

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

SELEÇÃO DE PROCESSO E PARÂMETROS DE SOLDAGEM  
QUANTO AO ASPECTO OPERACIONAL VISANDO UMA SOLDAGEM ECONÔMICA

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia

SÉRGIO AFONSO DIAS

FLORIANÓPOLIS  
SANTA CATARINA - BRASIL  
AGOSTO - 1980.

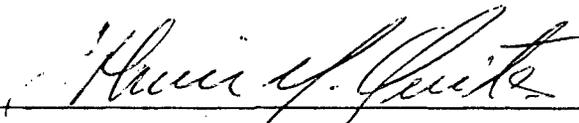
SELEÇÃO DE PROCESSO E PARÂMETROS DE SOLDAGEM  
QUANTO AO ASPECTO OPERACIONAL VISANDO UMA SOLDAGEM ECONÔMICA

SÉRGIO AFONSO DIAS

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do tí  
tulo de

"MESTRE EM ENGENHARIA"

Especialidade Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma  
final pelo programa de Pós-graduação



---

PROF. ALMIR MONTEIRO QUITES, M.Sc.

ORIENTADOR



---

PROF. ARNO BLASS, Ph.D.

COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA



---

PROF. JAIR CARLOS DUTRA, M.Sc.



---

PROF. AUGUSTO J.A. BUSCHINELLI, Dr.Ing.

A minha mãe, ao meu pai  
e ao meu irmão.

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. Almir Monteiro Quites, pela orientação e participação ativa neste trabalho, como também pelo estímulo e ensinamentos dispensados.

Ao prof. Jair Carlos Dutra, pela cooperação e ensinamentos dispensados.

Ao pessoal do laboratório de soldagem que comigo trabalhou desde 1979.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, pelo apoio recebido.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A ARMCO DO BRASIL, pelo material fornecido.

## SUMÁRIO

SIMBOLOGIA .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
INTRODUÇÃO .....	iv
1 - GENERALIDADES DOS PROCESSOS DE SOLDAGENS UTILIZZADOS ...	01
1.1 - INTRODUÇÃO .....	01
1.2 - SOLDAGEM COM ELÉTRODOS REVESTIDOS .....	01
1.2.1 - Características Gerais .....	01
1.2.2 - Diferentes Tipos de Revestimentos .....	02
1.2.3 - Dispositivo Automático para a Soldagem com Eléetrodo Revestido .....	04
1.3 - SOLDAGEM SEMI-AUTOMÁTICA E AUTOMÁTICA COM ELÉTRO DOS NÚS EM ATMOSFERA ESPECIAL (ARAMES MACIÇOS) ...	11
1.4 - SOLDAGEM AUTOMÁTICA COM ELÉTRODO TUBULAR (ARAME - ÔCO) .....	16
1.5 - SOLDAGEM AUTOMÁTICA A ARCO SUBMERSO (ARAME MACIÇO)	22
2 - INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM SOBRE O CONSUMO DE PRODUÇÃO DO ELÉTRODO .....	26
2.1 - INTRODUÇÃO .....	26
2.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO DO CONSUMO E PRO DUÇÃO .....	26
2.3 - MÉTODO DE MEDIÇÃO .....	27
2.3.1 - Medida de Produção .....	27
2.3.2 - Medida de Consumo .....	28
2.3.3 - Medição de Corrente .....	30
2.3.4 - Medição de Tensão .....	32
2.4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	32
2.4.1 - Processo Arame Tubular Auto-Protegido.....	32

2.4.2 - Processo Arco Submerso .....	36
2.4.3 - Processo MIG e MAG .....	39
2.4.4 - Processo com Eléctrodo Revestido .....	43
2.5 - ANÁLISE COMPARATIVA .....	48
2.6 - CONCLUSÕES .....	50
3 - INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DA SOLDA .....	51
3.1 - INTRODUÇÃO .....	51
3.2 - DEFINIÇÕES .....	51
3.3 - INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DA SOLDA .....	52
3.3.1 - Processo Arame Tubular Auto-Protegido ....	52
3.3.2 - Processo Arco Submerso .....	57
3.3.3 - Processo MIG e MAG .....	60
3.3.4 - Processo com Eléctrodo Revestido .....	63
3.4 - MORFOLOGIA DA SOLDA .....	67
3.5 - CONCLUSÕES .....	77
4 - SELEÇÃO DO PROCESSO QUANTO A CRITÉRIO PARA PASSES DE SOLDAGEM .....	78
4.1 - INTRODUÇÃO .....	78
4.2 - DEFINIÇÕES .....	79
4.3 - COMPARAÇÃO NO MESMO NÍVEL DE ENERGIA .....	79
4.3.1 - Avaliação dos Resultados .....	80
4.4 - CRITÉRIOS DE PASSES .....	83
4.4.1 - Passe de Penetração .....	83
4.4.2 - Passe de Enchimento .....	88
4.5 - SELEÇÃO DE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PARA PASSE DE PENETRAÇÃO .....	93
4.5.1 - Processo com Arame Tubular .....	93

4.5.2 - Processo a Arco Submerso .....	94
4.5.3 - Processo MIG e MAG .....	95
4.5.4 - Processo com Eléctrodo Revestido .....	96
4.6 - SELEÇÃO DE PROCESSO PARA PASSE DE PENETRAÇÃO .....	98
4.7 - SELEÇÃO DE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PARA PASSE DE ENCHIMENTO .....	99
4.7.1 - Processo com Arame Tubular .....	99
4.7.2 - Processo a Arco Submerso .....	100
4.7.3 - Processo MIG e MAG .....	102
4.7.4 - Processo com Eléctrodo Revestido .....	103
4.8 - SELEÇÃO DE PROCESSO PARA PASSE DE ENCHIMENTO .....	104
4.9 - CONCLUSÕES .....	106
5 - INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE SOLDAGEM EM DIVERSOS PROCESSOS .....	107
5.1 - INTRODUÇÃO .....	107
5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A TÉCNICA DE SOLDAGEM FORA DE POSIÇÃO .....	107
5.2.1 - Soldagem na Posição Vertical .....	107
5.2.2 - Soldagem Horizontal .....	108
5.2.3 - Soldagem Sobrecabeça .....	109
5.3 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM .....	109
5.4 - AVALIAÇÃO COMPARATIVA .....	112
5.5 - ANÁLISE COMPARATIVA .....	117
5.6 - CONCLUSÕES .....	119
6 - CONCLUSÃO GERAL .....	120
REFERÊNCIAS .....	121
ANEXO I .....	122
ANEXO II .....	123

ANEXO III .....	130
ANEXO IV .....	133
GLOSSÁRIO .....	136

## SIMBOLOGIA

a	=	comprimento do arco
b	=	largura
C	=	consumo
CA	=	corrente alternada
CC	=	corrente contínua
CC <sup>-</sup>	=	polaridade direta
CC <sup>+</sup>	=	polaridade inversa
d	=	diâmetro
e	=	espessura
E	=	tensão
I	=	corrente
Ke	=	coeficiente de forma externa
Ki	=	coeficiente de forma interna
Kx	=	produto b.r
n	=	número de rotações
MAG	=	Metal Active Gas
MIG	=	Metal Inert Gas
p	=	penetração
P	=	produção
r	=	reforço
s	=	encosto
Sad	=	área adicionada
Sp	=	área penetrada
t	=	altura da tomada de corrente
Va	=	velocidade de alimentação
Ve	=	velocidade equivalente
Vs	=	velocidade de soldagem
$\gamma$	=	peso específico
$\eta_d$	=	rendimento de deposição

## RESUMO

Para que se possa realizar a seleção de um processo de soldagem de modo a atender exigências específicas de aplicação, há necessidade de se desenvolver os conhecimentos de cada processo. Neste trabalho explicita-se as vantagens e desvantagens dos processos de soldagem a elétrodos revestidos, a elétrodo tubular, a arco submerso, MIG e MAG. São estudados os consumos de elétrodo, - as produções de material de adição e as geometrias da solda. Estabelecem-se critérios de seleção de processos e de parâmetros para a execução de passes de soldagem. Por último faz-se considerações gerais a respeito dos efeitos da posição de soldagem e das possibilidades de automatização, visando uma soldagem econômica.

## ABSTRACT

On order to be able to adequate by select a welding process meeting specific application requirements, a knowledge about each process is required. In this work the advantages and disadvantages of shielded metal-arc, self-shielded flux-cored, submerged-arc, - MIG and MAG welding processes. Electrode consumption, addition material production and welding geometries are studied. Process and parameters selection criteria are established for the welding passes. Lasty general considerations on the effects of welding position and automatization possibilities are presented, with regard to the economy of the welding process.

## INTRODUÇÃO

É comum especificar-se procedimentos de soldagem apenas pelo par tensão-corrente. No entanto há outros parâmetros a serem considerados, tais como, polaridade, diâmetro do eletrodo, altura da tomada de corrente, velocidade e posição de soldagem. Para a seleção de processos e procedimentos de soldagem devem ser estudados todos os parâmetros operacionais.

A seleção de processos envolve ainda as características tecnológicas e econômicas, e estas estão interrelacionadas com as operacionais. O presente trabalho aborda as características operacionais, como uma etapa fundamental para um futuro estudo que deverá relacionar estas características com as econômicas e tecnológicas. Nesta etapa, trabalhou-se com o material de base SAE 1010 que tem boa soldabilidade, não apresentando portanto, problemas quanto as características tecnológicas.

Esse trabalho está restrito a algumas espessuras de chapa e a uma única tensão de arco, para obter dados comparáveis entre si. Teve-se como intuito, também, a criação de uma metodologia para a seleção de processo e parâmetros de soldagem, visando uma soldagem econômica.

## 1 - GENERALIDADES DOS PROCESSOS DE SOLDAGENS UTILIZADOS

### 1.1 - INTRODUÇÃO:

Os processos de soldagem citados neste trabalho são:

- soldagem manual e automática com elétrodos revestidos;
- soldagem automática se semi-automática MIG/MAG;
- soldagem automática com elétrodo tubular; e
- soldagem automática a arco submerso.

Para cada processo, apresenta-se as principais aplicações e suas vantagens e desvantagens.

### 1.2 - SOLDAGEM COM ELÉTRODOS REVESTIDOS:

#### 1.2.1 - Características Gerais.

É o processo de soldagem mais usado em todas as nações. Para este processo de soldagem não se pode falar em uma aplicação principal, porque pode ser usado para soldagens de qualquer espécie e finalidade. Pode ser usado para todos os aços e ligas com exceção de alguns metais, que são muito suscetíveis à oxidação quando soldados, tais como titânio e o zircônio ou alguns metais raros que tem ponto de fusão extremamente elevado, como por exemplo, o tungstênio e o molibdênio. Podendo, também, ser usado em todas as posições: plana, horizontal e vertical e sobrecabeça. Aplica-se a quase todas as espessuras de chapa. As limitações surgem em chapas extremamente finas ou extremamente espessas.

Para passar de um metal para outro ou de uma posição de soldagem para outra, precisa-se apenas trocar de elétrodo e ajustar os parâmetros de soldagem. É o processo de soldagem a arco voltaico com elétrodos consumíveis que possui a maior variedade de tipos de elétrodos disponíveis no mercado.

Deve-se ainda salientar que o investimento em fontes de energia (transformadores, conversores ou retificadores) é relativamente um pouco mais baixo que os processos semi-automáticos e automáticos.

Uma desvantagem da soldagem com elétrodo revestido é que para se obter uma solda de alta eficácia, é preciso em soldador de grande habilidade. Soldadores habilidosos são frequentemente caros e, em algumas nações, como o Brasil, são também raros.

### 1.2.2 - Diferentes Tipos de Revestimentos

Os elétrodos para soldagem de aço de baixo carbono são classificados de acordo com a composição do seu revestimento e propriedades. Neste trabalho foram estudados três tipos de revestimentos; à base mineral (tipo rutílico - AWS E6013), à base de matéria orgânica (tipo celulósico - AWS E6010) e à base de carboneto de cálcio (tipo básico - AWS E7018), sendo este último, adicionalmente constituído com pó de ferro.

Os elétrodos com revestimento do tipo celulósico ou rutílico são bem conhecidos. São elétrodos para finalidades gerais, fáceis de usar mesmo para um soldador inábil e não necessitam de tantos cuidados no armazenamento. Os elétrodos do tipo celulósico tem ainda algumas propriedades especiais:

- a) maior penetração no metal base, e
- b) uma pequena quantidade de escória sobre a solda.

Por estas razões adaptam-se bem a soldagem de tubulações (de óleo por exemplo).

Os elétrodos básicos apresentam soldas de melhor qualidade, devido a escória básica e baixo conteúdo de hidrogênio; as soldas com elétrodos básicos são resistentes a todas as espécies de trinças: trinca a quente, trinca a frio, trinca abaixo do cordão, etc. Eles podem, conseqüentemente, ser usados para soldagem de aços com alto conteúdo de impureza (C,P,S, etc), aços que dariam problemas de trinças quando soldados com outros tipos de elétrodos (1).

A qualidade da solda é geralmente testada sob impacto, usando o conhecido teste Charpy. O diagrama na figura 1.1 mostra os valores Charpy-V de elétrodos básicos (1) comparados com outros elétrodos. Devido aos altos valores de impacto e alta resistência a fratura frágil, os elétrodos básicos devem ser usados sempre que se solda estruturas sob alta concentração de tensões. A concentração de tensão pode ser alta, devido a fatores de projeto, devido a grandes espessuras da chapa ou ambos.

Todos os elétrodos básicos devem ser armazenados sob condições secas ou devem ser entregues hermeticamente fechados, por ter um revestimento de baixo teor de hidrogênio e por isto altamente higroscópico. Os soldadores que usam elétrodos básicos tem que sub

meter-se a treinamento especial para familiarizarem-se com o fato dos elétrodos básicos exigirem arco mais curto do que os outros elétrodos. Os elétrodos básicos empregados com um arco muito longo geram porosidades no depósito.

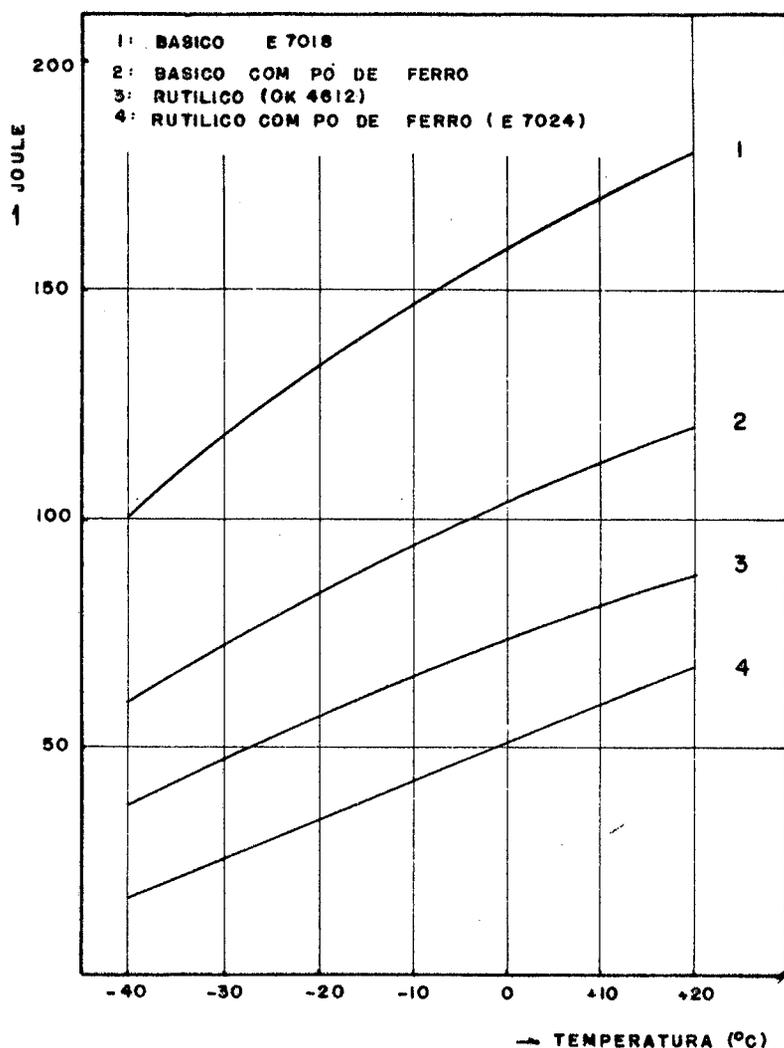


Fig. 1.1 - Propriedades de impacto para diferentes tipos de elétrodos.

Os elétrodos com pó de ferro, como seu próprio nome indica, tem revestimento contendo pó de ferro. Esses elétrodos são caracterizados por uma alta produção e um alto rendimento de deposição, - que resulta em baixo custo de soldagem.

Elétrodo com pó de ferro são extensivamente usados para soldagem de filete. Para este tipo de junta eles apresentam grande facilidade de soldagem. Geralmente pode-se soldar pela técnica do arraste, isto é, o elétrodo pode ser conduzido ao longo da junta -

com revestimento apoiando-se sobre a chapa.

### 1.2.3 - Dispositivo Automático para a Soldagem com Eléctrodo Revestido

#### a) Características Gerais:

Para o levantamento de dados sobre o processo com eléctrodo revestido, utilizou-se um equipamento que permite automatização do processo (fig. 1.2). Esse equipamento, projetado e construído na UFSC, foi uma realização conjunta do Departamento de Engenharia Mecânica (LABSOLDA) e do Departamento de Engenharia Elétrica. Se baseia no controle da velocidade de alimentação do eléctrodo através da tensão de soldagem (fig. 1.3). Como a fonte usada é do tipo corrente constante (fig. 1.4), possibilita realizar-se experiências com corrente e tensão aproximadamente constantes.

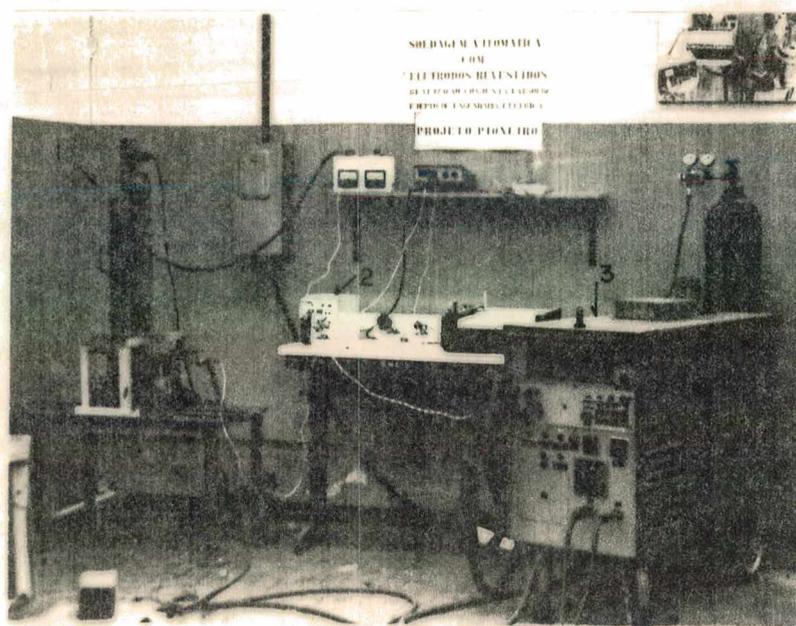


Fig. 1.2 - Equipamento de soldagem automática com eléctrodo revestido. 1- Dispositivo de alimentação do eléctrodo; 2- Circuito de controle de tensão e velocidade de alimentação; 3- Fonte de energia.

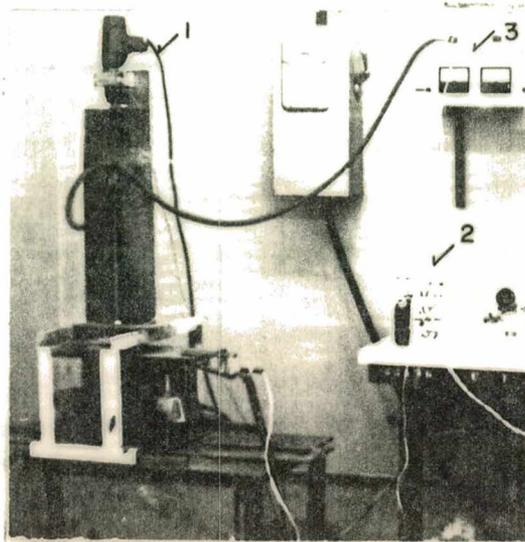


Fig. 1.3 - Cabeçote da controle de velocidade de alimentação do eletrodo. 1- Dispositivo de alimentação do eletrodo; 2- Circuito de controle de tensão e velocidade de alimentação do eletrodo; 3- Voltímetro e Amperímetro.

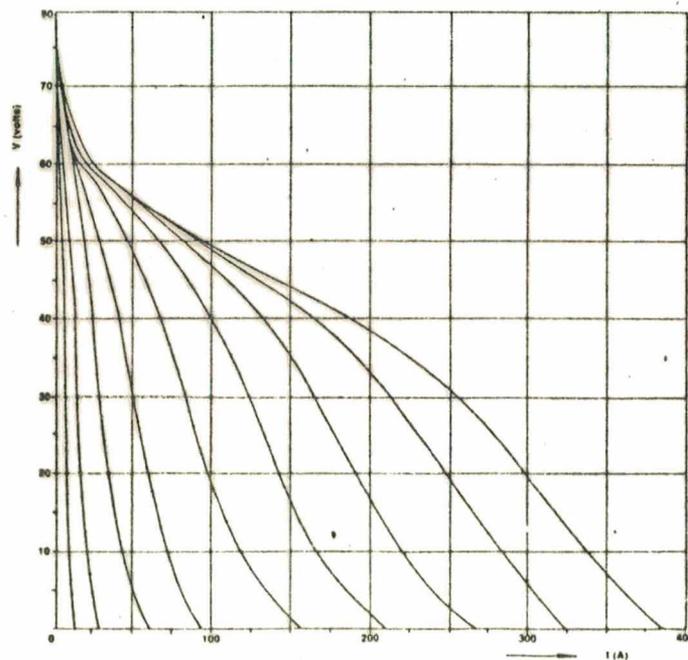


Fig. 1.4 - Características estáticas da fonte de energia marca Oerlikon (tipo AD 360 WR).

b) Fonte de energia:

A figura 1.5 mostra a vista frontal da fonte de corrente - marca Oerlikon (tipo AD 360 WR).

A corrente contínua obtida da mesma, provém de retificadores, e a corrente, alternada é obtida diretamente do transformador.

Tanto para uma classe de corrente como para outra, dispõe-se na parte frontal da máquina um seletor de faixa de corrente em três escalões (seletor da fig. 1.5) e uma regulagem fina. Esta regulagem fina se processa continuamente (sem degraus) com auxílio de um transdutor (seletor na figura 1.5). Esta fonte é adaptável tanto para a soldagem MIG como com elétrodo revestido (seletor 3 da figura 1.5).

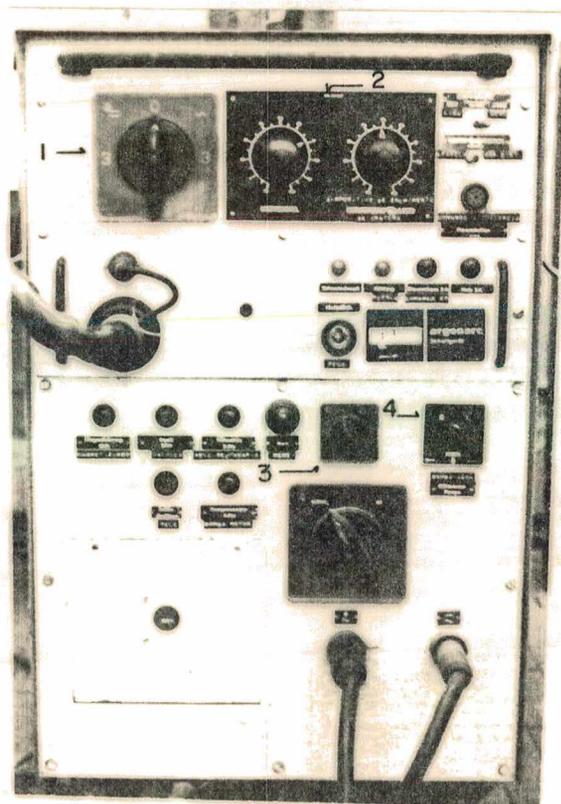


Fig. 1.5 - Vista frontal da fonte de energia marca Oerlikon (tipo AD 360 WR): 1- seletor de faixa de corrente; 2- seletor de regulagem fina; 3- seletor do tipo de processo (TIG ou elétrodo revestido); 4- chave de liga - desliga da bomba de refrigeração.

Para a soldagem com elétrodo revestido é necessário ainda o desligamento da bomba de refrigeração da pistola de soldagem TIG (chave 4 na figura 1.5). Utilizou-se nos experimentos a polaridade inversa segundo a especificação comercial.

c) Controle automático de soldagem:

A velocidade de alimentação do elétrodo é controlada para uma dada tensão de soldagem. Entende-se aqui a tensão de soldagem, como a soma da queda de tensão ao longo do elétrodo com a do arco voltaico. Assim, qualquer variação no comprimento do elétrodo, do arco ou de ambas implica na variação da tensão.

O circuito de controle de velocidade de alimentação e tensão de soldagem é mostrado esquematicamente na figura 1.6. A tensão de soldagem ( $E_s$ ) é atenuada por um fator  $K$  ( $K E_s$ ), e possui uma relação com a tensão de referência ( $E_r$ ), que varia de 0 a 10 volts, - conforme figura 1.7. Em seguida são comparadas, gerando um sinal de saída  $\Delta E$  ( $\Delta E = K E_s - E_r$ ). Por sua vez, um sinal proporcional a  $\Delta E$  ( $K \Delta E$ ) será comparada com a velocidade média ( $\Omega_m$ ), referida em tensão (de 0 a 15 volts), produzida a velocidade de referência - ( $\Omega_r$ ).

Utilizou-se a velocidade média a 2,6 volts, como um valor adequado constatado experimentalmente para o elétrodo revestido tipo básico (AWS E7018), de diâmetro igual a 3,25mm. Quando  $\Omega_r$  é comparado a velocidade real ( $\Omega_{taco}$ ) que é fornecida por um tacogerador. Implementaria-se ou não a velocidade de alimentação ( $\Omega_a$ ), através de uma lei apropriada fornecida por um controle de velocidade tipo proporcional integral. Este controlador fornece uma tensão de controle ( $E_c$ ) ao comando do "Triac", que por sua vez atua no motor de alimentação. Por conseguinte, o circuito é realimentado com informações da velocidade de alimentação em função da rotação do tacogerador e da tensão de soldagem em função da altura de tomada de corrente ( $t$ ). Proporcionando um controle da velocidade de alimentação para uma dada tensão de soldagem.

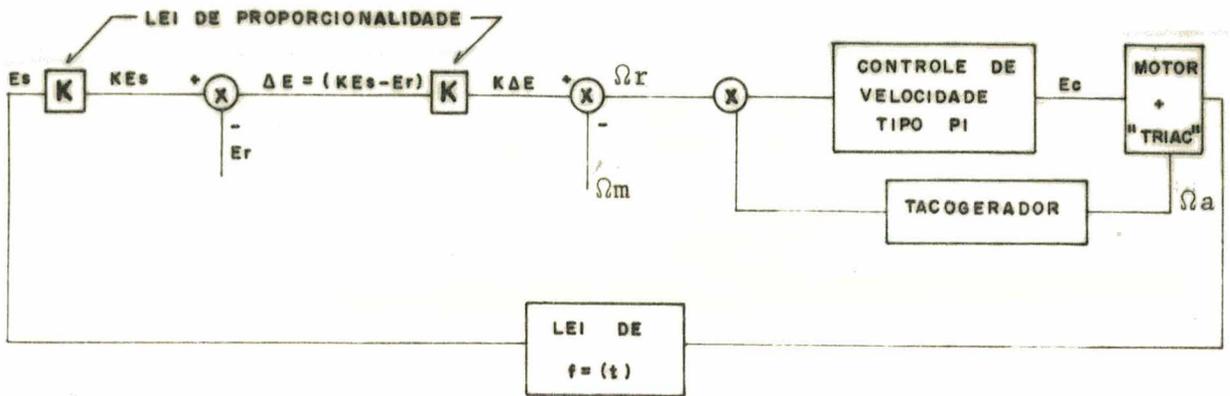


Fig. 1.6 - Esquema do sistema de controle da velocidade de alimentação e tensão de soldagem.

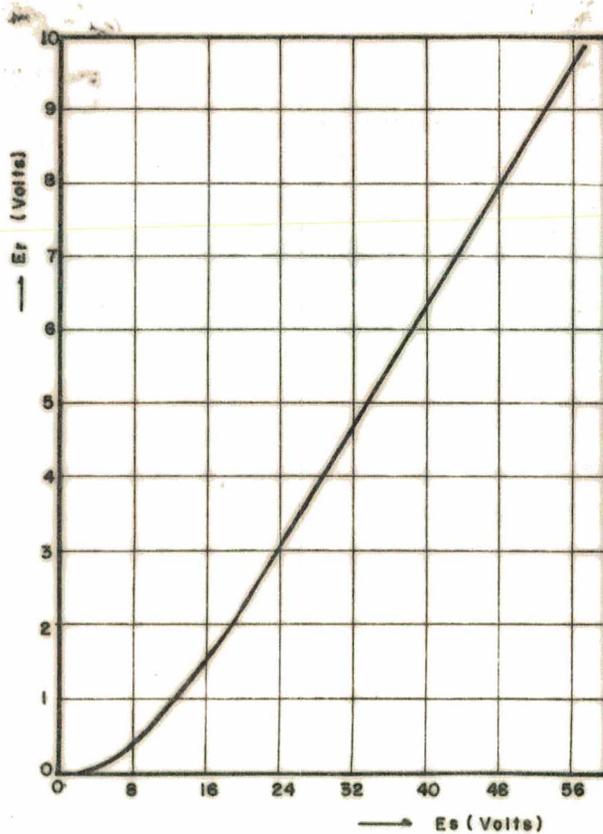


Fig. 1.7 - Relação entre a tensão de soldagem (\$E\_s\$) e a tensão de referência (\$E\_r\$).

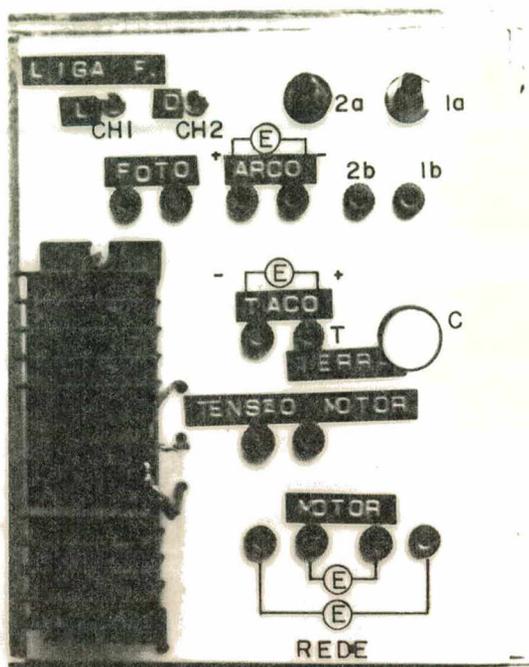


Fig. 1.8 - Painel de controle da velocidade de alimentação e tensão de soldagem.

A figura 1.8 mostra o painel de controle de velocidade de alimentação e tensão de soldagem. A tensão de referência é ajustada pelo potenciômetro "1a" (fig. 1.8), podendo esta ser monitorada com um voltímetro inserido entre os pinos "1b" e "T" (terra) do painel de controle. A velocidade média é proporcionada pelo potenciômetro "2a", podendo, também, ser monitorada.

O sinal do tacogerador é inserido no painel do circuito de controle, conforme é mostrado na figura 1.8 nos pinos referente a posição "TACO".

A alimentação do circuito é feita em 220 volts através dos pinos referente a posição "REDE". A alimentação do motor pelos pinos referente a posição "MOTOR" e a tensão de soldagem pelos pinos referente a posição "ARCO" observando-se a polaridade.

A chave "CH1" (fig. 1.8), quando acionada para a esquerda liga o comando de regulagem de velocidade de alimentação para o arco apagado, comandado pelo potenciômetro "C". Esse comando se presta para a aproximação ou afastamento do elétrodo ao metal de base, dependendo da posição da chave de reversão mecânica (dispositivo 4 na figura 1.9). A aproximação do elétrodo se realiza com velocidade controlada, permitindo o acendimento do arco com uma velocidade adequada, que deve ser lenta para evitar a colagem do elétrodo ao metal de base, sem o estabelecimento do arco.

No afastamento do elétrodo, esse controle tem atuação apenas para iniciar o afastamento, sendo o mesmo realizado com velocidade constante. Quando a chave CH1, for acionada para a direita liga o regulador de tensão para o arco apagado. Assim, logo após o acendimento do arco deve-se passar a chave "CH1" para a direita, - realizando uma soldagem com velocidade constante, caso a chave

"CH2" estiver à esquerda. Se à direita, estar-se-á trabalhando também, com o regulador de tensão. Portanto, quando ambas as chaves (CH1 e CH2) estiverem acionadas para à direita, o sistema fica efetivamente em funcionamento.

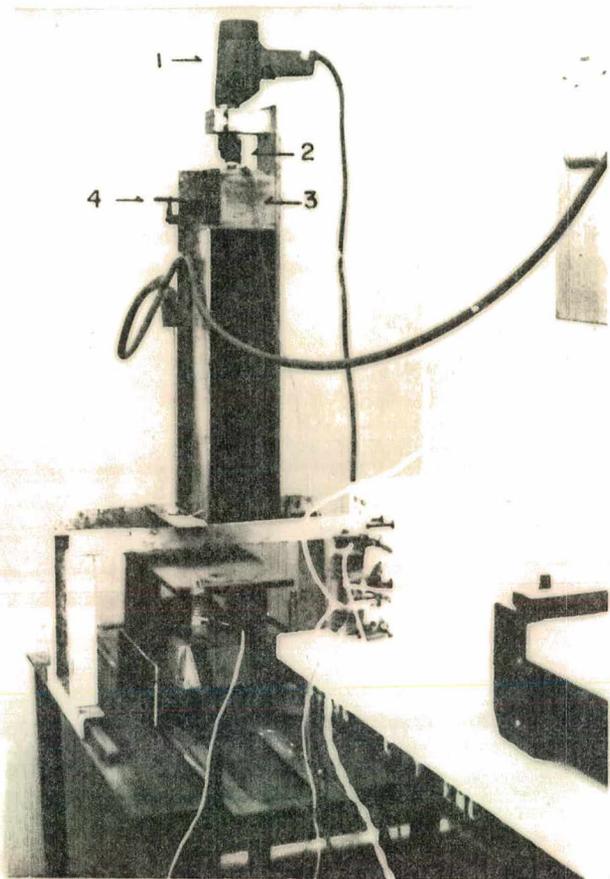


Fig. 1.9 - Dispositivo de alimentação do eletrodo: 1- motor; 2- tacogerador; 3- caixa de engrenagem; 4- chave de reversão mecânica.

A figura 1.9 mostra o dispositivo de alimentação do eletrodo que consiste basicamente da transformação do movimento de rotação do motor, através da caixa de engrenagem, em movimento de translação do eletrodo. Tem-se diretamente acoplado a caixa de engrenagem, um tacogerador (2, fig. 1.9) para medição da rotação e por conseguinte da velocidade de alimentação do eletrodo.

A montagem experimental completa é mostrada na figura 1.10, onde se vê além do sistema exposto anteriormente, - uma tartaruga que possibilita o movimento de avanço da solda e um traçador de gráfico - que registra a corrente.

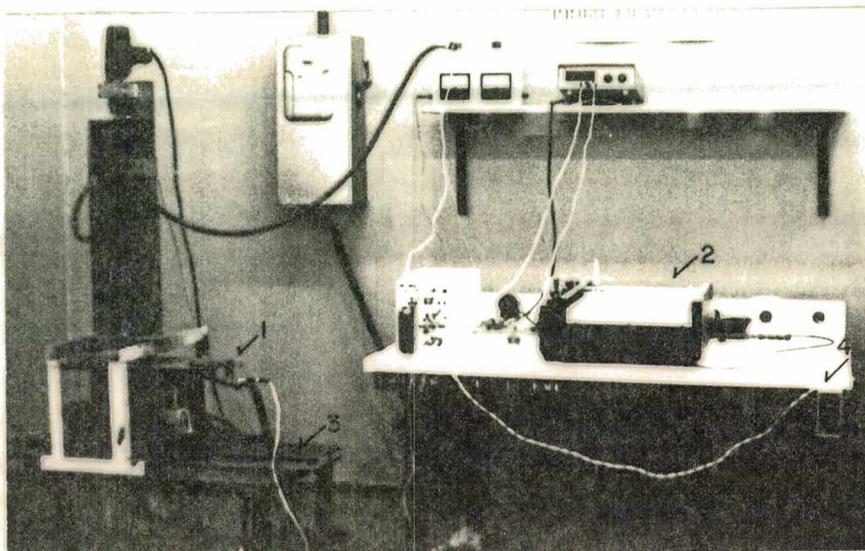


Fig. 1.10 - Montagem experimental: 1- tartaruga; 2- traçador de gráficos; 3- mesa metálica; 4- chave energizadora do circuito.

Convém lembrar que, quando do acendimento do arco com uma velocidade pouca adequada, que cause a "colagem" do elétrodo, deve-se imediatamente desligar a fonte.

### 1.3 - SOLDAGEM SEMI-AUTOMÁTICA E AUTOMÁTICA COM ELÉTRODOS NÚS EM ATMOSFERA ESPECIAL (ARAMES MACIÇOS).

Este processo é geralmente chamado de soldagem MIG (Metal - Inert Gás) quando o gás utilizado for um gás nobre (absolutamente inerte), e MAG (Metal Active Gás) quando o gás utilizado for  $\text{CO}_2$ , ou mistura do mesmo.

Estes gases, segundo sua natureza e composição, tem influência preponderante nas características do arco, no tipo de transferência do metal do elétrodo à peça, na velocidade de soldagem, nas perdas por projeções, na penetração e na forma da solda. Por outro lado, o gás também influencia nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e à porosidades, bem como na facilidade de execução da soldagem nas diversas posições (2).

O tipo de arame de alimentação, certamente depende da espécie de material a ser soldado. Este é também o caso do gás de proteção. Para a soldagem de aço carbono, o dióxido de carbono é o gás

mais empregado, mas em alguns casos usam-se misturas de dióxido de carbono e argônio. Os aços inoxidáveis são soldados com proteção de argônio, contendo diminuta adição (até 5%) de oxigênio. O alumínio também é soldado com argônio puro.

Para a soldagem de aço de baixo carbono é utilizado geralmente o  $\text{CO}_2$  como gás de proteção. O material de adição deve conter aproximadamente cerca de 1,0% de Si e 1,4% de Mn, para obter-se uma satisfatória desoxidação da solda.

Do ponto de vista metalúrgico, os depósitos de solda com proteção de  $\text{CO}_2$  são de qualidades satisfatórias. O conteúdo de microescória ( $\text{SiO}_2$ ) é pequeno, resultando em muitos bons valores de impacto, frequentemente comparáveis com aqueles obtidos com eletrodo básico. (1).

Quando se solda especialmente com argônio ou mistura (75% Ar e 25%  $\text{CO}_2$ ) dois princípios diferentes podem ser usados. Se usa-se altas amperagens, o material de adição é transferido da ponta do eletrodo para a poça em forma de aerosol. Este princípio é chamado de soldagem a "arco spray" e é usado para soldagem de chapas espessas devido a sua alta aplicação de calor. Quando por outro lado, a corrente é baixa e o comprimento do arco é mantido pequeno (tensão do arco 15 a 24 V), as gotas na ponta do eletrodo curto circuitarão o arco periodicamente e serão separadas pela força "pinch" e transferidas para a poça de fusão. O sistema é chamado de soldagem por "curto-circuito". Neste tipo de soldagem, a frequência do curto-circuito geralmente é de 50 a 100 por segundo. Devido a alta frequência do curto-circuito, o arco arde apenas por curtos períodos, o que resulta em menor aplicação de calor no material de base. O método "curto-circuito" é portanto bem adaptado para soldagens de chapas menos espessas. Há ainda a transferência por gotejamento que ocorre em baixa intensidade de corrente e tensão elevada, mas não é comumente utilizada, devido a não uniformidade do cordão e pouca penetração.

As principais vantagens do processo MIG/MAG podem ser resumidas do seguinte modo:

- a) o consumo de metal de adição é alto; devido a altas densidades de corrente;
- b) não há perdas de tempo em troca de eletrodo, uma vez que, o eletrodo é contínuo;

- c) a solda é isenta de escória o que elimina o tempo necessário para removê-la; e,  
 d) o processo é de aplicação fácil e gasta-se pouco tempo para treinar o soldador.

As desvantagens quando comparado com a soldagem manual são:

- a) o equipamento é mais caro;  
 b) não existe grande variedade de arame-elétrodo no mercado nacional; e,  
 c) o cordão de solda, por não ficar encoberto por escória, - sofre uma velocidade de resfriamento mais alta.

O diagrama na figura 1.11 mostra esquematicamente os componentes do equipamento MIG/MAG. O equipamento consiste uma fonte de energia que normalmente é um retificador com propriedades elétricas especiais, um sistema de suprimento de gás, um sistema alimentador do arame-elétrodo e uma pistola de soldagem. Por vezes é necessário um sistema de refrigeração a água.

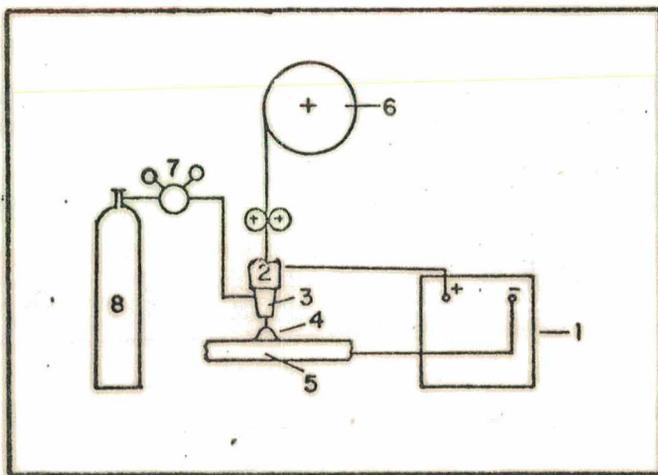


Fig. 1.11 - Esquema dos componentes básicos do equipamento MIG-MAG. 1- fonte de energia; 2- pistola de soldagem; 3- bico; 4- arco voltaico; 5- peça obra; 6- bobina de arame; 7- regulador de pressão; - 8- garrafa de gás.

Para o levantamento dos dados neste trabalho, utilizou-se o processo MIG/MAG automático, muito embora, na prática, seja comumente utilizado de forma semi-automática. No processo automático pode-se pesquisar experimentalmente, mantendo constantes os parâmetros de soldagem, fazendo registros automáticos e assim consegue-se se interpretar melhor a influência de cada variável de soldagem no processo.

O equipamento utilizado para os levantamentos neste trabalho constou de uma fonte de energia do tipo de tensão constante e um cabeçote alimentador de arame, ambos da marca Carl Cross (fig.1.12).

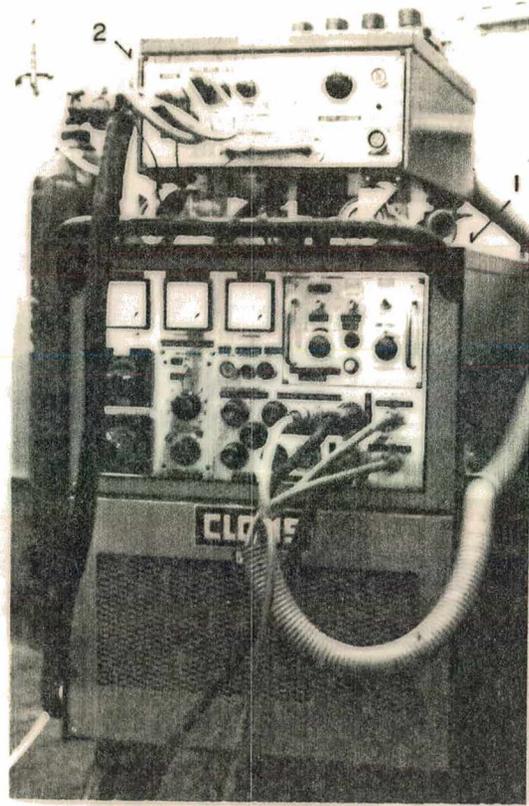


Fig. 1.12 - 1- fonte de energia e  
2- cabeçote alimentador  
de arame marca Carl Cross.

A característica estática da fonte é mostrada na figura 1.13, tais tipos de fontes prestam-se muito bem para soldagens automáticas e semi-automáticas, nas quais o eletrodo 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 determinado instante, em resposta, a tensão decresce 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 de Velocidade de Fusão" ou "Controle Interno" e nele, o dispositivo de alimentação do arame-elétrodo não altera sua velocidade ao longo da soldagem. Observa-se ainda que, a mudança de característica estática se dá de uma forma escalonada.

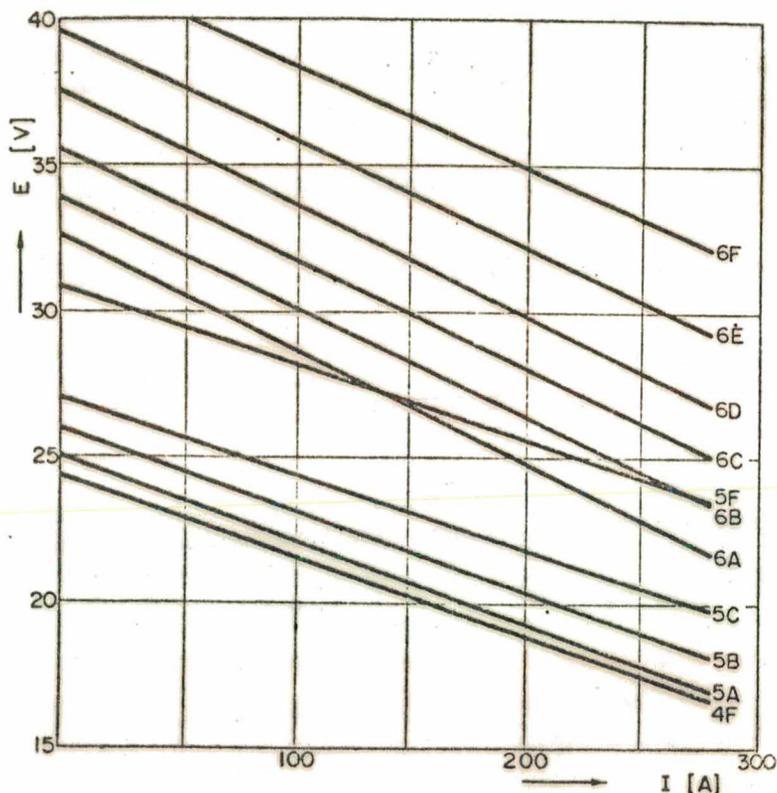


Fig. 1.13 - Curvas características estáticas da fonte de energia para a soldagem MIG/MAG marca Carl Cross tipo GLC 303 PA/3.

A figura 1.14 mostra o equipamento de soldagem semi-automática MIG/MAG, montada de uma forma automática com auxílio de um dispositivo automático, que consiste de uma tartaruga motorizada acoplada a pistola de soldagem.

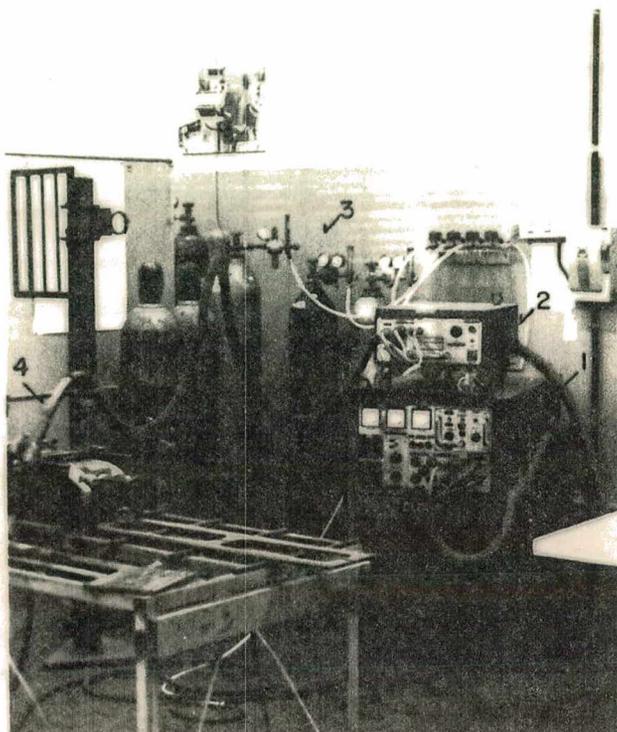


Fig. 1.14 - Equipamento da soldagem MIG/MAG: 1- fonte de corrente; 2- sistema de alimentação do arame; 3- sistema de suprimento de gás e 4- dispositivo automático.

