática.

b) Cabeçote de soldagem:

O cabeçote de soldagem (figura III.3) é composto pelos seguintes elementos:

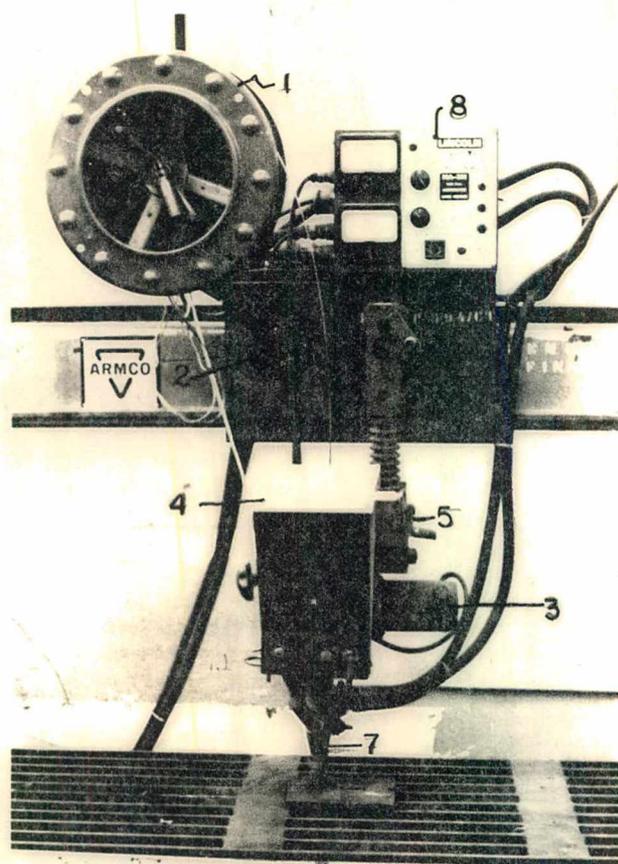


Fig. III.3: cabeçote de soldagem NA-3N da The Lincoln Elétric Company.

- 1) caratel de arame elétrodo
- 2) variador da velocidade de soldagem
- 3) sistema acionador do arame elétrodo
- 4) depósito de fluxo
- 5) sistema de ajuste horizontal da pistola de soldagem
- 6) sistema de ajuste vertical da pistola de soldagem
- 7) pistola de soldagem
- 8) unidade de controle (pode ser empregada tanto para fontes de tensão constante como para corrente constante).

Na unidade de controle (8 na figura III.3) é controlado a corrente de soldagem através da velocidade de alimentação do arame elétrodo, sendo que, além da corrente há outros controles e comandos, no painel externo (figura III.4) e no painel interno (figura III.5) dessa unidade, que são relacionados de acordo com a numeração nas figuras III.4 e III.5, como segue:

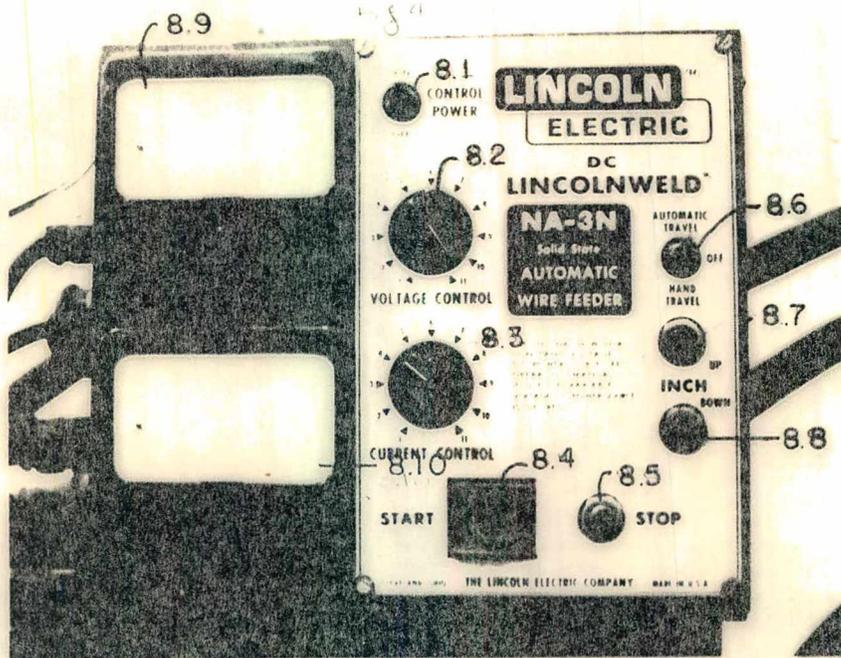


Fig. III.4: painel externo da unidade de controle.

- 8.1) controle de potência: chave energizadora da unidade de controle.
- 8.2) controle da tensão de trabalho: ajuste da tensão de trabalho no caso de se usar fonte do tipo corrente constante.
- 8.3) controle de corrente: ajuste da velocidade de alimentação do arame para controlar a corrente de soldagem.
- 8.4) comando do início do ciclo de soldagem.
- 8.5) comando para interromper o ciclo de soldagem.
- 8.6) comando do tipo de trabalho: soldagem totalmente automática

e ou semi-automática.

- 8.7) comando para erguer o elétrodo: este comando ergue o elétrodo, fora do ciclo de soldagem, com a velocidade ajustada no controle 8.12, no painel interno (figura III.5).
- 8.8) comando para descer o elétrodo: este comando desce o elétrodo, fora do ciclo de soldagem, com a velocidade ajustada no controle 8.12, no painel interno (figura III.5).
- 8.9) amperímetro: indicador da corrente de soldagem.
- 8.10) voltímetro: indicador da tensão de soldagem.