#### 1.4- SOLDAGEM AUTOMÁTICA COM ELÉTRODO TUBULAR (ARAME ÔCO)

Um elétrodo tubular consiste de um tubo preenchido com um fluxo que cumpre as seguintes funções:

- a) proteger o arco voltaico da ação de ar;
- b) criar uma atmosfera mais ionizável;
- c) desoxidar o material de base e a solda (ação de fluxo);
- d) formar uma escória durante a soldagem, como uma proteção contra influências atmosféricas e para melhorar a aparência da solda; e
- e) introduzir os necessários elementos de liga para corrigir a composição química da solda.

Básicamente, as principais funções do revestimento no elétrodo do revestido, se repetem neste caso.

Existem duas variantes básicas no processo de soldagens com

arame tubular:

- a) com fluxo adicional de gás, geralmente  $\text{CO}_2$  (fig. 1.15); e
- b) com arco auto-protegido (elétrodos auto-geradores de gás).

No primeiro caso, o fluxo investido tem fundamentalmente a função de desoxidante e introdutor de liga. As funções de proteção do arco voltaico e de criação de atmosfera mais ionizável ficam mais a cargo do gás introduzido à parte. No segundo caso, o fluxo investido deve cumprir todas estas funções, pois não se usa o gás externo de proteção.

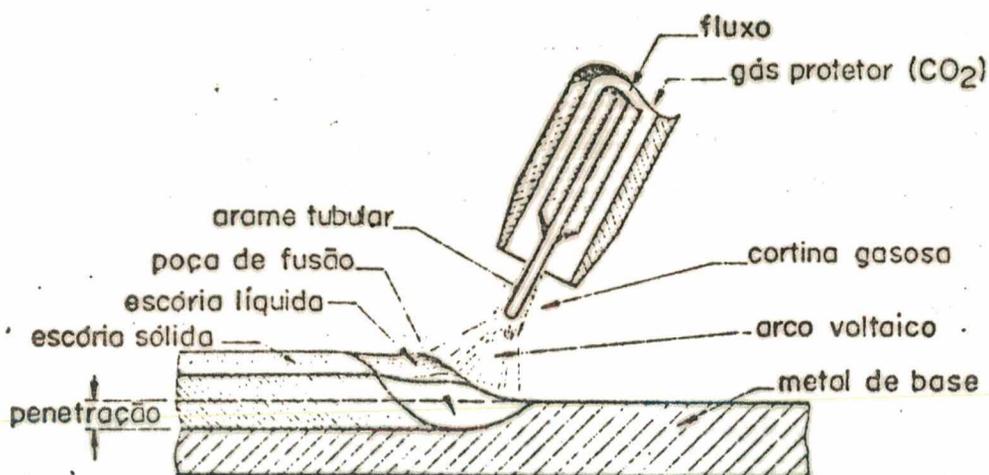


Fig. 1.15 - Arco de arame tubular protegido por gás.

O arame tubular tem a vantagem de poder ser bobinado e, como acontece com os processos MIG e MAG, a soldagem pode ser automática ou semi-automática.

Obtém-se assim, substancial economia, pois ficam eliminadas as perdas de tempo e material nas trocas de elétrodos, como ocorre com elétrodos revestidos. Com arame tubular auto-protegido (sem irrigação de gás) há ainda a vantagem adicional de se dispensar qualquer proteção contra o vento, tal como acontece com o uso de elétrodos revestidos, o que é vantajoso em relação aos processos que usam arco regado a gás. Obtém-se ainda maior consumo de eletrodo do que com elétrodos revestidos, porque pode-se trabalhar com maiores densidades de correntes. Devido ao alto consumo do eletrodo obtém-se elevada produção de material de adição. Tratando-se de processo automático ou semi-automático, trabalha-se com elevados fatores de carga. Todavia, devido a grande formação de fuma

ças, aconselha-se trabalhar sob condições de boa ventilação. Em soldagens em ambientes fechados convém utilizar exaustão localizada próxima do arco.

Para obtenção dos dados experimentais usou-se o processo de forma automática, com o seguinte equipamento:

- a) cabeçote alimentador de arame da Lincoln Electric Company NA - 3N (fig. 1.16);
- b) fonte de energia da S.A White Martins (fig. 1.17);

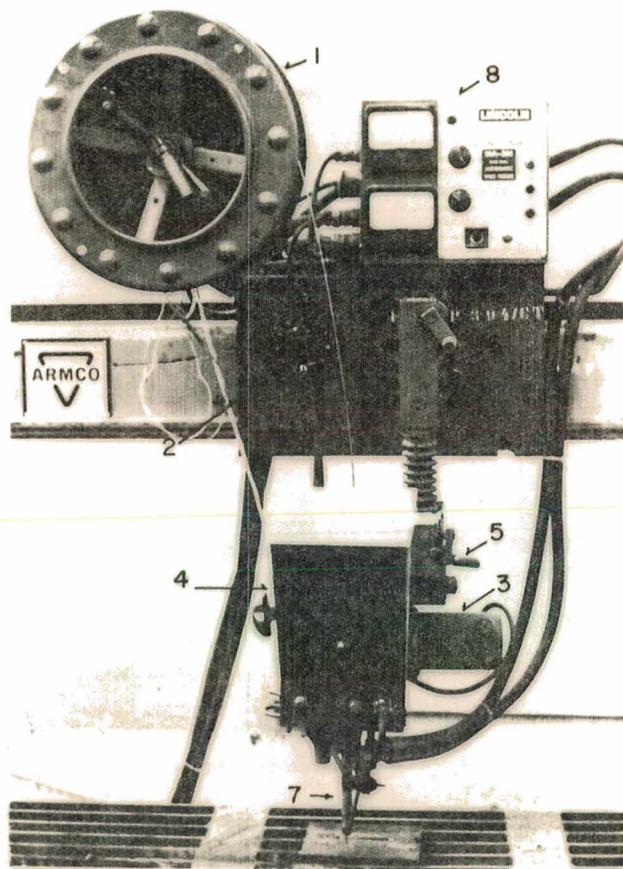


Fig. 1.16 - Cabeçote de soldagem de Lincoln Elétric; NA - 3N: -  
 1- carretel de arame eletrodos; 2- variador de velocidade de soldagem; 3- sistema acionador de arame eletrodo; 4- depósito de fluxo (para o processo arco submerso); 5- sistema de ajuste horizontal da pistola de soldagem; 6- sistema de 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).

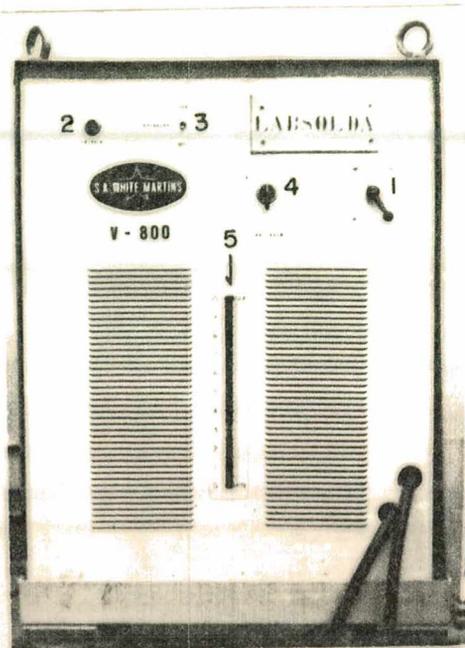


Fig. 1.17 - Fonte de energia S.A. White Martins V-800: -  
 1- chave energisadora da fonte; 2- lâmpada in-  
 dicadora de funcionamento; 3- chave de comando -  
 do ventilador de refrigeração; 4- chave de varia-  
 ção da característica estática da fonte; 5- indi-  
 cador da característica estática.

A fonte de energia (fig. 1.17), composta basicamente de um transformador-retificador que fornece uma alimentação em corrente contínua. Possui característica estática do tipo tensão constante a qual pode-se regular continuamente (fig. 1.18).

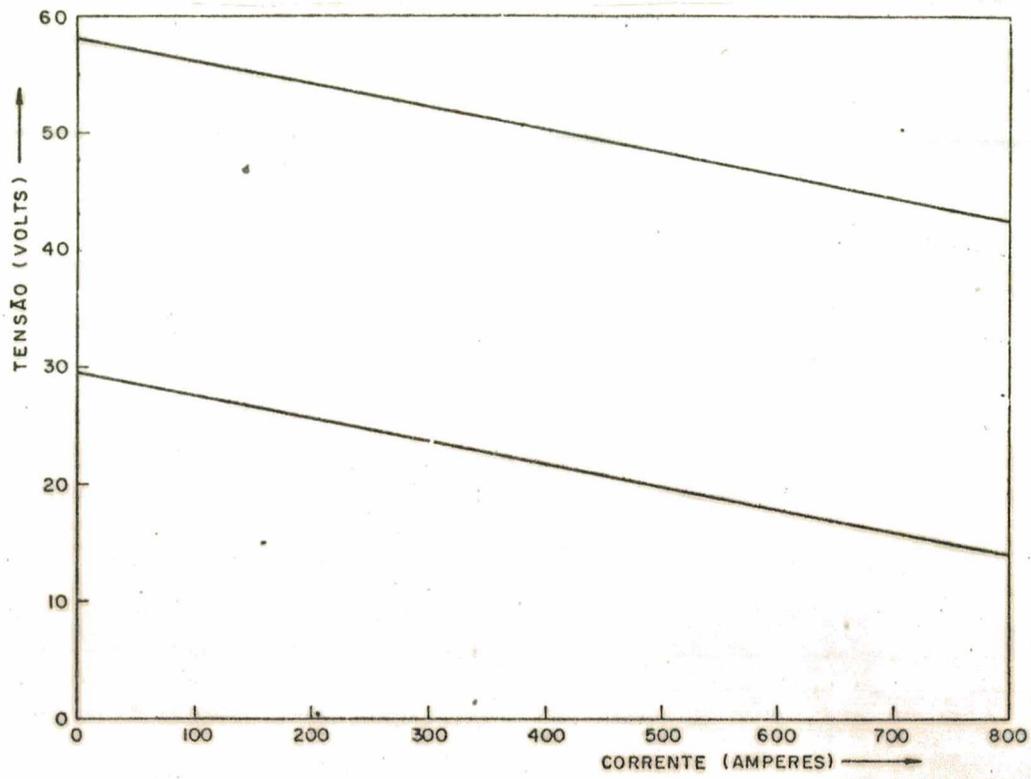


Fig. 1.18 - Curva de característica estática da fonte de energia da S.A. White Martins, V-800.

Na unidade de controle do cabeçote há um painel externo - (fig. 1.19), no qual pode ser comandado principalmente o ínico e térmico do ciclo de soldagem com controle de velocidade de alimen tação do arame, e portanto, da corrente.

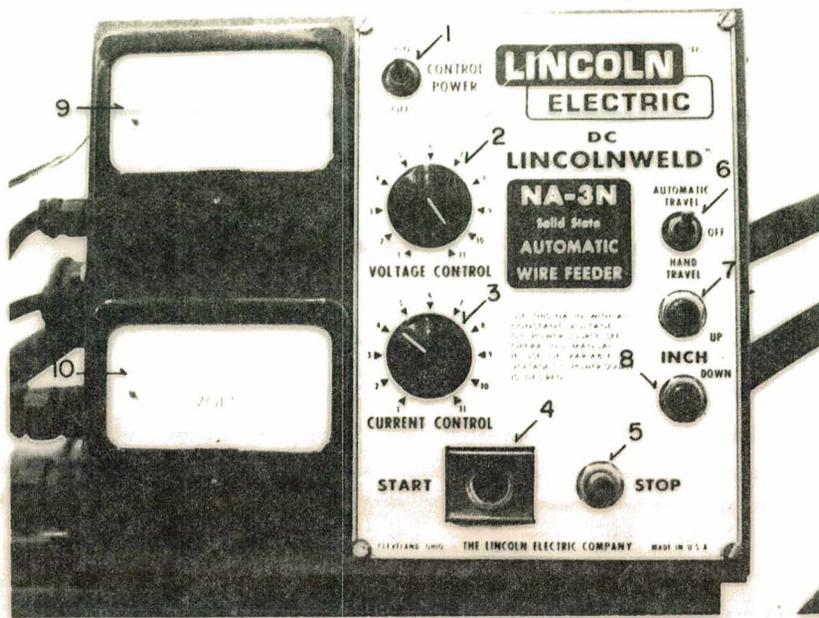


Fig. 1.19 - Painel externo da unidade de controle com os seguintes comandos: 1- controle "liga-desligue", 2- seletor de característica estática (tensão); 3- controle de velocidade de arame (corrente); 4- comando do início do ciclo de soldagem; 6- comando do tipo de trabalho: semi-automático e automático; 7- comando para subir o eletrodo; 8- comando para descer o eletrodo; 9- amperímetro; 10- voltímetro.

Ressalva-se que o cabeçote utilizado não está utilizando uma fonte de energia adequada, que seria da mesma marca: "Lincoln Electric", e sim uma adaptação com a fonte da S.A. White Martins. Assim, alguns dos comandos do cabeçote estão desativados, tal como o seletor 2 da figura 1.19 que ajustaria a característica estática da correspondente fonte de energia.

Há ainda, um controle adicional (fig. 1.20 - painel interno) na qual se seleciona.

- a) velocidade de alimentação do arame com arco apagado (seletor 3 na figura 1.20), o que possibilita um acendimento - de arco numa velocidade mais adequada, como também para a aproximação e afastamento do eletrodo ao metal de base (botão 7 e 8 da figura 1.19);
- b) controle do tempo de alimentação para uma respectiva velocidade de alimentação de arame, no início e final da sol

- dagem (dispositivo 1 e 2 na figura 1.20), o que possibilita um enchimento de cratera no final de soldagem;
- c) controle do tempo de extinção do arco sem alimentação de eletrodo (seletor 4 na figura 1.20) que possibilita também o enchimento de cratera. Este comando entra em funcionamento após o controle descrito no item b.

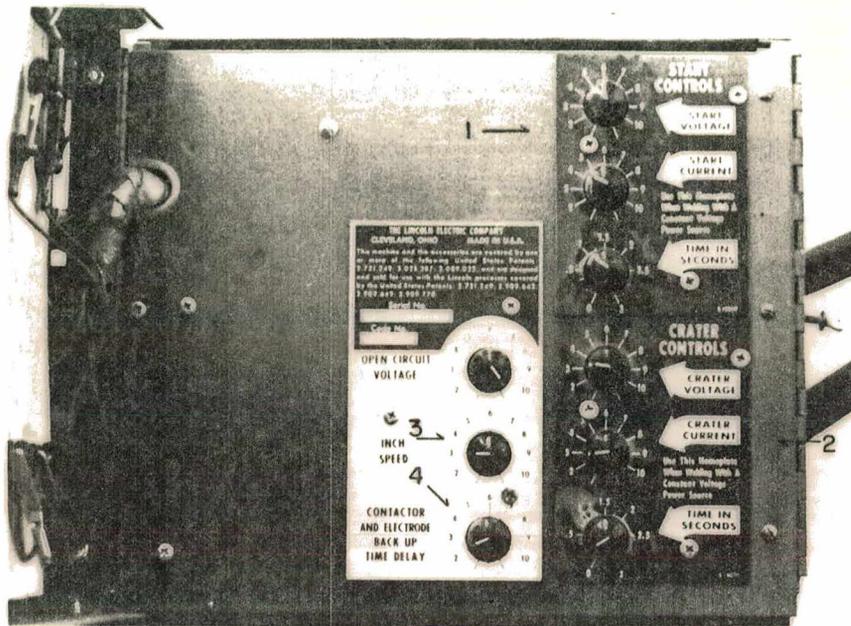


Fig. 1.20 - Painel interno da unidade de controle com os seguintes componentes: 1- dispositivo de controle de início de soldagem; 2- dispositivo de controle de final de soldagem; 3- controle de velocidade de alimentação para o arco apagado.

Ressalva-se aqui, também, que todos os seletores de características estáticas, ou seja, controle de tensão, estão desativados pelo motivo da imperfeita correspondência das características da fonte de energia e do cabeçote.

### 1.5 - SOLDAGEM AUTOMÁTICA A ARCO SUBMERSO (ARAME MACIÇO).

"Arco Submerso" é um processo de soldagem por fusão, no qual a energia necessária é fornecida por um arco (ou arcos) desenvolvido entre a peça-obra e um eletrodo (ou eletrodos) consumível, continuamente alimentado à região da soldagem.

Este arco arde dentro de uma camada de fluxo granular que se

funde parcialmente, formando uma escória líquida que sobrenada na poça metálica fundida, protegendo-a da ação contaminadora da atmosfera. Imediatamente após a solidificação metálica, da mesma forma como ocorre na soldagem manual com elétrodos revestidos, essa escória solidifica-se sobre o cordão de solda, evitando um resfriamento demasiadamente rápido.

Tem sido usado na indústria, há cerca de 40 anos, e as características básicas construtíveis deste processo de soldagem são bem conhecidas (fig. 1.21).

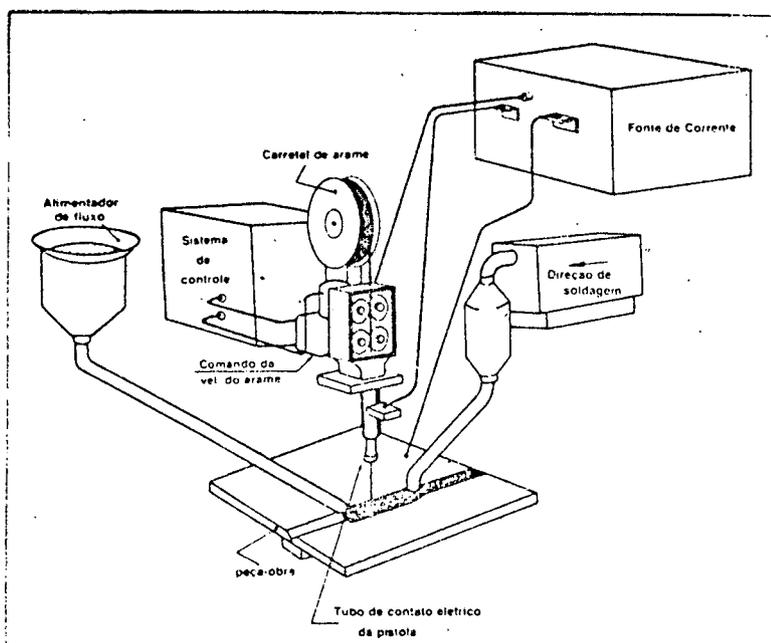


Fig. 1.21 - Unidades componentes do sistema a arco submerso.

A soldagem a arco submerso pode ser automática ou semi-automática, e a principal aplicação é em soldagem de construção pesada em aços doce ou baixa liga, com alguma extensão é também usado para soldagem de altas ligas (por exemplo aços inoxidáveis) e para acabamento ou enchimento. As aplicações são certamente, determinadas pelas vantagens e desvantagens do método.

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; e

b) A penetração é grande, o que, além de cooperar para aumentar ainda mais a velocidade de soldagem, pode évitar 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.

Tem, no entanto, desvantagens, sendo as principais as seguintes:

- 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; e
- c) Impossibilidade de soldar juntas de difícil acesso.

Apresenta ainda, desvantagens referente a problemas econômicos devido ao alto custo do equipamento.

Com a soldagem à arco submerso o conflito entre qualidade e produtividade é pronunciado, conforme tabela 1.1. Um fluxo básico usado em soldagens de multipasses resulta em alta qualidade, mas a produtividade é baixa. Um fluxo neutro usado na técnica de dois passes dá uma alta produtividade, mas uma modesta qualidade de solda. Atualmente não é possível achar combinações que combinem alta qualidade e alta produtividade (1).

Mesmo que a soldagem à arco submerso, com a técnica de dois passes, não preencha as mais altas exigências de qualidade, esta técnica é de qualquer forma satisfatória em muitas aplicações, e é portanto surpreendente que este método de soldagem não tenha ainda uma aplicação mais generalizada. A explicação residiria nos problemas econômicos inerentes a este processo.

O equipamento de soldagem a arco-submerso é caro e além disso é pesado, o que dificulta o movimento de um lado para outro. - Portanto, é difícil de obter o alto grau de utilização que é necessário para obtenção de uma boa economia.

No levantamento de dados experimentais para o estudo deste processo, utilizou-se o mesmo equipamento do processo a arame tubu

lar, trocando apenas o arame e acionando o dispositivo de alimen-  
tação de fluxo.

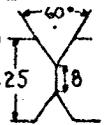
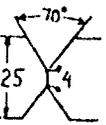
Junta			
Fluxo	OK 10:80 (neutro)	OK 10:61 (básico)	
d (mm)	6,0	4,0	
I (A)	925	600	
Vs em cada passe(cm/min)	43	50	
Vs equiva- lente(cm/min)	21,5	16,6	
Charppy V (Joule)	0°C	50	120
	-20°C	30	90

Tabela 1.1- Propriedades de impacto e  
velocidade de soldagem no  
processo a arco submerso,

## 2 - INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM SOBRE O CONSUMO E PRODUÇÃO DO ELÉTRODO

### 2.1 - INTRODUÇÃO

Aqui mostrar-se-á a influência da tensão, corrente, polaridade, atmosfera de proteção, altura de tomada de corrente e diâmetro do eletrodo, no consumo e na produção.

Já foram delineadas as vantagens e desvantagens de cada processo em estudo. Assim, procura-se agora mostrar as principais características operacionais como subsídio para a seleção de parâmetros e processos de soldagem.

### 2.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO DO CONSUMO E PRODUÇÃO

Para o estudo do consumo e produção determinou-se as curvas de isoconsumo e isoprodução, que são curvas nas quais o consumo e produção se mantem constantes, e são traçadas sobre um diagrama cartesiano, tendo na ordenada, a tensão em volts e na abcissa, a corrente em amperes. As primeiras, (isoconsumo) por estarem diretamente relacionadas com a velocidade de alimentação do arame, quando são sobrepostas às curvas de características estáticas da fonte, evidenciam o par "tensão-corrente" de soldagem. As segundas, (isoprodução) se diferenciam das primeiras porque informam sobre o material que foi de fato inserido na solda, descontando as perdas por salpicagem e outras. Essas curvas independem da fonte de energia, sendo porém dependentes do eletrodo (composição e bitola), do metal de base, do tipo de atmosfera ionizante, tipo de corrente e polaridade. A explicação das curvas é muito difícil por que envolvem uma série de variáveis independentes, e em cada processo a situação básica se modifica, de forma que não se tem um comportamento rígido. Procurou-se na medida do possível dar explicações plausíveis.

As duas maiores fontes de calor que contribuem para a realização da soldagem são:

1. O calor gerado no arco e suas conexões, uma das quais é o anodo e outra o cátodo.
2. O calor gerado pela resistência elétrica do eletrodo.

Experimentalmente constata-se que o consumo do eletrodo é

influenciado principalmente pela potência gerada na conexão do arco com o mesmo e pela potência gerada por efeito joule no próprio eletrodo. A potência gerada na conexão do arco com o material de base, assim como a potência gerada no plasma, pouco influi no consumo (2).

### 2.3 - MÉTODO DE MEDIÇÃO

As curvas de isoconsumo e isoprodução foram obtidas com auxílio de gráficos, obtidos experimentalmente, que fornecem a variação do consumo e produção com a corrente em tensões diferentes (anexo I). Assim, estabelecendo-se um valor de consumo e produção, pode-se determinar os correspondentes pares de tensão-corrente. Esses levantamentos foram feitos para os processos abaixo relacionados, com alguns parâmetros diferentes por serem inerentes aos mesmos.

#### - Eletrodo revestido

a) Tipo básico, Soldarc 18 - W.Martins (AWS E7018) CC<sup>+</sup>,  
E = 24 V , d = 3,25 mm

b) Tipo rutílico, armco A-13 (AWS E6013) CC<sup>+</sup>, E = 24 V,  
d = 3,25 mm

c) Tipo celulósico, ARMCO - FEETWELO 5P (AWS E6010) CC<sup>+</sup>,  
E = 24 V , d = 3,17 mm

- Arame tubular, ARMCO - NR 311 (AWS E60T7) CC<sup>-</sup>, E = 24 V,  
t = 25 mm , d = 2,38 mm

- Arco submerso (AWS EL12) CC<sup>+</sup>, E = 24 V , t = 37 mm ,  
d = 2,38 mm

#### 2.3.1 - Medida de Produção

A medida de produção se realiza através de pesagens e marcando-se o tempo de soldagem. Calcula-se com a seguinte expressão:

$$P = \frac{P_2 - P_1}{t}$$

onde:

P = produção em Kg/h

P<sub>1</sub> = peso do material de base

$p_2$  = peso do material de base e da solda  
 $t$  = tempo de soldagem

### 2.3.2 - Medida de Consumo

No processo arco submerso, arco descoberto protegido a gás e tubular auto-protegido, um arame contínuo é usado como elétrodo. O mesmo é alimentado automaticamente por um controle de regulação da velocidade de alimentação do arame, regulando assim o consumo. Para o caso do processo com arame tubular, tem-se a fórmula:

$$C = 0,06 \quad \rho \quad Va. \quad (\text{Kg/h})$$

onde  $Va$  = velocidade de alimentação do arame em m/min  
 $\rho$  = peso específico do elétrodo sem fluxo em g/m.

A velocidade de alimentação do arame é função da rotação do mecanismo de tração, que varia de acordo com o controle de regulação. Medindo-se essa rotação, determinaria-se a velocidade de alimentação e por conseguinte o consumo. Para tanto, foi utilizado um Tacodínamo acoplado ao mecanismo de tração (fig. 2.1). Esse instrumento fornece uma tensão proporcional a cada valor de rotação (fig. 2.2). A vantagem da medição do consumo por esse sistema, é que se pode registrar em um traçador de gráficos durante a soldagem.

Assim no caso do cabeçote utilizado, o consumo seria dado por uma fórmula dependente apenas do peso específico do arame a ser utilizado.

$$C = (1,1472111 E + 0,0010579) \rho$$

onde

$C$  = consumo em Kg/h  
 $E$  = tensão em volts  
 $\rho$  = peso específico em g/m

Para o processo arco submerso, por utilizar o mesmo cabeçote, usa-se o mesmo dispositivo acima na medição do consumo, como o elétrodo nesse caso é maço, a fórmula torna-se:

$$C = 40,45E + 0,037$$

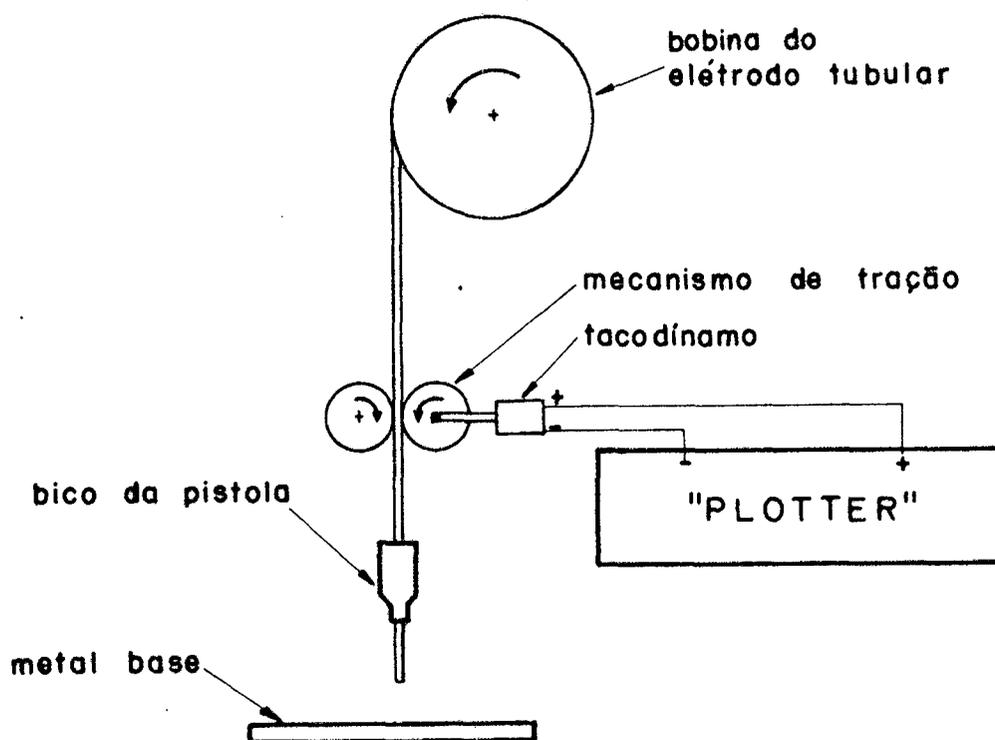


Fig. 2.1 - Esquema de registro da velocidade de alimentação.

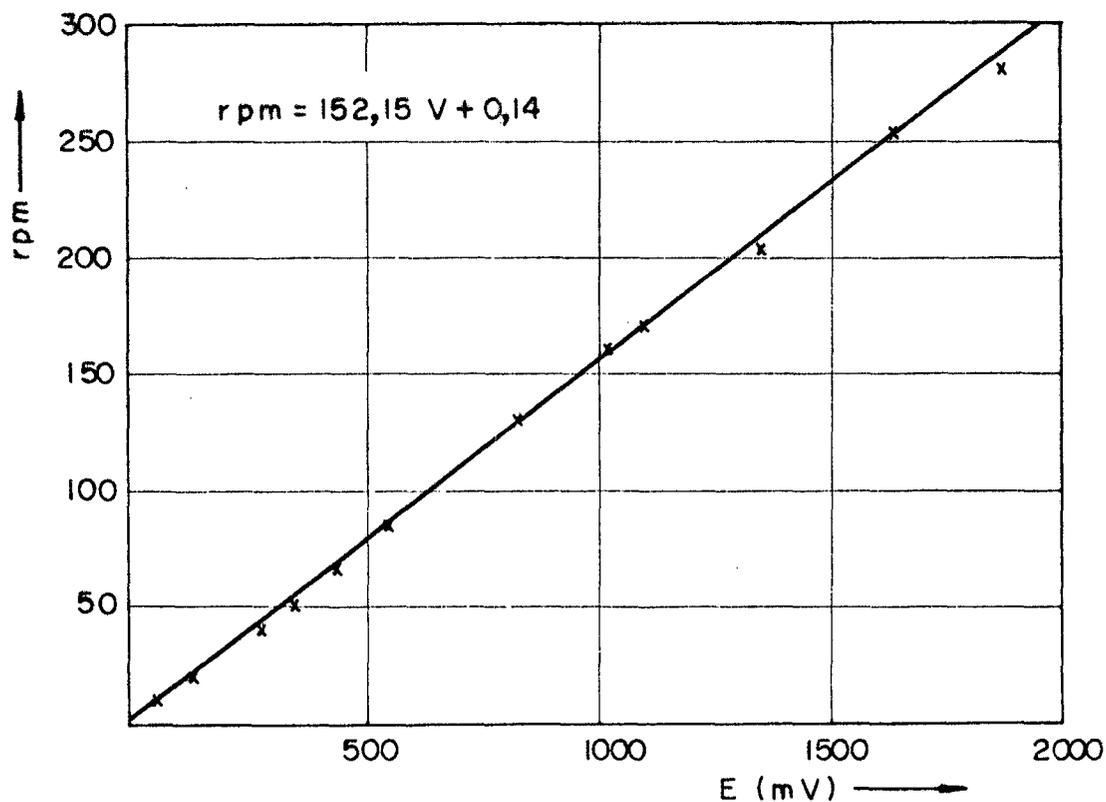


Fig. 2.2 - Variação da tensão do Tacodínamo em mV, com a rotação em RPM.

No processo com elétrodo revestido, utilizou-se a seguinte expressão:

$$C = 0,37 V_a d^2$$

onde

$C$  = consumo em Kg/g

$V_a$  = velocidade de alimentação em m/min

$d$  = diâmetro do elétrodo em mm<sup>2</sup>

Sendo que, a velocidade de alimentação, foi medida pela diferença entre o comprimento inicial e final do elétrodo sobre o tempo de soldagem

$$V_a = \frac{l_1 - l_2}{t}$$

onde

$l_1$  = comprimento inicial

$l_2$  = comprimento final

$t$  = tempo de soldagem

### 2.3.3 - Medição de Corrente

A medida da corrente é feita através de um traçador de gráfico (Plotter), para se obter um valor médio, pois sendo a fonte de tensão constante, qualquer inconstância no arco causará variações apreciáveis da corrente (fig. 2.3). O mesmo acontece com a tensão, que terá pequenas variações, podendo ser medida através de um voltímetro.

O sinal que entra no "Plotter", é uma tensão proporcional a passagem de corrente no "shunt" (resistência calibrada) do amperímetro do próprio cabeçote. Este sinal por ser de baixa tensão, força a utilização de escalas menores no Plotter, sendo mais sensíveis a sinais indesejáveis (ruídos), causando vibração na pena do Plotter, e conseqüentemente mascarando o resultado. Para eliminá-los teve-se a necessidade de utilização de filtros "passa-baixo", (fig. 2.4) que eliminam sinais de alta frequência, pois a frequência do sinal indesejável, ou seja, o sinal a ser medido, é de zero Hz, por ser de corrente contínua. Portanto qualquer sinal com frequência superior, será um sinal indesejável.

No entanto a utilização de filtros passa-baixo mais rigoro-

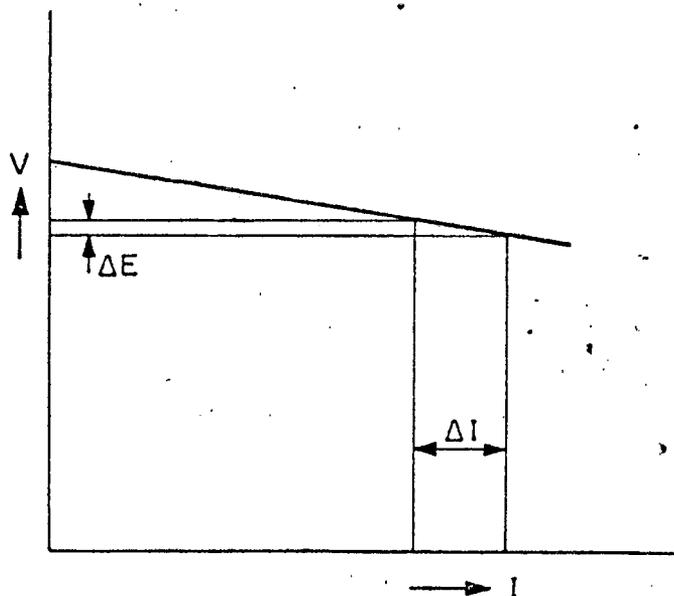


Fig. 2.3 - Característica estática da fonte de corrente tipo tensão constante

tos, aumenta o tempo de resposta do traçador de gráficos. No caso de variações contínuas do valor do sinal, acontecerá que a defasagem da resposta mascarará o resultado. Por esse motivo, procurou-se utilizar filtros com tempo de respostas pequenos e além disso, não se fez registros contínuos e sim ponto a ponto.

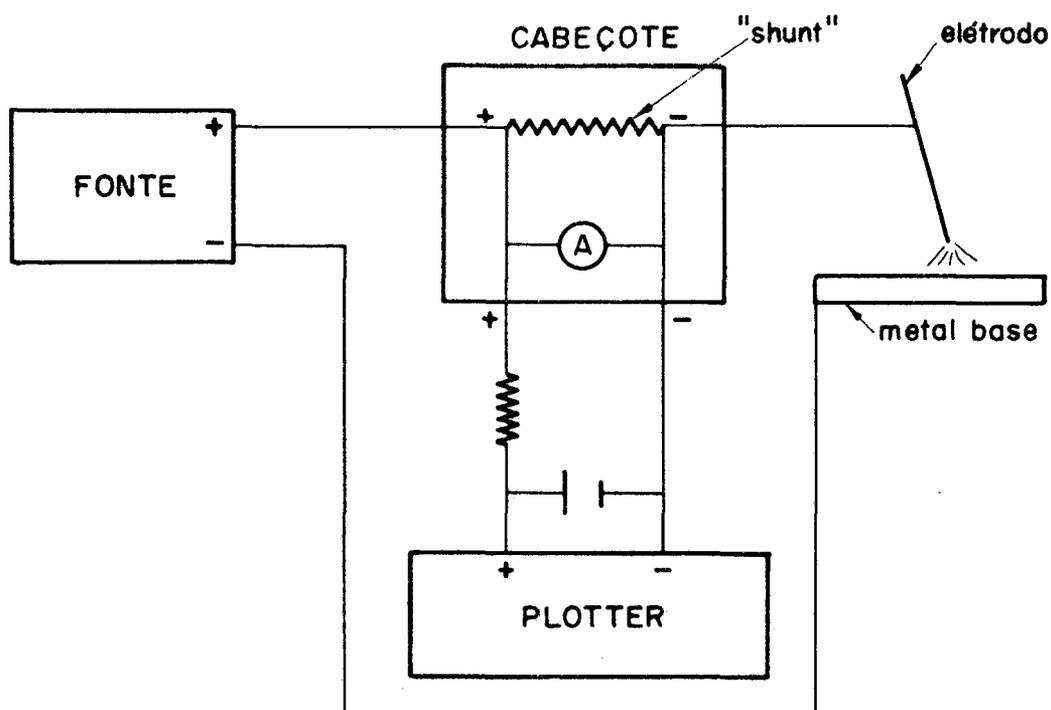


Fig. 2.4 - Esquema de registro da corrente.

#### 2.3.4 - Medição de Tensão

Deve ficar bem claro, onde começa e onde termina a fonte de energia, em outras palavras, deve-se convencionar se a fonte inclui os cabos condutores ou não. Neste trabalho a fonte exclui o seu cabo de alimentação, uma vez que a tensão de soldagem foi medida no voltímetro da própria fonte. Ressalta-se, neste caso, que para saber-se a verdadeira tensão do arco, deve-se subtrair daquela tensão, as perdas nos cabos condutores, conexão e no elétrodo.

## 2.4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 2.4.1 - Processo Arame Tubular Auto-Protegido

A figura 2.5 apresenta as curvas de isoconsumo e isoprodução. Observa-se que a corrente possui uma grande influência no consumo, pois quanto maior a corrente maior será o consumo, e que a tensão possui pouca influência, sendo mais significativa em maiores correntes, onde o consumo cresce com o aumento da tensão. Isso se deve ao fato que em correntes maiores o comprimento

do arco é pequeno, melhorando o rendimento térmico, e por conseguinte influenciando o consumo.

O rendimento de deposição fica em torno de 89%. Nota-se que o rendimento de deposição é aproximadamente constante com o aumento de corrente, sofrendo um ligeiro decréscimo na tensão de 20 V.

A figura 2.6 mostra a influência do parâmetro "t" no consumo. Como a tensão é constante, o comprimento de arco também será, para uma mesma corrente. Assim obtém-se consumos mais elevados com maiores comprimentos de eletrodo, o que é mais acentuado quanto maior for o valor de corrente. Devido ser a geração do calor por efeito "Joule", ao longo do comprimento do eletrodo, um dos fatores que influenciam o consumo do eletrodo, então com maiores comprimentos de eletrodos e corrente esse efeito será maior, portanto, aumentando mais o consumo.

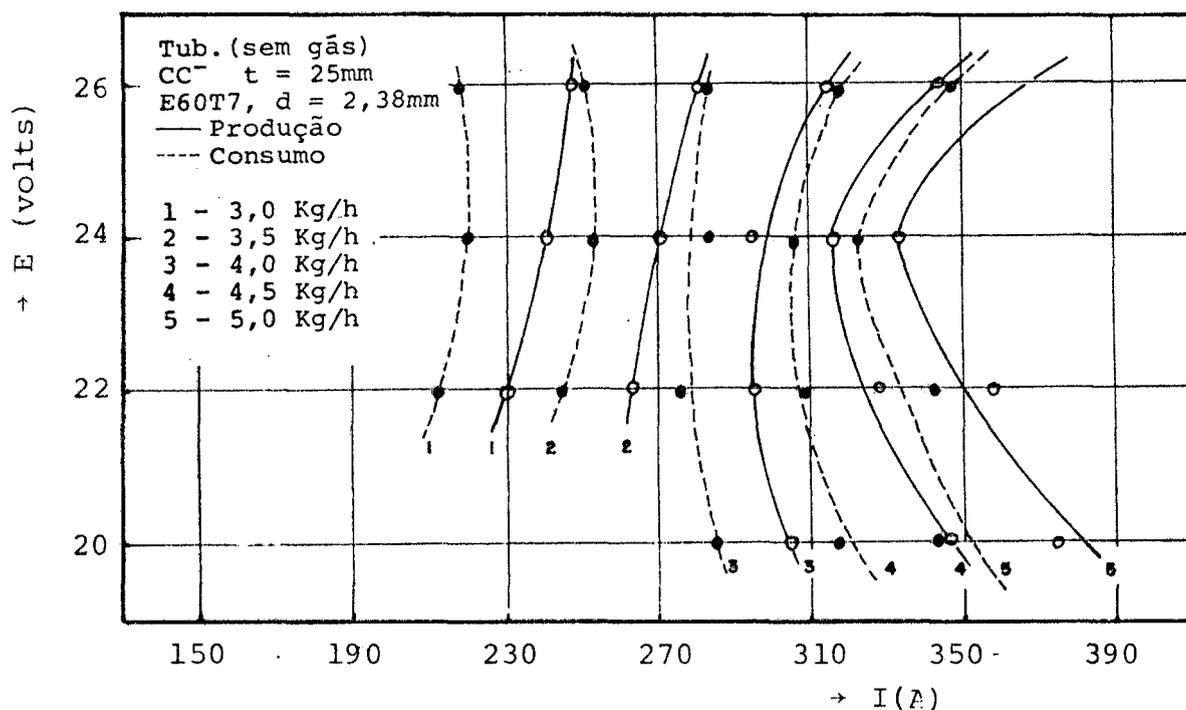


Fig. 2.5 - Curvas de isoconsumo e isoprodução para arame tubular.

Em um gráfico de curvas de isoconsumo (fig. 2.7), com o aumento do valor de t as curvas tendem para a esquerda, no sentido de menor corrente. Ou seja, necessita-se de menos energia para obter-se o mesmo consumo com valores de t superiores, isto ocorre com ambas polaridades.

Para polaridade direta obtém-se um maior consumo do que na

polaridade inversa (fig. 2.8). E sobrepondo as curvas de isoconsumo (fig. 2.7), nota-se que o efeito se acentua com o aumento do valor de  $t$ .

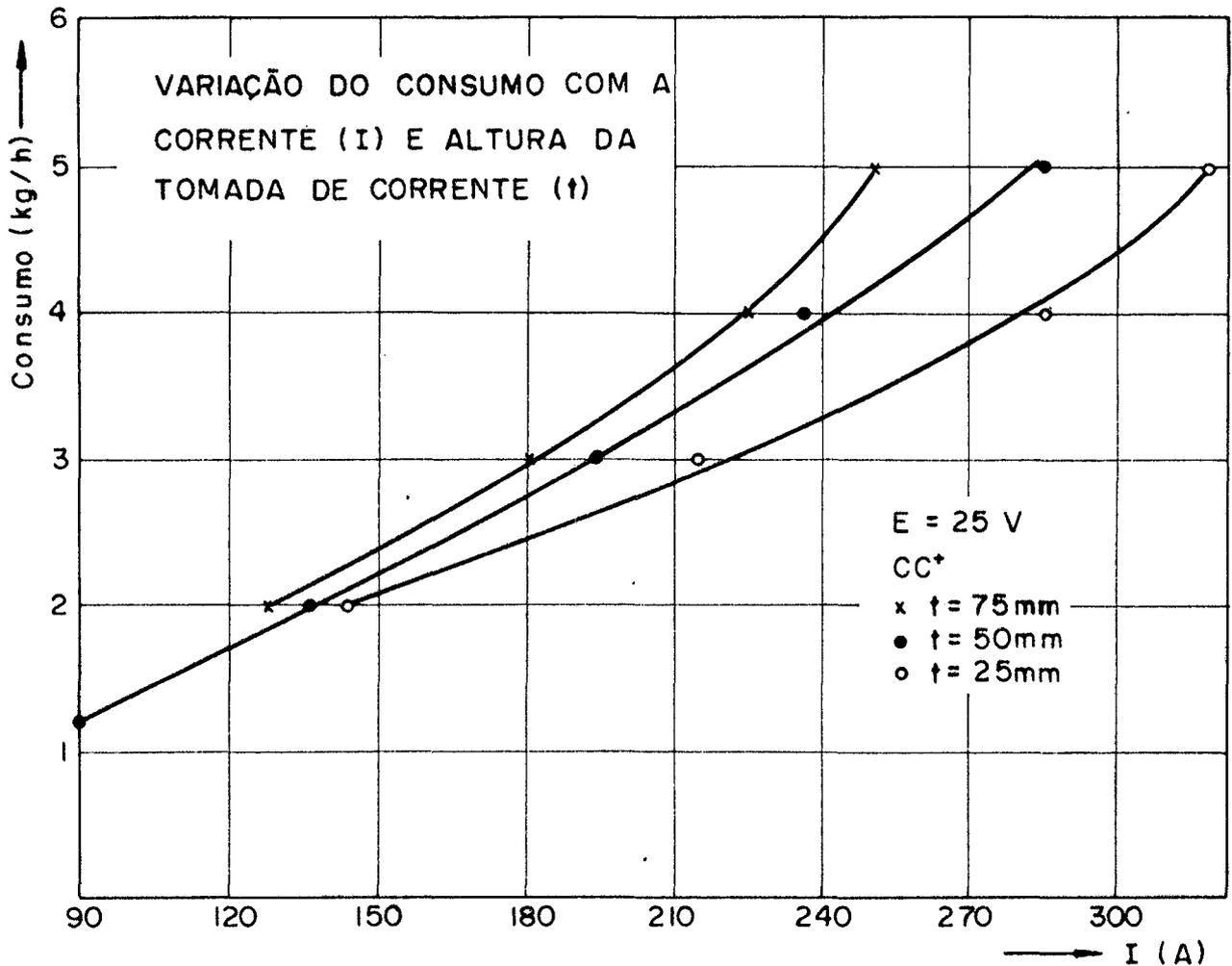


Fig. 2.6 - Variação do consumo com a corrente (I) e altura da tomada de corrente.

Uma explicação plausível foi tentada sobre o maior consumo obtido em CC<sup>-</sup> do que em CC<sup>+</sup>. A figura 2.9 ilustra as configurações de um arco para um arame nũ em atmosfera inerte e mostra que em cada caso o arco está uniformemente distribuído no anodo enquanto no catodo se move erráticamente. Em CC<sup>+</sup> pelo comportamento estável e o bombardeio de elétrons no qual o polo positivo está sujeito há ebulição e evaporação da ponta do eletrodo formando pequenas gotas sobreaquecidas. Enquanto que em CC<sup>-</sup>, devido ao foco do catodo não se manter em um ponto fixo, há a formação de gotas maiores, aplicando a maior parte do seu calor sobre o eletrodo sólido, aumentando assim o consumo (3).

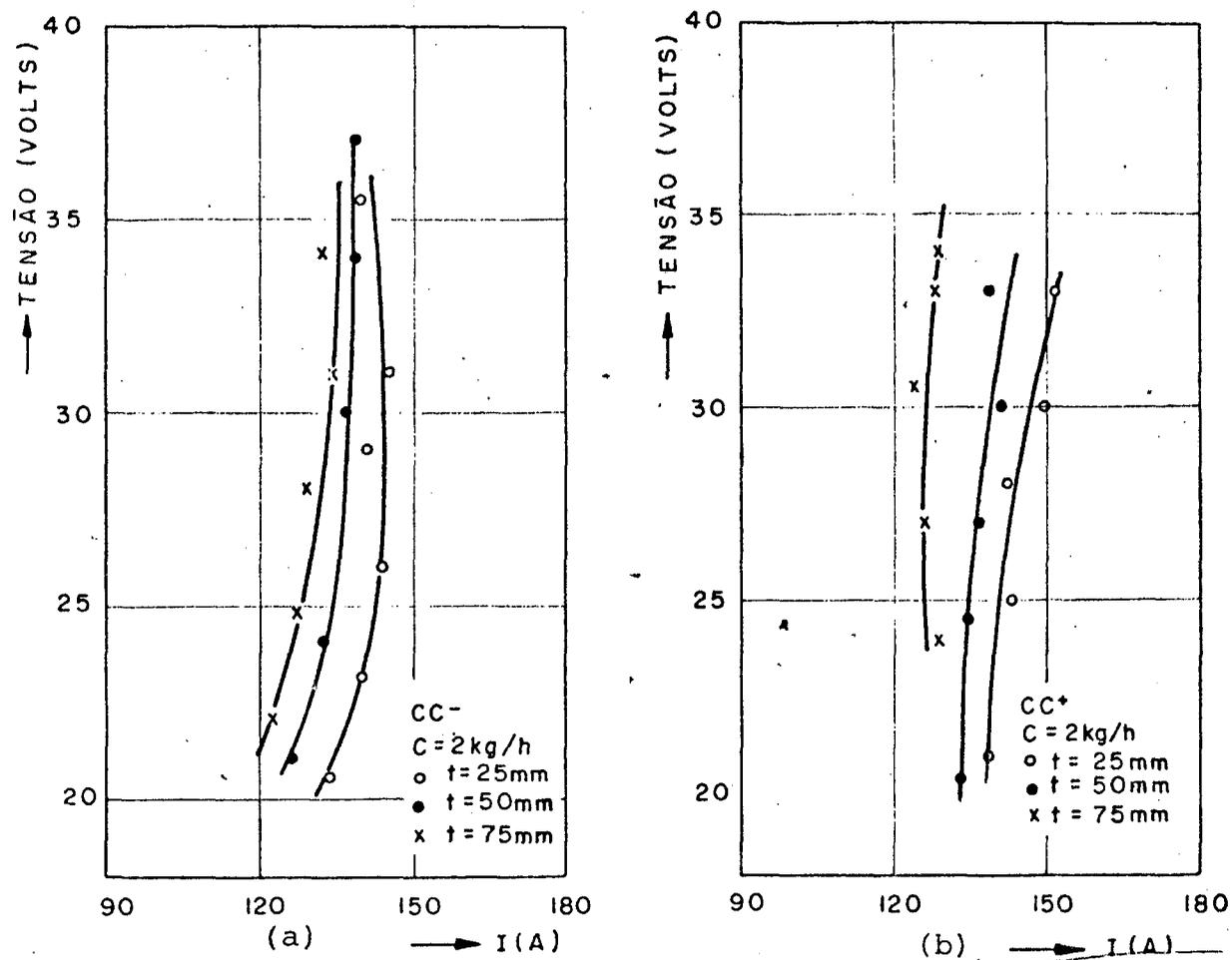


Fig. 2.7 - Variação da curva de isoconsumo com a mudança de altura de tomada de corrente para eletrodo E60T7 em CC<sup>-</sup> (a) e CC<sup>+</sup> (b).

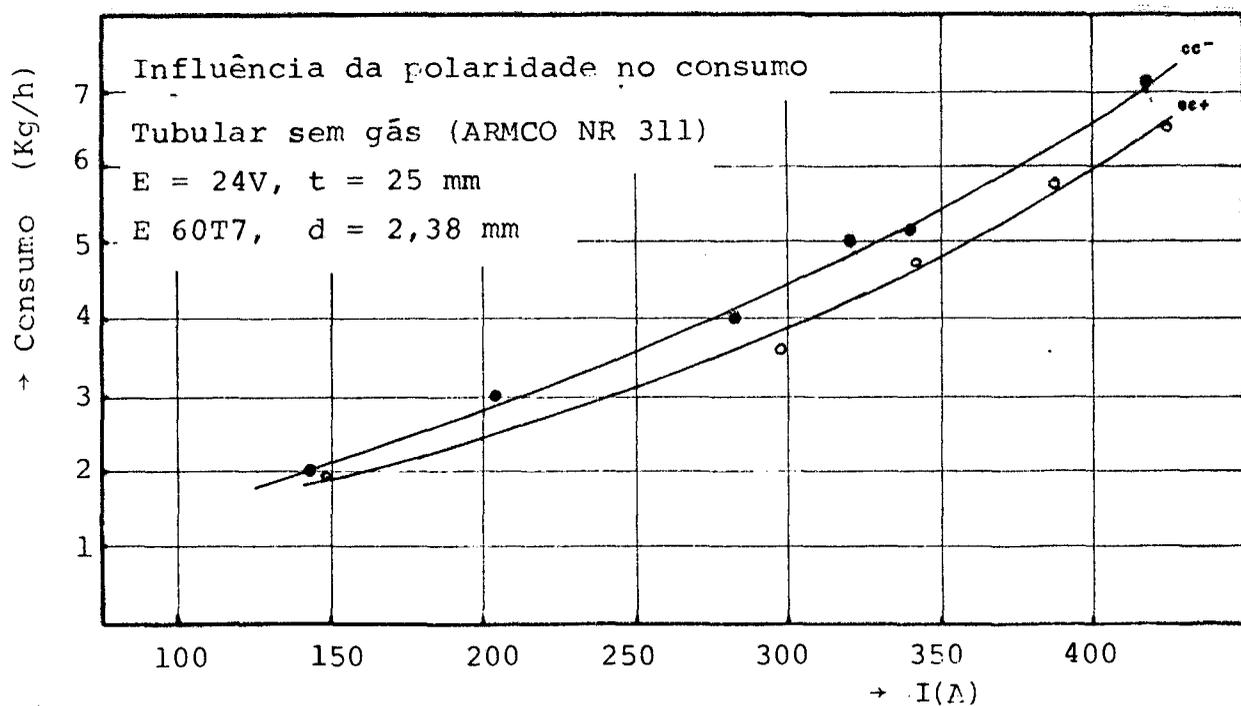


Fig. 2.8 - Variação do consumo com corrente em polaridade diferente.

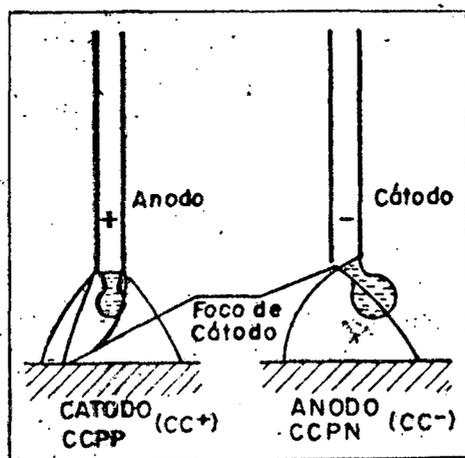


Fig. 2.9 - Características da forma do arco, em baixas intensidades de corrente em  $CC^+$  e  $CC^-$

Uma outra explicação (4), se deve ao fato do gradiente de potencial na área do catodo ser sensivelmente maior que o correspondente na área do anodo, portanto deve ter-se mais energia no catodo, o que explicaria o maior consumo em  $CC^-$ .

Pelo exposto, o maior consumo em  $CC^+$  será devido tanto ao fato do foco catódico errático quanto ao do maior gradiente potencial no cátodo.

#### 2.4.2 - Processo Arco Submerso

Para este processo apresenta-se somente as curvas de isoconsumo (fig. 2.10). Pela característica do arco ser submerso, não haverá perda por salpicagem, e sim em combinação com o fluxo, com rendimento em torno de 95%. Como se vê na figura 2.10, a corrente apresenta significativa influência no consumo, o mesmo não acontecendo com a tensão.

Nas curvas de 6 Kg/h e 8 Kg/h, nota-se que, ao longo da curva de isoconsumo, com a diminuição da tensão diminui a corrente. Uma explicação razoável pode ser tentada em termos qualificativos tendo-se em vista que a velocidade de fusão sobre uma mesma curva é constante, teoricamente a corrente deveria aumentar para que a quantidade de energia permanece-se a mesma, e assim, a mesma quantidade do eletrodo continua-se a ser consumido. Como a corrente diminui, ocasiona-se um decréscimo na energia gerada. Sabe-se, por outro lado, que sendo constante o consumo do eletrodo, também

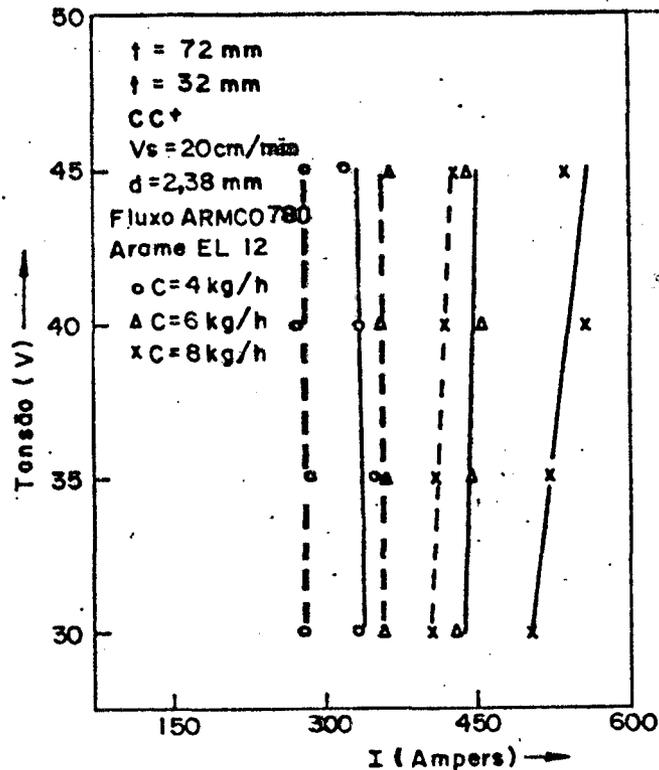


Fig. 2.10 - Curva de isoconsumo para arco submerso

o é a energia dispensada para fundi-lo em qualquer ponto. Fica evidenciado, então, que outras parcelas de energia são diminuídas em favor da manutenção da energia para fundir o arame. Uma destas parcelas é a perda para a fusão do fluxo e material de base, a qual varia de acordo com o comprimento do arco, que por sua vez é função da tensão aplicada. Quando o comprimento do arco se altera, varia a tensão do arco, porque a queda na coluna chamada de tensão no plasma, modifica-se, por ser muito dependente do comprimento do arco. Entretanto as quedas de voltagem no anodo e no cátodo podem permanecer constantes, conseqüentemente, o comprimento do arco e a queda de tensão na coluna do plasma deverão ter menor influência sobre o consumo. E essa influência aumenta com menores comprimentos do arco. Isto ocorre em correntes elevadas. O que explica a inclinação das curvas de 6 e 8 Kg/h. Já na curva de 4 Kg/h, praticamente não teve nenhuma influência. Por isto afirmou-se inicialmente que o consumo depende apenas do calor gerado no próprio eletrodo e na sua conexão com o arco. O calor gerado no comprimento do arco e na sua conexão com a peça não contribuem de uma forma significativa para o consumo do eletrodo.

A figura 2.11 ilustra a variação do consumo do eletrodo com a corrente nas duas polaridades mantendo-se constante a tensão. Observa-se que com a polaridade direta ( $CC^-$ ) obtém-se maior consumo, o que equivale a dizer, tendo em vista que o rendimento de deposição é alto, maior produção de material de adição para a solda. Todavia, observa-se uma maior instabilidade do arco com a polaridade direta que vai diminuindo a medida que a corrente aumenta. Este fato, segundo Mantel (3), é devido a erraticidade da mancha catódica e formação de grandes gotas metálicas. Na polaridade inversa a transferência do metal se efetua em gotas menores, atingindo-se o aerosol com facilidade.

Também serão válidas para o processo arco submerso, as hipóteses explicativas dadas no processo a arame tubular, para o maior consumo em  $CC^-$ , onde, o fato se deve ao fenômeno do foco de cátodo errático e a existência de um maior gradiente de potencial no cátodo do que no ânodo.

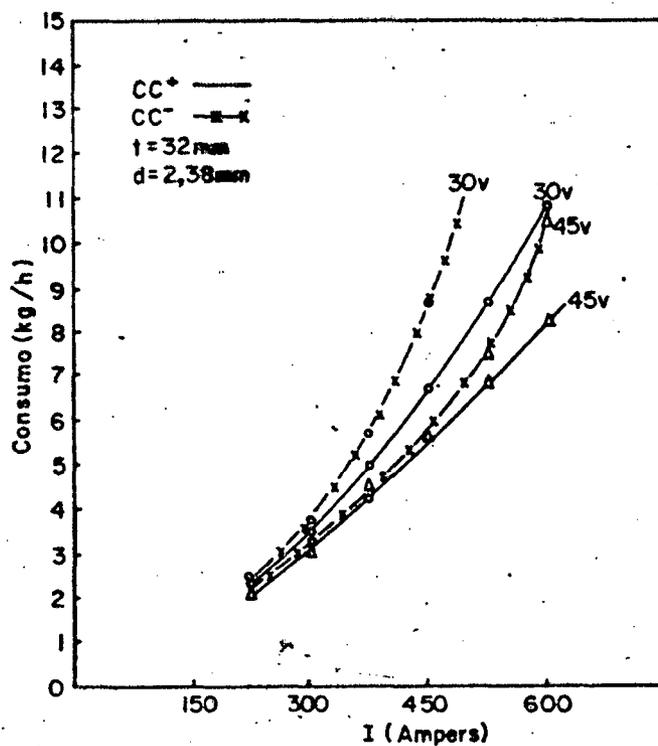


Fig. 2.11 - Influência da polaridade no consumo do eletrodo.

A figura 2.12 mostra a variação do consumo do eletrodo com a distância de tomada de corrente em intensidades diferentes de corrente. Observa-se o aumento da influência do valor de "t" no consumo com o aumento da corrente. Pode-se ainda vislumbrar, que,

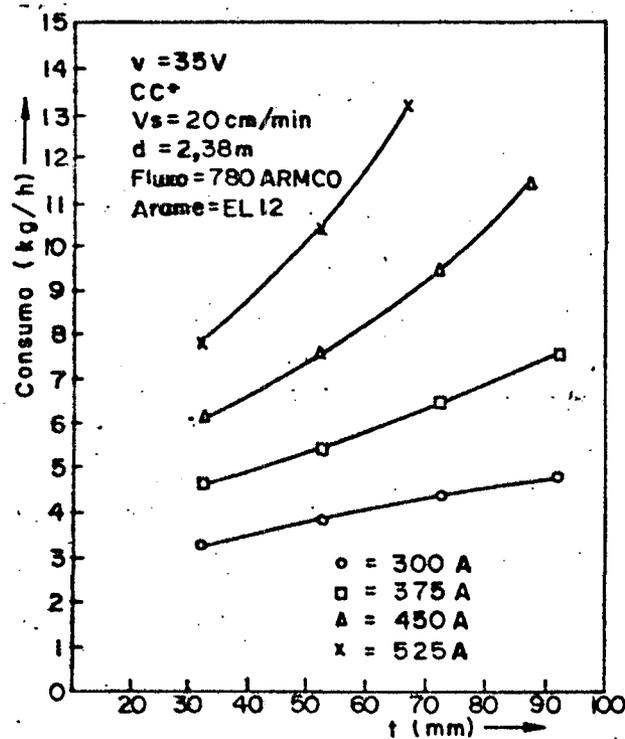


Fig. 2.12 - Variação do consumo com a altura de tomada de corrente (t) e corrente

com o aumento do valor de "t", as curvas de isoconsumo tendem na direção de menor corrente.

#### 2.4.3 - Processo MIG e MAG

Neste processo, além da influência da corrente, polaridade e distância de tomada de corrente no consumo, foram consideradas ainda a dependência do arame eletrodo (tipo e bitola) e sobretudo da atmosfera de proteção.

A corrente, polaridade e altura de tomada de corrente apresenta o mesmo comportamento mostrado nos processos anteriores, guardando as devidas proporções para cada processo.

Os resultados experimentais para argônio puro e  $\text{CO}_2$  (5), válidos para arame E70S-3 de 1,0 mm de diâmetro, indicam que para qualquer potência da fonte, o  $\text{CO}_2$  apresenta um maior consumo que o argônio. Este fato porém vale para o eletrodo que tem a composição indicada, já que a mesma influi muito no consumo. Com eletrodo de aço com composição diferente encontram-se campos nos quais o argônio pode apresentar maior ou igual consumo que o  $\text{CO}_2$ .

Como se vê para o elétrodo E70S-6, de 1,2 mm de diâmetro (fig. 2.13), trabalhando a 25 volts, verificou-se que o tipo de gás de proteção, pouco altera o consumo do mesmo, desde que mantida a mesma corrente, a mesma polaridade e comprimento do elétrodo (6). Nota-se também, que com a mudança de polaridade, a diferença é evidente conforme já foi dito, a polaridade direta oferece um maior consumo de elétrodo.

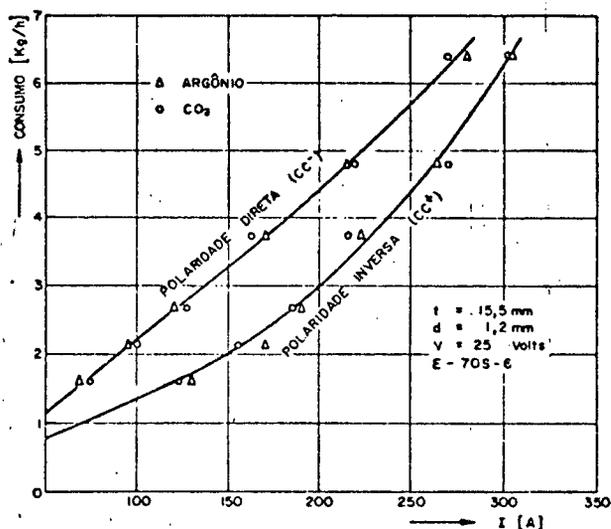


Fig. 2.13 - Variação do consumo do elétrodo E70S-6 com a corrente para argônio e CO<sub>2</sub> em ambas as polaridades.

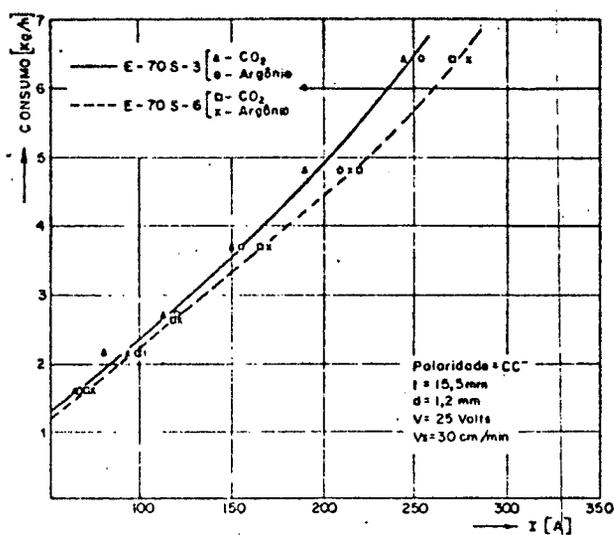


Fig. 2.14 - Variação do consumo dos elétrodos E70S-3 e E70S-6 com a corrente de argônio e CO<sub>2</sub>

Todavia mudando-se a composição do elétrodo (fig. 2.14) a diferença é evidente. O elétrodo E70S-3 produz maior consumo que o E70S-6 em uma mesma corrente, isso é devido a diminuição do teor de silício e manganês, que chega a dar um aumento na ordem de 20% no consumo do elétrodo a 240 A e polaridade inversa (6).

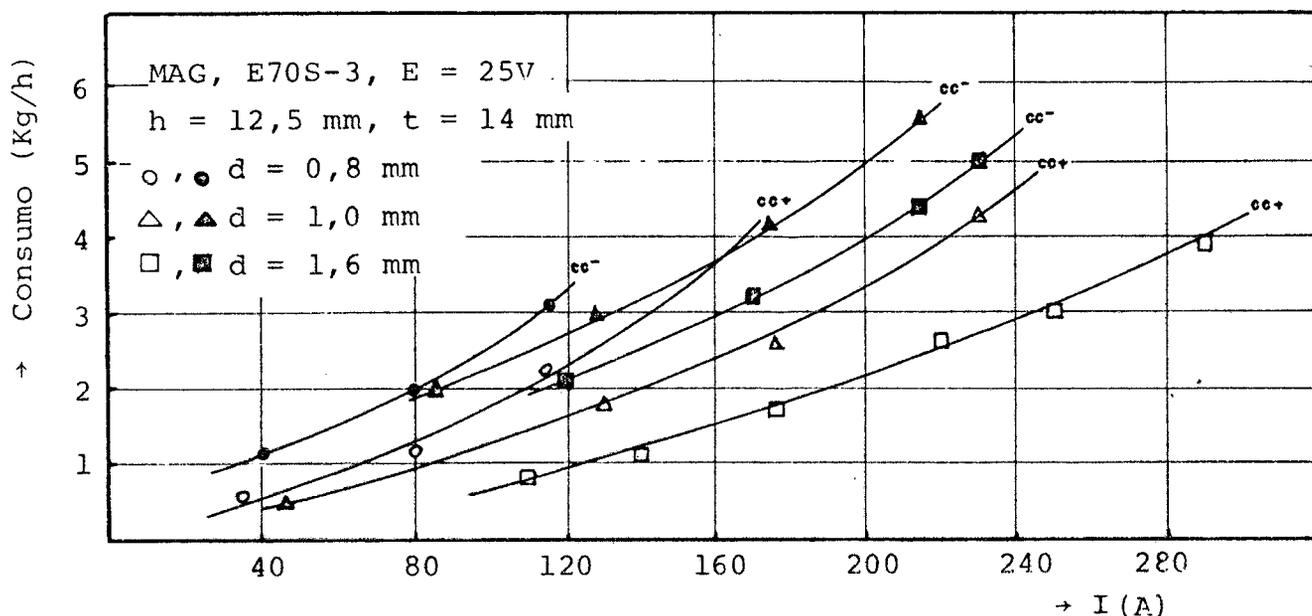


Fig. 2.15 - Variação do consumo com a corrente (I) e diâmetro do elétrodo (d), e polaridade (CC<sup>+</sup> e CC<sup>-</sup>).

O diâmetro do elétrodo tem uma significativa influência no consumo, como pode-se ver na figura 2.15. A medida que o diâmetro do elétrodo "d" decresce obtém-se um maior consumo numa mesma corrente e que se acentua com a mudança de polaridade. Mas com o aumento do diâmetro, torna-se possível trabalhar com correntes mais elevadas podendo-se obter consumos mais elevados do que os obtidos com diâmetros inferiores. Esses fatos estão relacionados pela parcela de calor gerada por efeito Joule, na resistência elétrica do elétrodo, que é proporcional a  $\rho l \frac{I^2}{d^2}$ . Pode-se então afirmar que para uma mesma corrente o consumo varia linearmente em relação a  $1/d^2$ .

Para uma mesma corrente, maior será a queda de potencial para o elétrodo mais fino do que em elétrodos mais grossos. Isto leva a pensar que para manter idênticos comprimentos de arco numa corrente comum, necessita-se de ter uma tensão mais elevada para o elétrodo mais fino (vide gráfico hipotético na fig. 2.16). Com

esse aumento de tensão é proporcional a resistência do eletrodo, acredita-se que os eletrodos mais finos possuem uma curva de característica estática de arco de forma mais acentuada, enquanto que os eletrodos mais grossos, de forma mais branda.

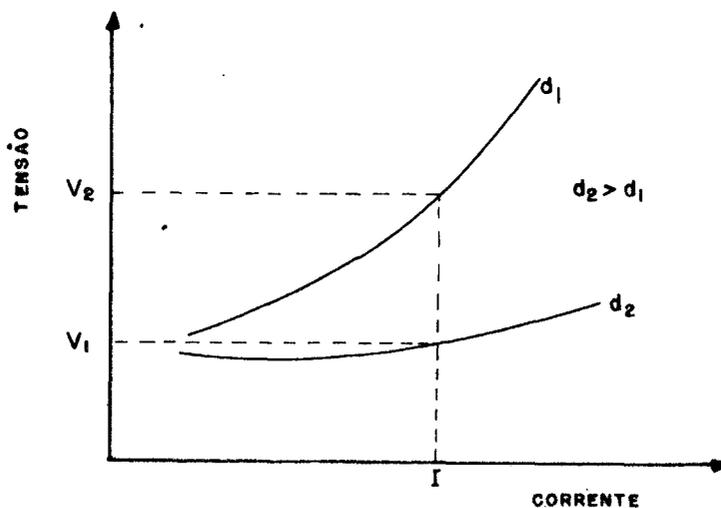


Fig. 2.16 - Gráfico hipotético de curva de característica estática de arco, com diâmetros de eletrodos diferentes.

Este fato explica o limite físico para os eletrodos mais finos em altas correntes, pois necessitam de tensão elevada para o estabelecimento de um comprimento de arco adequado para a soldagem, o que é verificado na prática quando em tensão mais baixas, a imposição de altas correntes estabelece comprimento de arcos tão pequenos, que fazem com que o eletrodo se choque com a peça obra, impossibilitando a soldagem. O mesmo não acontece com eletrodo um pouco mais grosso em idêntica condição, que por ter um comportamento mais branda na curva de característica estática de arco, possibilita-o de almejar mais valores de corrente.

Por outro lado o baixo consumo dos eletrodos grossos, em correntes baixas, leva-o a instabilidade do arco, pois o mecanismo de manutenção do arco voltaico, para o caso de fonte de tensão constante, com a qual em geral os processos automáticos se utilizam, consiste na constância do comprimento do arco, através do aumento da fusão do eletrodo, caso haja variação no comprimento do arco. Assim com um baixo consumo, o estabelecimento do comprimento do arco se processa de forma mais lenta, o que ocasiona a

instabilidade do arco e por esse motivo os elétrodos finos conseguem mais estabilidade do arco em correntes baixas.

Em adição a variação do diâmetro do eletrodo, tem-se a variação da altura de tomada de corrente, que por variar também a resistência do eletrodo, terá o mesmo efeito, visto anteriormente, no comportamento do arco.

#### 2.4.4 - Processo com Eletrodo Revestido

Em soldagem comum, usando eletrodos revestidos, a corrente elétrica é aplicada em uma das extremidades do eletrodo, por meio de um alicate, e o arco é formado entre a outra extremidade e a peça obra. Consequentemente o eletrodo torna-se mais curto quando se funde. Experiências de laboratório comprovam que existe uma correlação entre a energia de ionização, medida em eletrôn-volts, de vários materiais diferentes e os consumos de eletrodos revestidos com estes materiais (9). Embora baseados em observações assistemáticas, acredita-se poder generalizar dizendo que, para eletrodos revestidos, quanto maior for a energia de ionização da atmosfera do arco, com comprimentos iguais de arco, maior é o consumo do eletrodo, maior será também a frequência de passagens das gotas e menor será o diâmetro médio das mesmas. Por outro lado, é preciso que se considere também que a viscosidade e a tensão superficial da gota fundida também são importantes. A alta viscosidade e tensão superficial tendem a impedir a separação da gota e, com isto, a transferência de material, tornando necessária a utilização de correntes mais elevadas. De modo geral, quanto maior for o teor de gás dissolvido nas gotas, menores serão aquelas grandezas e, em consequência, maior será o consumo do eletrodo. Então, também, deste modo, o tipo de revestimento exerce a sua influência. Do exposto ocorre que tanto o consumo dos eletrodos como a produção de material são muito dependentes do revestimento. Para mostrar isto realizou-se experiências relativas à variação do consumo e da produção, com a corrente em diversas tensões para os revestimentos celulósico, rutílico e básico com pó de ferro, (figs. 2.17, 2.18 e 2.19).

Observa-se que, para os eletrodos de mesmo diâmetro, trabalhando na mesma faixa de corrente, o tipo rutílico apresenta maior produção que o tipo básico. Quanto ao tipo celulósico apresenta uma maior produção que ambos na tensão de 22 volts para uma mesma

corrente, o que se deve ao fato de possuir um diâmetro menor. Pois verificou-se que o elétrodo celulósico possui um consumo intermediário em relação aos outros dois, quando comparado com o mesmo diâmetro (2). O elétrodo básico necessita de correntes maiores para alcançar a mesma produção que o rutilico, mas atinge produções maiores porque permite a utilização de correntes mais elevadas.

Observa-se ainda que o rendimento de deposição diminui com o aumento da tensão. Uma explicação lógica é que com o aumento da tensão há o aumento da salpicagem diminuindo, portanto, o rendimento.

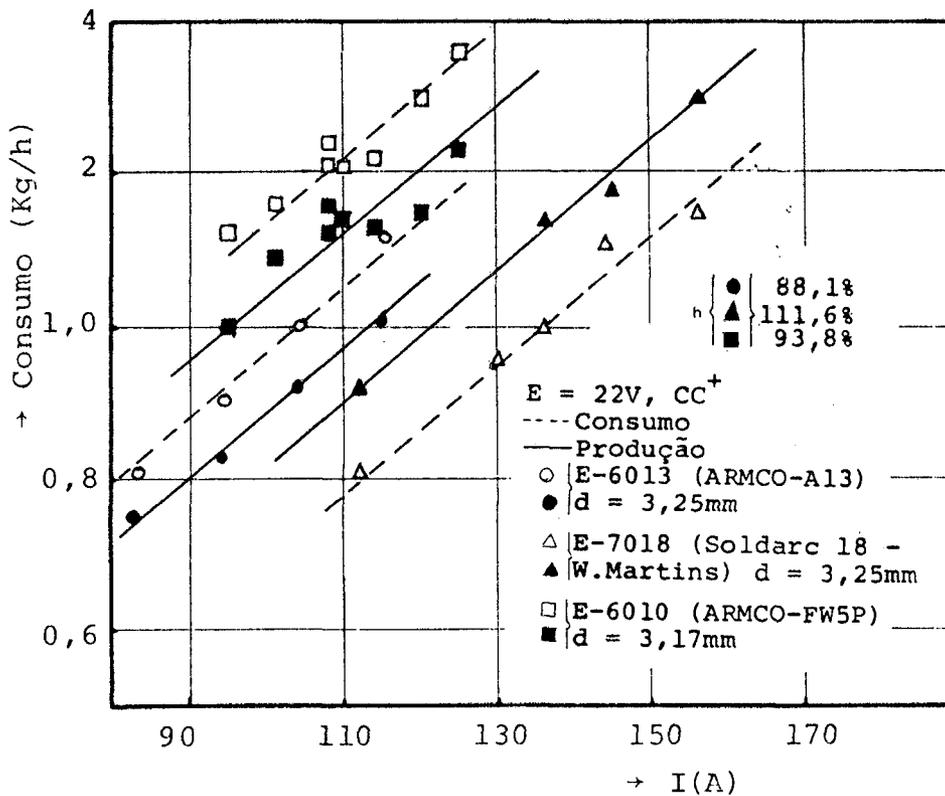


Fig. 2.17 - Variação do consumo com a corrente

O elétrodo do tipo celulósico apresentou com aumento da tensão, uma queda de rendimento mais drástica e na tensão de 22 volts, um rendimento superior aos demais tipos. Isso é explicado pela soldagem, ter-se realizado por arraste em condições de soldagem controlada.

Dos gráficos "consumo versus corrente" apresentados, fez-se as curvas de isoconsumo e isoprodução (fig. 2.20, 2.21 e 2.22).

Nota-se nas curvas de isoconsumo (fig. 2.20), para o processo com elétrodo do tipo rutilico, que a medida que a tensão dimi-

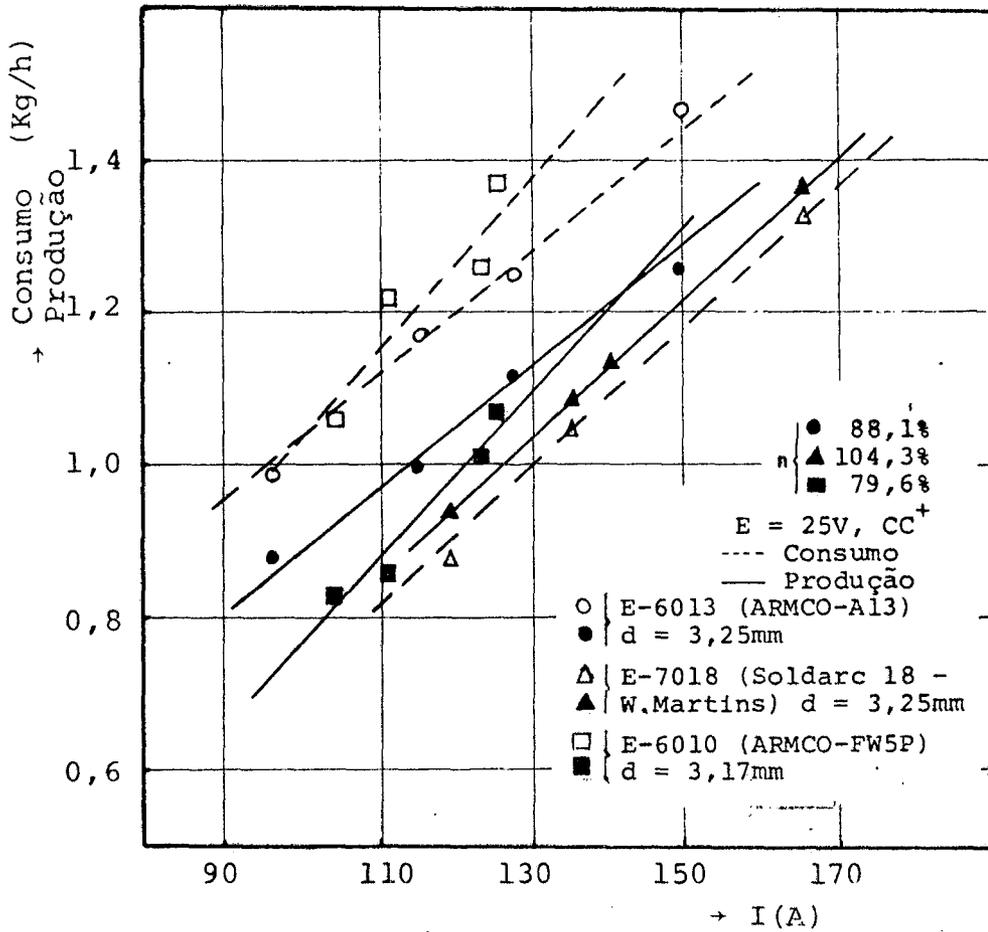


Fig. 2.18 - Variação de consumo com a corrente (I)

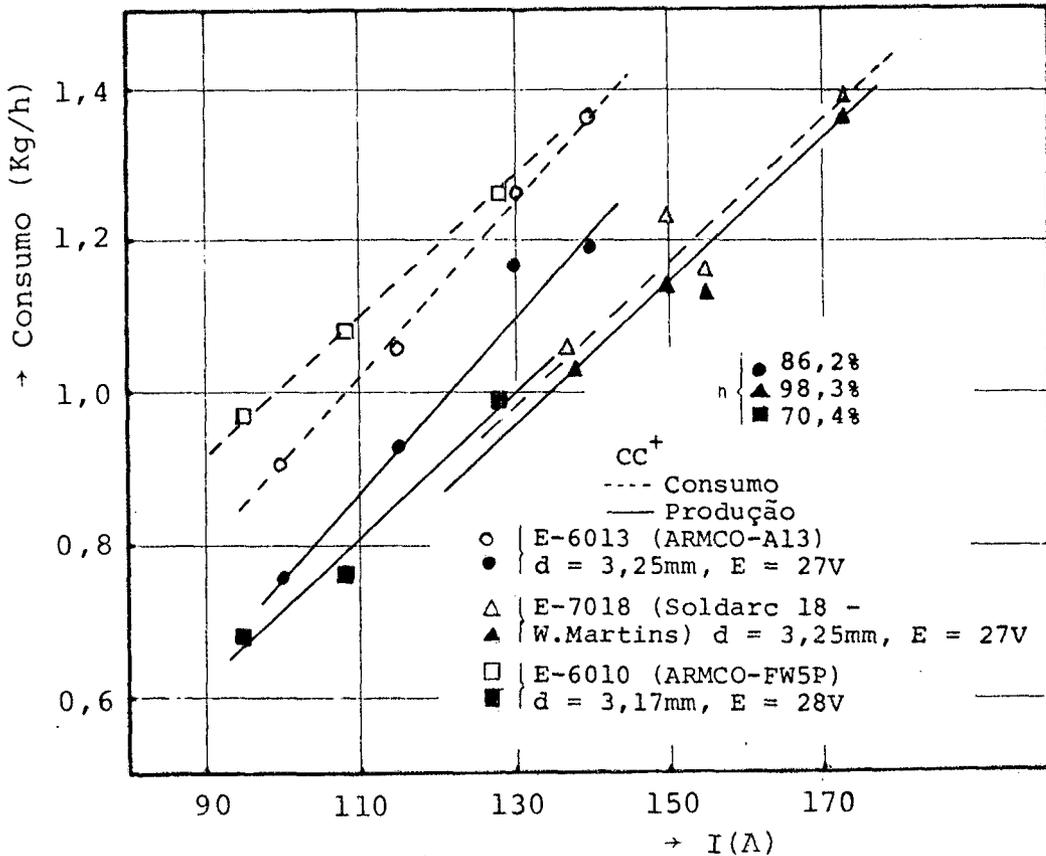


Fig. 2.19 - Variação de consumo com a corrente (I).

nui, a corrente também diminui, até um ponto ótimo, onde a corrente passa a aumentar.

Discutiu-se anteriormente o comportamento dessas curvas, e no presente caso também será válida a discussão citada, em que o aumento do rendimento térmico compensa a diminuição de corrente, quando a tensão diminui. A partir do ponto ótimo, acredita-se que não há mais aumento efetivo de rendimento térmico, necessitando-se, em vista de diminuição de tensão, de maiores correntes, para manutenção de energia.

Nota-se ainda que para o elétrodo celulósico (fig. 2.21), quando diminui-se a tensão ao longo da curva de isoconsumo, há apenas um decréscimo de corrente, não havendo o ponto ótimo como no caso do processo com elétrodo rutílico, o que evidencia o fato de apresentar apenas o efeito de aumento de rendimento térmico. Conforme se verificou (2), o comprimento do arco do elétrodo celulósico, nas mesmas condições, é relativamente maior do que os elétrodos básicos e rutílicos, nessa ordem. Assim a sua variação de rendimento térmico também o será. O que também explica o comportamento intermediário do elétrodo básico (fig. 2.22).

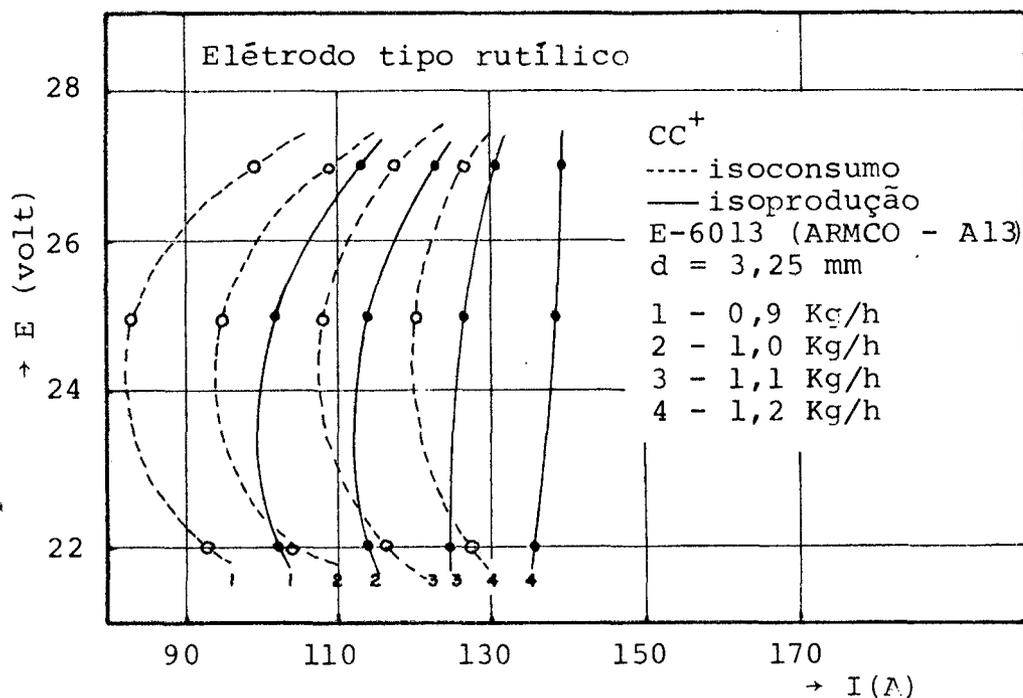


Fig. 2.20 - Curva de isoconsumo e isoprodução para elétrodo revestido E6013.

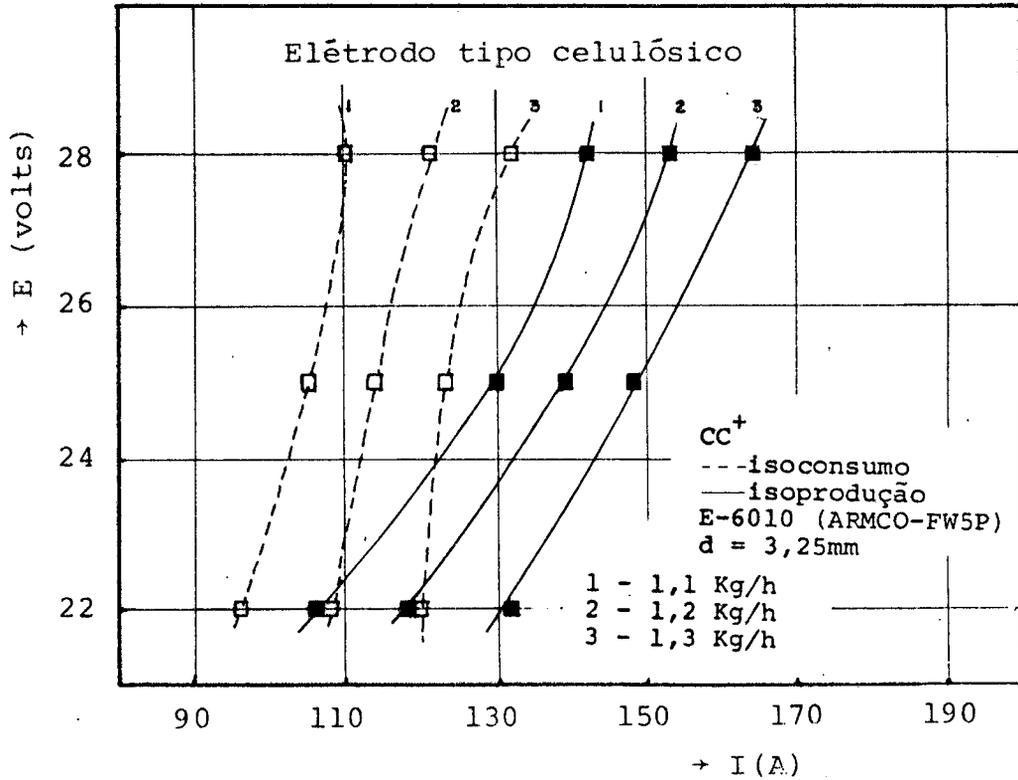


Fig. 2.21 - Curva de isoconsumo e isoprodução para elétrodo revestido E6010.

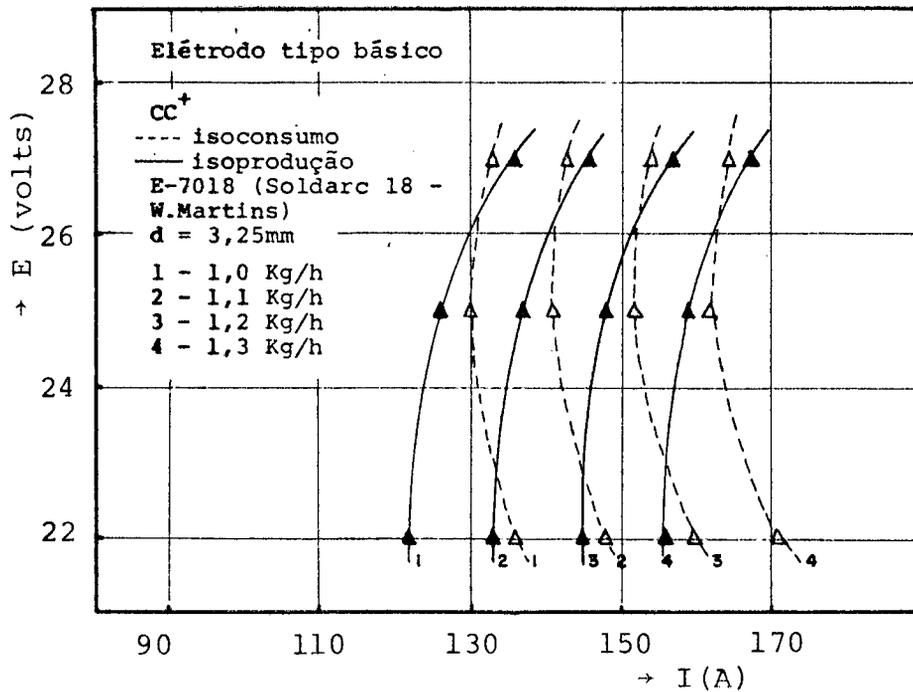


Fig. 2.22 - Curva de isoconsumo e isoprodução para elétrodo revestido E7018.

## 2.5 - ANÁLISE COMPARATIVA

Como já foi visto, a corrente, polaridade e distância da tomada de corrente influenciam de igual maneira o consumo nos processos a arco submerso, arame tubular, MIG e MAG.

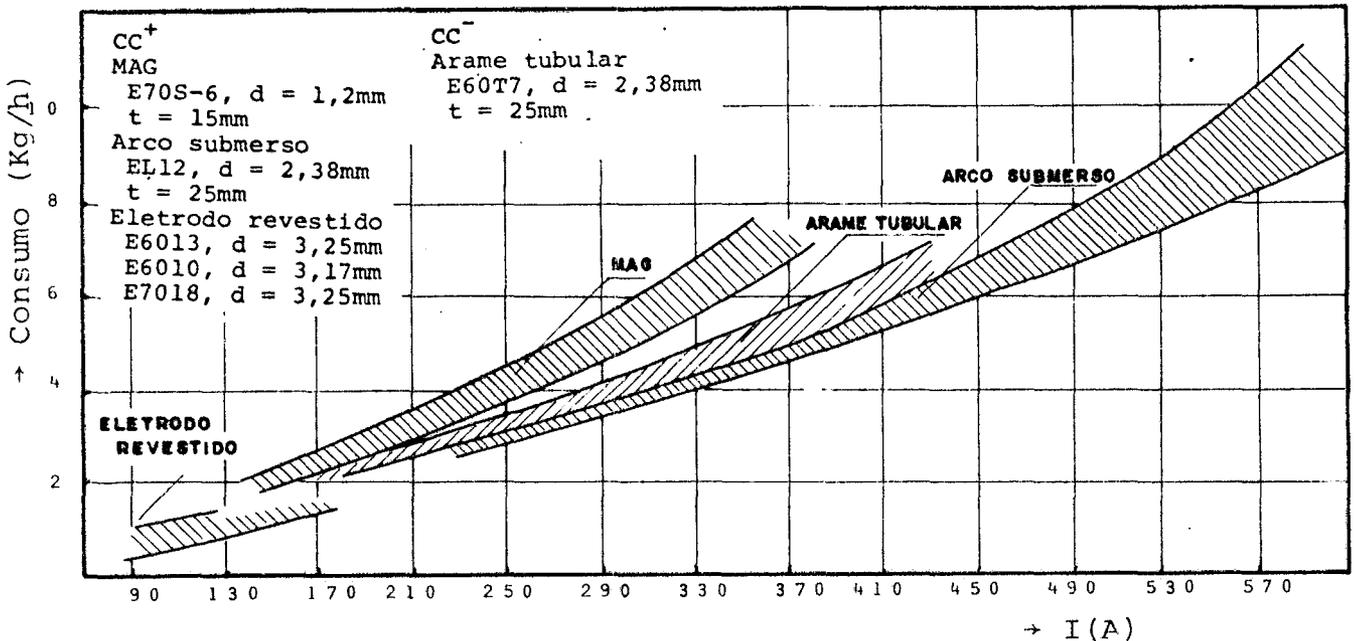


Fig. 2.23 - Comparação da capacidade de consumo de diversos processos

A figura 2.23 mostra a faixa de variação do consumo com a corrente para os diversos processos postos em estudo. Verifica-se que a distância da tomada de corrente e o diâmetro do eletrodo tem significativa influência na diferenciação das faixas de consumo e corrente alcançadas.

O processo arame tubular alcança na mesma faixa de corrente um consumo superior ao arco submerso. Essa diferença se dá primeiro, pela polaridade aplicada do arame tubular ser direta, que proporciona um maior consumo que a inversa para ambos processos. E secundamente, pela forma do eletrodo ser tubular, possuir uma maior resistência do que o eletrodo usado no arco submerso que é maciço, mas possibilita trabalhar-se com correntes mais elevadas, obtendo-se consumos maiores. O fato da maior resistência do eletrodo proporcionar trabalhar com menores correntes para um mesmo consumo, mostra-se mais evidente no processo MAG, com eletrodo de diâmetro igual a 1,2 mm e distância de tomada de corrente igual a 15 mm, em que numa faixa de corrente comum a ambos processos,

apresenta um maior consumo.