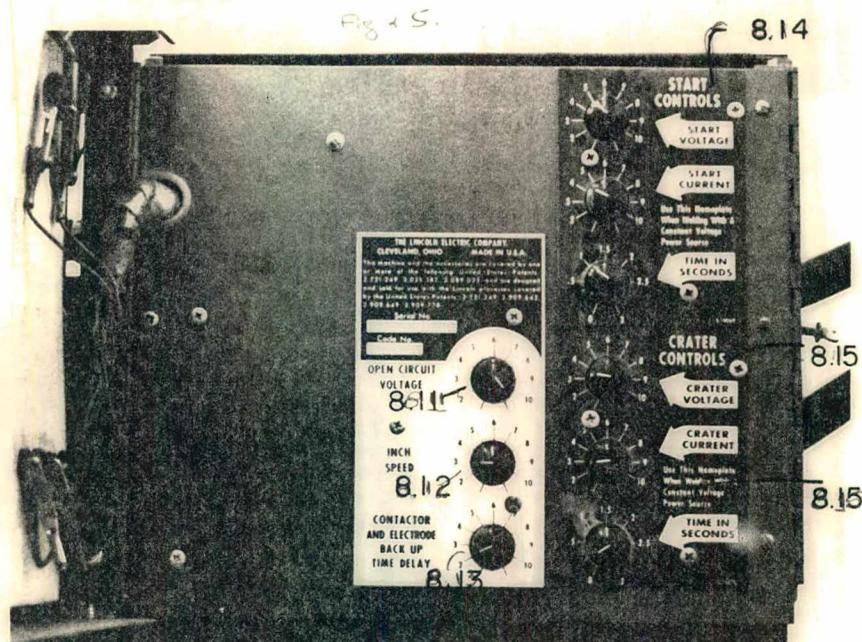


Fig. III.5: painel interno da unidade de controle.

- 8.11) tensão de circuito aberto: ajuste da tensão em vazio da fonte de energia, para controlar a característica estática.
- 8.12) controle de velocidade: ajuste da velocidade de alimentação do elétrodo, independente do ciclo de soldagem.
- 8.13) controle do tempo de retardação: evita a cratera final, pelo ajuste do tempo para o elétrodo apagar.

8.14) controle da abertura do arco: corrente e voltagem iniciais, por um tempo ajustável.

8.15) controle de cratera: corrente e voltagem finais por um tempo ajustável.

## GLOSSÁRIO

- Consumo de elétrodo (Melting Rate) ( $C = \text{kg/h}$ ): quantidade de material fundido por unidade de tempo.
- Distância da tomada de corrente ao metal de base (contact - tube to - work distance) ( $t = \text{mm}$ ): distância do ponto onde ocorre o contato elétrico até a superfície do metal de base.
- Folga (gap) ( $f = \text{mm}$ ): distância entre bordos de uma junta em I.
- Geometria da solda (weld geometry): a geometria da seção transversal de uma solda é composta pela penetração ( $p$ ), largura ( $b$ ) e reforço ( $r$ ).
- Iso-largura (isowidth): são linhas sobre as quais a solda apresenta a mesma largura em relação a corrente e velocidade de soldagem.
- Iso-ke (isoke) = são linhas sobre as quais o valor de  $k_e (= b/r)$  é constante.
- Iso-ki (isoki): são linhas sobre as quais o valor de  $k_i (= b/p)$  é constante em relação a corrente e velocidade de soldagem.
- Iso-kx (isokx): são linhas sobre as quais o  $k_x$  é constante em relação a corrente e velocidade de soldagem.
- Iso-penetração (isopenetration): são linhas sobre as quais a solda apresenta a mesma penetração em relação a corrente e velocidade de soldagem.
- Iso-reforço (isorrinforcement): são linhas sobre as quais a solda apresenta o mesmo reforço em relação a corrente e velocidade de soldagem.

- Largura (Width) ( $l = \text{mm}$ ): máxima distância entre pontos extremos alcançados pela fusão, sobre a superfície do material de base.
- Linhas de iso-consumo (isomelting line): são linhas sobre as quais obtem-se o mesmo consumo em relação a tensão e corrente de soldagem.
- Nível de energia (energy level) ( $k = \text{watts min/cm}$ ): é o produto da corrente (amperes) e a tensão (volts) dividido pela velocidade de soldagem (cm/min).
- Produção de material de adição (filler metal production) ( $P = \text{kg/h}$ ): quantidade de material de adição depositado na junta soldada, por unidade de tempo.
- Reforço (reinforcement) ( $r = \text{mm}$ ): máxima altura alcançada pelo excesso de material de adição, medida a partir da superfície do material de base.
- Regularidade da solda (regularity): são linhas que demarcam o início de uma soldagem que proporciona um cordão de solda regular, ou seja, sem que a instabilidade do arco afete a largura e o reforço.
- Solda (weld): é o volume de metal fundido e solidificado no processo de soldagem, constituído de metal adicionado e metal de base solubilizados, e que forma a junção permanente entre as partes.
- Tensão (welding voltage) ( $V = \text{volts}$ ): é a soma das quedas de tensão no extremo livre do arame mais a do arco elétrico.
- Velocidade equivalente (equivalent speed) ( $V_e = \text{cm/min}$ ): velocidade equivalente de um conjunto de diversos passes.

- Velocidade de soldagem (welding speed) ( $V_s = \text{cm/min}$ ): velocidade de execução de um único passe.