Ressalta-se que muito embora os elétrodos revestidos possuam um diâmetro superior aos outros processos, apresentam uma faixa de corrente e consumo bem menor que os demais. Isso se deve ao fato que a distância da tomada de corrente não ser tão próxima do arco como nos demais processos, e pelo limite físico imposto pelo revestimento.

Cabe ainda dizer que as faixas de consumo apresentadas na figura 2.23 podem ser modificadas alterando-se a distância de tomada de corrente ou a bitola do eletrodo. Assim o processo a arco submerso pode assumir faixas superiores as obtidas com o aumento do valor de "t", tão bem como no processo MAG, com diâmetro de eletrodo maior e também aumentando o valor de "t". Neste caso existe a limitação imposta pela coifa, por ser comumente fixa, limita a distância entre o bocal e a peça, e por conseguinte de "t", devido a necessidade de se manter uma perfeita proteção gasosa. Mas mesmo em processos como arame tubular auto-protégido que tem possibilidade de uma maior variação de "t" tão bem como o processo a arco submerso, há ainda o limite físico da instabilidade do arco, dependendo das condições de soldagem impostas pois a medida que aumenta o valor de "t", maior será a queda de tensão ao longo do eletrodo, aumentando a instabilidade do arco, em virtude de diminuição da energia de ionização, até o ponto em que se torna impossível soldar.

Em termos de produtividade o arco submerso é o mais interessante por ter um alto consumo e um rendimento de cerca de 95%, em seguida os processos MAG, MIG e arame tubular, por terem aproximadamente o mesmo rendimento e trabalharem quase na mesma faixa. E por último o processo com eletrodo revestido, que muito embora apresenta às vezes um rendimento superior a 100%, que é o caso do eletrodo com pó de ferro, seu consumo é inferior aos demais processos.

A importância de se ter maior consumo, vem do fato que oferece a oportunidade de aumentar a velocidade de soldagem. Entretanto o aumento do consumo e velocidade varia em cada processo. E ainda diferenças na proteção do arco e custos do material de soldagem (eletrodo, gás e fluxo), dá a cada processo características específicas de desempenho que controla seu potencial de redução de custo e influencia sua aplicação.

## 2.6 - CONCLUSÕES

1. As curvas de isoconsumo mostram que a corrente tem muita influência sobre o consumo do eletrodo, enquanto que a tensão tem pouca influência.
2. A influência da tensão no consumo aumenta com o aumento da corrente.
3. Nos processos arco submerso, arame tubular, MIG e MAG, o uso da polaridade direta  $CC^-$  resulta em maior consumo do arame-eletrodo, mantidas iguais as demais condições em cada processo.
4. Quando se aumenta a altura da tomada de corrente, em relação a peça-base, as curvas de isoconsumo deslocam-se no sentido das menores correntes.
5. O consumo do arame-eletrodo altera-se muito pouco quando se troca o gás de proteção de argônio para  $CO_2$ , ou vice-versa, desde que se trabalhe com E70S-6 a 25 volts, mantidas as demais condições.
6. Soldando com E70S-3 obtém-se maior consumo de eletrodo com proteção de  $CO_2$  do que com argônio, mantidas iguais as demais condições.
7. O consumo do eletrodo varia linearmente com a relação  $l/d^2$ , com iguais condições de soldagem, sendo  $l$  o comprimento e  $d$  o diâmetro do eletrodo.

### 3 - INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DA SOLDA

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

No presente estudo tomou-se como variáveis independentes, a corrente e a velocidade de soldagem. As variáveis dependentes, determinadas experimentalmente, foram: a penetração, a largura e o reforço da solda, tendo sido fixados a distância de tomada de corrente e diâmetro do eletrodo de acordo com cada processo, e ainda uma tensão comum a todos os processos.

E, muito embora a tensão tenha influência na geometria da solda, tal como a distância de tomada de corrente e bitola do eletrodo (10), não se fez a variação, para que assim se pudesse fazer um estudo comparativo entre os processos e verificar a influência da velocidade de soldagem e corrente numa mesma tensão, através de curvas de isolargura, isoreforço e isopenetração.

Com as curvas de isopenetração, isoreforço e isolargura pode-se pré-determinar a geometria da solda, através da escolha adequada das condições de soldagem. Porém, dessas curvas, o que se obtém são resultados um pouco restritos. Em soldagem, na maioria dos casos, o que se tenta conseguir, é uma relação adequada entre os elementos que compõem a geometria da solda; por exemplo, quando se pretende soldar uma junta de bordos retos em único passe, o importante é obter a penetração desejada com um reforço pequeno em relação a largura da solda.

Nesse sentido achou-se conveniente definir as constantes  $K_e$  (coeficiente de forma externa) e  $K_i$  (coeficiente de forma interna), que são, respectivamente, a razão entre a largura e o reforço ( $K_e = b/r$ ) e entre a largura e a penetração ( $K_i = b/p$ ). Assim, esses coeficientes permitem comparar os processos quanto a forma da solda. Para a seleção de parâmetros de soldagem em uma dada aplicação serão necessários outros critérios, conforme se verá adiante.

#### 3.2 - DEFINIÇÕES

As soldas foram realizadas em junta I com folga igual a zero (fig. 3.1). Chamou-se de largura "b" da solda, a distância entre os pontos mais extremos em que ainda houve fusão do material

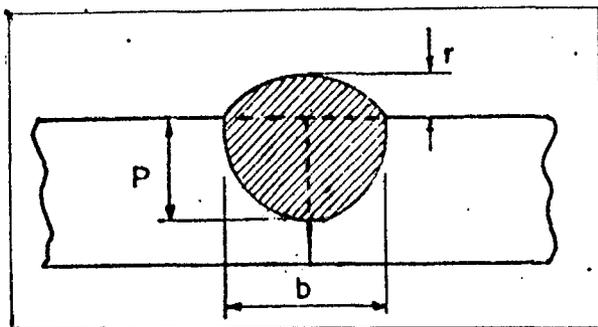


Fig. 3.1 - Geometria do cordão de solda;  $b$  - largura;  $p$  - penetração;  $r$  - reforço.

de base, medida na superfície deste material, perpendicularmente a junta.

Designou-se de reforço " $r$ ", a altura da solda, em relação à superfície do material de base.

Denominou-se penetração " $p$ " a profundidade em relação à superfície original das chapas, alcançada pela zona de fusão do material de base.

Efetou-se levantamentos da variação da geometria da solda com a corrente em diversas velocidades de soldagem, em cada processo (vide anexo II).

Assim, nesses gráficos, se for pré-estabelecida a geometria da solda, pode-se determinar a corrente e a velocidade da soldagem, formando pares (de corrente-velocidade de soldagem), que colocados em gráficos, tendo na ordenada a velocidade  $V_s$  (cm/min) e na abcissa, a corrente  $I$  (A), estabelecem as curvas de isolargura, isoreforço e isopenetração. A interpretação dessas curvas, é um tanto difícil, porque a sua forma varia para cada processo, mas foram feitas constatações experimentais que asseguraram a forma das curvas, e ainda, elas se prestam para pré-determinar a geometria da solda. Permitem também a verificação da influência da velocidade de soldagem e corrente na variação da geometria da solda.

### 3.3 - INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DA SOLDA

#### 3.3.1 - Processo Arame Tubular Auto-Protegido

a) Sistematização das variáveis influentes na geometria da solda.

Tentativas foram feitas para correlacionar-se a geometria da solda, com as condições em que a mesma foi efetuada, sintetizando as variáveis em forma de gráficos e fórmulas matemáticas (2), para o caso de soldagem com arco voltaico protegido por uma mistura de argônio e  $CO_2$ . Também, neste trabalho tentou-se obter a mesma correlação para o processo arame tubular.

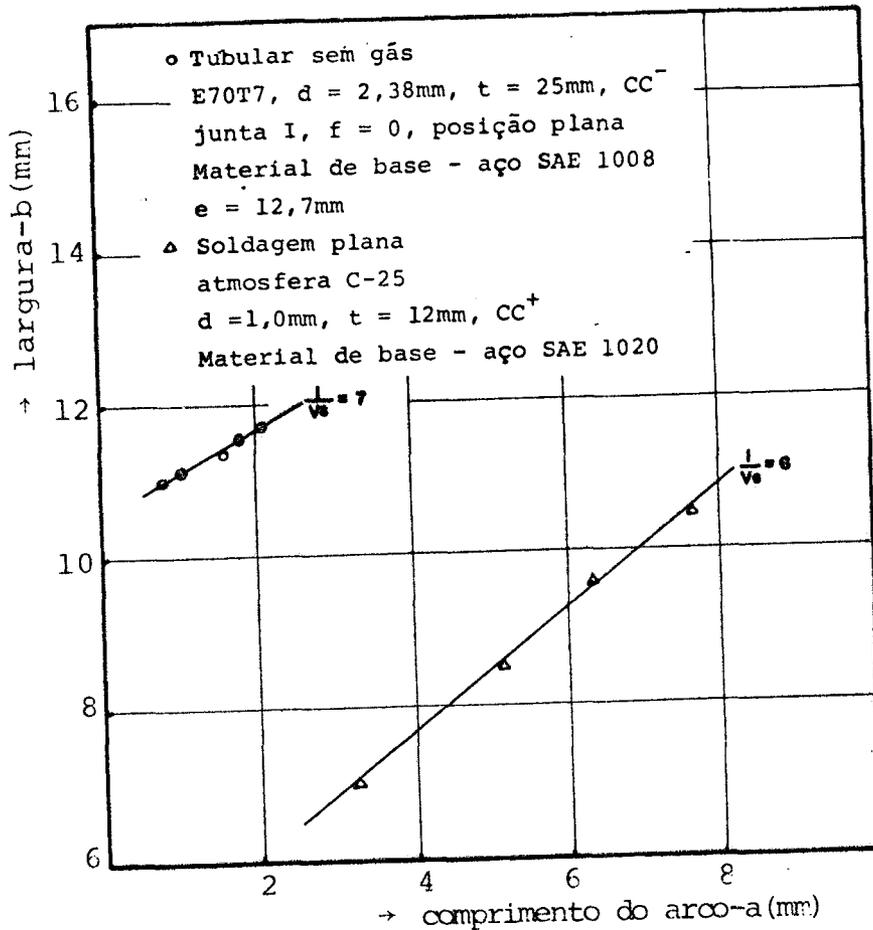


Fig. 3.2 - Influência da corrente, da velocidade de soldagem e do comprimento do arco sobre a largura da solda executada em passe único.

Encontrou-se a dependência da geometria da solda, juntamente com o comprimento do arco e com a relação  $I/V_s$  (fig. 3.2 e 3.3).

Como o comprimento do arco pode ser conhecido através de diagramas das características de arco (5), pode-se determinar a largura (fig. 3.2) e estabelecer a relação linear que liga os valores de penetração e reforço (fig. 3.3), da seguinte forma,

$$p.a = -Ar + B$$

onde A e B são constantes.

E, com mais o auxílio da expressão

$$V_s \cdot (0,70 \cdot b \cdot r + p \cdot f) = \frac{\pi}{4} \frac{C}{0,37} \eta_d$$

Tem-se assim um sistema onde apenas p e r são incógnitas. Face ao exposto, concluiu-se que a geometria da solda pode ser pré-determinada a partir dos parâmetros pré-reguláveis. E como esse modelo se aplicou também ao processo MIG/MAG (11), acredita-se que se possa generalizar para outros processos.

#### b) Variação da geometria da solda.

O processo a arame tubular auto-protegido permite a variação da altura de tomada de corrente, influenciando na geometria da solda e no consumo do elétrodo. Na figura 3.4, observa-se que nas condições de  $E = 24 \text{ V}$ ,  $I = 300 \text{ A}$  e  $V_s = 20 \text{ cm/min}$ , com o aumento do

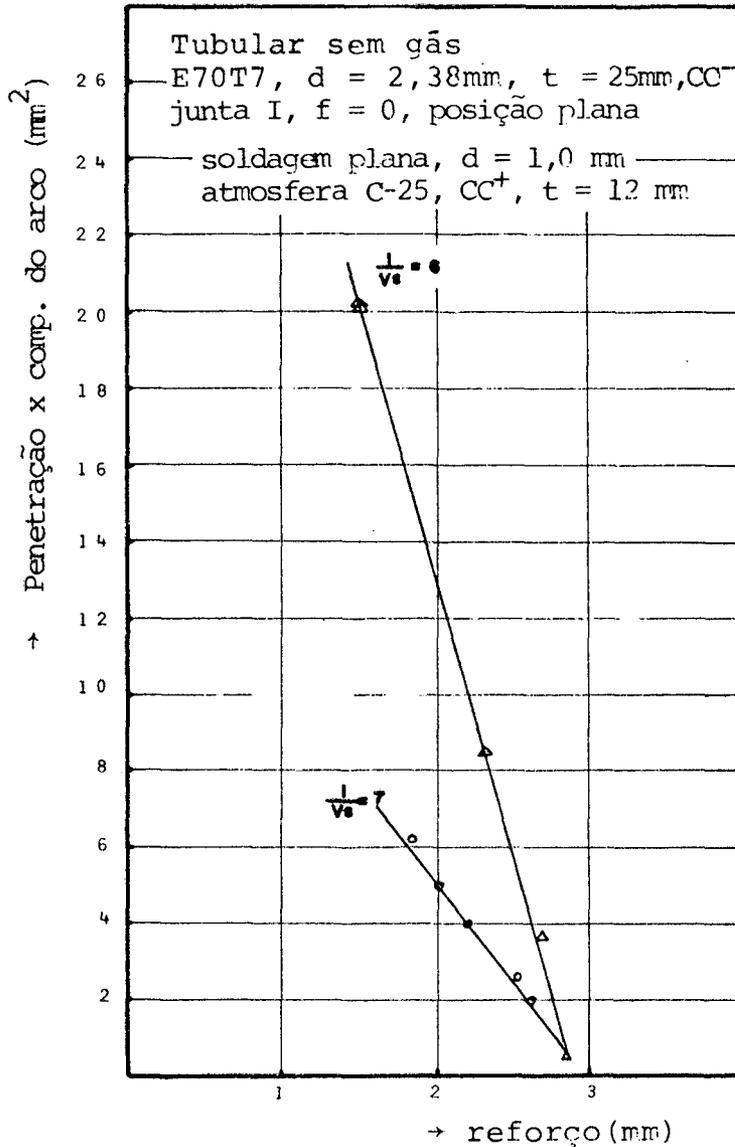


Fig. 3.3 - Influência da corrente, da velocidade de soldagem e do comprimento do arco sobre o reforço e a penetração da solda.

valor de "t", o reforço aumenta e a largura diminui, tendo pouca influência no consumo do eletrodo e na penetração.

Ressalta-se que há um limite para o aumento da altura da tomada de corrente, dependendo das condições de soldagem, pois com o aumento do valor de "t", o arco fica cada vez mais instável, até o ponto em que se torna impossível soldar.

Os gráficos das curvas de isopenetração, isoreforço e isolarura foram obtidos de uma forma indireta, através de gráficos da variação da geometria da solda com a corrente, em diferentes velocidades de soldagem, na condição de  $E = 24\text{ V}$  e  $t = 25\text{ mm}$  em CC<sup>-</sup>.

O gráfico da figura 3.5 mostra as curvas de isopenetração. Nota-se que a velocidade próxima de  $40\text{ cm/min}$  exige menos corrente

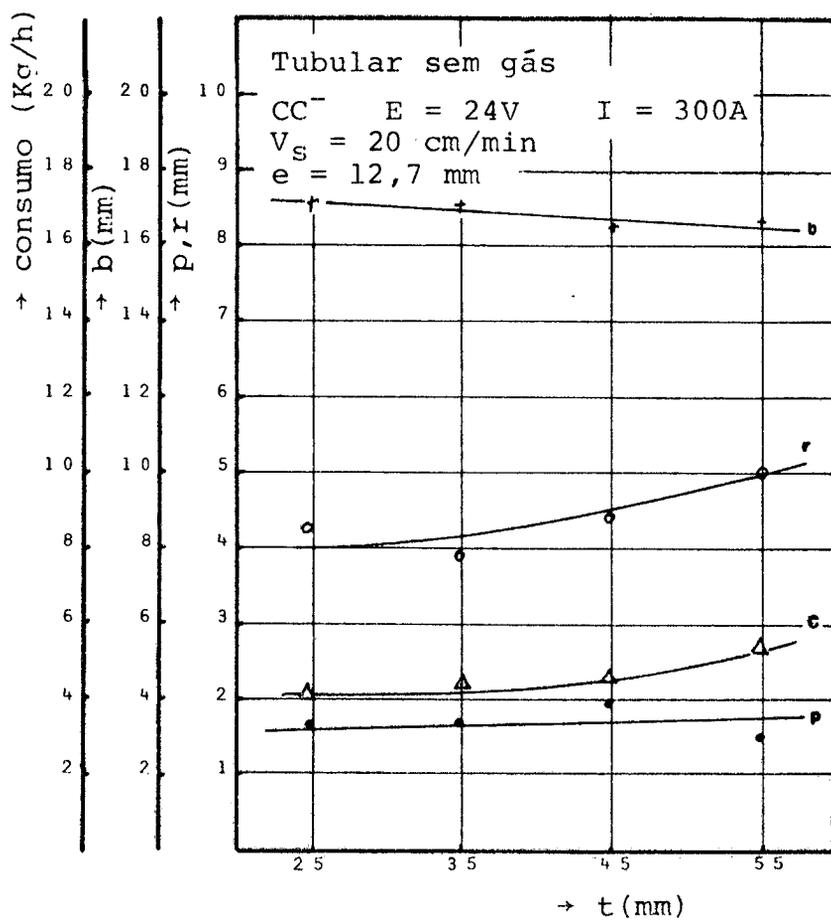


Fig. 3.4 - Influência da altura da tomada de corrente "t" na geometria da solda e consumo "C" do eletrodo.

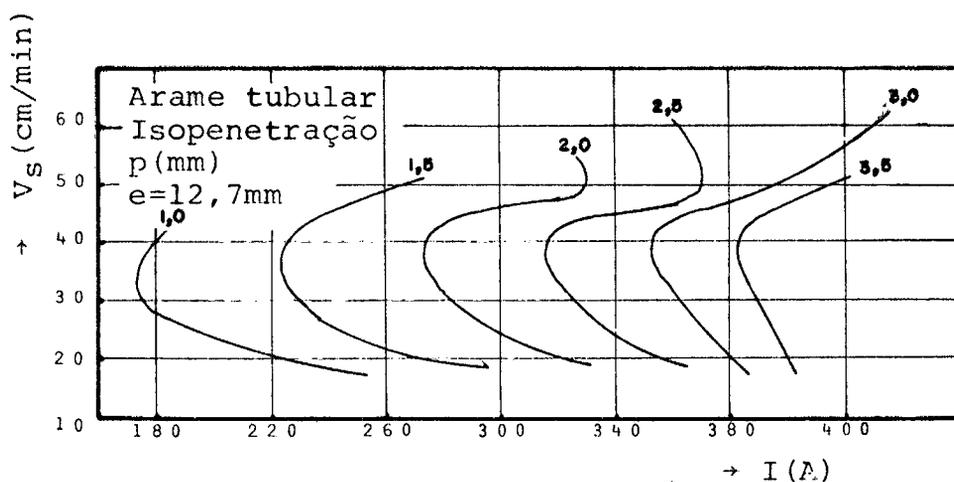


Fig. 3.5 - Curvas de isopenetração para o processo com arame tubular.

para se ter a mesma penetração e numa mesma corrente obtém-se uma maior penetração que nas demais velocidades.

Observa-se ainda que, na  $V_s = 60$  cm/min, a penetração é pouco sensível à variação da corrente. Essa sensibilidade aumenta com o aumento da corrente.

Nas curvas de isolargura (fig. 3.6), com o aumento da velocidade de soldagem, necessita-se de mais corrente para se ter a mesma largura, acentuando-se acima da  $V_s = 30$  cm/min, ou seja tem-se que aumentar a taxa de fusão.

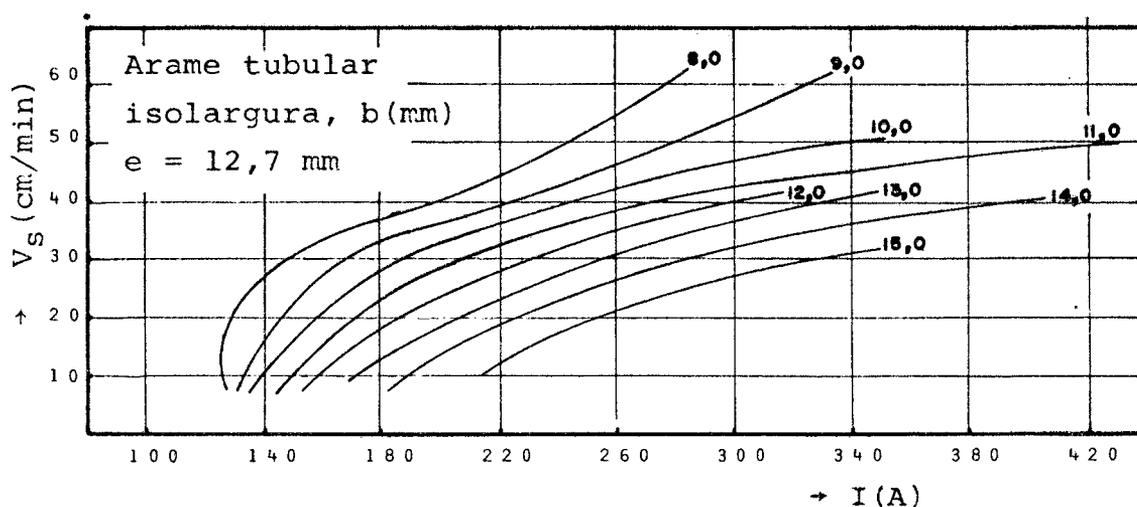


Fig. 3.6 - Curvas de isolargura para o processo arame tubular.

Em velocidades de soldagem elevadas a largura é pouco sensível à variação da corrente. E a medida que se aumenta a velocidade de soldagem, numa mesma corrente, a largura diminui.

As curvas de isoreforço (fig. 3.7), apresentam o mesmo comportamento do que as curvas de isolargura, em termos da necessidade do aumento da corrente, a medida que se aumenta a velocidade para se ter o mesmo reforço, mas de uma forma ora acentuada ora suave.

E também há o decréscimo de reforço, à medida que a velocidade de soldagem aumenta, em uma mesma corrente.

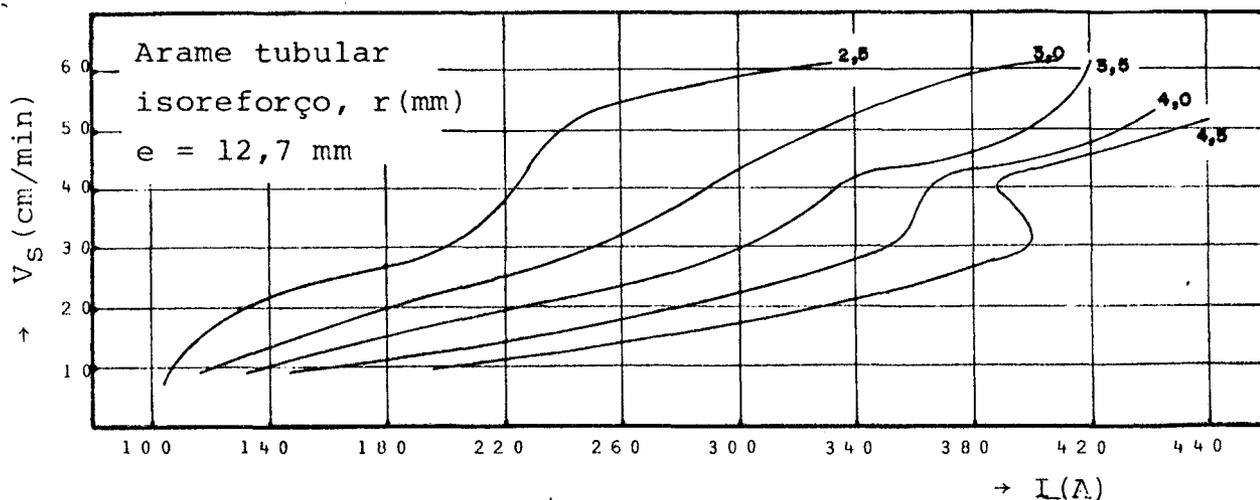


Fig. 3.7 - Curvas de isoreforço para processo arame tubular.

### 3.3.2 - Processo Arco Submerso

Este processo também permite uma variação da altura de tomada de corrente. A figura 3.8, mostra esta influência, nas condições de  $E = 40$  V,  $I = 400$  A e  $V_s = 20$  cm/min. Verifica-se que, nestas condições, aumentando-se o valor de "t", aumenta a penetração "p", o reforço "r", a seção da solda "S", a área adicionada "Sad", diminui a largura "b".

Se observa que a variação da altura "t", possui uma influência um pouco mais marcante do que para o processo com arame tubular.

Quanto a sistematização das variáveis influentes na geometria da solda, acredita-se que a interdependência dessas variáveis em jogo obedecem a leis análogas àquelas obtidas pelos processos MIG/MAG e arame tubular.

A influência da corrente e velocidade de soldagem na geometria da solda, pode ser vista através das curvas de isolargura, isoreforço e isopenetração, obtidas com  $E = 24$  V,  $t = 25$  mm e  $CC^+$ .

As curvas de isopenetração (fig. 3.9), nas condições em que foram realizadas, assumem uma forma distinta das que foram obtidas no processo com arame tubular, apresentando na  $V_s = 20$  cm/min o ponto que necessita de menos corrente para se ter a mesma penetração. E, como consequência, nessa velocidade, numa mesma corrente, tem-se a máxima penetração.

Observa-se ainda que em velocidades de soldagem mais elevadas, não diminui a sensibilidade da variação da penetração com a

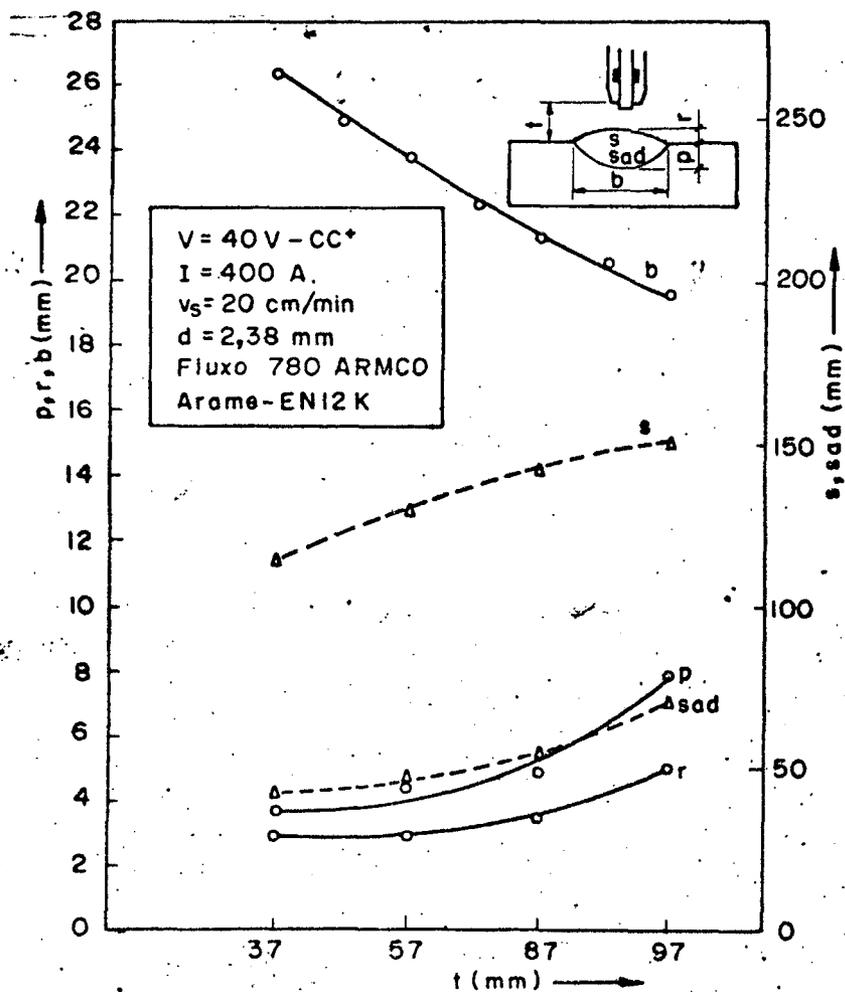


Fig. 3.8 - Geometria da solda em função da distância de tomada de corrente.

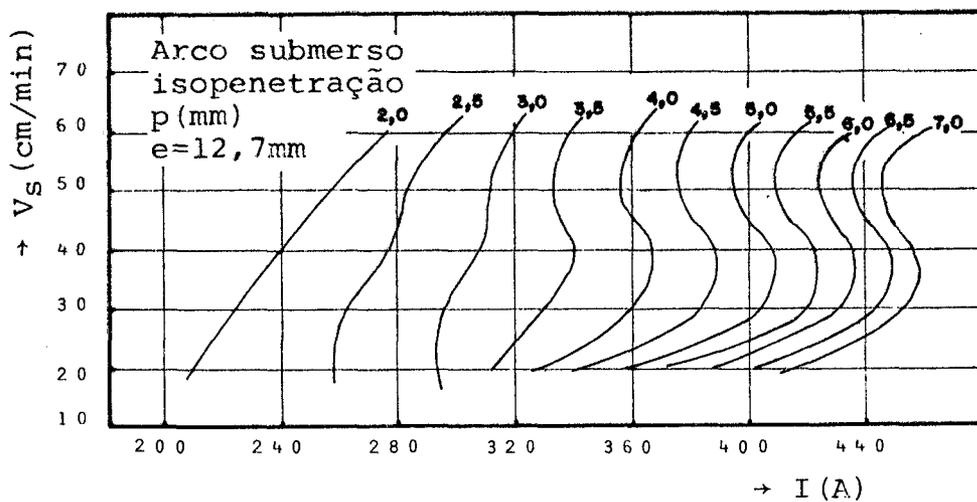


Fig. 3.9 - Curva de isopenetração para o processo a arco submerso.

corrente, tal como acontece com arame tubular. E apresenta, com excessão da  $V_s = 60$  cm/min abaixo de 280 A, uma penetração sempre superior ao processo com arame tubular (vide anexo II).

As curvas de isolargura, apresentadas na fig. 3.10, mostram que com o aumento da velocidade de soldagem, diminui a sensibilidade da largura com a corrente. Em geral, mantendo constante a velocidade, necessita-se de mais corrente para se ter a mesma largura, com a excessão da passagem de  $V_s = 30$  cm/min para  $V_s = 40$  cm/min.

Comparando com o processo arame tubular, que é mais sensível à variação da largura com a corrente, o processo do arco submerso apresenta quase sempre valores de largura inferiores, excetuando para  $V_s = 40$  cm/min e  $V_s = 50$  cm/min, abaixo de 280 A e  $V_s = 60$  cm/min, abaixo de 340 A (vide anexo II).

Nas curvas de isoreforço (fig. 3.11), nota-se um aumento acentuado da corrente, quando a velocidade de soldagem aumenta. Nota-se também que, mantida constante a corrente, em geral, há um decréscimo de reforço, quando se aumenta a velocidade.

Comparando com o arame tubular, observa-se que este processo possui, em velocidades de soldagem superiores a  $V_s = 30$  cm/min e na  $V_s = 20$  cm/min (a partir de 180 A), valores superiores de reforço, do que com o processo a arco submerso.

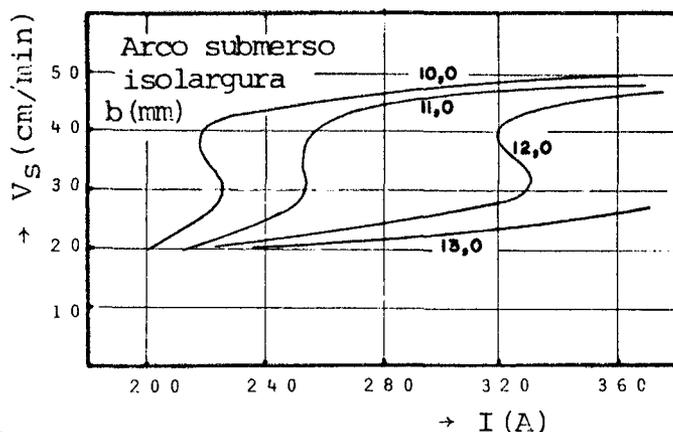


Fig. 3.10 - Curvas de isolargura para processo a arco submerso.

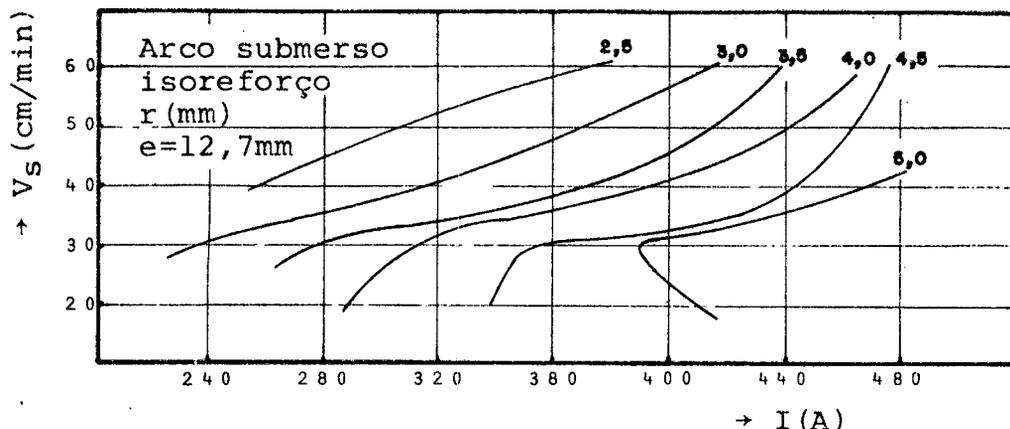


Fig. 3.11 - Curvas de isoreforço para processo a arco submerso.

### 3.3.3 - Processo MIG e MAG

Neste processo ver-se-á a influência da atmosfera de proteção, já que os demais parâmetros serão idênticos ( $E = 24 \text{ V}$ ,  $t = 15 \text{ mm}$ ,  $d = 1,6 \text{ mm}$ ). Como já se observou no capítulo 2, a atmosfera de proteção influencia no consumo do eletrodo e este, por sua vez, na geometria da solda (10). Observar-se-á também, a influência da energia de ionização da atmosfera do arco, a qual reflete-se no comprimento do arco, e também na variação do comprimento do eletrodo. Todos estes são fatores que se refletem na geometria da solda através do consumo do eletrodo e da forma e comportamento do arco.

A sistematização das variáveis influentes na geometria da solda, já foi viabilizada em trabalhos anteriores (11). A extensão deste estudo já foi vista no processo com arame tubular.

O estudo da influência da corrente e velocidade de soldagem, numa mesma tensão, é possível, através de curvas de isolargura, isoreforço e isopenetração, obtidas da mesma forma que nos processos anteriores.

As curvas de isopenetração para os processos MIG e MAG, são apresentadas nas figuras 3.12 e 3.13. O comportamento das curvas de isopenetração do processo MIG se assemelham ao processo a arco submerso. No processo MAG, tal semelhança ocorre até a curva de isopenetração igual a 2,0 mm. A partir deste ponto, para valores de penetração superiores, passa a se assemelhar ao processo a ara-

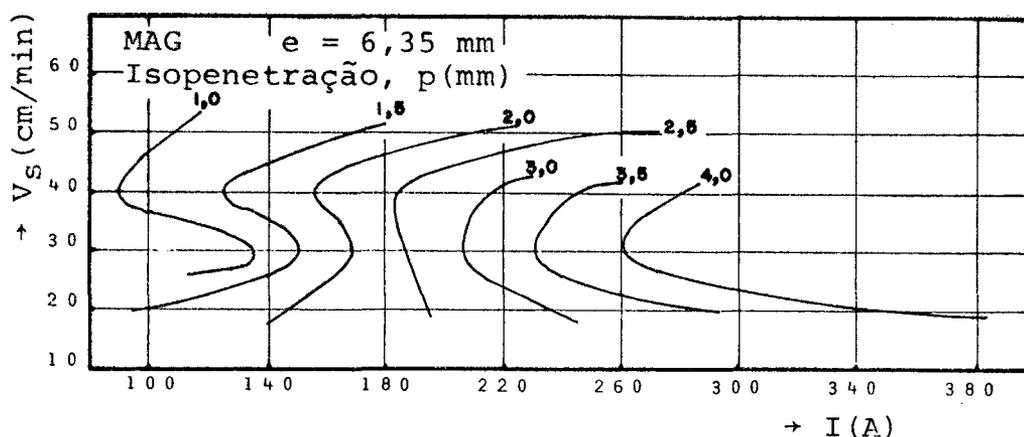


Fig. 3.12 - Curvas de isopenetração para o processo MAG.

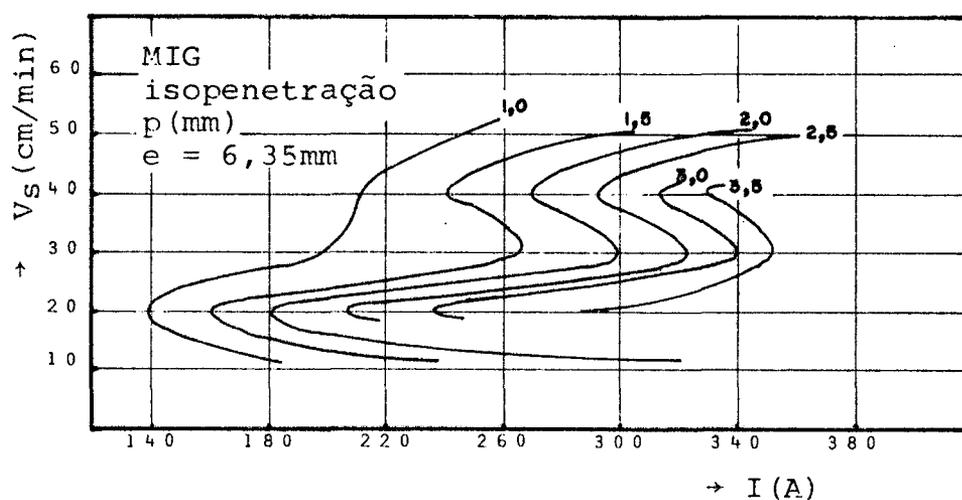


Fig. 3.13 - Curvas de isopenetração para o processo MIG.

me tubular.

O processo MAG, apresenta, nas suas curvas de isopenetração, numa certa velocidade entre 30 e 40 cm/min, uma situação em que se necessita de menor corrente para se conseguir a mesma penetração. Por conseguinte, para corrente constante, ter-se-á uma velocidade ótima, na qual a penetração será máxima, tal fato acontece também com o processo a arame tubular, MIG e arco submerso.

As curvas de isopenetração do processo MIG, apresentam pontos coincidentes na velocidade de 30 cm/min com as do processo MAG. Mas nas demais condições de soldagem apresentadas, o processo MAG

alcança maior penetração. Este fato se deve a maior energia de ionização do gás  $\text{CO}_2$ . Assim em nível de energia de soldagem idêntico ( $E$ ,  $I$  e  $V_s$ ) ao processo MIG, o MAG terá um comprimento de arco menor, alcançando assim maiores valores de penetração.

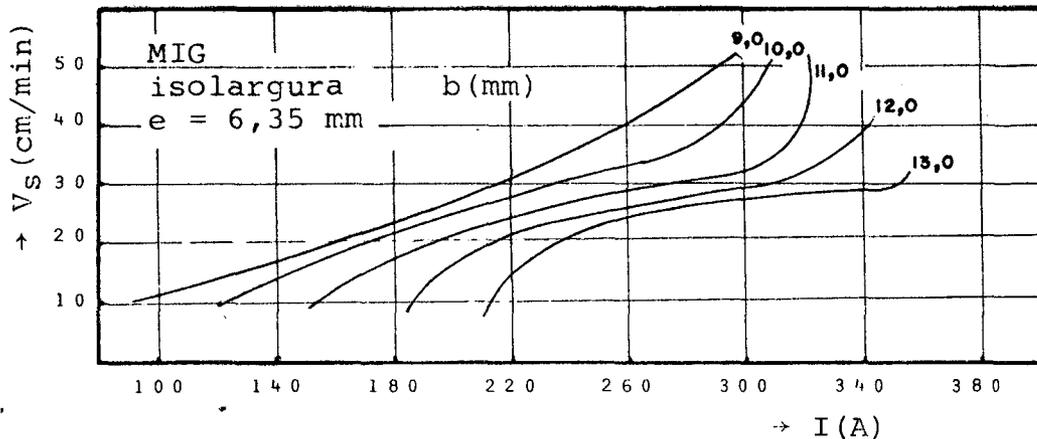


Fig. 3.14 - Curvas de isolargura para o processo MIG.

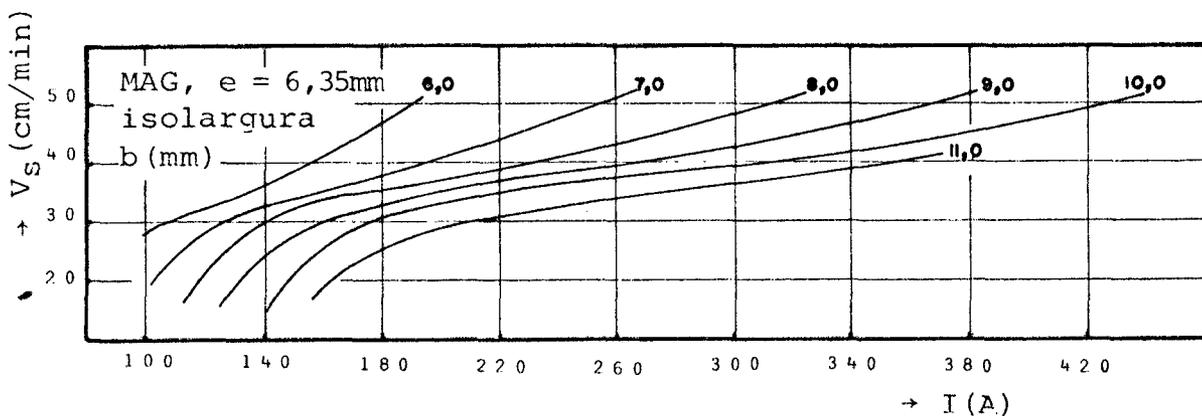


Fig. 3.15 - Curvas de isolargura para o processo MAG.

As curvas de isolargura nos processos MIG e MAG (fig. 3.14 e 3.15), são semelhantes as do processo com arame tubular, principalmente o processo MAG, tanto no aspecto da forma acentuada com que a corrente aumenta para se ter a mesma largura, quanto na diminuição da sensibilidade da variação da largura com a corrente.

Na  $V_s = 20$  e  $30$  cm/min e abaixo de  $270$  A (vide anexo II), o processo MAG apresenta maior largura, mas nas  $V_s = 40$  e  $50$  cm/min, o processo MIG o supera nesse aspecto.

As curvas de isoreforço (figs. 3.16 e 3.17), apresentam uma forma parecida com as obtidas com os processos a arame tubular e arco submerso quanto ao aspecto da necessidade do aumento de cor-

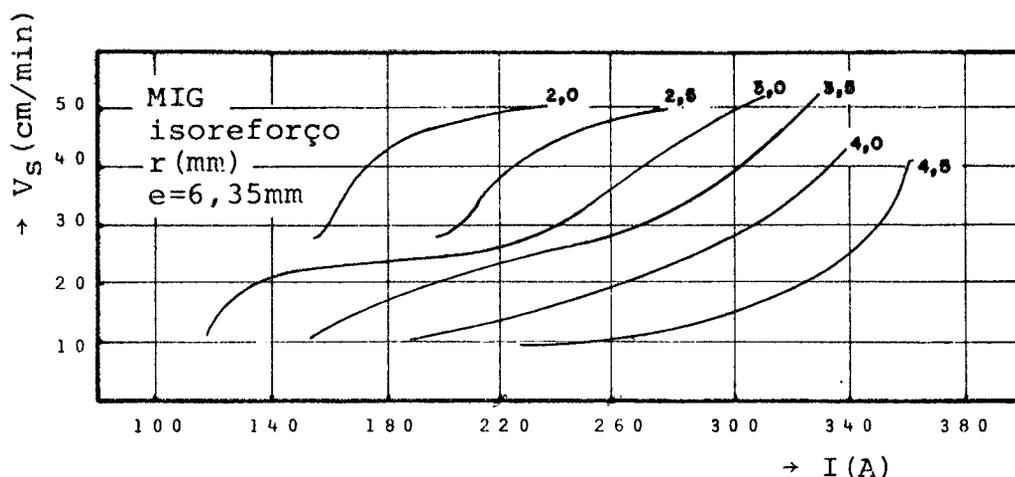


Fig. 3.16 - Curvas de isoreforço para o processo MIG

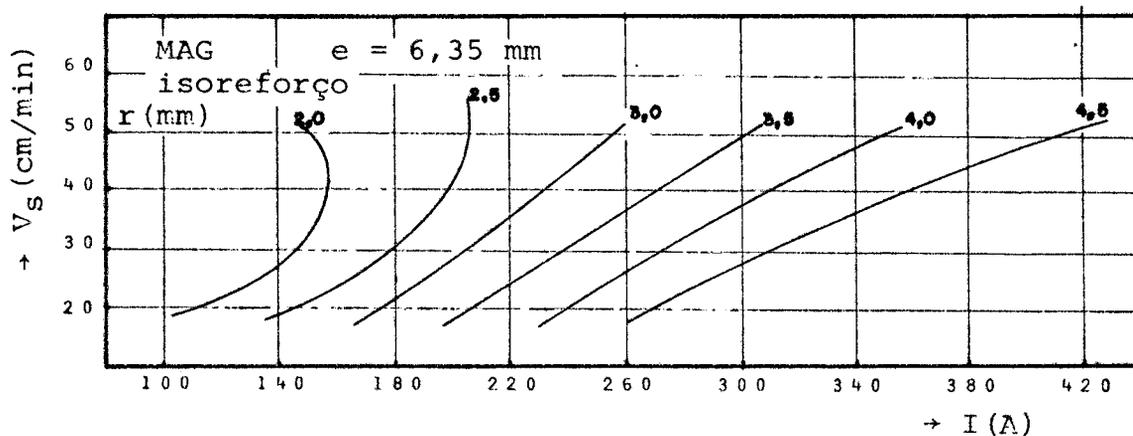


Fig. 3.17 - Curvas de isoreforço para o processo MAG

rente, a medida que a velocidade de soldagem aumenta, para manter o mesmo reforço. No entanto no processo MAG esse aumento não é tão acentuado quanto no processo MIG e arame tubular, que ocasiona em velocidades de soldagens mais altas, uma menor variação do reforço com a corrente.

Em condições iguais de soldagem, aqui apresentadas, com poucas exceções, o processo MAG apresenta um maior reforço que o MIG.

### 3.3.4 - Processo com Eléctrodo Revestido

Foram estudados dois tipos de eléctrodos, o eléctrodo tipo básico com pó de ferro (AWS E7018 -  $d = 3,25$  mm) e o tipo celulósico

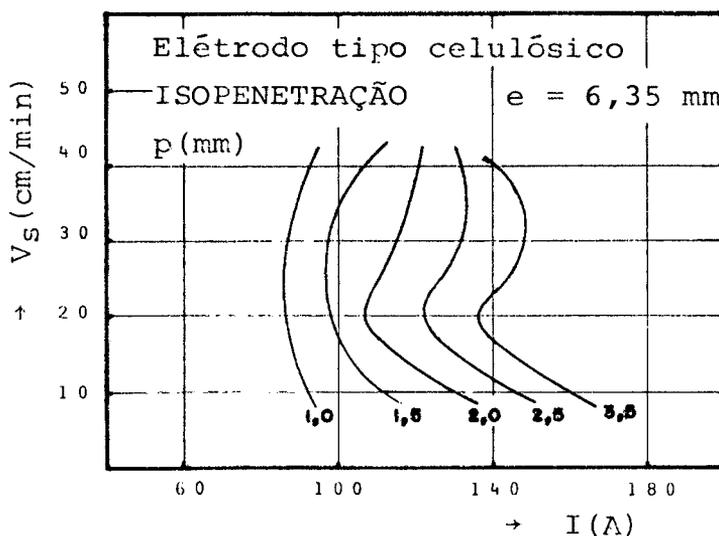
(AWS E6010 -  $d = 3.17$  mm). O primeiro protege a solda, formando uma cortina gasosa (CO) produzida pela decomposição do carboneto de cálcio e sua reação com ferro, manganês e silício, elementos presentes nestes elétrodos, possuindo um alto rendimento. Quanto ao segundo, a proteção gasosa (CO e  $CO_2$ ) se dá pela combustão do material orgânico do revestimento e possui um baixo rendimento.

Além da diferença do revestimento, que proporciona distintas atmosferas de proteção, tem-se diâmetros diferentes, que juntamente afetam o consumo do eletrodo e a forma e o comportamento do arco, e por conseguinte a geometria da solda.

Acredita-se também que nesse processo possa sistematizar-se as variáveis influentes na geometria da solda, como visto em processos anteriores.

Foram levantadas curvas de isopenetração, isolargura e iso reforço, da mesma forma que nos demais processos, e com o mesmo intuito de verificar a influência da corrente de soldagem na geometria da solda.

As figuras 3.18 e 3.19 mostram as curvas de isopenetração, - que inicialmente assumem o mesmo comportamento, e para o caso do eletrodo E6010, após a segunda curva de isopenetração, toma um comportamento semelhante as curvas do processo arame tubular, tendo a  $V_s = 20$  cm/min a menor corrente para se ter o mesmo valor de penetração, e para uma mesma corrente tem-se uma penetração superior que as demais velocidades de soldagem.



Por sua vez, o eletrodo E7018, após a primeira curva, assume o comportamento das curvas do processo a arco submerso, e apresenta a  $V_s = 10$  cm/min, a menor corrente para a mesma penetração.

Fig. 3.18 - Curvas de isopenetração para processo com eletrodo revestido (E6010).

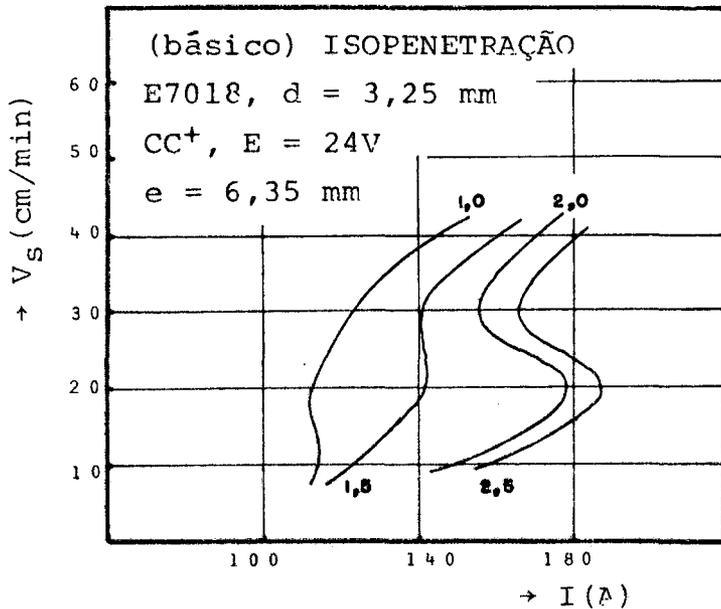


Fig. 3.19 - Curva de Isopenetração para processo com eletrodo revestido - (E7018)

As curvas de isolargura (figs. 3.20 e 3.21), apresentam semelhanças com alguns trechos das curvas obtidas pelos processos - MIG e MAG, como no caso do eletrodo celulósico, lembra as formas de curva do processo MAG, em velocidades de soldagem superior a 30 cm/min. E para o eletrodo básico lembra o processo MIG, em velocidade de soldagem acima de 30 cm/min.

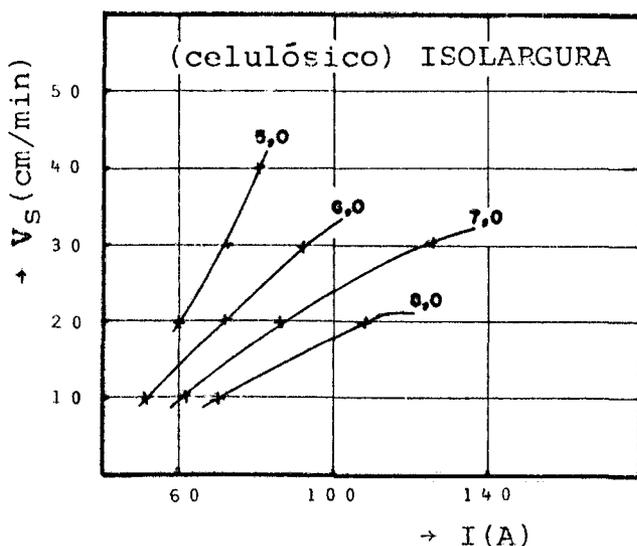
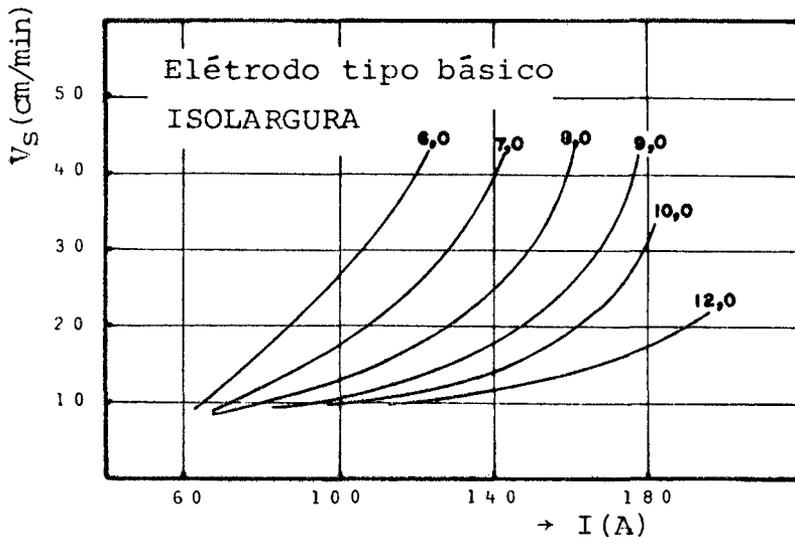


Fig. 3.20 - Curvas de isolargura para processo com eletrodo revestido (E6010)

O eletrodo do tipo celulósico, em quaisquer das condições apresentadas, possui uma penetração superior ao eletrodo do tipo básico. (E7018). (Vide anexo II).

Processos como MAG e MIG são sempre superados pelo eletrodo celulósico, e no caso particular da  $V_s = 30$  cm/min, também o são para o eletrodo do tipo básico (vide anexo II), quando operam na mesma faixa.

Tal como acontece nos outros processos, com o aumento da velocidade de soldagem se necessita de mais corrente para manter a mesma geometria, e diminui a sensibilidade da variação da largura com a corrente, de uma forma mais acentuada para o eletrodo celulósico.



Existe uma corrente de transição na qual com valores de corrente superior, o eletrodo do tipo celulósico passa ter valores de largura menores do que os obtidos com eletrodo do tipo básico, e essa corrente de transição diminui com o aumento da velocidade de soldagem (vide anexo II).

Fig. 3.21 - Curvas de isolargura para processo com eletrodo revestido (E7018).

Na  $V_s = 10$  cm/min, o processo MIG é superado em termos de valores de largura, pelo processo com eletrodo revestido, nas demais velocidades de soldagem, não se apresentam um comportamento distinto.

As curvas de isoreforço (figs. 3.22 e 3.23), apresentam um comportamento similar as obtidas com o processo com arame tubular, se for olhado alguns trechos das curvas, e as interpretações obtidas também são válidas.

Em termos comparativos a variação do reforço se apresenta com pouca diferença entre os eletrodos celulósico e básico.

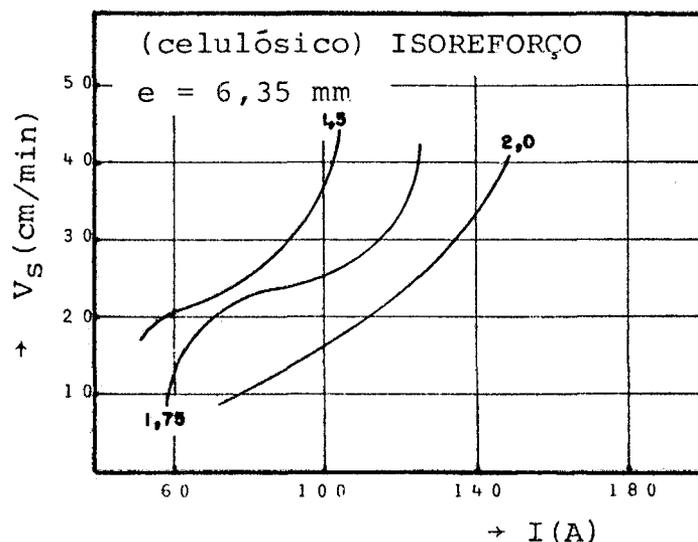


Fig. 3.22 - Curva isoreforço para eletrodo revestido (E6010).

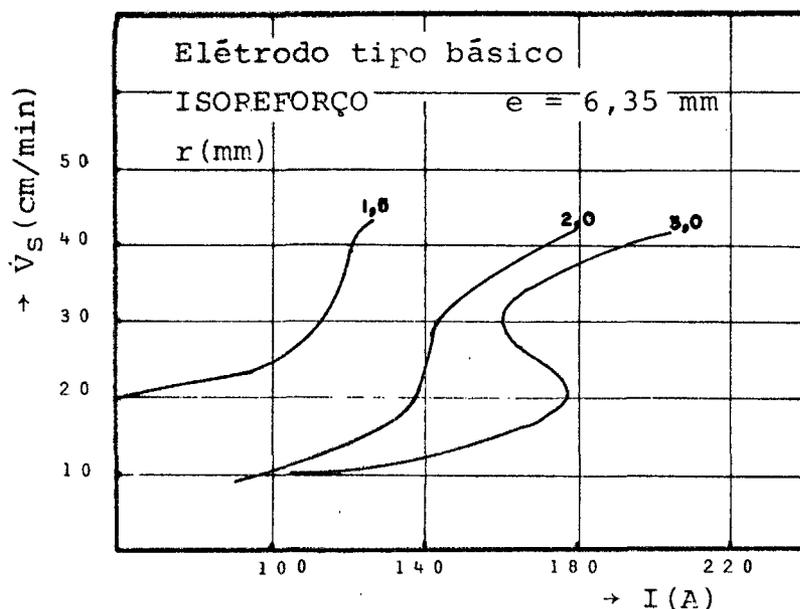


Fig. 3.23 - Curva de isoreforço para eléttrodo revestido (E7018)

#### 3.4 - 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 iso-penetração, iso-ki e iso-ke, que passa-se a definir:

a) Linhas de regularidade: essa linha demarca 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. Nos casos do processo com arame tubular e eléttrodo revestido, tal linha inclui o critério adicional de garantir a inexistência de falhas no recobrimento da escória, o que prejudica o cordão da solda.

b) Linhas de isopenetração: demarcam as linhas de soldagem com determinada penetração e permitem, estabelecer-se as condições de penetração inferior a 1,0 mm, considerada insuficiente para qualquer caso de soldagem.

c) Linhas de iso-ki e iso-ke: são linhas nas quais os valores de ki (b/p) e ke (b/r) são constantes. Convencionou-se que para

ambos fatores ( $k_e$  e  $k_i$ ), o valor quatro serve como referência e desta forma, pôde-se estabelecer campos de utilização do processo em que essas relações ( $k_e$  e  $k_i$ ), são maiores ou menores que quatro (Anexo III), caracterizando a geometria da solda (fig. 3.24 e 3.25). A determinação dessas linhas (iso- $k_i$  e iso- $k_e$ ) podem ser feitas a partir das curvas da variação da geometria da solda em função da corrente para diversas velocidades de soldagem, obtidas experimentalmente, ampliando-se de quatro as escalas das curvas de penetração e reforço ( $p$  e  $r$ ) em relação a curva de largura. Assim, na interseção das curvas de largura e penetração numa determinada velocidade de soldagem, tem-se a corrente na qual se obtém a relação  $k_i = 4$ . Igualmente na interseção das curvas de largura e reforço numa determinada velocidade de soldagem, tem-se a corrente na qual se obtém a relação  $k_e = 4$ . Procedendo-se sucessivamente nos diversos gráficos teria-se pares de velocidade de soldagem e corrente, que configurariam as linhas de iso- $k_i$  e iso- $k_e$  nos campos de ocorrência.

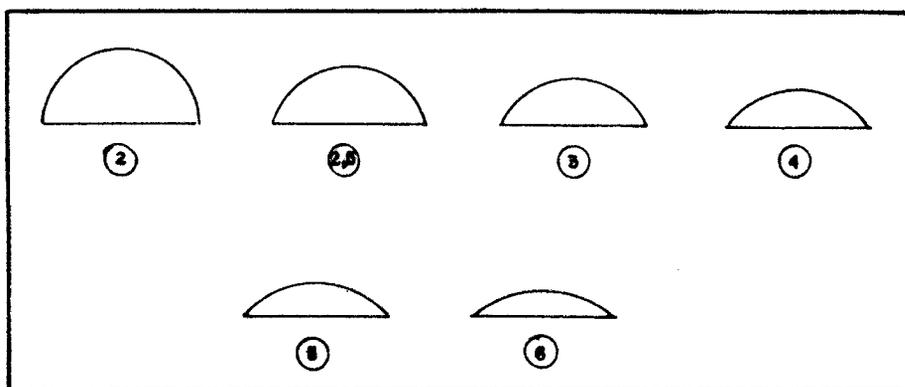


Fig. 3.24 - Variação do fator  $k_e$ .

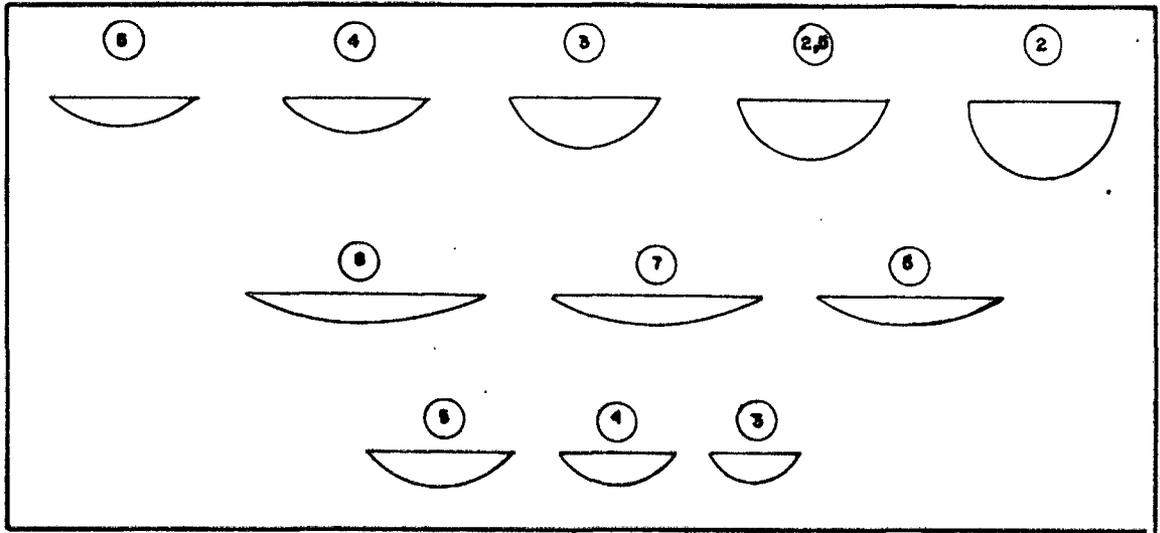


Fig. 3.25 - Variação do fator  $K_i$

Estipulando os valores  $k_i$  e  $k_e$  igual a quatro, tem-se uma solda de referência (fig. 3.26). Assim, pode-se estabelecer os seguintes critérios:

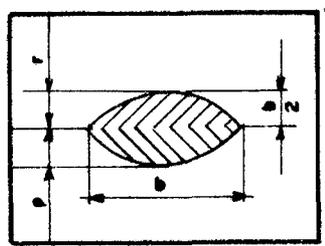


Fig. 3.26 - Solda de referência.

Quando:

$$k_e = \frac{b}{r} < 4, \text{ tem-se um excesso relativo de reforço.}$$

e quando:

$$k_i = \frac{b}{p} > 4, \text{ tem-se um excesso relativo de largura.}$$

Portanto as linhas descritivas acima são fronteiras que delimitam o campo de ocorrência, caracterizando a forma da geometria da solda em cada processo, permitindo compará-los em relação a solda de referência.

Nessa comparação deve-se levar em conta a espessura da chapa, em que foram realizados os experimentos, pois a geometria da

solda, nas mesmas condições de soldagem, se modifica com a espessura. Assim, com o aumento da espessura, a largura e a penetração tendem a diminuir, enquanto que o reforço tende a aumentar, alterado os valores de  $k_i$  e  $k_e$ , sendo que o primeiro fator ( $k_i$ ), sofrerá pequena variação, porém o mesmo não acontece com  $k_e$  (figs. 3.27 e 3.28), que sofrerá uma variação um pouco mais significativa. Portanto deve-se levar em conta essa variação, na comparação entre processos, cujos campos de utilização foram obtidos em diferentes espessuras. Como se observa nas (figs. 3.27, 3.28 e 3.29) o valor de  $k_e$  diminui com o aumento da espessura, o que significa que a linha de  $k_e = 4$ , tende a se deslocar no sentido do menor valor de corrente, ou seja, amplia-se o campo de utilização comum ao fator  $k_e < 4$  com o aumento da espessura, que caracteriza uma solda com excesso relativo de reforço.

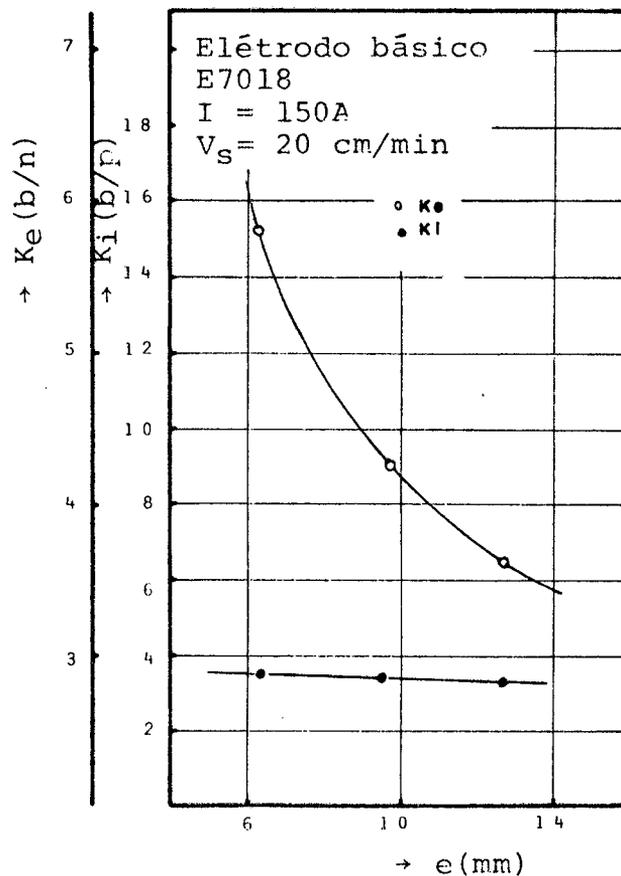


Fig. 3.27 - Variação de  $k_e$  e  $k_i$  com a espessura, para o processo com eletrodo revestido tipo básico (E7018).

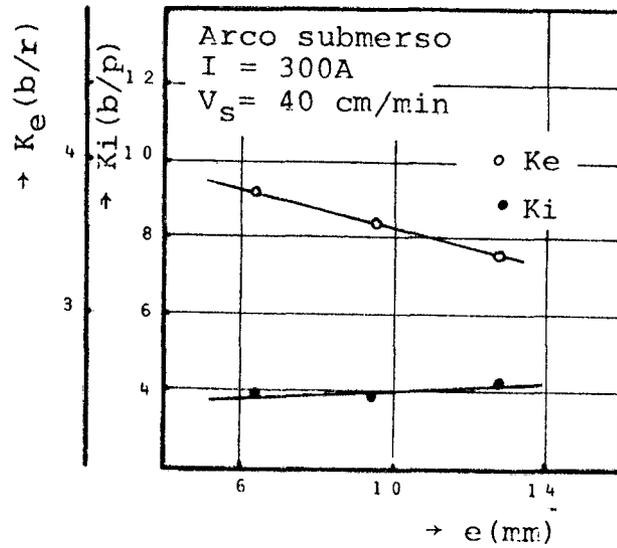


Fig. 3.28 - Variação de  $k_e$  e  $k_i$  com a espessura, para o processo a arco submerso.

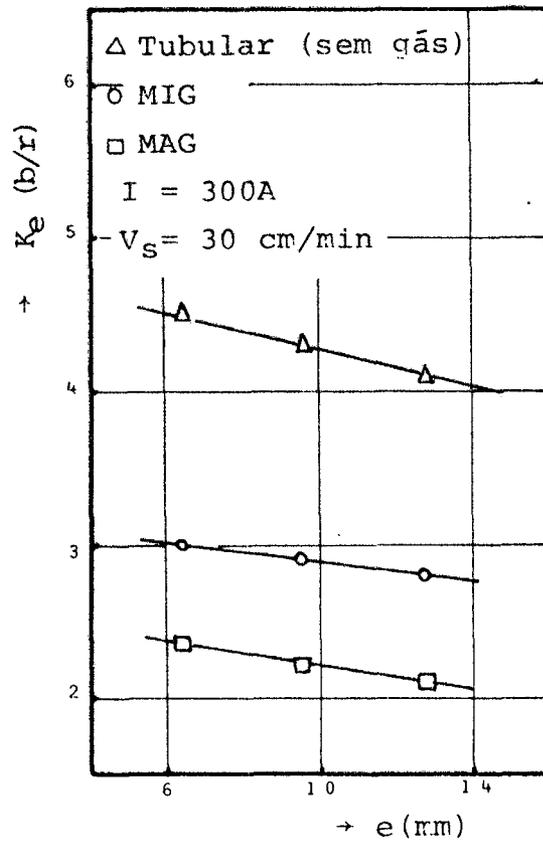


Fig. 3.29 - Variação de  $k_e$  com a espessura, para os processos arame tubular, MIG e MAG.

As figuras 3.30 e 3.31 mostram os campos de ocorrência para os processos de alta produção (MIG, MAG, arame tubular e arco submerso, que possuem produção superior a 3 kg/h), em relação ao fator  $k_i$ . Observa-se na (fig. 3.30), relativa aos campos com fator  $k_i > 4$ , que os processos arame tubular e MIG se caracterizam, na quase totalidade dos respectivos campos de ocorrência, por uma solda com excesso relativo de largura ( $k_i > 4$ ), enquanto que os processos MAG e arco submerso, como se vê na fig. 3.31, por terem relativamente maior penetração, apresentam seus campos de ocorrência, em maior amplitude, com fator de forma  $k_i < 4$ .

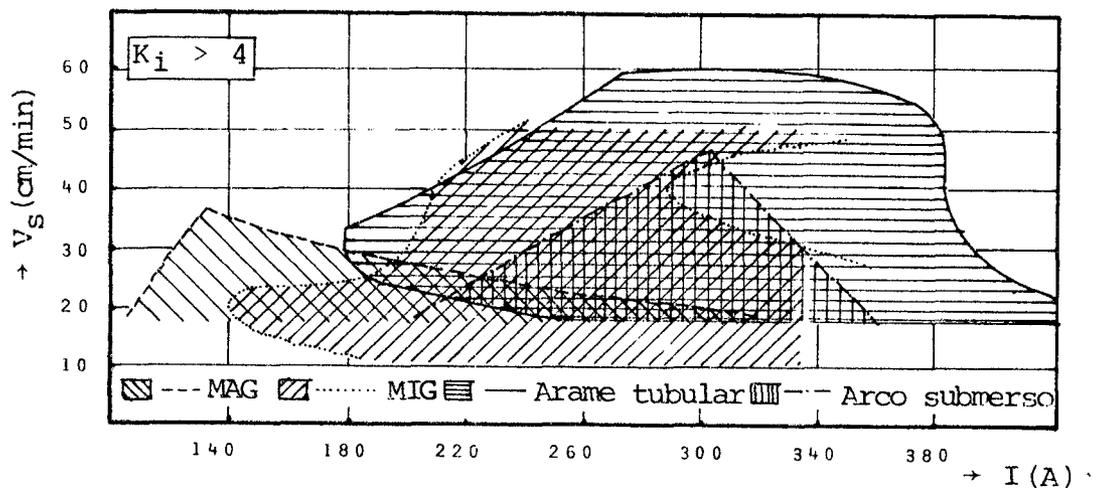


Fig. 3.30 - Campo de ocorrência para processos de soldagem de alta produção, em relação ao fator  $k_i > 4$ .

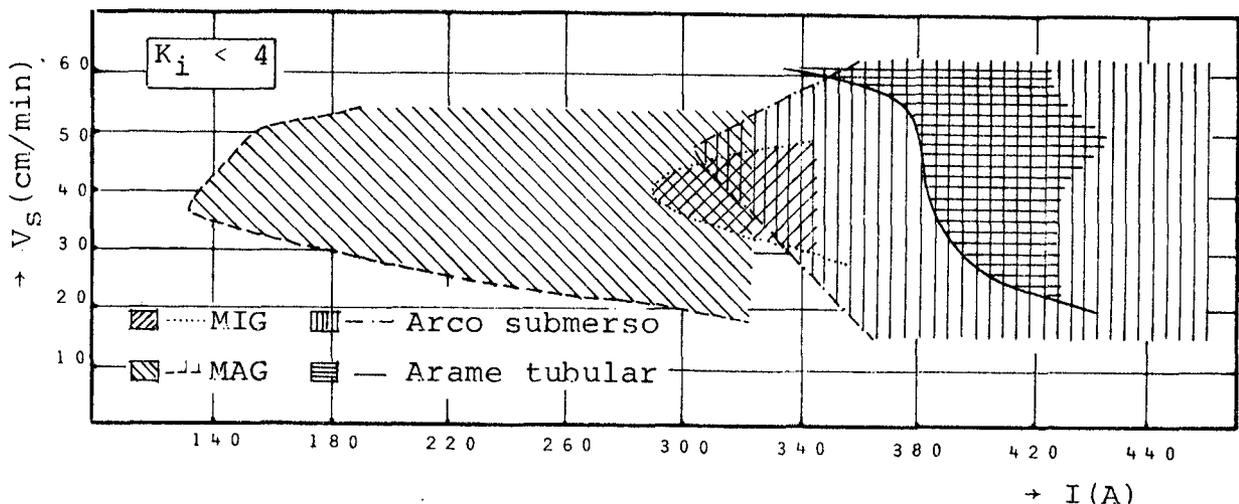


Fig. 3.31 - Campo de ocorrência para processos de soldagem de alta produção, em relação ao fator  $k_i < 4$ .

Em relação ao fator  $k_e$ , as (figs. 3.32 e 3.33) mostram os respectivos campos para o fator de forma  $k_e < 4$  e  $k_e > 4$ , e como se observa os processos de alta produção se caracterizam, em geral, por uma solda com excesso relativo de reforço ( $k_e < 4$ ), principalmente o processo MIG. Tem-se apenas algumas áreas com uma diminuição relativa do reforço (fig. 3.33,  $k_e > 4$ ), sendo que neste caso o processo arame tubular se mostra mais vantajoso, por possuir um campo maior.

Ressalta-se ainda a existência de uma área (em negrito), no processo a arco submerso, onde  $k_e > 4$  e  $k_i < 4$ , ou seja, proporciona uma solda sem excesso relativo de reforço ou largura.

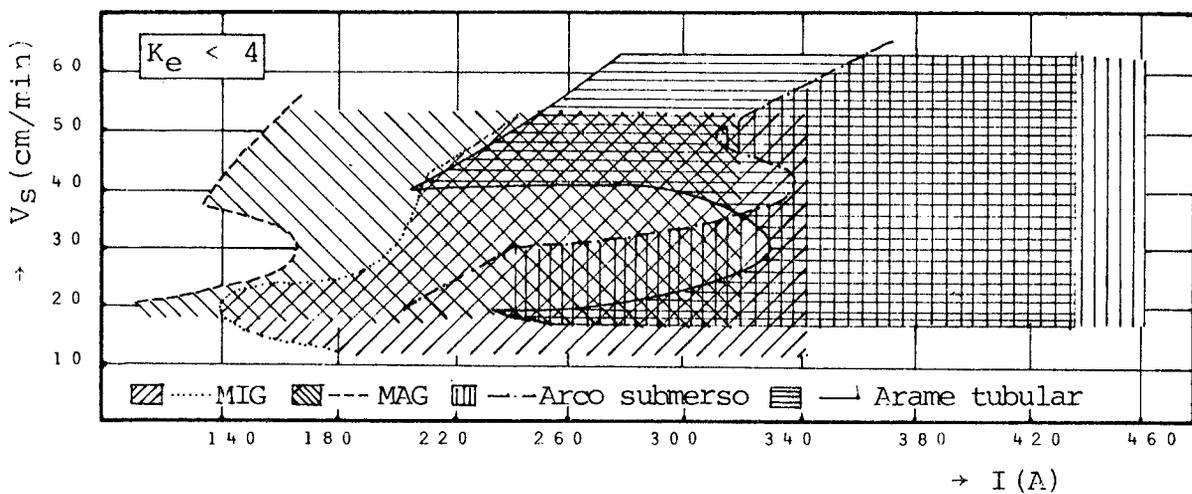


Fig. 3.32 - Campos de ocorrência para processos de soldagem de alta produção em relação ao fator  $k_e < 4$ .

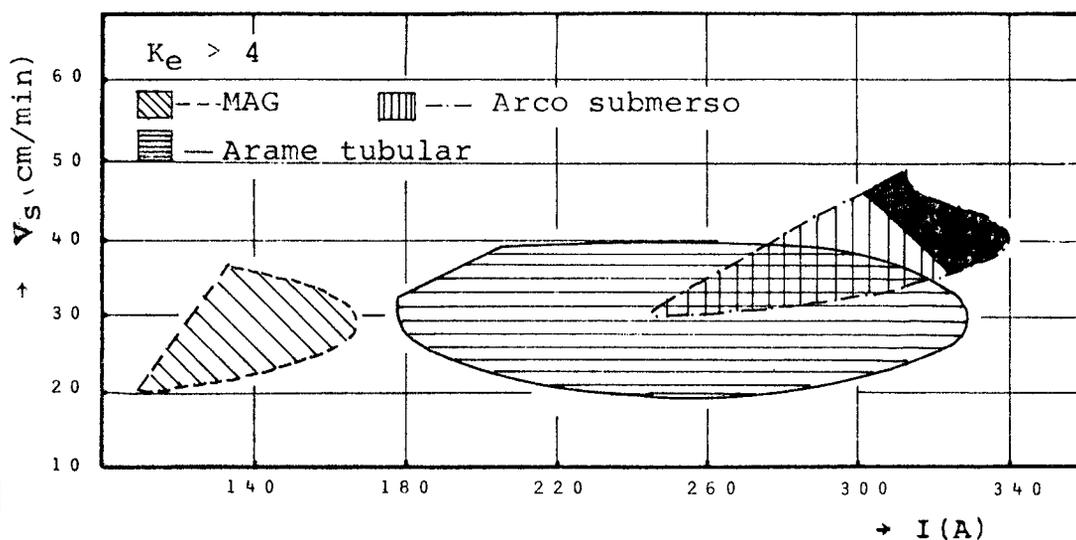


Fig. 3.33 - Campos de ocorrência para processos de soldagem de alta produção, em relação ao fator  $k_e > 4$ .

Para o processo de baixa produção, que possuem produção inferior a 3 kg/h, foram estudados dois tipos de eletrodos revestidos: tipo celulósico e tipo básico. Seus respectivos campos de ocorrência em relação ao fator  $k_i$ , são apresentados nas (figs. 3.34 e 3.35). O eletrodo do tipo celulósico se destaca pela sua maior penetração, apresentando uma área de  $k_i < 4$ , bem maior do que a obtida com eletrodo básico, e este por sua vez apresenta uma área mais ampla para  $k_i > 4$ , o que caracteriza uma solda com excesso relativo de largura.

Os campos de ocorrência em relação a  $k_e$ , são apresentados nas (figs. 3.36 e 3.37). Observa-se que o tipo básico apresenta uma área de  $k_e > 4$ , referente a solda sem excesso relativo de reforço, bem mais ampla em comparação ao tipo celulósico. Como no processo a arco submerso, apresenta uma área comum a  $k_e > 4$  e  $k_i < 4$ , referentes a solda sem excesso relativo de reforço e largura (em negrito).

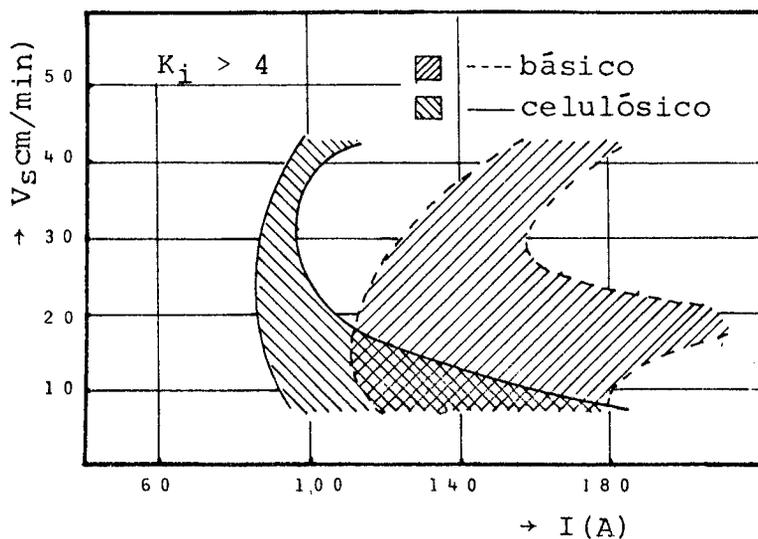


Fig. 3.34 - Campo de ocorrência para processo com eletrodo revestido do tipo celulósico e básico, em relação a  $k_i > 4$ .

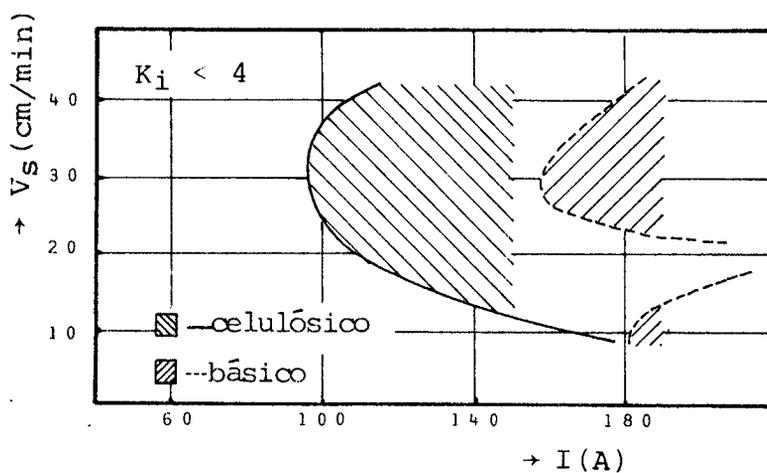


Fig. 3.35 - Campo de ocorrência para processo com eletrodo revestido do tipo celulósico e básico, em relação a  $k_i < 4$ .

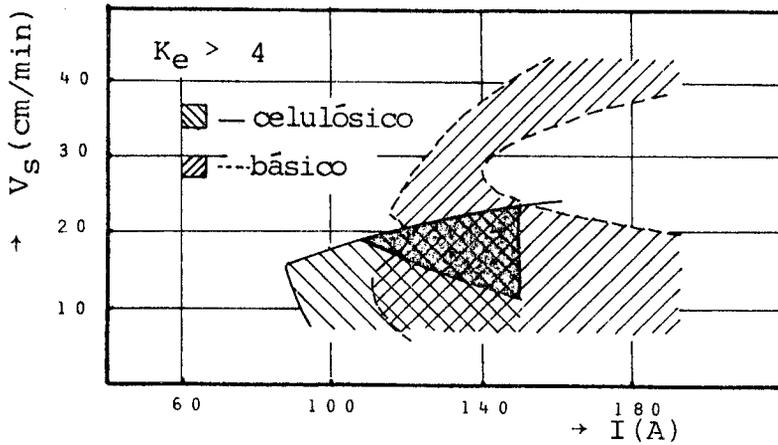


Fig. 3.36 - Campo de utilização em relação a  $k_e > 4$ .

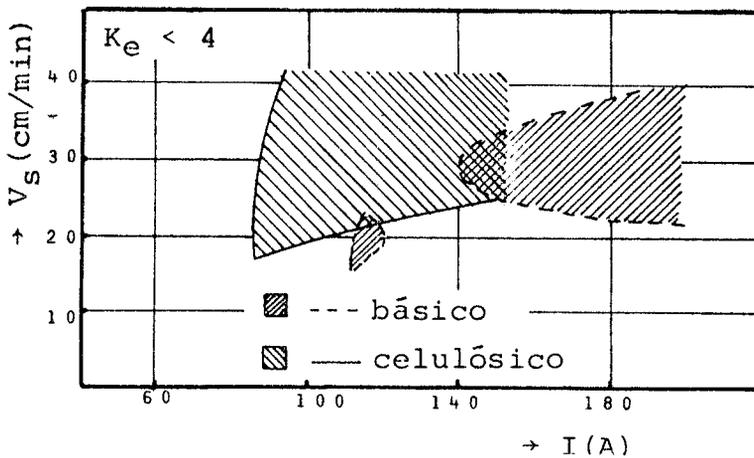


Fig. 3.37 - Campo de utilização em relação a  $k_e < 4$ .

As constantes  $k_e$  e  $k_i$ , caracterizam a forma da solda, portanto pode-se dizer que a forma da solda mais adequada para passe de penetração, seria com  $k_i < 4$ , e para passe de enchimento as soldas que tivessem um excesso relativo de reforço e largura, ou seja, com  $k_i > 4$  e  $k_e < 4$ . Os processos que se tornam mais característicos nas seguintes situações são:

$k_i < 4$  - processos arco submerso e MAG;

$k_i > 4$  e  $k_e < 4$  - processos arame tubular e MIG.

Esse aspecto da característica do processo em diferentes tipos de passes, será visto mais criteriosamente em capítulo posterior, com auxílio dos dados já levantados.

### 3.5 - CONCLUSÕES

a) A confirmação do correlacionamento da geometria da solda (largura, reforço e penetração) com a relação  $I/Vs$  e o comprimento do arco, para o processo a arame tubular. Leva a acreditar na possibilidade do emprego deste modelo para outros processos.

b) Quanto a influência da velocidade de soldagem na geometria da solda:

- Em cada processo, dentro do campo de utilização estudado, existe uma velocidade de soldagem, que permite obter, numa mesma corrente, maior penetração do que nas demais velocidades. Uma exceção foi observada no processo MAG para correntes abaixo de 180 A.

- Com o aumento da velocidade de soldagem, diminui a sensibilidade da variação da geometria com a corrente.

c) Quanto a forma predominante da solda tem-se:

- processos de alta produção

$k_i < 4$  - processo MAG e arco submerso

$k_i > 4$  e  $k_e < 4$  - processos MIG e arame tubular

- processo de baixa produção

$k_i < 4$  - eletrodo revestido tipo celulósico

$k_e > 4$  - eletrodo do tipo básico.

#### 4- SELEÇÃO DO PROCESSO QUANTO A CRITÉRIO PARA PASSES DE SOLDAGEM.

##### 4.1 - INTRODUÇÃO

O estudo, que segue tem a corrente e a velocidade da soldagem como variáveis independentes e restringe-se a duas espessuras de chapa SAE 1010, soldadas com uma única tensão de arco e sem variação da altura da tomada de corrente.

Inicialmente fez-se uma comparação de desempenho de cada processo no mesmo nível de energia (180 watt min/cm) em termos de consumo, produção e geometria de solda, área adicionada ( $S_{ad}$ ), área penetrada ( $S_p$ ) e penetração ( $p$ ) para que assim se pudesse diferenciar os processos pelas suas características de enchimento, penetração e produtividade.

Em seguida, com o estabelecimento de critérios para passes de penetração e enchimento, pode-se definir uma geometria de solda adequada para cada um dos passes a executar. Utilizando os gráficos que indicam o campo de ocorrência de cada processo de soldagem, nas condições desse estudo, ter-se-ão condições de selecionar o processo mais vantajoso no sentido de permitir uma solda com menor consumo de potência ( $P=EI$ ) e com maior velocidade de soldagem, para cada passe em questão.

São duas as razões que levam a impor a condição de uma baixa potência associada a maior velocidade de soldagem possível, na obtenção da geometria desejada da solda. A primeira razão liga-se ao fato de, com uma pequena potência associada a uma grande velocidade de soldagem, diminui-se a quantidade de calor aplicada ao metal de base. Como essa quantidade de calor além de ter influência no fenômeno de fusão e solidificação, dissipa-se pelo metal de base provocando transformações estruturais, alterações volumétricas, deformações plásticas e elásticas, etc, conclui-se que quanto menor a potência calorífica, 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.

## 4.2- DEFINIÇÕES

Costuma-se classificar os passes de soldagem em:

(a) passes de penetração, (b) passes de enchimento e (c) passes de recobrimento.

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

b) 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.

c) Passes de recobrimento, são aqueles que são aplicados como último passe, com função de acabamento, em cordão de múltiplos passes, ou aqueles cuja função é recobrir uma superfície com propriedades especiais, diferentes das do material de base.

## 4.3- COMPARAÇÃO NO MESMO NÍVEL DE ENERGIA

Comparou-se os diversos processos de soldagem no mesmo nível de energia. As medidas geométricas foram feitas sobre uma seção reta particular da solda, aquela em que a corrente permaneceu mais estável. A corrente ao longo da soldagem era registrada através de um traçador automático de gráficos, possibilitando determinar posteriormente a seção mais adequada.

Os resultados da comparação dos diversos processos são apresentados segundo seis eixos coordenados, formando ângulos de  $60^\circ$  entre si (fig. 4.1). Em cada eixo representou-se uma das variáveis estudadas em escala conveniente. Cada solda pode então ser apresentada por um polígono de seis lados definidos pelos pontos que indicam os valores de consumo do eletrodo (C), produção de material de adição (P) na execução da solda, área adicionada ( $S_{ad}$ ), área penetrada da solda ( $S_p$ ), da penetração (p) e velocidade de soldagem ( $V_s$ ) para alcançar o mesmo nível de energia.

Quando o polígono se alonga para baixo significa que a solda tem boas características para passes que requerem penetração; quando se alonga para cima significa boas características para passes de enchimento, quando se alonga para cima, tendendo para direita,-

significa boas características de produtividade, ou seja, alta produção e velocidade de soldagem.

Convém lembrar que determinados processos alcançam valores de corrente não atingíveis por outros. Isso pode ser vislumbrado através da (fig. 2.23), que mostra a faixa de corrente de trabalho de cada processo. Assim, pode-se atingir o mesmo nível de energia com valores de corrente maiores ou menores, alterando-se a velocidade de soldagem convenientemente, no caso de se manter a tensão constante.

Verificou-se (2) que, para um mesmo processo, a variação proporcional da corrente e da velocidade afetam um pouco a geometria da solda, ainda que se mantenha constante a tensão e a energia por unidade de comprimento. No entanto, quando se comparam processos de alta produção com os de baixa produção, a influência da variação proporcional da corrente e da velocidade de soldagem é muito menos significante que a variação causada pela mudança de processo. Logo a comparação do resultado pode ser feita adequadamente apenas mantendo constantes a energia por unidade de comprimento e a tensão.

#### 4.3.1 - Avaliação dos Resultados

Examinando a (fig. 4.1), nota-se a supremacia dos processos automáticos MIG, MAG, arame tubular e arco submerso - sendo acentuada a vantagem do processo MAG no aspecto de penetração - sobre o processo com elétrodo revestido. Entre estes por sua vez ressalta-se o elétrodo do tipo celulósico (E6010), que no aspecto de penetração supera o arame tubular e compete com o processo MIG, porém é menos produtivo que o elétrodo do tipo básico com pó de ferro (E7018), mas são ambos superiores ao elétrodo do tipo rutílico (E6013).

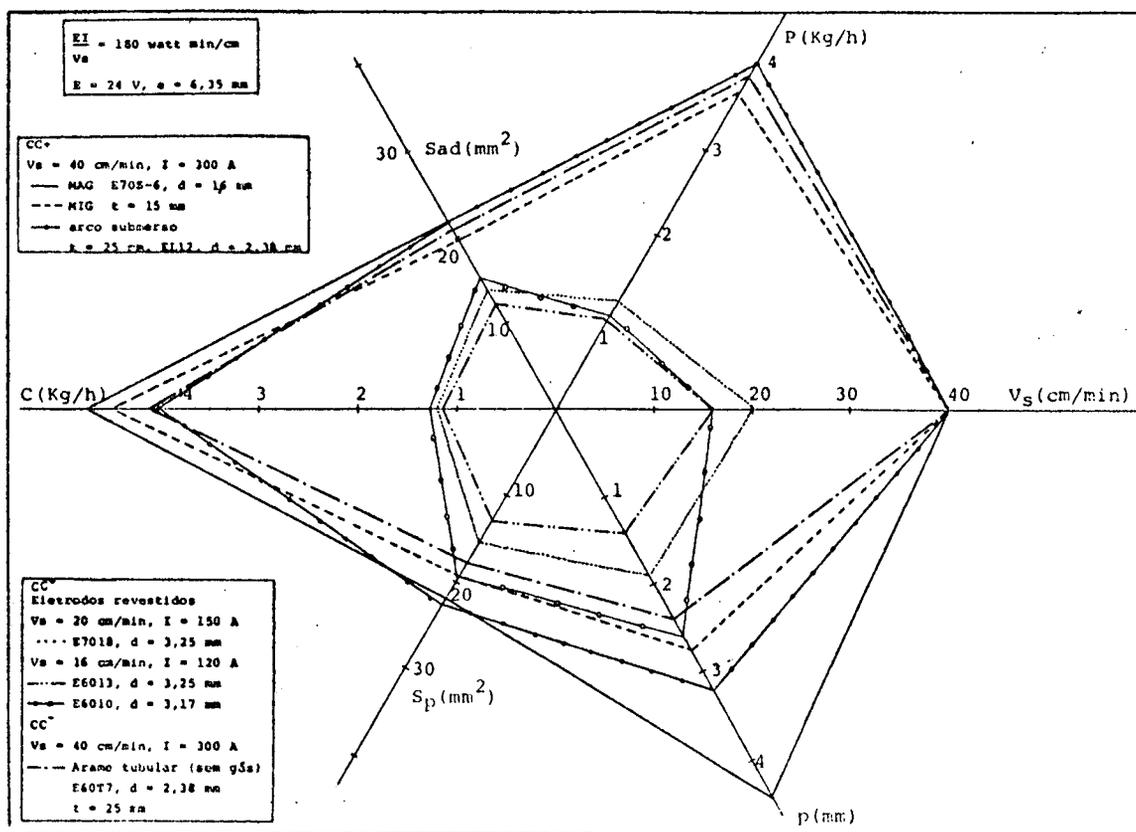


Fig. 4.1 - Comparação entre processos de soldagem, no mesmo nível de energia (180 watt min/cm).

Em suma, os processos mais indicados para passes de penetração seriam, em ordem, os seguintes: MAG; arco submerso; MIG; eléctrodo revestido do tipo celulósico; e arame tubular.

Nota-se ainda que muito embora o processo MAG apresente uma penetração de aproximadamente 30% superior a obtida com arco submerso, a sua área penetrada é aproximadamente igual. Isso se deve a forma alongada da penetração conseguida com o processo MAG.

Quanto ao aspecto de enchimento os processos automáticos são os mais indicados, pois eles apresentam pouca diferença na área adicionada. Mas quando se requer pouca penetração e mais enchimento, o mais indicado seria o processo com arame tubular. E nesse ponto, entre os eléctrodos revestidos, seria indicado o do tipo rutilico (E6013).

Em termos de produtividade é evidente que os processos automáticos, levam uma nítida vantagem sobre os processos que utilizam eléctrodos revestidos. Porém o processo a arco submerso alcança maiores valores de corrente, impondo assim o uso de maior velocidade

de de soldagem, para se ter o mesmo nível de energia, dando maior produção. Tendo assim uma maior produtividade, e poderá também superar os demais processos no aspecto de penetração e enchimento, nesse nível de energia ou em outros.

Baseado na premissa de continuidade e conservação da matéria, pode-se escrever que:

$$V_s \cdot S_{ad} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot V_a \cdot \eta_d$$

onde

$V_a$  = velocidade de alimentação

$\eta_d$  = rendimento de deposição

Como o consumo é dado por

$$C = 0,37 V_a d^2 \text{ em kg/h}$$

Tem-se:

$$V_s \cdot S_{ad} = \frac{\pi}{4} \frac{C}{0,37} \eta_d$$

ou:

$$V_s \cdot S_{ad} = K P; K = \frac{\pi}{4 \cdot 0,37}$$

então:

$$V_s = K \frac{P}{S_{ad}}$$

Ou seja: a velocidade de soldagem é diretamente propor<sub>cional</sub> a razão  $P/S_{ad}$ , que explica o paralelismo que se observa entre os lados dos polígonos limitados pelos eixos  $S_{ad}$  e  $P$ , quando se tem velocidade de soldagens idênticas.

Ressalta-se que o mesmo nível de energia dos diversos processos foi obtido dando aos processos automáticos uma velocidade de soldagem superior a dos elétrodos revestidos, em vista do valor de corrente alcançados pelos mesmos.

Em suma, pede-se concluir que:

1) Para passes de penetração

a) entre os processos de alta produção: processo MAG e o arco submerso;

b) entre os processos de baixa produção: processo com elétrodo do tipo revestido do tipo celulósico.

2) Para passes de enchimento

a) entre os processos de alta produção, todos são adequados;

b) entre os processos de baixa produção: processo com elétrodo revestido com pó de ferro.

3) Para alcançar-se produtividade recomenda-se o uso de processos de alta produção.

#### 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 - Passe de Penetração.

Seja, por exemplo, uma junta em I a ser soldada com dois passes (fig. 4.2) ou em único passe (fig. 4.3).

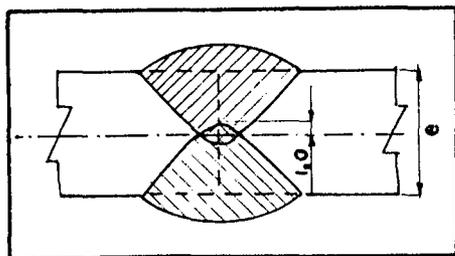


Fig. 4.2 - Junta em I, soldada em dois passes.

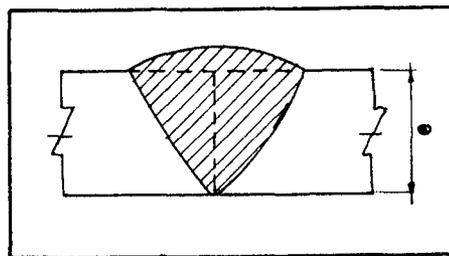


Fig. 4.3 - Junta em I, soldada em único passe.

O critério a ser seguido, no caso de junta I soldada em dois passes, seria fixar a penetração a ser alcançada de modo a garantir a sobreposição dos cordões de pelo menos 1,0 mm, ou seja,  $p = \frac{e}{2} + 0,5 \text{ mm}$ . Com isso garante-se uma penetração nunca inferior a metade da espessura, pois a variação de penetração causada pelo erro da corrente ( $\pm 10 \text{ A}$ ), é menor que o estipulado 0,5 mm nos processos em estudo. Para a solda em passe único seria fixado a penetração máxima e mínima exigida. A máxima deve ser igual a espessura da chapa, pois com valores superiores ocorre vazamento ocasionando um furo na peça obra. O valor mínimo será um pouco menor que a espessura da chapa, porém oferece segurança contra o vazamento da solda. Admite-se um repasse de acabamento no verso, para garantir a penetração total na raiz da solda.

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

A partir dos gráficos que mostram a variação da geometria da solda (b,p e r) com a corrente e velocidade de soldagem para juntas em I, é possível obter-se outros gráficos que mostram a variação de  $Kx$  (Anexo IV), e através desses gráficos obter curvas de iso -  $Kx$ , que são feitas estabelecendo um valor de  $Kx$ , e determinando a corrente e a respectiva velocidade da soldagem, pela qual possa atingir esse valor; formando-se assim, pares de "Vs - I" que configurariam a linha de iso- $Kx$ .

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 espessura da chapa, como mostra o gráfico da (fig. 4.4), onde se vê que com o aumento da espessura, na velocidade de  $V_s = 40 \text{ cm/min}$  e corrente  $I = 300 \text{ A}$ , a penetração e a largura diminuem enquanto que o reforço aumenta. Essa variação é própria a cada processo (fig. 4.5 e 4.6).

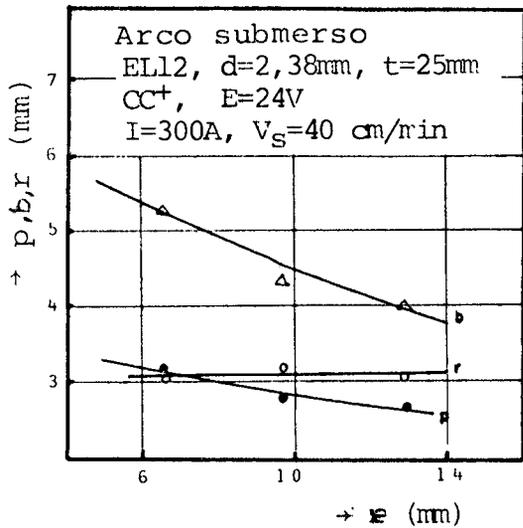


Fig. 4.4 - Variação da geometria da solda com a espessura para o processo arco submerso.

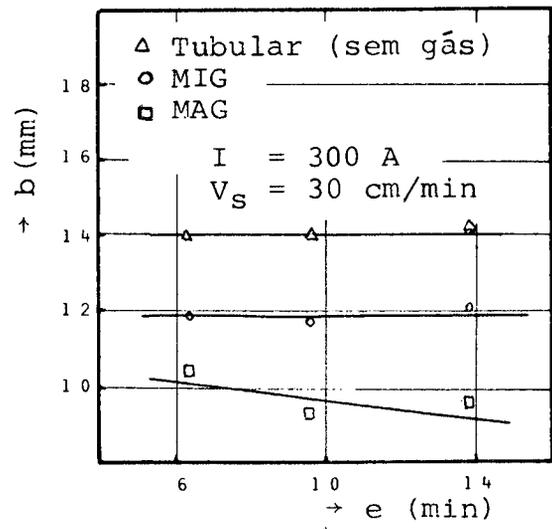


Fig. 4.5 - Variação da largura com a espessura para os processos MIG, MAG e arame tubular.

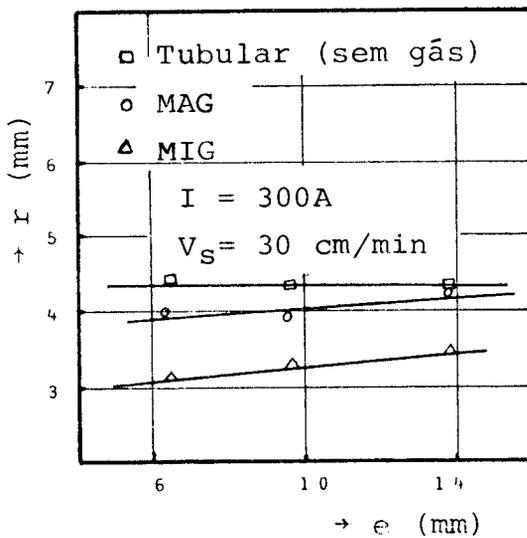


Fig. 4.6 - Variação do reforço com a espessura para os processos MIG, MAG e arame tubular.

Assim sendo, poder-se-ia ter gráficos de variação da geometria da solda com a corrente para diferentes espessuras em diversas velocidades de soldagem, para que, no caso de se ter uma determinada espessura com valor intermediário entre as apresentadas no gráfico, fosse possível uma interpolação mais adequada do valor da geometria da solda numa específica condição de soldagem tal como

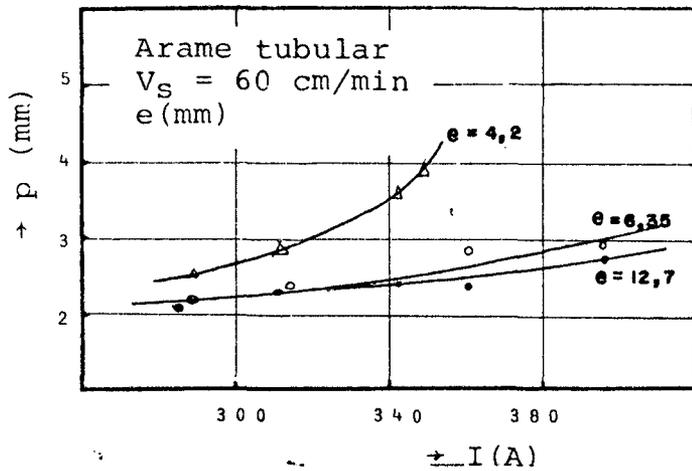


Fig. 4.7 - Variação da penetração com a corrente na  $V_s = 60 \text{ cm/min}$  para diferentes espessuras.

o gráfico da (fig. 4.7), - onde tem-se curvas de variação da penetração com a corrente na  $V_s = 60 \text{ cm/min}$  para diferentes espessuras. Observa-se que o aumento de penetração com a corrente é mais acentuado com menor espessura, pois a medida que a penetração se aproxima do valor da espessura da chapa, menor será a dissipação de calor, ocasionando uma variação de penetração mais sensível à corrente.

No presente trabalho não se efetuou um levantamento de modo a abranger diversas espessuras, apenas situou-se numa determinada espessura ( $e = 6,35 \text{ mm}$  para os processos MIG, MAG e elétrodo revestido,  $e = 12,7 \text{ mm}$  para os processos arco submerso e arame tubular), de forma que se conseguiu-se uma metodologia para se selecionar adequadamente as condições de soldagem, segundo os critérios apresentados. Assim, na máxima velocidade de soldagem, requer-se a satisfação dos seguintes critérios:

a) para  $e = 6,35 \text{ mm}$

	Critérios
único passe	mínimo $K_x$ $p = 6,35 \text{ mm}$
passe duplo	mínimo $K_x$ $p = 3,5 \text{ mm}$

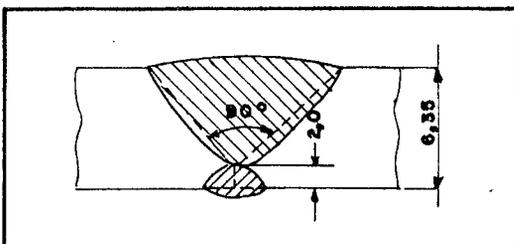
b) para  $e = 12,7$  mm

	Critérios
único passe	mínimo Kx $p = 12,7$ mm
passe duplo	mínimo Kx $p = 7,0$ mm

O caso A ( $e = 6,35$  mm), abrange os processos MIG, MAG e elé trodo revestido, por se ter realizado os experimentos nessa espesura. Como se observa, apenas o critério para duplo passe seria satisfeito com os processos MIG e MAG, devido a limitação do processo com elé trodo revestido em termos de alcance de penetração. O mesmo acontece no caso B ( $e = 12,7$  mm), para o processo arame tubular, onde o critério seria satisfeito com o processo arco submerso em duplo passe, nas condições desse trabalho, em virtude da penetração de 12,7 mm.

O passe de raiz em junta de chanfro, como no exemplo na (fig. 4.8), para  $e = 6,35$  mm e para  $e = 12,7$  mm no exemplo da (fig. 4.9), alcança uma faixa de penetração comum a todos os processos, possibilitando a sua seleção segundo os seguintes critérios:

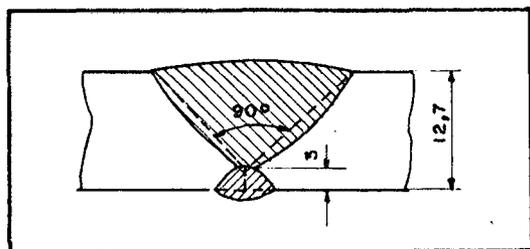
a) para  $e = 6,35$  mm



	Critério
passe de raiz	mínimo Kx $p = 2,5$ mm

Fig. 4.8 - Junta em chanfro, soldada em dois passes ( $e = 6,35$  mm)

b) para  $e = 12,7$  mm



	Critério
passe de raiz	mínimo Kx $p = 3,5$ mm

Fig. 4.9 - Junta em chanfro, soldada em dois passes ( $e = 12,7$  mm).

Em suma, tem-se:

1º)  $e = 6,35$  mm

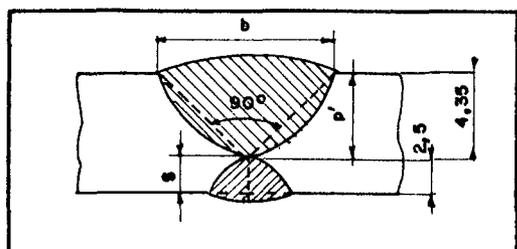
	Critério
passe duplo	mínimo Kx $p = 3,5$ mm
passe de raiz	mínimo Kx $p = 2,5$ mm

2º)  $e = 12,7$  mm

	Critério
passe duplo	mínimo Kx $p = 7,0$ mm
passe de raiz	mínimo Kx $p = 3,5$ mm

#### 4.4.2 - Passe de Enchimento

Suponha-se uma solda composta de dois cordões: o primeiro feito em um passe de enchimento e o segundo em um passe de penetração. Para o passe de enchimento do chanfro, como o apresentado na (fig. 4.10), pode-se adotar o critério da mínima área adicionada necessária para o preenchimento do chanfro. Tal critério pode ser expresso assim:



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

Para o chanfro em questão, seria:

$$S_{ad} = 24,6 \text{ mm}^2$$

Fig. 4.10 - Junta em chanfro soldada em dois passes.

Como a área adicionada não depende do tipo de chanfro, os dados experimentais, obtidos para bordos retos sem folga, podem ser utilizados. Nestas experiências a área adicionada é aproximadamente.

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

onde  $Kx$  é definido pelo produto  $b \times r$ .

Então:

$$Kx = S_{ad} \cdot 1.43 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (4.1)$$

no caso em questão, tem-se:  $Kx = 35 \text{ mm}^2$

Com o valor pré-determinado de  $Kx$  e sobrepondo a respectiva curva de iso- $Kx$  nos campos de ocorrência, 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 ( $p \leq s$ ), é aqui proposta porque se acredita que ela seja suficiente para evitar uma perfuração na junta a ser soldada, pois as curvas de isopenetração apresentadas são para junta em I, não podendo ser levadas em conta para junta em chanfro. Para um estudo mais preciso e extenso seriam necessários levantamentos experimentais de penetração em encosto, válidos especificamente para o caso do chanfro em estudo, como mostra o exemplo das (figs. 4.11 e 4.12) para o processo com arame tubular, cujos dados experimentais utilizados na seleção ( $Kx = 24 \text{ mm}^2$  em  $p = 1,6 \text{ mm}$  e  $2,4 \text{ mm}$ ), foram obtidos na espessura de  $12,7 \text{ mm}$ . Observou-se uma penetração de encosto bem inferior à obtida na deposição em junta I. Portanto os processos com experimento na espessura de  $6,35 \text{ mm}$ , também estará garantido o não vazamento, haja vista a influência da espessura na geometria da solda.

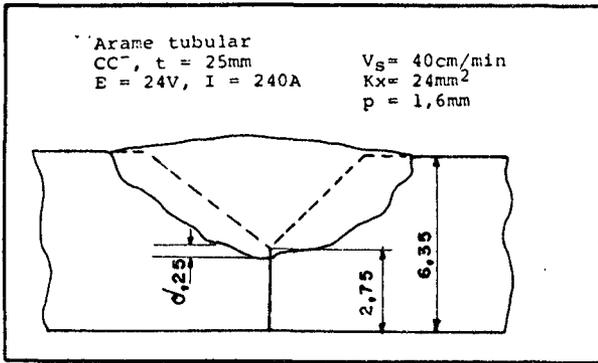


Fig. 4.11 - Junta em chanfro soldada em único passe para  $Kx = 24 \text{ mm}^2$  e  $p = 1,6 \text{ mm}$ .

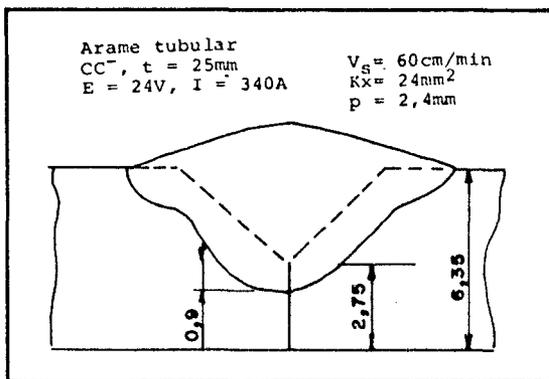


Fig. 4.12 - Junta em chanfro, soldada em único passe para  $Kx = 24 \text{ mm}^2$  e  $p = 2,4 \text{ mm}$ .

Levando-se ainda em consideração a influência da espessura - na geometria da solda, como foi visto anteriormente, pode-se vislumbrar que a curva de isopenetração, tenderia a caminhar no sentido de maiores correntes com o aumento de espessura. Como a seleção das condições de soldagem para passes de enchimento poderá se dar ao longo de uma curva de isopenetração, é de se notar que na comparação entre processos com experimentos com diferentes espessuras, este fato deve ser levado em conta, visto que os parâmetros - de soldagem se modificam com a espessura como mostra o gráfico hipotético na (fig. 4.13).

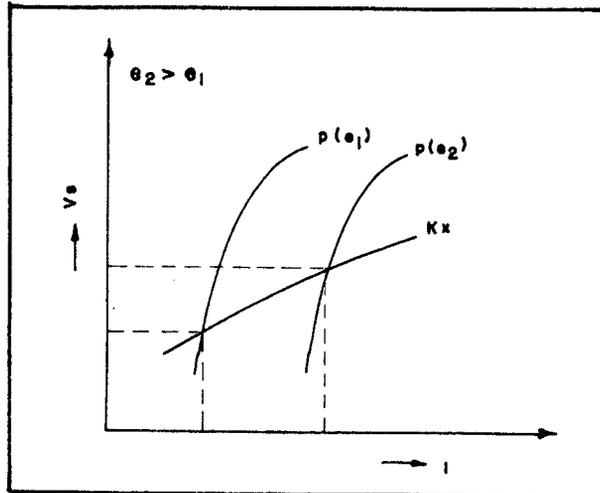


Fig. 4.13 - Gráfico hipotético da influência da espessura na curva de isopenetração.

Para o passe de raiz, que se caracteriza como passe de penetração, um critério adequado foi estipulado anteriormente.

Em caso de chanfros para chapas muito espessas, onde não é possível o preenchimento do chanfro em 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.

$$Ve = \frac{\sum_{n=1}^n Sad_n . Vs_n}{Sad_t} ; Sad_n = 0,7 b.r = 0,7.Kx$$

onde:

$Ve$  = velocidade equivalente

$Sad_n$  = área adicionada de cada passe

$Sad_t$  = área adicionada total

$n$  = número de passes

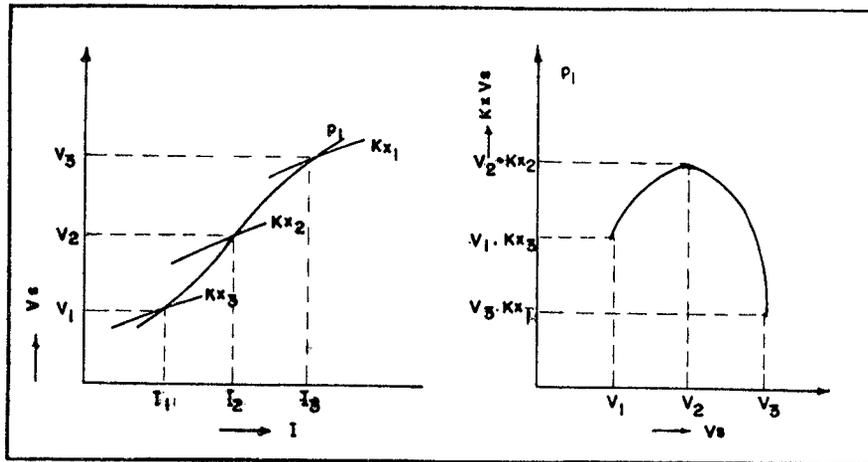
Assim, tem-se:

$$V_e = \frac{0,7 \sum_{l=1}^n Kx V_{s_n}}{Sad_t} \quad (4.2)$$

Em suma tem-se para passe de enchimento que considerar os seguintes casos com seus respectivos critérios. Estar-se admitindo-se o mesmo encosto da (fig. 4.8), para o passe inicial do caso múltiplos passes.

	Critério
único passe	Kx calculado $p \leq 2,5 \text{ mm}$
passe inicial de cordão de múltiplos passes	máximo Kx.Vs $p \leq 2,5 \text{ mm}$

A seleção da condição de soldagem com máximo produto  $Kx \cdot Vs$ , que é conveniente conforme visto anteriormente, com  $p \leq 2,5 \text{ mm}$ , pode ser realizada ao longo da curva de isopenetração igual a 2,5 mm, conforme mostra o exemplo hipotético na fig. 4.14. Onde se pode visualizar, na fig. 4.14b, a velocidade de soldagem ( $V_2$ ) na qual se tem o máximo produto  $Kx \cdot Vs$  e a respectiva corrente ( $I_2$ ), na figura 4.14a. Isso pode ser feito levantando-se, no gráfico "Vs x I" (fig. 4.14a) os produtos  $Kx \cdot Vs$  ( $Kx_1 V_3$ ,  $Kx_2 V_2$ ,  $Kx_3 V_1$ ), - nas diversas velocidades em coincidência com a curva de isopenetração. E consecutivamente colocando em gráfico (fig. 4.14b) os respectivos pares "Vs - Vs Kx" ( $V_1 - V_1 Kx_3$ ,  $V_2 - V_2 Kx_2$ ,  $V_3 - Kx_1 V_3$ ). Este levantamento é necessário para o passe inicial, mas nos demais passes, onde a penetração é irrelevante conviria explorar, dentro do campo de utilização de cada processo, o máximo produto ( $Kx \cdot Vs$ ), independentemente da penetração. Para tanto seria necessário ter-se levantamentos da variação do produto ( $Kx \cdot Vs$ ) em todo campo de utilização. Um meio simples é realizar um gráfico - da variação do produto ( $Kx \cdot Vs$ ) com a corrente em diversas velocidades. Isto realça a velocidade de soldagem e corrente onde o produto ( $Kx \cdot Vs$ ) é máximo, conforme mostra o gráfico hipotético, da figura 4.15:



(a)

(b)

Fig. 4.14 - Exemplo hipotético, mostrando a forma de se determinar o maior produto  $Kx.Vs$ , ao longo da curva de isopenetração.

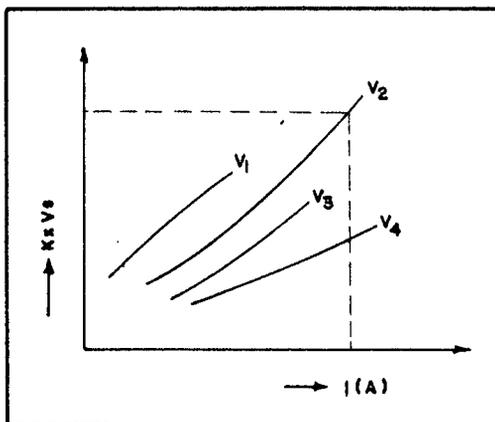


Fig. 4.15 - Exemplo hipotético na determinação do máximo ( $Kx.Vs$ ).

#### 4.5 - SELEÇÃO DE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PARA PASSE DE PENETRAÇÃO

##### 4.5.1 - Processo com Arame Tubular

Como indica a figura 4.16, as condições possíveis de soldagem com mínimo  $Kx$  na máxima velocidade de soldagem, para o passe de raiz em questão ( $p = 3,5 \text{ mm}$ ), seria:

$I = 415 \text{ A}$  na  $V_s = 40 \text{ cm/min}$  ( $K_x = 40 \text{ mm}^2$ )

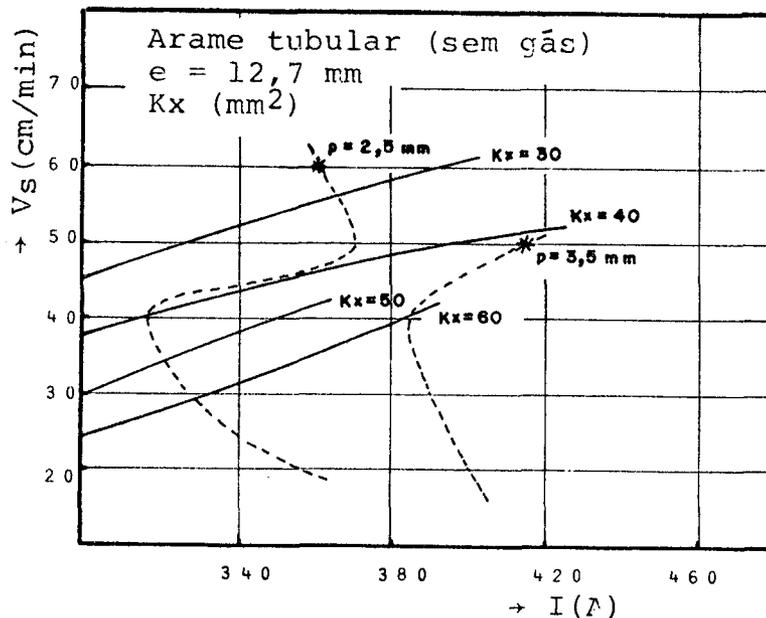


Fig. 4.16 - Critério para passe de penetração, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A) para o processo a arame tubular.

#### 4.5.2 - Processo a Arco Submerso

A figura 4.17 mostra as seguintes condições de soldagem na máxima velocidade com mínimo  $K_x$ , para:

a) duplo passe: ( $p = 7,0 \text{ mm}$ )

$I = 460 \text{ A}$  na  $V_s = 60 \text{ cm/min}$  ( $k_x = 38 \text{ mm}^2$ )

b) passe de raiz: ( $p = 3,5 \text{ mm}$ )

$I = 335 \text{ A}$  na  $V_s = 55 \text{ cm/min}$  ( $k_x = 23 \text{ mm}^2$ )

Sendo que para o "passe de raiz", há a limitação adicional da linha de regularidade, e em comparação ao processo com arame tubular, o processo arco submerso satisfaz com menor nível de energia e de  $k_x$ .

Ressalta-se que o grande campo de aplicação do processo de soldagem a arco submerso é a união de chapas espessas, devido ao grande alcance de penetração e produção de material de adição.

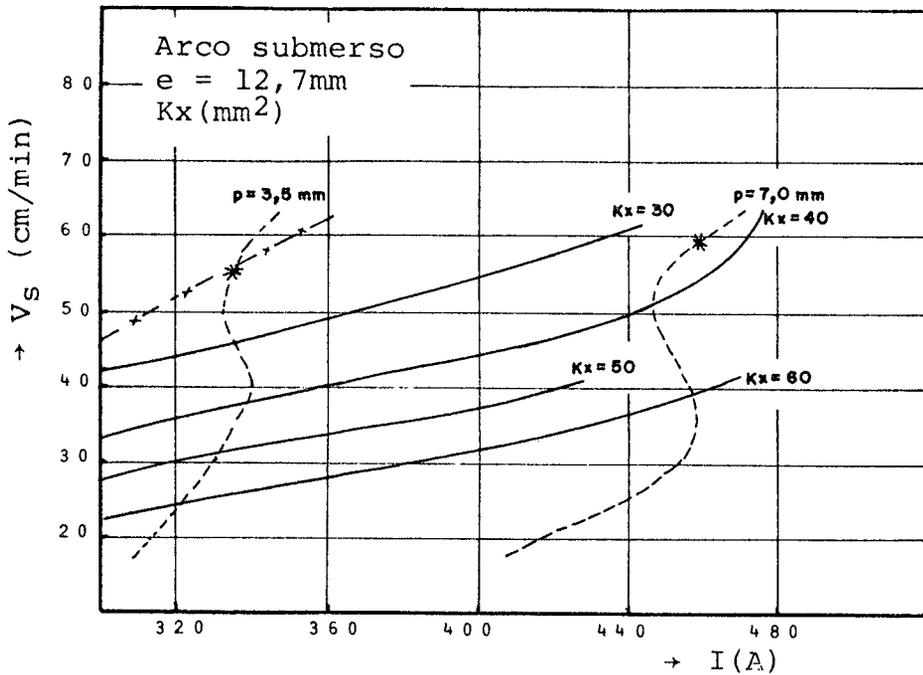


Fig. 4.17 - Critério para passe de penetração, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A), para o processo arco - submerso.

#### 4.5.3 - Processos MIG e MAG

As figuras 4.18 e 4.19 apresentam as seguintes condições de soldagem para um mínimo  $Kx$  na maior velocidade de soldagem.

Em dois passes ( $p = 3,5 \text{ mm}$ )

- processo MAG:  $I = 245 \text{ A}$  na  $V_s = 40 \text{ cm/min}$   
 $(Kx = 27 \text{ mm}^2)$

- processo MIG:  $I = 330 \text{ A}$  na  $V_s = 40 \text{ cm/min}$   
 $(Kx = 45 \text{ mm}^2)$

O processo MAG se mostra mais vantajoso em relação ao MIG, - devido ser um processo que possui características para passes de penetração, alcançando níveis de energia mais baixos e com menor  $Kx$ , na subordinação ao critério estabelecido.

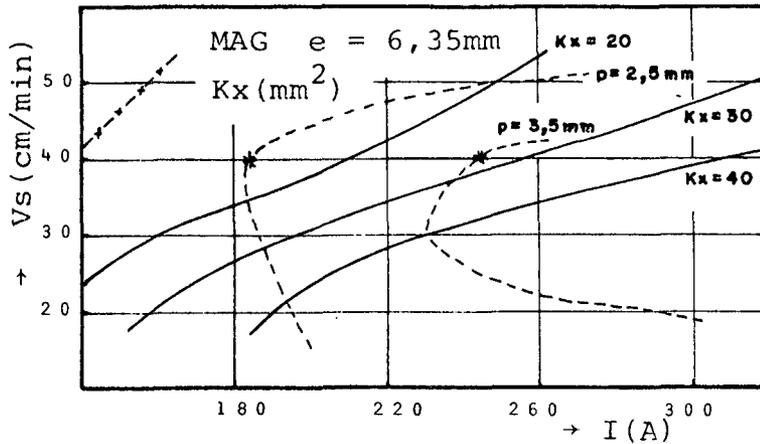


Fig. 4.18 - Critério para passe de penetração, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A), para o processo MAG.

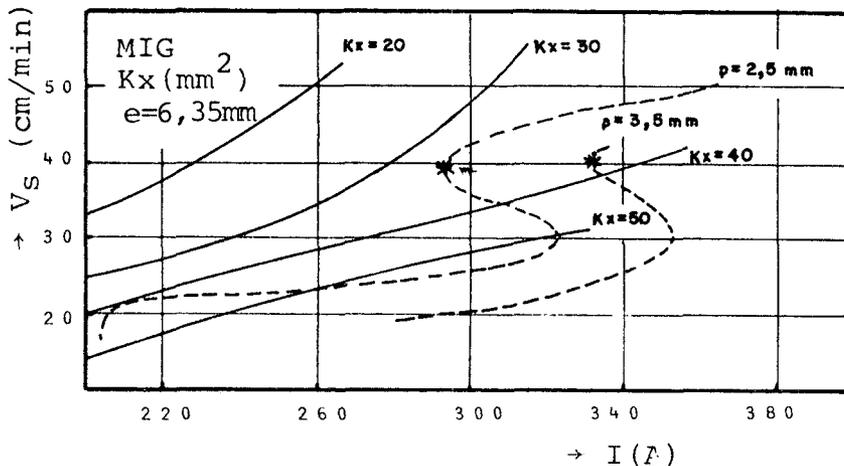


Fig. 4.19 - Critério para passe de penetração, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A), para o processo MIG.

#### 4.5.4 - Processo com Eléttrodo Revestido

Como se observa nas (figs. 4.20 e 4.21), só há possibilidade de se satisfazer o critério para passe de raiz ( $p = 2,5$  mm), e as condições de soldagem viáveis seriam:

- tipo básico

$$I = 182 \text{ A na } V_s = 40 \text{ cm/min (} K_x = 17 \text{ mm}^2 \text{)}$$

- tipo celulósico

$$I = 130 \text{ A na } V_s = 40 \text{ cm/min (} K_x = 9,5 \text{ mm}^2 \text{)}$$

Nota-se que o elétrodo do tipo celulósico é o mais indicado para passe de penetração e, em comparação aos processos MIG e MAG, leva uma nítida vantagem satisfazendo o critério com menor valor de corrente, de  $K_x$  e com uma velocidade de soldagem relativamente alta.

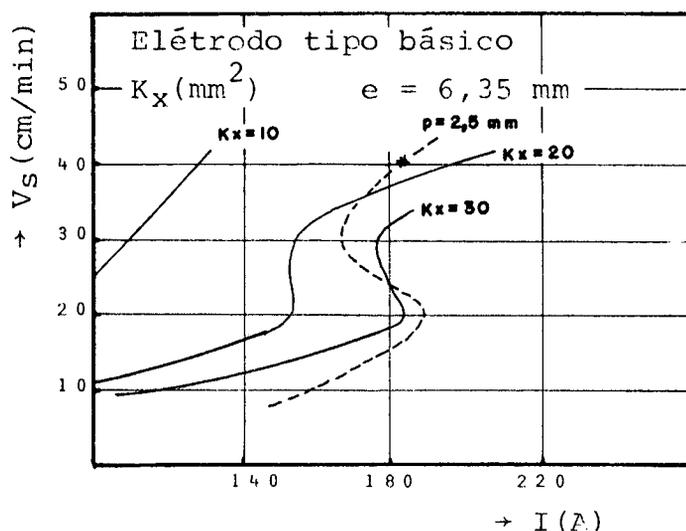


Fig. 4.20 - Critério para passe de penetração, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A), para o processo com elétrodo revestido do tipo básico.

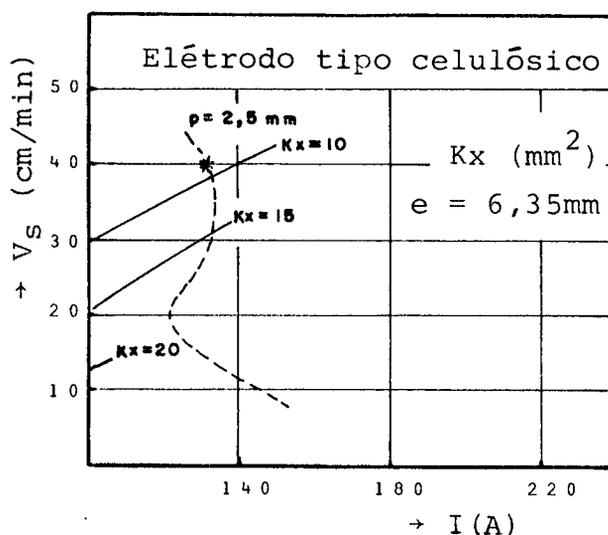


Fig. 4.21 - Critério para passe de penetração, em relação a  $V_s$  (cm/min) e  $I$  (A), para o processo com elétrodo revestido do tipo celulósico.

## 4.6 - SELEÇÃO DE PROCESSO PARA PASSE DE PENETRAÇÃO

Como foi dito inicialmente os processos que possuem características para passes de penetração, seriam: processo MAG, arco submerso e elétrodo revestido do tipo celulósico, que é comprovado na seleção das condições de soldagem segundo a penetração necessária com um mínimo de  $Kx$ , na confecção de uma solda pré-estabelecida, - conforme mostra a tabela 4.1.

Muito embora os resultados apresentados na tabela 4.1, tenham sido obtidos em espessuras diferentes entre alguns processos, a sua comparação não é de todo funesta, pelo fato de que as diferenças entre os resultados serem mais marcantes do que a influência da diferença de espessura. Assim entre os processos de alta produção (MIG, MAG, arame tubular e arco submerso), o mais indicado seria o processo a arco submerso, que proporcionou um mínimo  $Kx$  com maior velocidade de soldagem no passe de penetração igual a 3,5 mm. E, no caso da solda atuar num campo comum aos processos de alta e baixa produção ( $p = 2,5$  mm), observa-se que os processos de alta produção são desaconselháveis, optando-se pelo elétrodo revestido do tipo celulósico.

$e=6,35$ mm				
Processo	$Kx$ (mm <sup>2</sup> )			
	em dois passes $p = 3,5$ mm mínimo $Kx$		passe de raiz $p = 2,5$ mm mínimo $Kx$	
	I (A)	$V_s$ (cm/min)	I (A)	$V_s$ (cm/min)
MAG	245	40	184	40
	$Kx = 27$		$Kx = 15$	
MIG	330	40	292	40
	$Kx = 45$		$Kx = 33$	
Elet. rev. (celulós.)	-		130	40
			$Kx = 9,5$	
Elet. rev. (básico)	-		182	40
			$Kx = 17$	

(a)

$e=12,7$ mm				
processo	$Kx$ (mm <sup>2</sup> )			
	em dois passes $p = 7,0$ mm mínimo $Kx$		passe de raiz $p = 3,5$ mm mínimo $Kx$	
	I (A)	$V_s$ (cm/min)	I (A)	$V_s$ (cm/min)
Arco submerso	460	60	335	55
	$Kx = 38$		$Kx = 23$	
Arame tubular	-		415	40
			$Kx = 40$	

(b)

Tab. 4.1 - Condições de soldagem para passes de penetração na espessura de 12,7 mm (a) e 6,35 mm (b).

## 4.7 - SELEÇÃO DE CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PARA PASSES DE ENCHIMENTO

### 4.7.1 - Processo com Arame Tubular

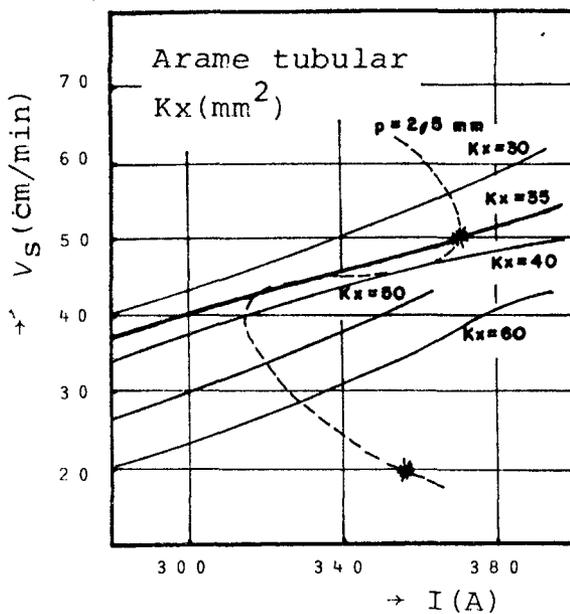
As figuras 4.22a e 4.22b, apresentam as seguintes condições de soldagem que satisfazem os critérios para:

- passe único ( $Kx = 35 \text{ mm}^2$  em  $p = 2,5 \text{ mm}$ )

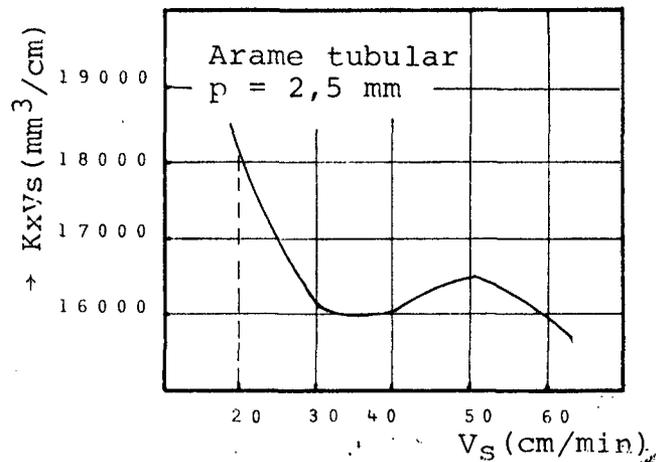
$I = 370 \text{ A}$  na  $Vs = 50 \text{ cm/min}$

- múltiplos passes (passe inicial em  $p = 2,5 \text{ mm}$ )

$I = 356 \text{ A}$  na  $Vs = 20 \text{ cm/min}$  ( $Vs.Kx = 18.200 \text{ mm}^3/\text{cm}$ )



(a)



(b)

Fig. 4.22 - Critério para passe de enchimento, em relação de  $V_s$  (cm/min) a  $I$  (A) em (a) e a  $V_s.Kx$  em (b), para o processo a arame tubular.

Nos demais passes, o gráfico da (fig. 4.23), mostra que o máximo produto ( $Kx.Vs$ ), se dá na  $V_s = 40 \text{ cm/min}$  em  $I = 400 \text{ A}$  com  $Kx.Vs = 26.600 \text{ mm}^3/\text{cm}$ . Nos outros processos em estudo o mesmo procedimento deve ser realizado, para se otimizar o produto  $Kx.Vs$ , - que proporciona uma menor velocidade equivalente em solda de múltiplos passes.

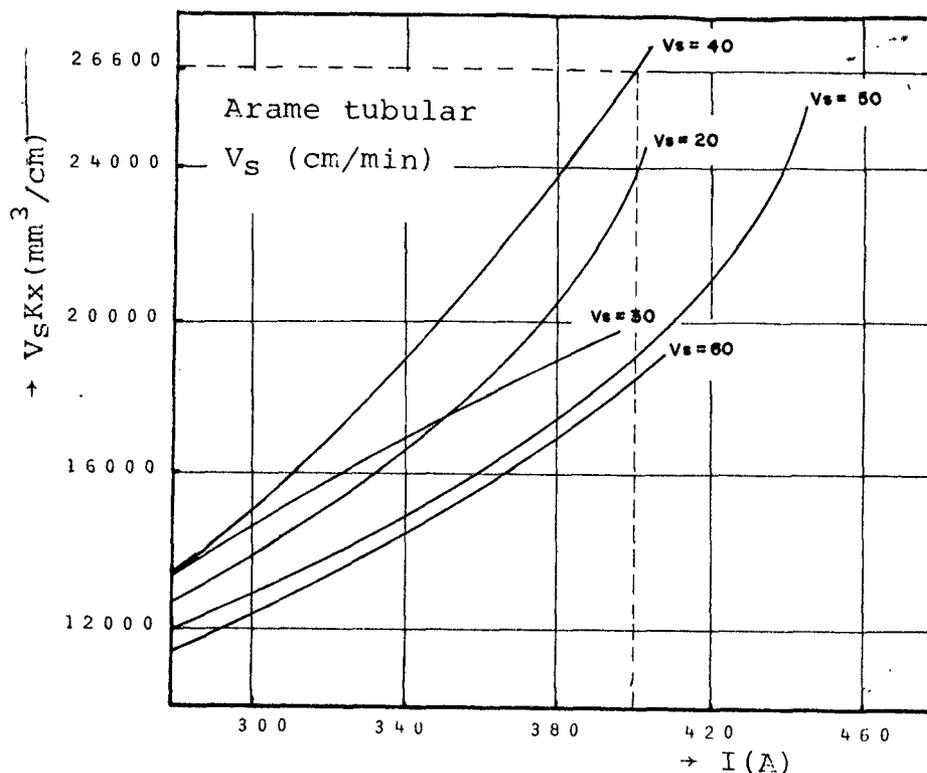


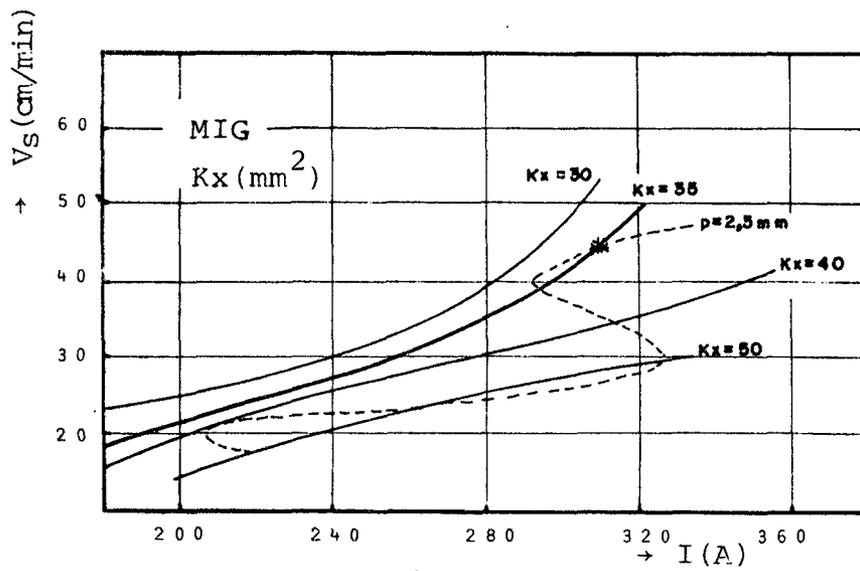
Fig. 4.23 - Produto ( $K_x.V_s$ ) e função de  $I$  (A), para diferentes velocidades de soldagem.

#### 4.7.2 - Processo a Arco Submerso

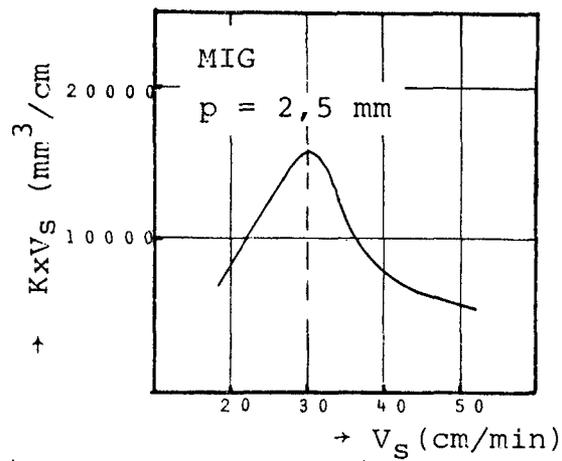
As figuras 4.24a e 4.24b mostram as seguintes condições de soldagem que satisfazem os critérios para:

- único passe ( $K_x = 35 \text{ mm}^2$  em  $p = 2,5 \text{ mm}$ )  
 $I = 267 \text{ A}$  na  $V_s = 33 \text{ cm/min}$
- múltiplo passe (passe inicial em  $p = 2,5 \text{ mm}$ )  
 $I = 278 \text{ A}$  na  $V_s = 40 \text{ cm/min}$  ( $V_s K_x = 13.200 \text{ mm}^3/\text{cm}$ )

Em comparação ao processo com arame tubular, o processo arco submerso se mostra menos vantajoso, por alcançar uma menor velocidade no caso de único passe e menor produto  $K_x.V_s$  em múltiplo-passe, não obstante, o processo a arco submerso, pelo uso de corrente mais elevadas que as proporcionadas com arame tubular, pode alcançar produções de material de adição superiores, e por conseguinte alcançando valores de  $K_x$  mais elevados e, portanto, podendo superar o processo a arame tubular.



(a)



(b)

Fig. 4.25 - Critério para passe de enchimento em relação de  $V_S$  a  $I$  em (a) e a  $V_S \cdot K_x$  em (b) para o processo MIG.

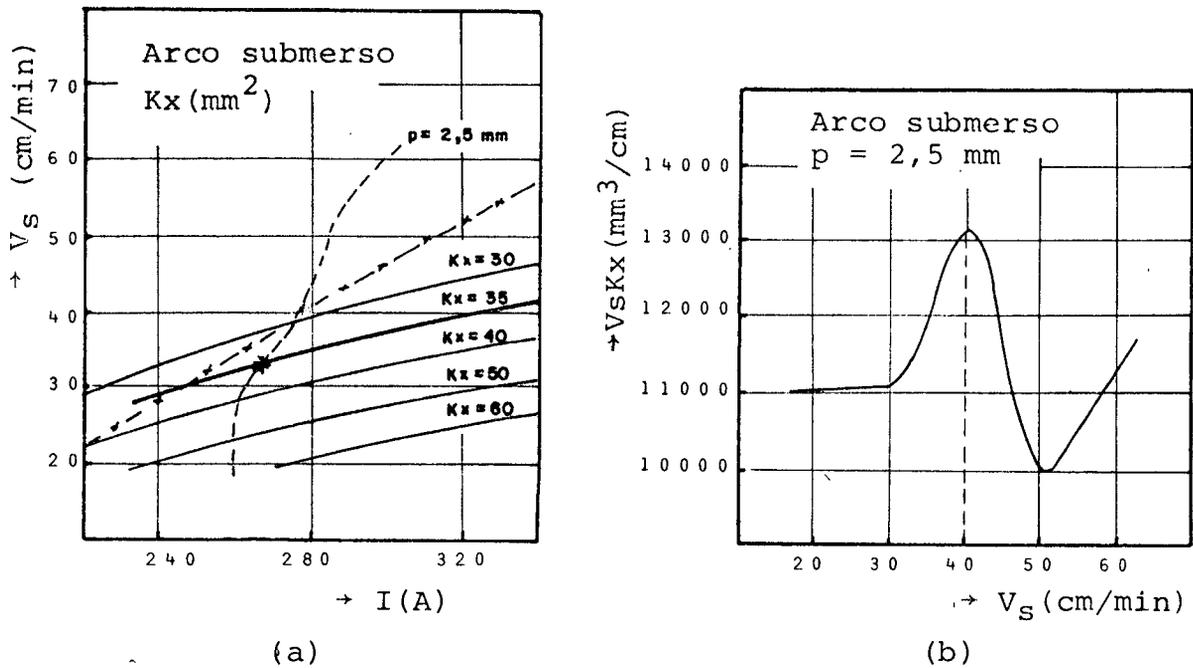


Fig. 4.24 - Critério para passe de enchimento, em relação de V<sub>S</sub> (cm/min) a I (A) em (a) e a Kx.V<sub>S</sub> em (b), para o processo a arco submerso.

#### 4.7.3 - Processo MIG e MAG

As soluções que satisfazem o critério para passe de enchimento, são mostradas na (fig. 4.25 e 4.26), são elas:

- a) para único passe (Kx = 35 mm<sup>2</sup> em p = 2,5 mm)
  - I = 310 A na V<sub>S</sub> = 45 cm/min
  - processo MAG
  - I = 190 A na V<sub>S</sub> = 25 cm/min
- b) para múltiplo passe (passe inicial em p = 2,5 mm)
  - Processo MIG
    - I = 325 A na V<sub>S</sub> = 30 cm/min
    - (V<sub>S</sub>.Kx = 15.750 mm<sup>3</sup>/cm)
  - Processo MAG
    - I = 260 A na V<sub>S</sub> = 50 cm/min
    - (V<sub>S</sub>.Kx = 10.000 mm<sup>3</sup>/cm)

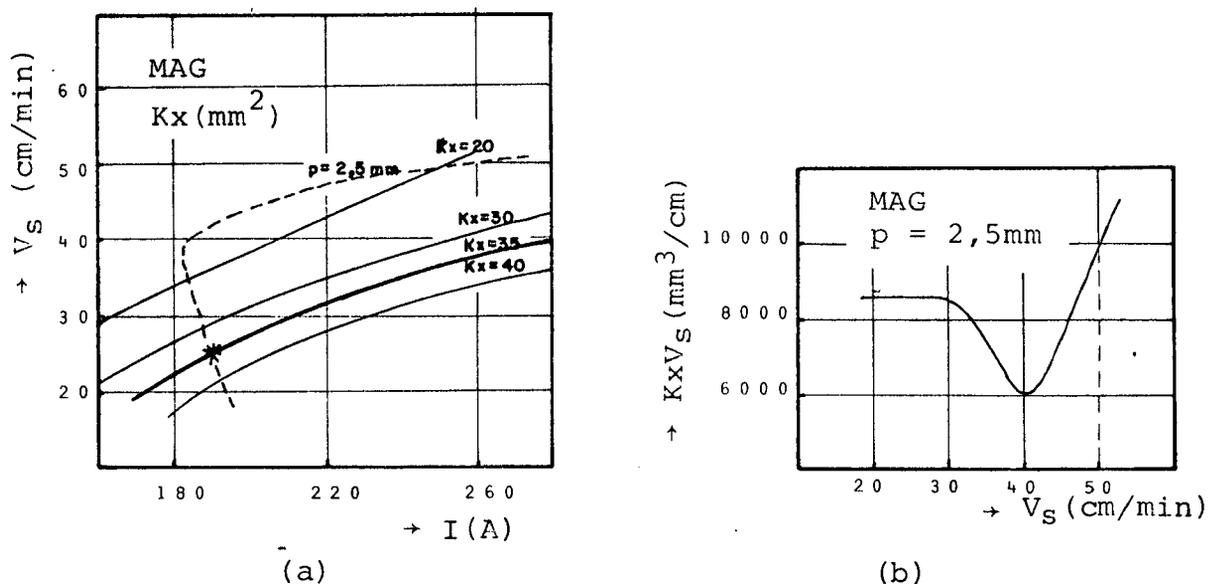


Fig.4.26 - Critério para passe de enchimento, em relação de  $V_s$  a  $I$  em (a) e a  $V_s \cdot K_x$  em (b), para o processo MAG.

Comparando-os, nos dois casos (processo MIG e MAG em único e múltiplos passes), nota-se a supremacia do processo MIG, por obter maior velocidade de soldagem em único passe e maior produto  $K_x \cdot V_s$  no caso de múltiplos passes.

#### 4.7.4 - Processo com Eléctrodo Revestido

Como se observa nas figuras 4.27 e 4.28 apenas o eléctrodo do tipo básico preenche o requisito ( $K_x = 35 \text{ mm}^2$ ), necessário para o passe único de enchimento, e uma solução em  $p = 2,5 \text{ mm}$ , seria:

$$I = 182 \text{ A na } V_s = 17 \text{ cm/min}$$

Para a solda em múltiplos passes, tem-se as seguintes soluções, em  $p = 2,5 \text{ mm}$ :

a) Tipo básico

$$I = 165 \text{ na } V_s = 30 \text{ cm/min}$$

$$(V_s K_x = 7.200 \text{ mm}^2/\text{cm})$$

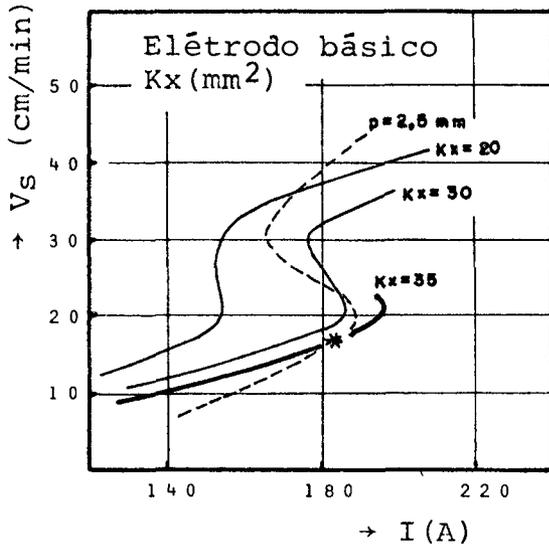
b) Tipo celulósico

$$I = 132 \text{ A na } V_s = 30 \text{ cm/min}$$

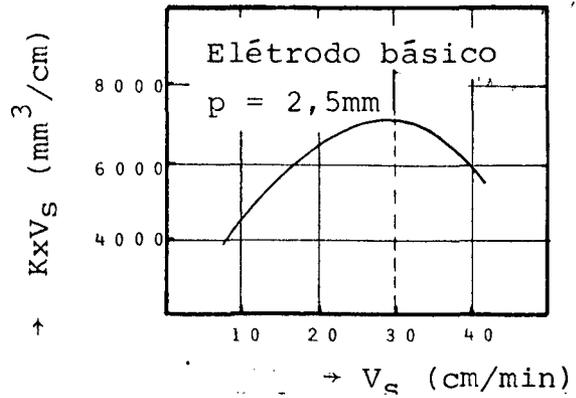
$$(V_s K_x = 3.900 \text{ mm}^3/\text{cm})$$

É mais vantajoso o tipo básico, devido ao maior produto  $(K_x \cdot V_s)$ , mas em comparação ao processo MIG, não chega a equi

parar-se.

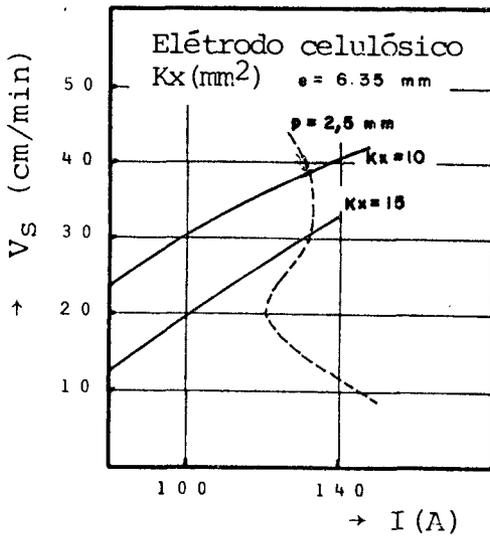


(a)

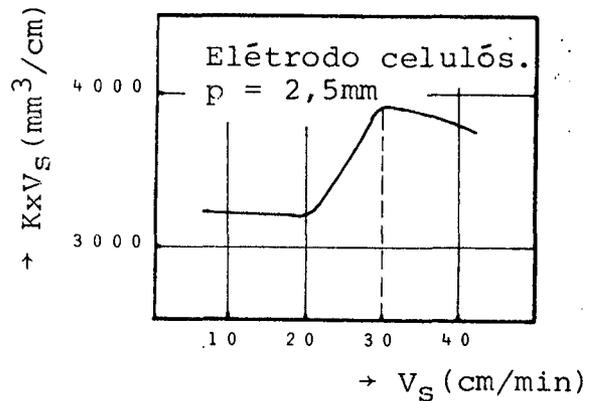


(b)

Fig. 4.27 - Critério para passe de enchimento, em relaçaõ de  $V_s$  (cm/min) a  $I$  (A) em (a) e a  $V_s.K_x$  em (b), para o processo com eléttrodo de tipo básico.



(a)



(b)

Fig. 4.28 - Critério para passe de enchimento, em relaçaõ de  $V_s$  (cm/min) a  $I$  (A) em (a) e  $K_x.V_s$  em (b), para o processo com eléttrodo reves tido do tipo celulósico.

#### 4.8 - SELEÇÃO DE PROCESSO PARA PASSE DE ENCHIMENTO

Na comparaçaõ entre processos no mesmo nívél de enrgia, fei ta no início do capítulo, chegou-se a conclusãõ que todos os pro cessos de alta potência não se diferenciavam no aspecto de passe

de enchimento.

Porém, com o estabelecimento dos novos critérios ( $Kx = 35\text{mm}^2$  e máximo  $Kx \cdot Vs$  em  $p = 2,5 \text{ mm}$ ) onde o nível energético não é constante, observa-se na tabela 4.2, que entre os processos a arame tubular e arco submerso, o processo a arame tubular é o que

Processo	único passe		múltiplos passes		espessura experimental
	$Kx = 35\text{mm}^2$ $p \leq 2,5\text{mm}$		máximo $VsKx$ ( $\text{mm}^3/\text{cm}$ ) $p \leq 2,5\text{mm}$		
	I (A)	$Vs$ (cm/min)	I (A)	$Vs$ (cm/min)	
Arame tubular	370	50	356	20	12,7 mm
Arco submerso	262	33	278	40	
MAG	190	25	260	50	6,35 mm
MIG	310	45	325	30	
Elet.rev. (básico) c/	182	17	165	30	
Elet.rev. (celulós.)	-	-	132	30	
			3.900		

Tab. 4:2 - Condições de soldagem para passe de enchimento.

satisfaz com maior vantagem (maior  $Vs$  em único - passe e maior  $Kx \cdot Vs$  em múltiplos passes). Esse fato se deve à característica do processo ser de relativamente menor penetração em mais altas correntes, o mesmo acontecendo com os processos MIG e a eletrodo revestido com pó de ferro, nessa ordem, entre os processos cujo experimento foi realizado na espessura de  $e = 3,35 \text{ mm}$ .

Observa-se ainda - que, mesmo levando-se em consideração a diferença de espessura de tal realização experimental entre alguns processos. O processo a arame tubular teve um resultado bem relevante sobre os demais processos o que indica ser este o mais adequado para passes de enchimento, na subordinação aos critérios acima citados.

#### 4.9 - CONCLUSÕES

1) Baseado no polígono de comparação no mesmo nível de energia, seleciona-se processos para:

a) Passes de penetração: preferem-se os processos a arco submerso, MAG e a elétrodo revestido do tipo celulósico.

b) Passes de enchimento: preferem-se os processos a arame tubular, MIG e a elétrodo revestido com pó de ferro.

2) O estabelecimento dos seguintes critérios para:

a) Passes de penetração: máxima penetração com minimização - de  $Kx$  (produto  $b.r$ ) na máxima velocidade de soldagem.

b) Passes de enchimento;

- em único passe: mínima área adicionada (valor de  $Kx$  calculado) na máxima velocidade de soldagem.

- em múltiplo passe: maximização do produto  $Kx.Vs$  na máxima velocidade de soldagem.

Conduziram a regras úteis na solução de processos e condições de soldagem.

## 5 - INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE SOLDAGEM EM DIVERSOS PROCESSOS

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Examinar-se-ão neste capítulo os fatores que se relacionam com a velocidade equivalente. Como a posição da soldagem influencia estes fatores, verificar-se-á esta influência nos diversos processos em estudo verificando qual o mais vantajoso, em cada posição, quanto à velocidade da soldagem. Por meio desta verificação é possível avaliar qualitativamente a economia do processo, pois pode-se considerar que o processo mais econômico é aquele que possui uma alta produção de material de adição associado à uma baixa fração adicionada. Uma avaliação econômica mais precisa envolveria ainda uma série de outras variáveis, que não serão abordadas aqui, tais como custo de insumos e equipamentos, custo de operação e volume de produção.

### 5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A TÉCNICA DE SOLDAGEM FORA DE POSIÇÃO

#### 5.2.1 - Soldagem na Posição Vertical

Em soldagem na posição vertical, gotas da ponta do eletrodo fundido e metal fundido na cratera tendem a fluir por gravidade (fig. 5.1a). Portanto, um arco curto é essencial, a fim de reduzir

a distância entre o ponto do eletrodo fundido e a poça de fusão para uma situação onde a tensão superficial garante uma atração mútua.

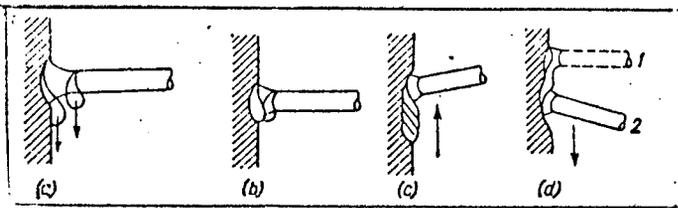


Fig. 5.1. - Posição do eletrodo na posição vertical.

A gota na ponta do eletrodo submerge no metal fundido na cratera (fig. 5.1b). Quando a gota atravessa para a poça de solda, aumenta o volume da poça, e o excesso de metal fundido pode derramar pela ação da gravidade. Para evitar isto, o eletrodo deve rapidamente mudar de posição para cima ou para o lado, sem apagar o arco. Então a poça de solda solidificará sem qualquer derramamento do metal fundido. A soldagem vertical pode ser realizada na direção ascendente ou descendente.

Em soldagem ascendente, o arco é iniciado na base da junta e é gradualmente movido para cima (fig. 5.1c).

A velocidade de avanço do arco deve corresponder a produção de material de solda. Se o arco é mantido por muito tempo em um ponto, o metal depositado fluirá para baixo, logo que o arco seja movido mais acima, o depósito de metal se solidifica, formando uma base na qual as gotas subsequentes de metal fundido são depositadas. O eletrodo deve ser ligeiramente inclinado na direção da soldagem. Isto dá uma boa penetração (7).

Em soldagem descendente, o arco é aceso no topo e o eletrodo é mantido em ângulo reto com a superfície, como em 1, na figura 3.5d. Logo que a gota do metal fundido se forma no topo da junta, a próxima gota seria depositada com o eletrodo inclinado para baixo, como mostra em 2 na figura 5.1d, de modo que o arco atinja tanto o metal de base como o depositado. O arco deve ser suficientemente curto, para que a ponta do eletrodo seja capaz de manter o metal fundido, e para que as gotas na ponta do eletrodo sejam transferidos na direção da poça de fusão por atração.

Em ambos os casos, o eletrodo deve ter movimento lateral de tecimento, a fim de obter-se uma adequada fusão e boa geometria de cordão.

Convém salientar que em soldagem descendente, a fusão não é tão boa quanto na soldagem ascendente, pois o metal fundido flui sobre o metal a soldar não fundido e obriga o uso de mais alta velocidade de soldagem, o que influencia na penetração (7).

Em soldagem vertical é preferível usar eletrodos até quatro milímetros de diâmetro, pois com eletrodos mais grossos é mais difícil evitar que o metal fundido derrame.

Em alguns casos, os primeiros cordões em soldagem de múltiplos passes, são depositados descentemente, e os cordões subsequentes de forma ascendente.

### 5.2.2 - Soldagem Horizontal

A soldagem horizontal tem muita semelhança com a soldagem vertical. Muito comumente são feitas soldas horizontais de topo em vasos reservatórios. A preparação de junta normalmente se limita a um simples "V" assimétrico (fig. 5.2). O arco é iniciado em algum lugar na aresta inferior horizontal e é então movido da face

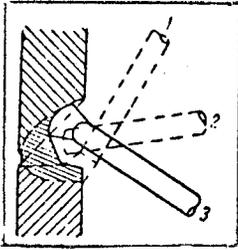


Fig. 5.2 - Posição do eletrodo na soldagem horizontal de topo.

de fusão da junta, enquanto que o eletrodo inclina para trás, como se mostra em 1, 2 e 3 na figura 5.2. A soldagem em "3" assemelha-se a soldagem sobrecabeça, e deve ser realizada com um procedimento adequado. Em chapas de mais que 8 ou 10 mm de espessura, fazem-se soldas horizontais com múltiplos passes.

### 5.2.3 - Soldagem Sobrecabeça

Soldagem em posição sobrecabeças são muito mais difíceis de se fazer. A poça neste caso fica suspensa e o metal fundido tende a cair.

O mais importante em soldagem sobrecabeça é que o arco deve ser mantido tão curto quanto possível, para facilitar a transferência do metal do eletrodo em direção à poça. Quando a ponta fundida do eletrodo toca a poça suspensa, forças de tensão superficial erguem a gota do eletrodo e a incorpora à poça de fusão. O rápido deslocamento da poça de fusão é importante para evitar que ela cresça em volume e tenda a gotejar por gravidade, o que prejudica a solda.

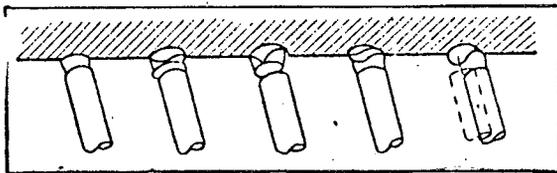


Fig. 5.3 - Transferência de metal na posição de soldagem sobrecabeça.

A figura 5.3 ilustra a transferência do metal em soldagens sobrecabeça. Essa soldagem exige muita prática.

Em soldagem sobrecabeça a corrente e o diâmetro do eletrodo devem ser menor do que na soldagem em posição plana, pois a poça não deve ser grande e a quantidade de metal fundido deve ser reduzida.

### 5.3 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM

Uma vez que seja conhecida a quantidade de material,  $M$ , que precisa ser depositada em cada passe, pode-se determinar a velocidade de soldagem para cada passe. Para isto, pode-se utilizar a expressão:

$$V_s = \frac{P}{M}$$

onde:

$P$  = produção em g/min

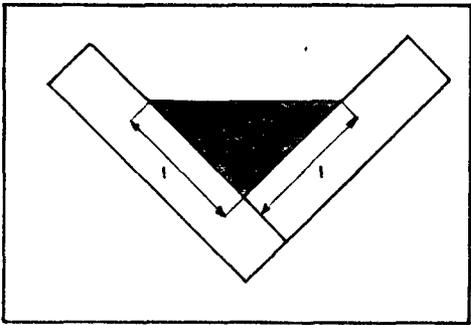
$M$  = g/cm

$V_s$  = velocidade de sodagem em cm/min

1º caso: estudo do cordão plano:

Considerando um cordão plano de catetos iguais (fig. 5.4), - com velocidade a cada passe iguais ( $V_p$ ). A velocidade de soldagem é dada por:

$$V_p = \frac{P}{\gamma \cdot S_p}$$



onde:

$\gamma$  = peso específico do aço

$S_p$  = área da seção reta de cada passe.

Fig. 5.4 - Cordão plano em junta

Considerando que na soldagem com  $n$  passes feitos a igual velocidade, a velocidade equivalente é dada por:

$$V_e = \frac{V_p}{n}$$

onde:

$V_e$  = velocidade equivalente em cm/min

$n$  = número de passes

Conclui-se que:

$$V_e = \frac{P}{\gamma n S_p}$$

$$\text{mas } S_p = \frac{S}{n} = \frac{l^2}{2n} ; \quad S = \text{área total}$$

então:

$$V_e = \frac{2P}{\gamma l^2}$$

E se conclui que, para obtenção de uma solda com 1 dado:

- o número de passe não influi na velocidade equivalente, - quando o cordão é plano;
- o número de passês influi na velocidade de execução de cada passe e na seção dele.

2º caso: cordão côncavo ou convexo

Para o caso do cordão côncavo ou convexo (fig. 5.5), a área do excesso de material (reforço  $r+$ ) e de falta de material (rebai-xo  $r-$ ), é aproximadamente igual a:

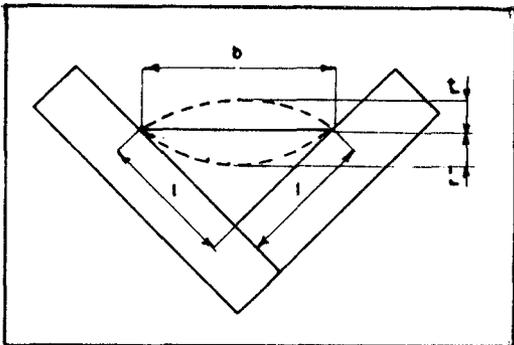


Fig. 5.5 - Cordão côncavo ou convexo em junta L.

$S_r = 0,7 b r$ ,  $r$  tomado como positivo no cordão convexo e negativo no côncavo.

Assim:

$$S = \frac{l^2}{2} \pm S_r$$

Portanto:

$$S = \frac{l^2}{2} + 0,7 b r, -$$

onde  $r$  é tomado em valor relativo.

Como:

$$S_p = \frac{S}{n}$$

$$S_p = \left( \frac{l^2}{2} + 0,7 b r \right) \frac{1}{n}$$

Então: de (a):

$$V_e = \frac{2P}{\gamma (l^2 + 1,4 b r)} \quad (5.2)$$

Chega-se a conclusão que a velocidade equivalente depende apenas da produção e geometria da solda. Mais isso só é válido quando não há escorrimento.

#### 5.4 - AVALIAÇÃO COMPARATIVA

Para efetuar-se uma avaliação comparativa dos diversos processos de soldagem, definiu-se uma solda padrão, formada em uma junta "L", de largura igual a 18 mm e catetos (ou pernas) iguais a 12,7 (fig. 5.6).

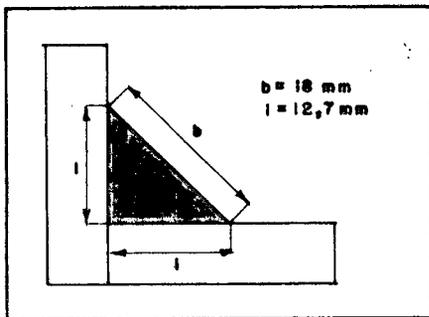


Fig. 5.6 - Sal de padrão.

Esta solda padrão em diversas posições, permite chegar-se a conclusões sobre as velocidades de soldagem possíveis e sobre a exequibilidade da mecanização da operação. A tabela 5.1 resume os principais resultados. A velocidade de soldagem citada é a velocidade equivalente de soldagem e, além disso, pressupõe um fator de operação (fator de carga) de 100%.

Logo, não são computados tempos de preparação, fixação e limpeza. Estes tempos, embora omitidos aqui, não devem ser esquecidos na avaliação final do processo, porque condicionam o volume de produção que é possível alcançar pela mais alta velocidade de soldagem mecanizada, afetando, obviamente, os custos finais de soldagem. Embora o tempo de limpeza não seja avaliado em muitas aplicações de soldagem, a introdução de técnica de soldagem mecanizada, com poucas exceções, favorece a redução do tempo efetivo.

TABELA 5.1. - JUNTA EM "L", GEOMETRIA DA SOLDA

b = 18 mm, pernas = 12,7 mm

Nº	PROCESSO	POSIÇÃO	ELETRODO	I (A)	Vs (cm/min)	FORMA	Nº DE PASSES
1 (*)	Eletrodo revestido (celulósico)	sobrecabeça	E 6010 d = 4,8mm	170 CC+	4,2		2
2 (*)	Eletrodo revestido (básico)	sobrecabeça	E 6018 d = 4,0mm	170 CC+	4,2		
3	MIG (semi-autofásico)	sobrecabeça	E 70S-6 d = 1,0mm	220 CC+	12		3
4 (*)	Eletrodo revestido (celulósico)	Vertical ascendente	E 6010 d = 4,8mm	170 CC+	3,5		
5 (*)	Eletrodo revestido (básico)	Vertical ascendente	E 6018 d = 4,0mm	170 CC+	3,5		
6	Eletrodo revestido (básico)	Vertical descendente	E 7018 d = 5,0mm	180 CC+	5,6		2
7	MIG (semi-automática)	Vertical descendente	E 70S-6 d = 1,0mm	162,5 CC+	8,0		2
8	MIG (semi-automática)	horizontal	E 70S-6 d = 1,0mm	162,5 CC+	6,3		2
9	Eletrodo revestido (básico)	horizontal	E 7018 d = 3,25mm	155 CC+	3,3		2
10	MIG (semi-autofásica com tecimento)	horizontal	E 70S-6 d = 1,0mm	160 CC+	6,6		2
11	Eletrodo revestido (básico)	horizontal	E 7018 d = 5,0mm	190 CC+	6,6		2
12	MIG (automático)	horizontal	E 70S-6 d = 1,0mm	240 (E=21V) CC+ t=15mm	9,8		3
13 (*)	Eletrodo revestido rutílico)	horizontal	E 6024 d = 6,3mm	375	11		

Nº	PROCESSO	POSIÇÃO	ELETRODO	I (A)	Vs (cm/min)	FORMA	Nº DE PASSES	
14	Tubular sem gás (automático)	horizontal	E 60T-7 d=2,38mm	240 (E=21V) CC+ (t=25mm)	13		3	
15 (*)	Arco submerso (automático)	horizontal	EL 12 d=2,38mm	500 CC-	18		1	
16	Eletrodo revestido (celulósico)	plana	E 6010 d=3,17mm	113 CC+	2,4			
17	Eletrodo revestido (rutílico)	plana	E 6013 d=3,25mm	120 CC+	2,8			
18	Eletrodo revestido (básico)	plana	E 7018 d=3,25mm	150 CC+	3,2			
19	Eletrodo revestido (básico)	plana	E 7018 d=5,0 mm	287,5 CC+	9,6		2	
20	MIG (semi-automático com tecimento)	plana	E 70S-6 d=1,0 mm	240 CC+	7,1		2	
21	MIG (automático)	plana	E 70S-6 d=1,0 mm	240 (E=21V) CC+ (t=15mm)	9,8		3	
22	MAG (automático)	plana	E 70S-6 d=1,0 mm	240 (E=21V) CC+ (t=15mm)	9,8		3	
23	Tubular sem gás (automático)	plana	E 60T-7 d=2,38mm	240 (E=21V) CC- (t=25mm)	13		3	
24 (*)	Arco submerso (automático)	plana	E L 12 d=2,38mm	600 CC-	30		1	
25 (*)	Arco submerso	plana	EL 12 d=2,38mm	a) simples	1000 CC+	38		1
				b) duplo paralelo	1350 CC-	60		1
				c) duplo série	1200, CC+ 750, CC-	76		1

(\*) Referência bibliográfica (8)

Quando se passa da posição plana para outra posição pode ocorrer escorrimento de material fundido. Para evitar isso tem-se três opções:

1a. opção: Reduzir a corrente (mantendo a velocidade da soldagem e o diâmetro do eletrodo). Neste caso a velocidade equivalente ( $V_e$ ) diminui porque a produção diminui, conforme a expressão (5.2).

2a. opção: Aumentar a velocidade de soldagem (mantendo a corrente e o diâmetro do eletrodo). Neste caso a velocidade equivalente não muda ou muda um pouco em função da convexidade ou concavidade do cordão, conforme a expressão (5.2).

3a. opção: Diminuir o diâmetro do eletrodo (mantendo a corrente). Neste caso a velocidade equivalente aumenta porque a produção, conforme a expressão (5.2).

Com a diminuição da corrente e o aumento da velocidade de soldagem ou ambos, o banho torna-se mais viscoso e de menor tamanho, modificando a geometria do cordão de solda. Assim cada passe fica com menor seção reta, exigindo-se mais passes para se atingir a "solda padrão". Mas como o tempo de arco apagado não está sendo computado, considerando-se um fator de carga igual a 100%, o número de passes nesse aspecto não influenciaria a velocidade equivalente, pois foi mostrada, através da expressão (5.2), a sua não dependência.

O que foi dito acima explica o decréscimo da velocidade equivalente, para obtenção da solda padrão, no processo automático a arco submerso (vide 15 e 24 na tabela 5.1), na mudança da posição plana para horizontal, pelo motivo de redução de corrente, ocasionando uma redução de 40% na velocidade de soldagem, mas mesmo assim superando os demais processos.

Na posição horizontal não há uma grande exigência quanto a viscosidade da solda como na posição vertical e sobrecabeça, na forma pela qual a soldagem foi realizada, no presente caso com uma inclinação de 45° em junta "L". O uso de eletrodos revestidos de maior diâmetro permite a utilização de maiores correntes, aumentando a produção e por conseguinte aumentando a velocidade de soldagem (vide 9, 11 e 13 na tabela 5.4), isso também é válido para a posição plana (vide 16, 17, 18 e 19 na tabela 5.4). Esse aumento na velocidade de soldagem com o uso de eletrodos revestidos com diâ

metros maiores, pode torná-los competitivo em relação ao processo MIG (vide 12 e 13, 19 e 21 na tabela 5.1).

No entanto, na posição vertical descendente o processo semi-automático MIG, leva uma vantagem significativa (vide 7 na tabela 5.1), é que nesta posição há necessidade de uma grande viscosidade que é conseguido com elétrodos finos, como foi dito inicialmente, sobrepujando o processo com eletrodo revestido (vide 6 na tabela 5.1), que possui uma produção inferior, dando um maior escorrimento, que provoca a forma côncava do cordão.

Há um aumento de velocidade de soldagem na mudança da posição horizontal para vertical no processo MIG (vide 7 e 8 na tabela 5.1), com a mesma condição de soldagem. Isso é explicado pela presença de reforço na posição horizontal, que implica na necessidade de adicionar mais material, do que na vertical, para alcançar a perna padrão. Com o mesmo processo, não houve alteração da velocidade de soldagem, mudando da posição horizontal para plana, nas mesmas condições de soldagem (vide 12 e 21 na tabela 5.1), o que comprova o fato da velocidade equivalente depender apenas da produção do material de adição e da geometria da solda.

A operação de tecimento na soldagem fora de posição permite sustentar a poça de fusão até um certo ponto evitando o escorrimento ou excessiva convexidade, podendo aumentar a velocidade equivalente fora de posição (vide 8 e 10 na tabela 5.1). Na posição plana não há necessidade de sustento da poça de fusão.

Para espalhar mais o material, solda-se então em menos passes, muito embora com a velocidade equivalente um pouco menor (vide 20 e 21 na tabela 5.1).

Na posição sobrecabeça, o processo MIG se mostou vantajoso - (vide 3 na tabela 5.1), em virtude do seu menor diâmetro do elétrodo do que os processos em elétrodos revestidos (vide 1 e 2 na tabela 5.1).

Quanto ao processo com arame tubular, mostrou-se um pouco mais vantajoso do que os processos MIG e MAG, tanto na posição horizontal quanto na plana (vide 14 e 23 na tabela 5.1), isso é explicado pela sua maior produção.

Na posição plana é evidente a vantagem conseguida com o proceso automático a arco submerso. E essa vantagem é mais evidente quando se usa elétrodos em série ou paralelo (vide 25 na tabela

5.1).

Entretanto na posição vertical e sobrecabeça o processo se mi-automático MIG e em extensão também o MAG sobrepujou o processo com elétrodo revestido. O mesmo não acontecendo com os processos - arame tubular e arco submerso, tanto na forma semi ou totalmente automática, devido a inviabilidade desses processos nessas posi ções.

A conclusão é óbvia: a posição de soldagem é um fator impor tante no custo final da solda, visto que, com poucas exceções, a técnica de soldagem mecanizada obriga a solda ser realizada na po sição plana ou horizontal, conseguindo sua maior vantagem.

## 5.5 - ANÁLISE COMPARATIVA

Uma comparação das vantagens de desempenho e limitações da soldagem semi-automática com técnicas manuais e totalmente automá tica servem para posicionar a usabilidade desses processos.

As vantagens que favorecem a semi-mecanização sobre a solda gem manual são:

1. Aumento da produção de material de adição
2. Aumento da velocidade de soldagem
3. Aumento do fator de operação em alimentação com arame con tínuo.

As limitações são:

1. Custo mais alto de material (elétrodo, fluxo, arame)
2. Limitada acessibilidade
3. Limitada posição de operação (com exceção do processo - MIG/MAG).

Desde que a soldagem totalmente automática oferece altas pro duções de material de adição e velocidades de soldagem, a semi-me canização deve ter vantagens comparativas que justifiquem sua se leção sobre a total mecanização.

1. Maior mobilidade e versatilidade
2. Menos exigências de acessórios complexos
3. Inferior investimentos inicial.

Visto que a posição de soldagem é essencial para receber os

benefícios de mecanização da solda, o próximo passo é a questão de averiguar se a soldagem semi-automática é a última resposta. Baseando a resposta apenas na comparação da máxima velocidade possível, a resposta é não. Pode-se obter aumentos adicionais na velocidade com a introdução da soldagem à arco submerso totalmente automática com um único eletrodo, ou instalações de eletrodos em série (um atrás do outro) oferecendo, cada um, um substancial aumento sobre os processos anteriores. A soldagem a arco submerso com eletrodo em série alcança o máximo em velocidade de soldagem nesta aplicação particular.

Infelizmente, em muitas aplicações de soldagem, a mesma resposta nem sempre se aplica para as duas questões: (a) que processo de soldagem mecanizada alcançara a mais alta velocidade de soldagem e (b) que escolha desenvolverá o custo de produção mais baixo.

Se a resposta para ambas as questões fosse a mesma, a soldagem à arco submerso com eletrodos em série ofereceria o processo mais econômico de mecanização da soldagem para todas as aplicações, de produção, e nós poderíamos parar o estudo visto que todas as discussões adicionais seriam irrelevantes. Neste ponto, a importância dos fatores de produção que influenciam o processo de seleção tornam-se aparentes: o comprimento da solda, a acessibilidade da solda e o volume de produção em uma aplicação específica deveriam ser relacionados com as características de desempenho do processo em consideração. A necessidade de familiaridade com o processo e equipamento disponível para soldagem semi ou totalmente automática é óbvia.

Felizmente, a situação não é tão complexa como a primeira impressão sugere. As combinações de fatores de produção e características de desempenho frequentemente permitem refinar a seleção para a comparação final de apenas dois processos.

Por exemplo:

1. O projeto final pode diminuir a acessibilidade da solda em um ponto onde técnicas de soldagem totalmente automáticas são eliminadas.
2. O projeto de junta pode ser tal que fluxo desprezado ou problemas de aspiração de gás eliminem de consideração as técnicas de soldagem mecanizada que usam esses processos

de arco protegido.

3. O volume de produção pode apenas permitir pouco investimento de capital em acessório.
4. O comprimento da solda e a posição pode demandar versatilidade e adaptabilidade, características vantajosas em apenas um ou dois dos processos de soldagem semi ou totalmente automáticos disponíveis.
5. A geometria da solda e o custo de sua execução pode tirar de cogitação processos que são incapazes de satisfazer estes requisitos.

Finalmente, é preciso ressaltar que, para a seleção do processo de soldagem mais adequado para uma soldagem econômica, após as considerações gerais aqui apresentadas a respeito dos efeitos da posição de soldagem e da possibilidade de automatização, é preciso levar em conta ainda a influência dos parâmetros de soldagem na geometria de solda e na velocidade de sua execução.

Esta última consideração, embora mais complexa, permitirá uma definição final sobre o processo a ser escolhido e também sobre os parâmetros a serem regulados para uma operação econômica.

## 5.6 - CONCLUSÕES

1. A velocidade equivalente depende apenas da produção do material de adição e da geometria da solda, não dependendo do número de passes, para obtenção da solda padrão, com o fator de carga igual a 100%.
2. Observou-se que o aumento da produção e velocidade de soldagem, aumenta a viscosidade da peça de fusão.
3. Elétrodos de menor diâmetro são adequados para soldagem fora da posição plana.
4. A soldagem fora da posição plana necessita redução da corrente ou aumento da velocidade ou ambos.
5. A posição de soldagem é um fator importante no custo e seleção do processo de soldagem.
6. Para a seleção do processo de soldagem é preciso considerar também a geometria da solda desejada e o custo de sua execução.

## 6- CONCLUSÃO GERAL

1. Este estudo mostrou que, além da tensão e da corrente, outras variáveis de soldagem, tais como, polaridade, diâmetro do eletrodo, altura da tomada de corrente, velocidade e posição de soldagem são relevantes na seleção de processos e procedimentos de soldagem.

2. Estabeleceu-se, ainda, critérios bem definidos para passes com intuito de se selecionar o processo e as condições de soldagem mais econômicas.

3. As conclusões obtidas neste trabalho permite que se recomende os seguintes caminhos, para o procedimento das investigações

- a) Desenvolver a mesma metodologia para outros tipos de materiais, procurando relacionar as características operacionais e econômicas do processo de soldagem com as propriedades tecnológicas do material.
- b) Estender este estudo para outros diâmetros de eletrodos, altura de tomada de corrente, tensão e espessura.

## REFERÊNCIAS

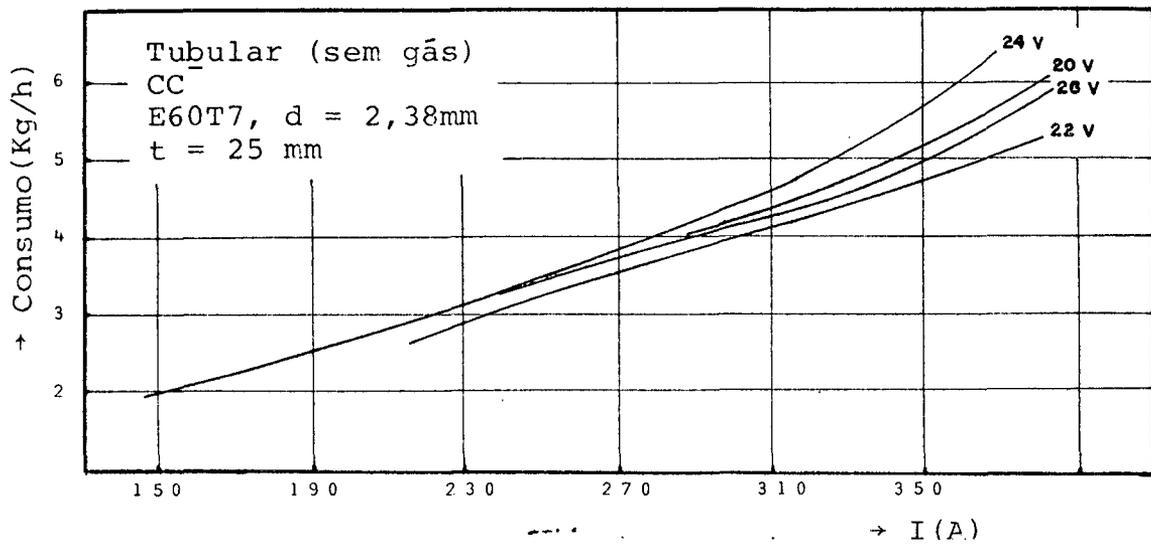
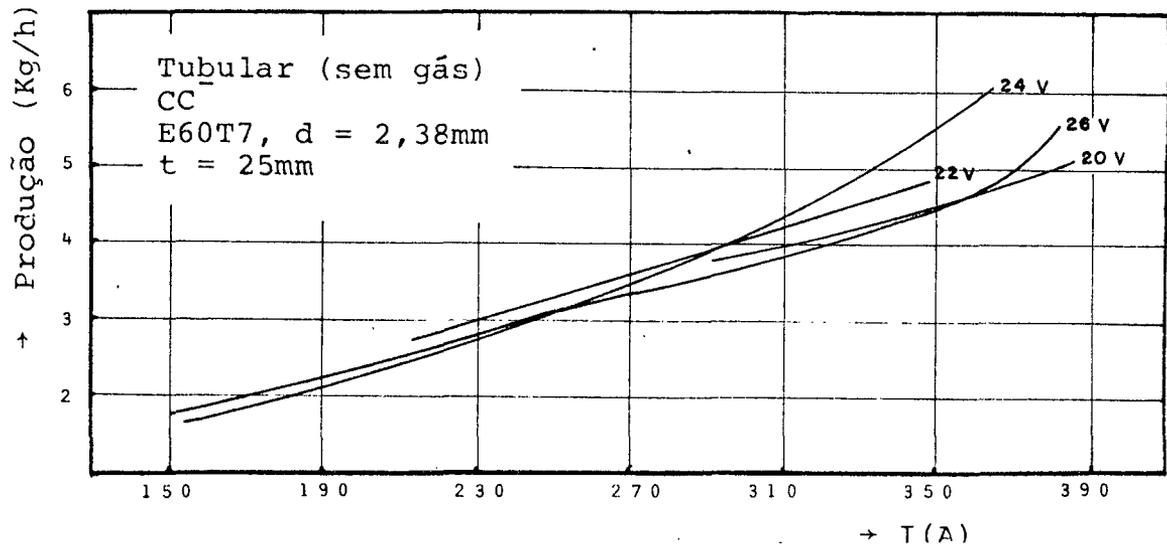
## REFERÊNCIAS

- (1) - Magnusson, E.J., "Welding Technology , Present Position and Future" , Ressearch Manager , ESAB , 1973.
- (2) - Quites, A.M., Dutra, J.C., "Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico", Livro publicado em 1979.
- (3) - Mantel, W., "The Fhysic of the Welding Arc", Schweissen und Shneiden, 8, pág. 280, 287, 1956.
- (4) - Lesnewish, A., "Control of Melting Rate and Metal Transferin Gas Shield Metal Arc Welding", Welding Journal, 37, 8, Res Suppl., pág. 418-s/425-s, 1958.
- (5) - Dutra, J.C., "Contrtribuição ao Estudo da Soldagem Elétrica a Arco Voltaico sob Atmosfera de Argônio e Dióxido de Carbono", Tese de Mestrado, UFSC, 1976.
- (6) - Quites, A.M., Dutra, J.C., Mira, F.M., "Variação do Consumo de Material de Adição em Soldagem MIG/MAG em Função da Corrente e da Composição Química do Elétrodo", Trabalho apresentado no V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, - COBEM, Campinas , Dezembro, 1979.
- (7) - Jseglsky, V., "The Electric Welder"
- (8) - Hinkel, J.E., "The Why, and How of Mechanized Welding", - Part II, "The Economics of Process Selection".
- (9) - Hummitzsh, W., "Neve Erkeuntnise ü ber die Vurgange in Shweisslishtbogem von Mantelektroden", Schweisstecnich (Wieu)2 1948, H.5, 550/54, H.6, S67/70, H7, s84/89.
- (10) - Quites, A.M., Dutra, J.C., "Contribuição ao Estudo do Arco Voltaico Aplicado à Soldagem", V Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Poços de Caldas, Brasil, 1978.
- (11) - Quites, A.M., Dutra, J.C., "Estudo da influência do Arco Voltaico sobre o Consumo do Elétrodo e Geometria da Solda" , Trabalho apresentado no I Congresso Nacional de Soldagem, - Valparaíso, Chile, Novembro de 1978.

A N E X O

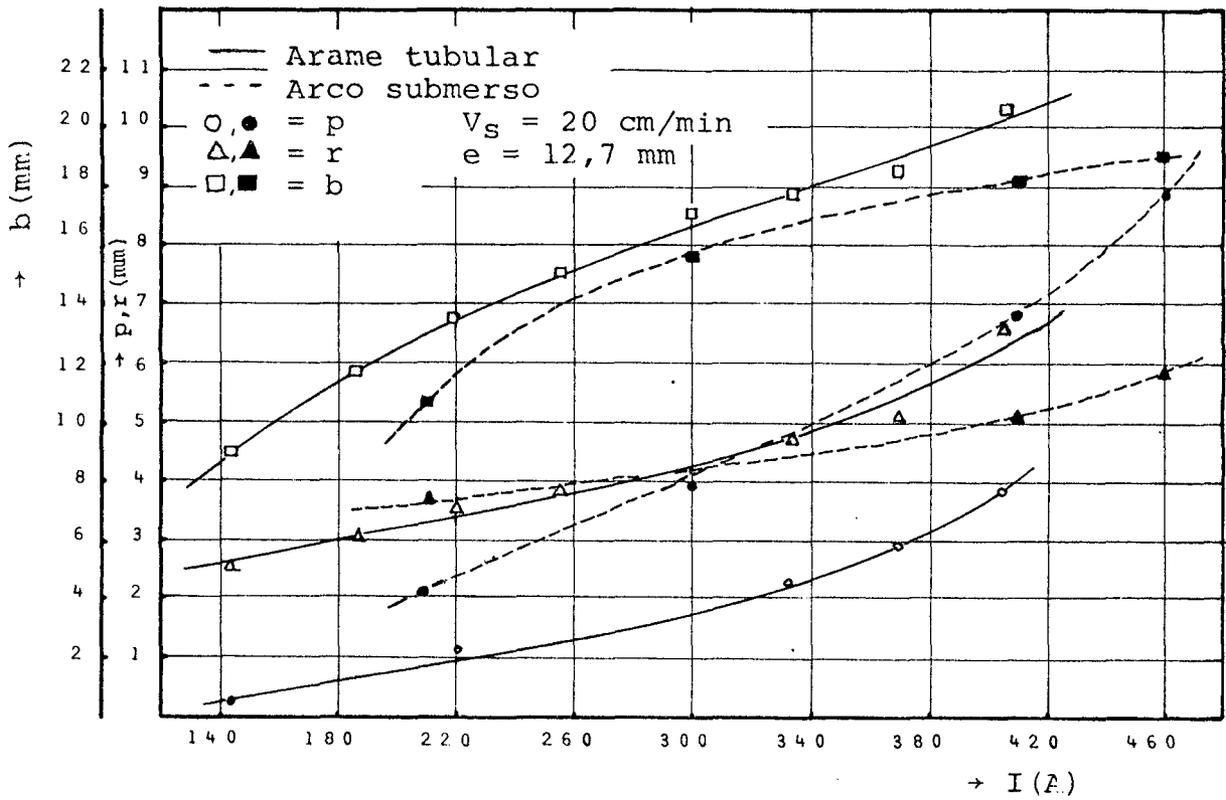
## ANEXO I

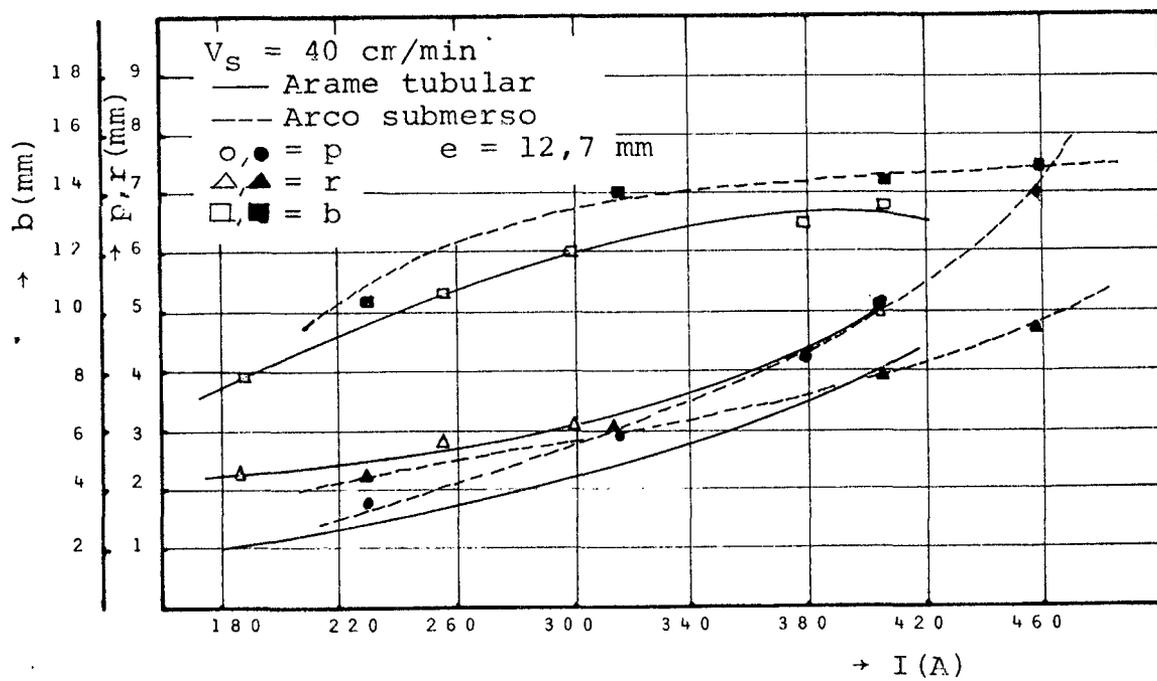
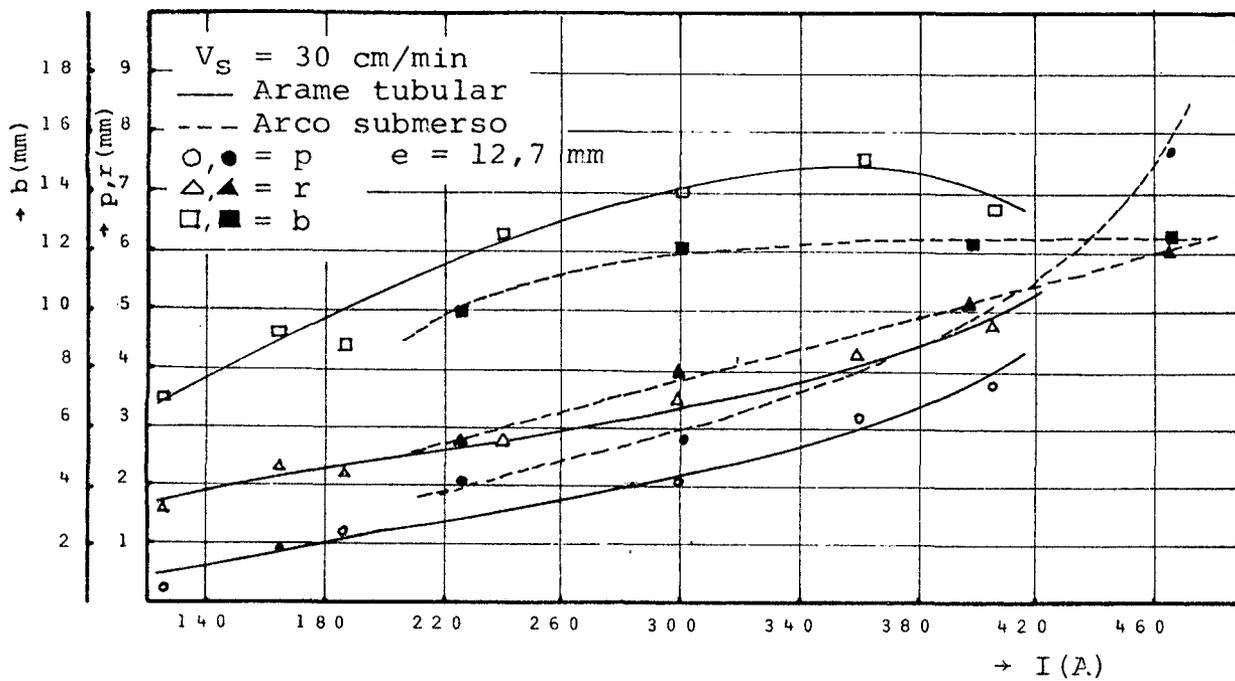
VARIAÇÃO DO CONSUMO E PRODUÇÃO COM A CORRENTE EM DIVERSAS TENSÕES PARA O PROCESSO COM ARAME TUBULAR.

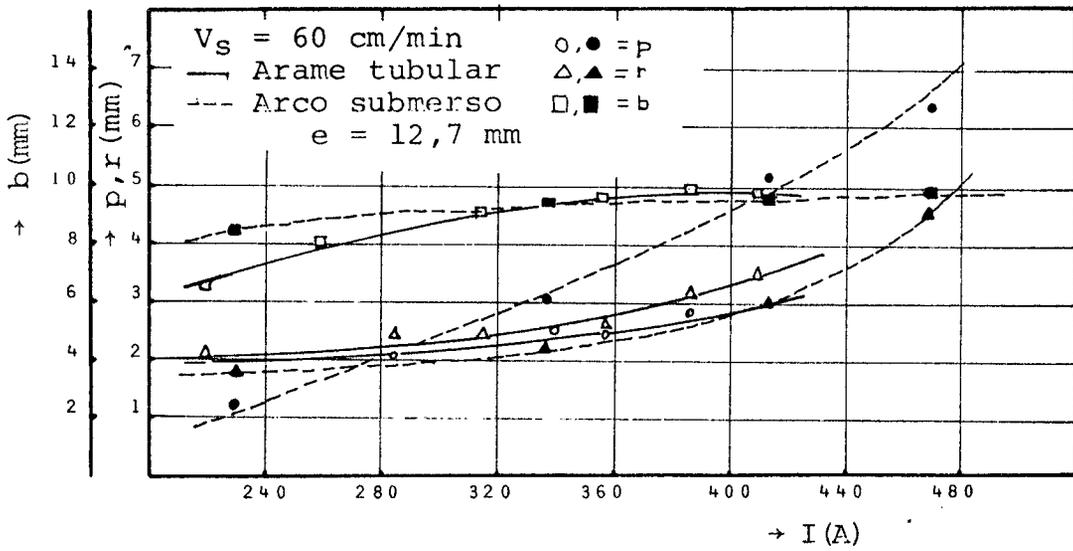
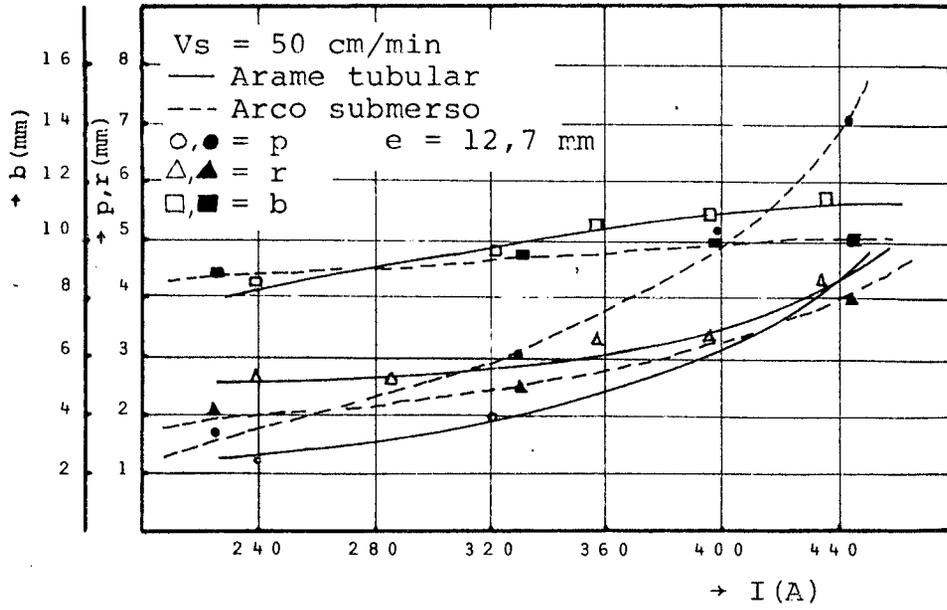


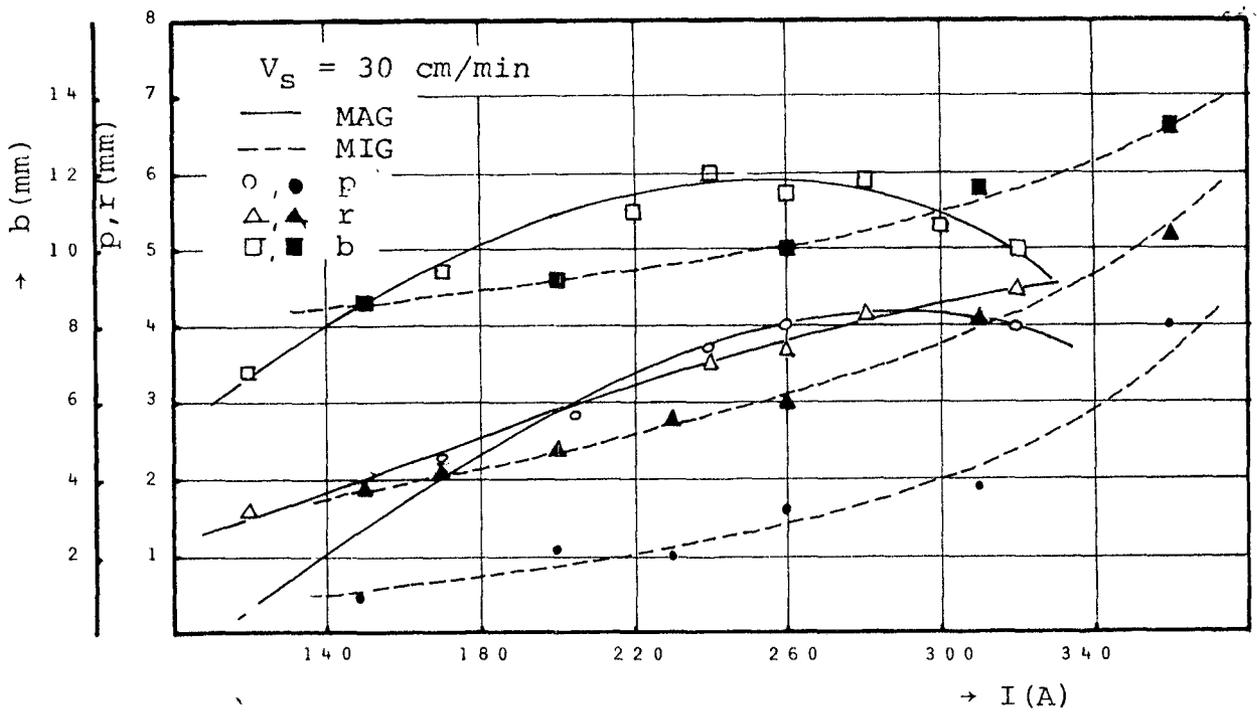
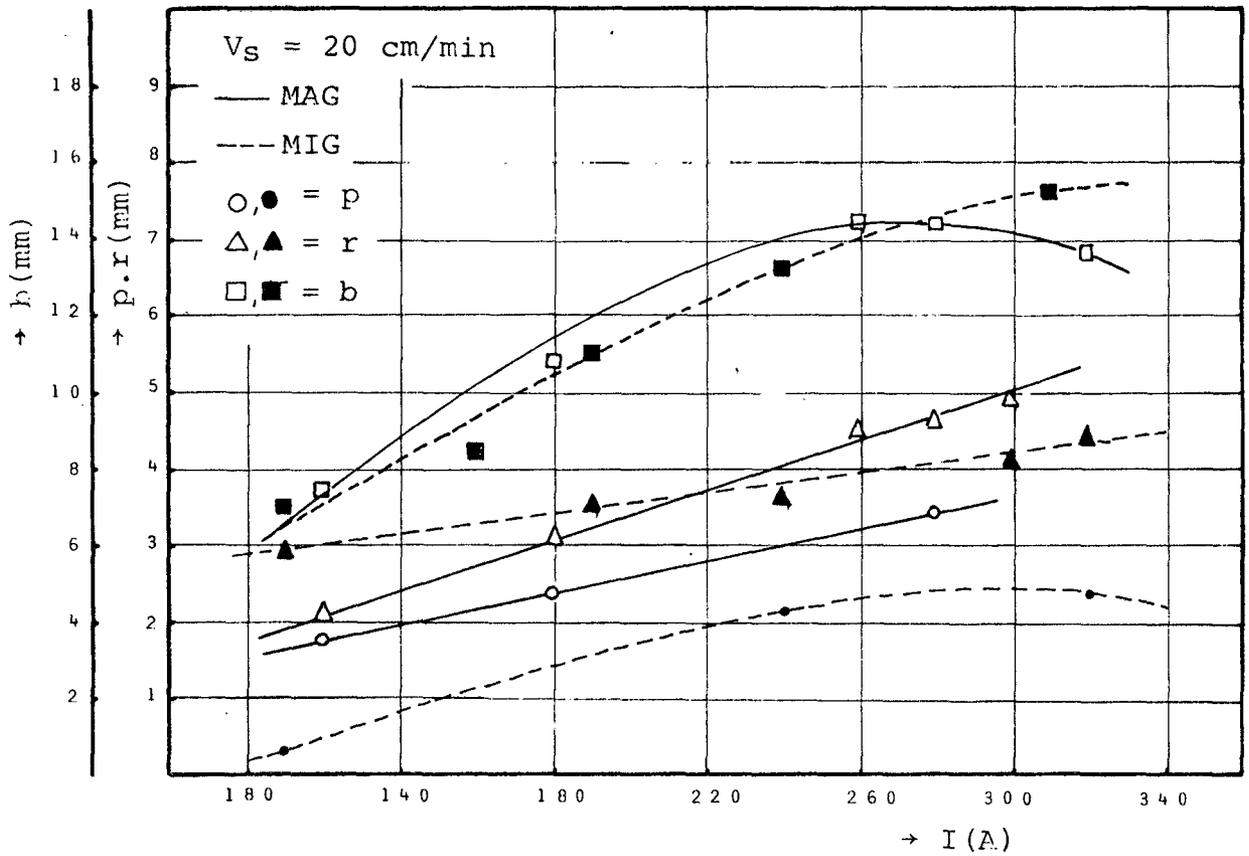
## ANEXO II

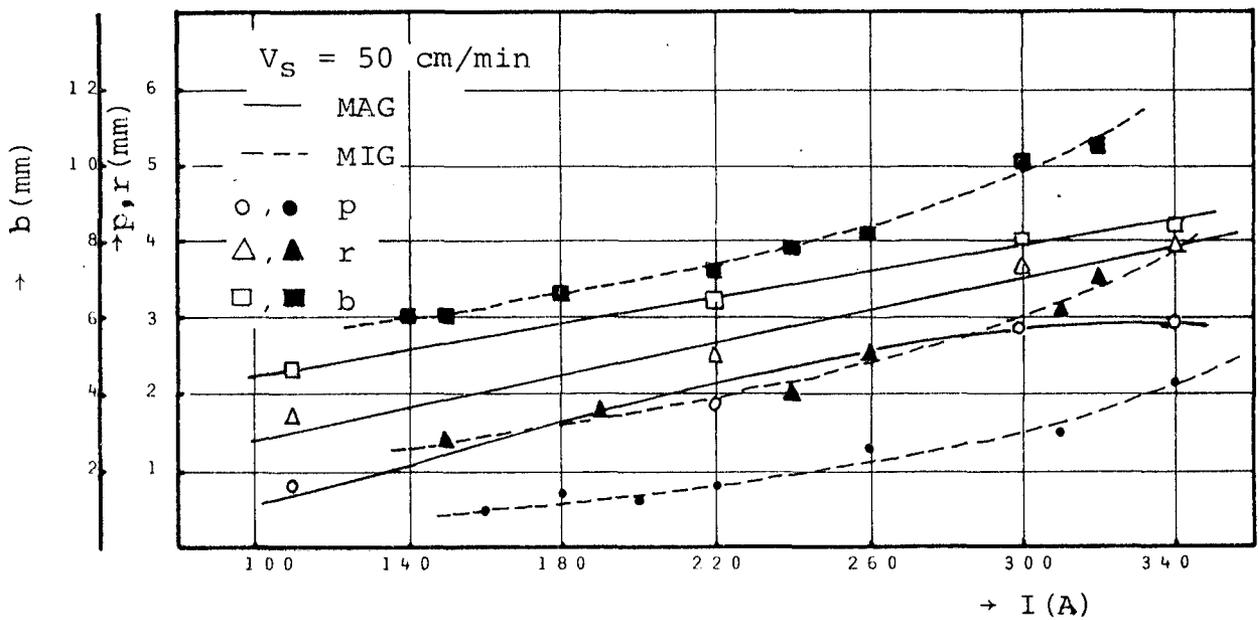
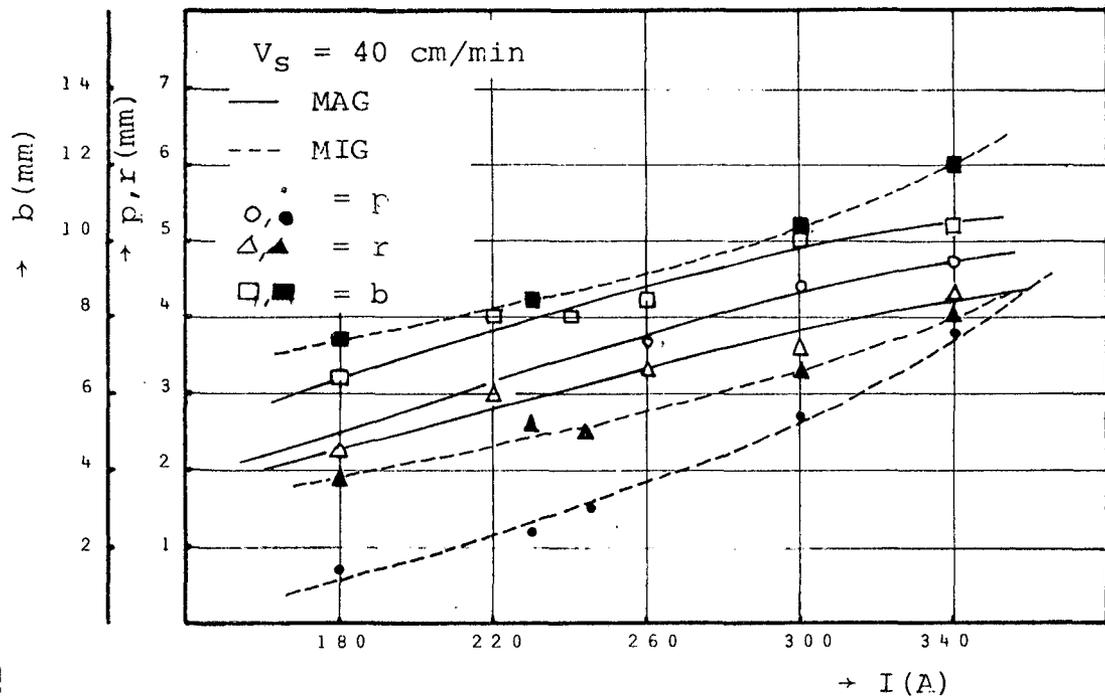
VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DA SOLDA (b, p e r) COM A CORRENTE EM DIVER  
SAS VELOCIDADES DE SOLDAGEM.

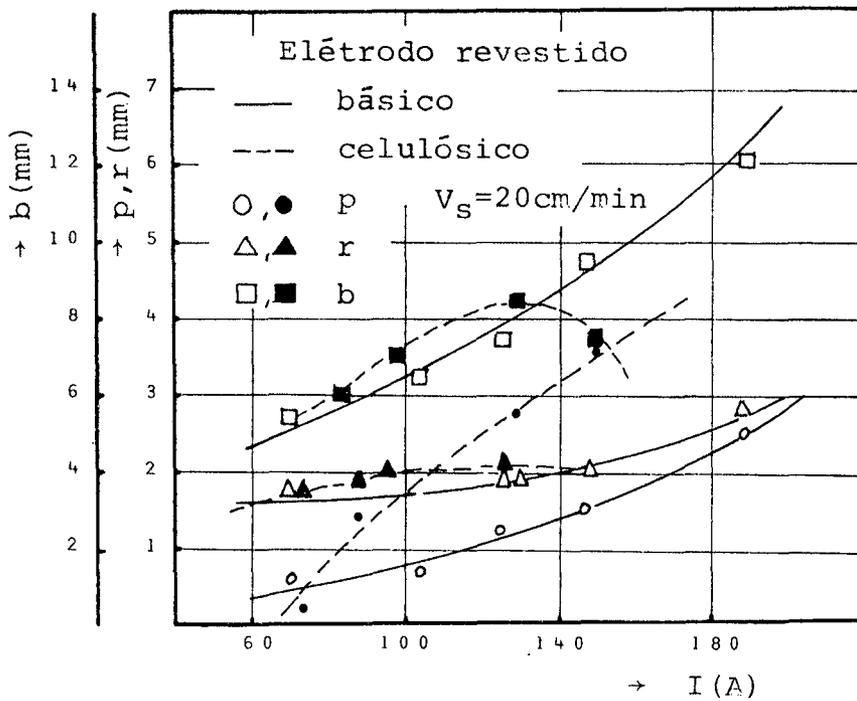
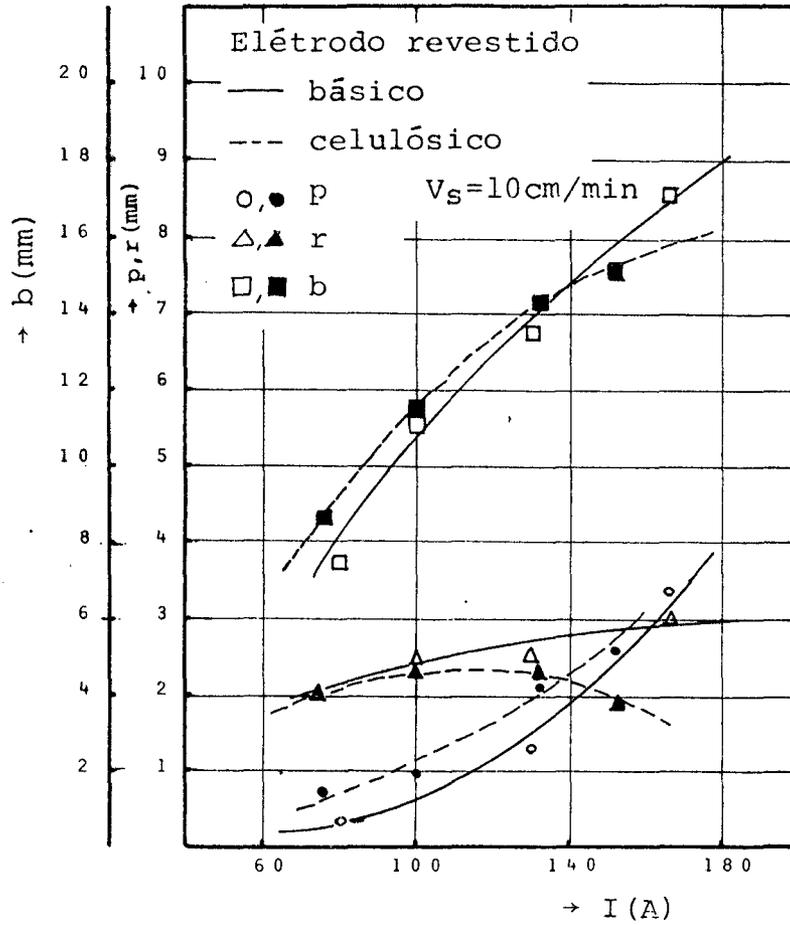


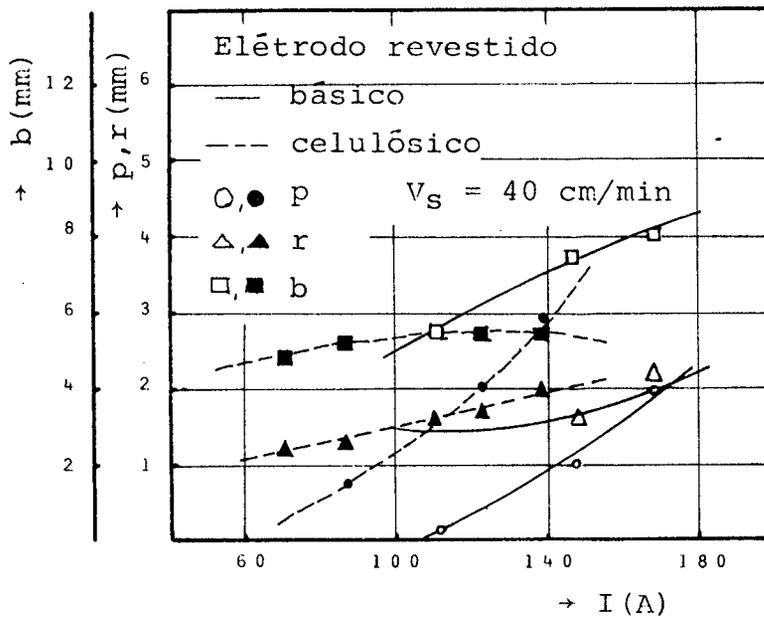
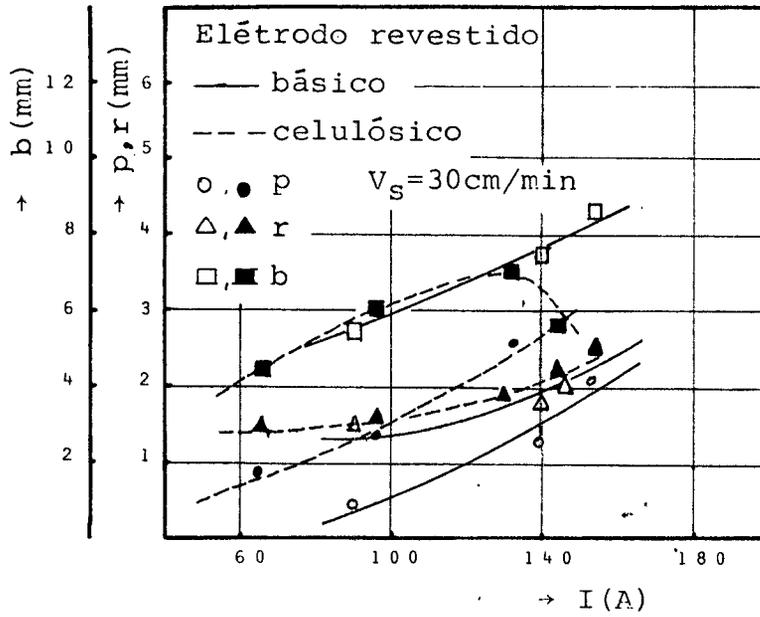










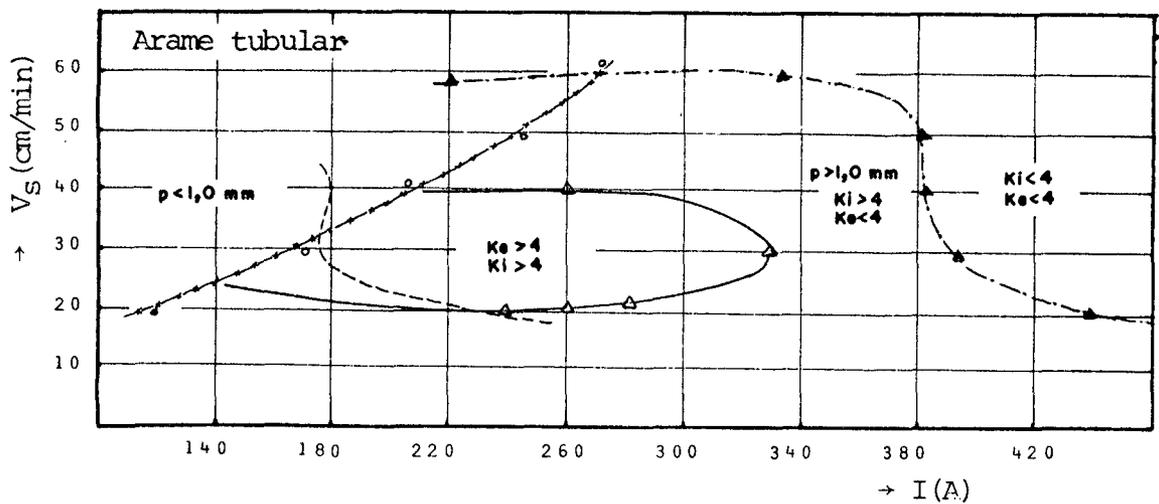
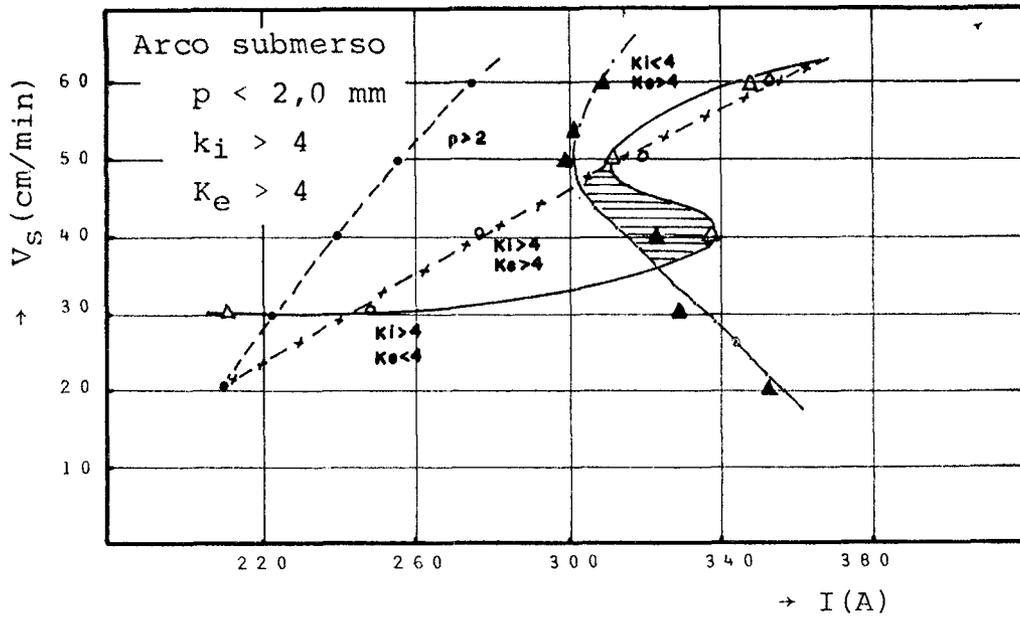


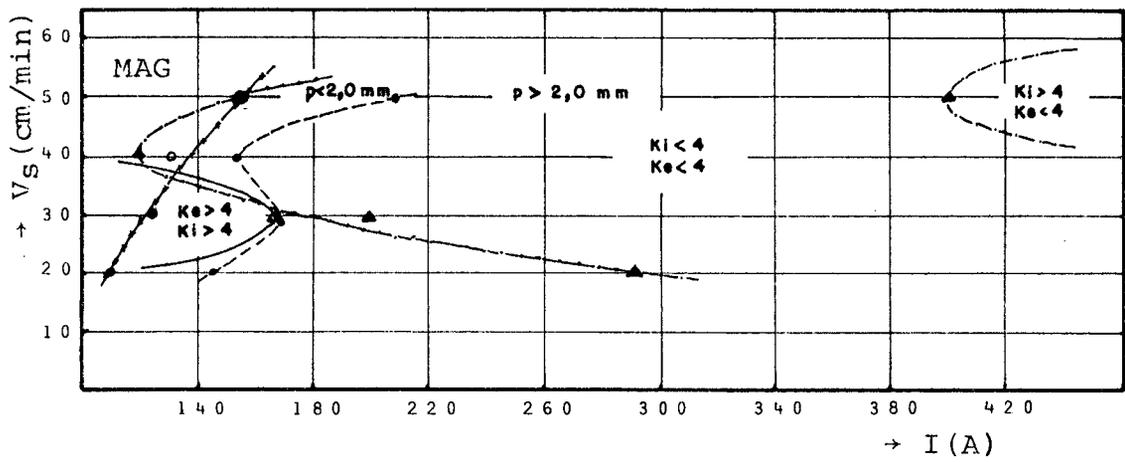
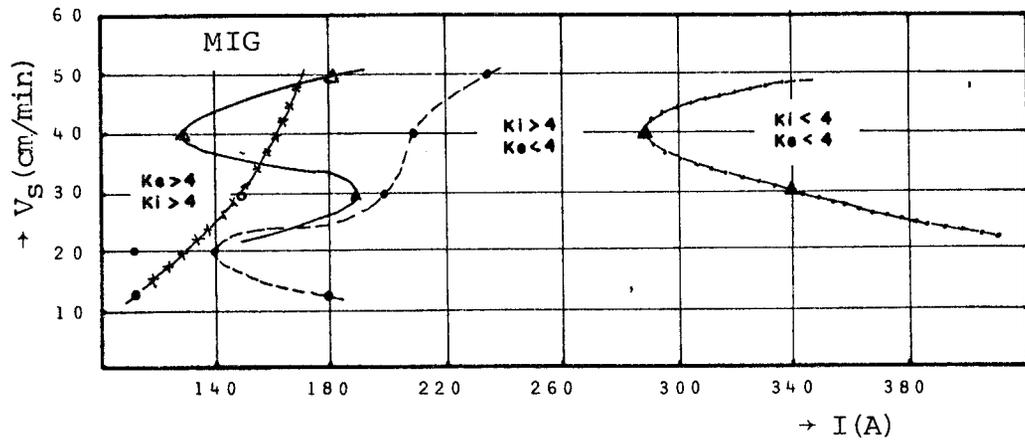
## ANEXO III

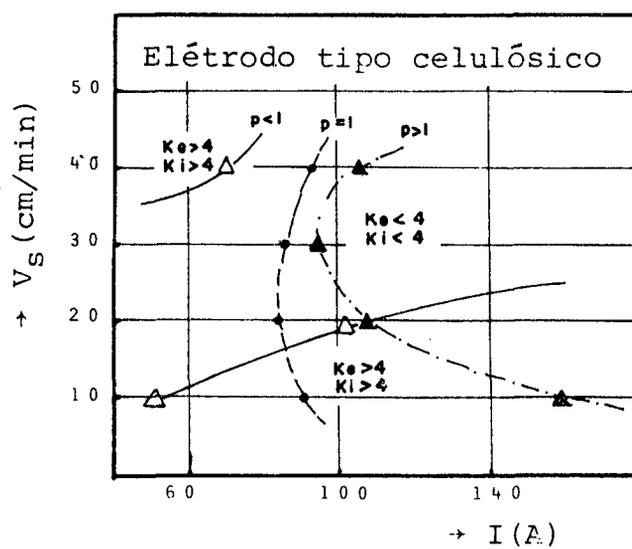
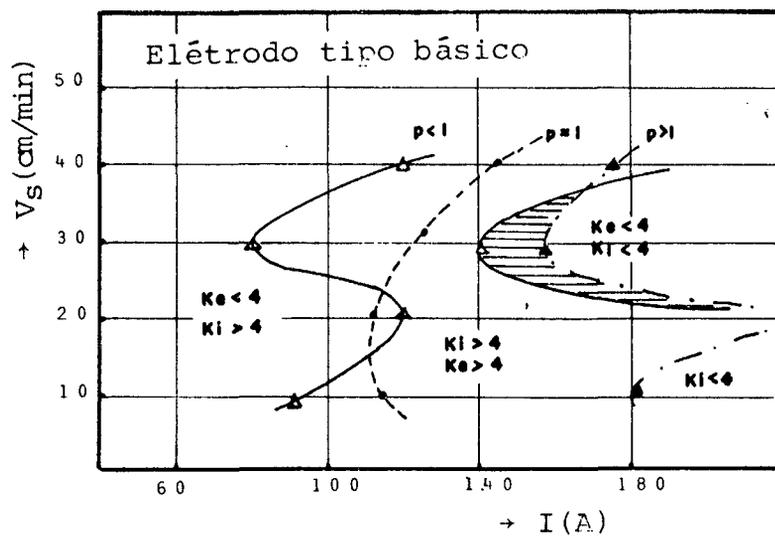
## CAMPOS DE UTILIZAÇÃO

Convenção:

- o-x-x- Linha de regularidade
- - - Linha de isopenetração
- △—— Linha de iso-ke
- ▲-.-.- Linha de iso-ki

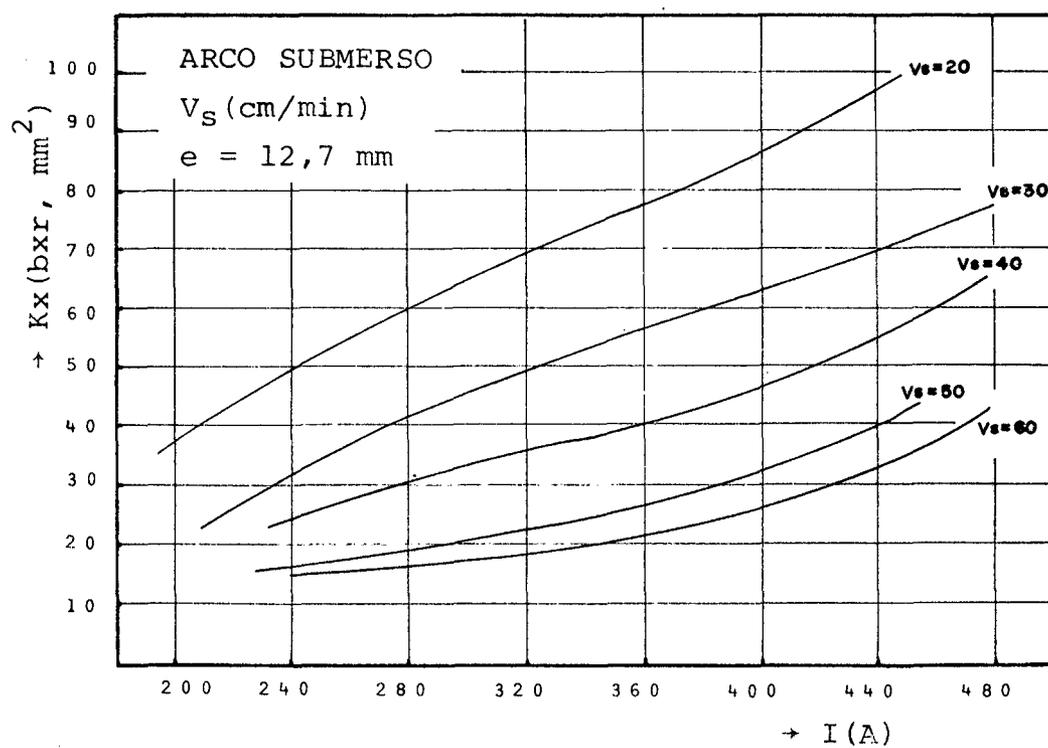
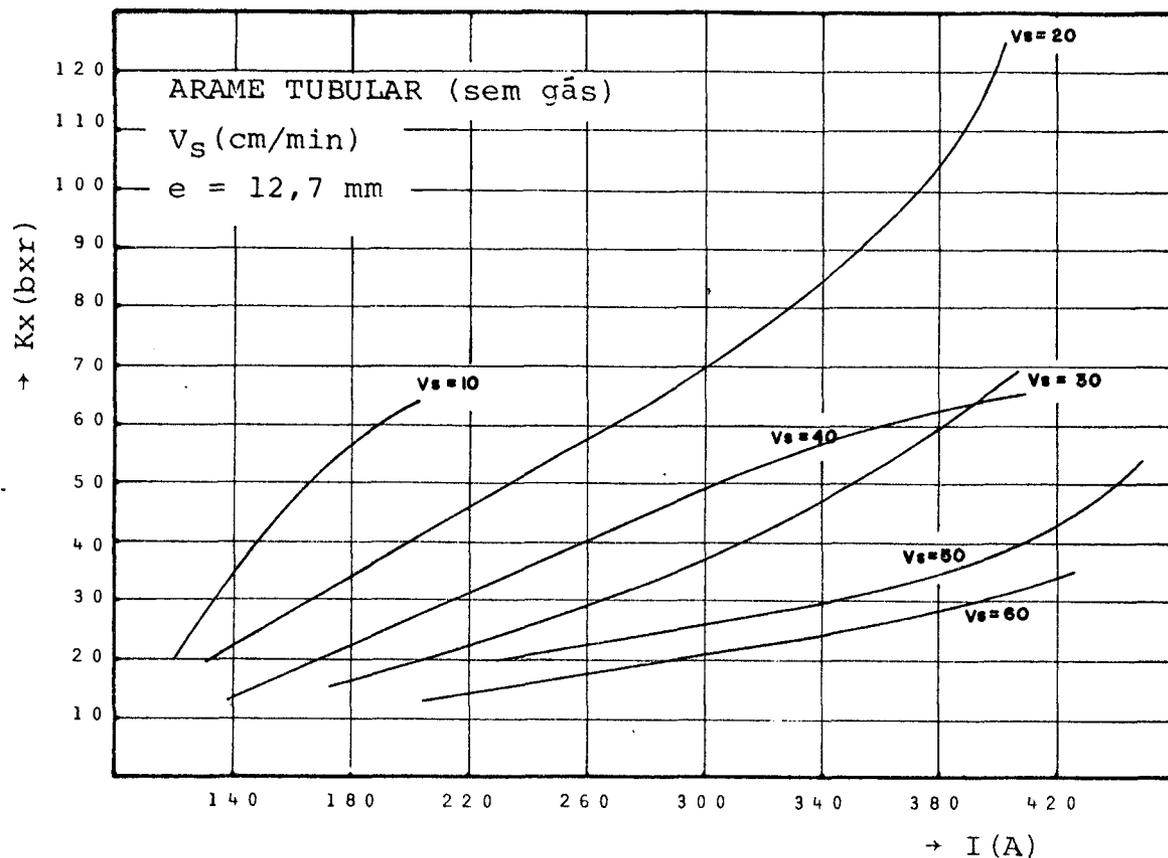


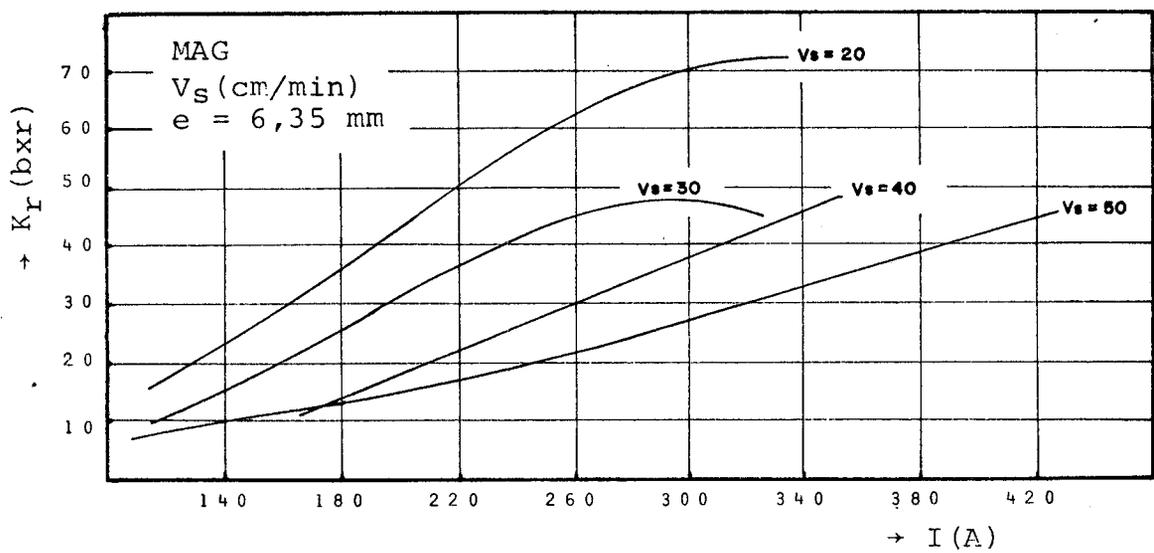
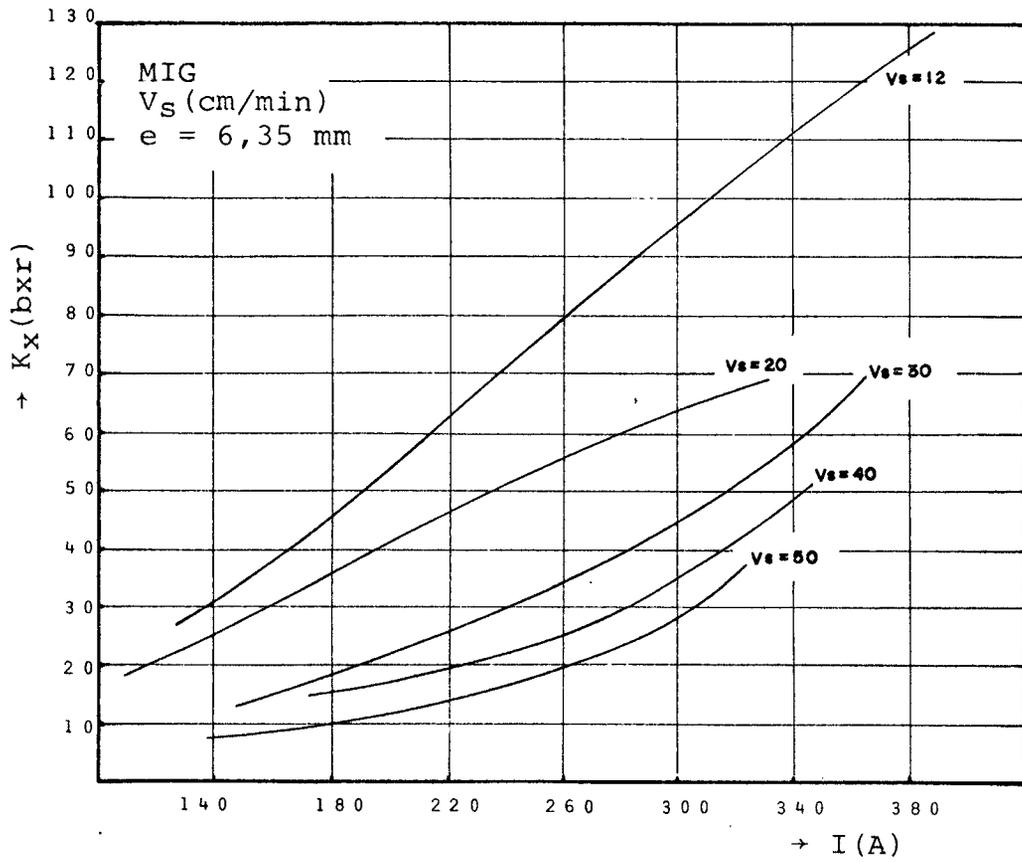


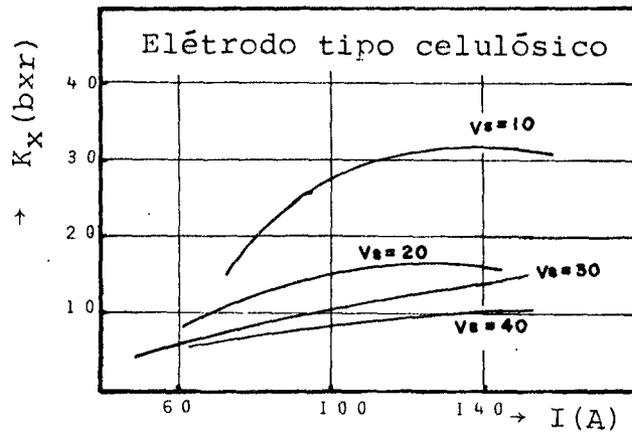
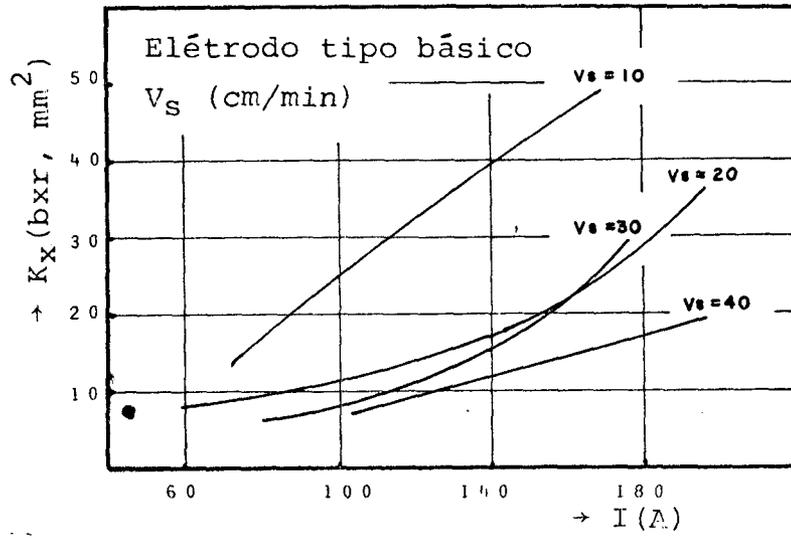


## ANEXO IV

VARIAÇÃO DO PRODUTO  $b \cdot r$  (kx) COM A CORRENTE EM DIVERSAS VELOCIDADES DE SOLDAGEM.







# GLOSSÁRIO

## 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 ao 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  $ke (= b/r)$  é constante.
- Iso-ki (isoki): são linhas sobre as quais o valor de  $ki (= b/p)$  é constante em relação a corrente e velocidade de soldagem.
- Iso-kx (isokx): são linhas sobre as quais o  $kx$  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 live): 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 ( $\text{cm/min}$ ).

- Produção de material de adição (filler metal production) (P = kg/h): quantidade de material de adição depositado na junta soldada, por unidade de tempo.
- Reforço (reinforcement) (r = 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) (E = volts): é a soma das quedas de tensão no extremo livre do arame mais a do arco elétrico.
- Velocidade equivalente (equivalent speed) (Ve = cm/min): velocidade equivalente de um conjunto de diversos passes.
- Velocidade de soldagem (welding speed) (Vs = cm/min): velocidade de execução de único passe.