

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

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO NA ESTABILIDADE  
E TRANSFERÊNCIA DE METAL EM ELETRODOS BÁSICOS

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

JESUALDO PEREIRA FARIAS

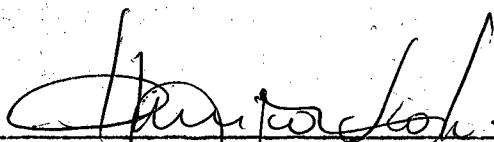
FLORIANÓPOLIS - SC, AGOSTO DE 1985

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO NA ESTABILIDADE  
E TRANSFERÊNCIA DE METAL EM ELETRODOS BÁSICOS

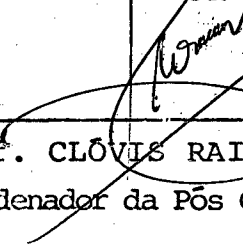
JESUALDO PEREIRA FARIAS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA

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

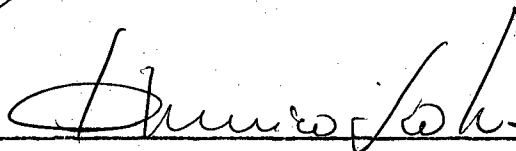


Prof. AMÉRICO SCOTTI, M.Sc. Eng. Mec.  
ORIENTADOR

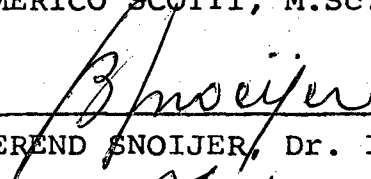


Prof. CLÓVIS RAIMUNDO MALISKA, Ph.D.  
Coordenador da Pós Graduação em Eng. Mecânica

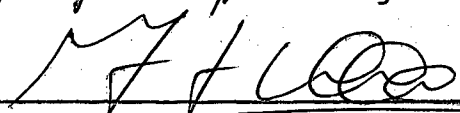
BANCA EXAMINADORA



Prof. AMÉRICO SCOTTI, M.Sc. Eng. Mec.



Prof. BEREND SNOIJER, Dr. Ing.



Prof. IVAN GUERRA MACHADO, Ph.D.



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

À meus Pais, dedico  
este trabalho.

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

Expresso os meus agradecimentos pela confiança e colaboração inestimáveis para a realização deste trabalho:

À UNIVERSIDADE DE FORTALEZA E A FUNDAÇÃO NÚCLEO DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL (NUTEC), pelo incentivo e apoio financeiro, que possibilitaram a realização deste trabalho.

À CONARCO ALAMBRES Y SOLDADURAS S.A., em especial ao LIC. RAUL TIMERMAN, LIC. ESTELA SURIAN e LIC. VERA RAITER pelo apoio a este trabalho sem o qual não seria possível realizá-lo.

Ao PROF. AMÉRICO SCOTTI pela orientação deste trabalho e ao PROF. ALMIR MONTEIRO QUITES pelo incentivo inicial.

Aos companheiros da Pós-Graduação e Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da U.F.S.C.

Aos Técnicos: JÂNIO e ALFREDO (LABSOLDA), pela ajuda indispensável neste trabalho.

Ao PROF. ALEXANDRE e PROF. IVO BARBI pela orientação na parte de Eletrônica.

Ao PROF. SAMIR NAGI e PROF. ROBERTO HEIDRICH pela orientação na medição do nível do ruído.

Ao graduando em Engenharia Mecânica, LUCIANO MOREIRA, pelo auxílio no desenvolvimento do SOFTWARE para o experimento.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Ao companheiro YUKIO KOBAYASHI pela ajuda.

À MARLEI DA SILVA COSTA pela datilografia deste trabalho

A todas as pessoas que se interessaram e de alguma forma contribuíram com este trabalho.

## Í N D I C E

LISTAGEM DE FIGURAS E TABELAS .....	viii
SIMBOLOGIA .....	xiv
RESUMO .....	xvi
ABSTRACTS .....	xvii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	01
CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA	
2.1 - Arco Voltaico de Soldagem .....	03
2.1.1 - Definição do Arco Voltaico de Soldagem .....	03
2.1.2 - Abertura do Arco Voltaico de Soldagem .....	04
2.1.3 - Regiões do Arco Voltaico de Soldagem .....	05
2.1.4 - Estabilidade do Arco Voltaico de Soldagem ..	16
2.2 - Eletrodos Revestidos .....	26
2.2.1 - Funções do Revestimento .....	26
2.2.2 - Constituição do Revestimento .....	29
2.2.3 - Características Estáticas .....	30
2.2.4 - Características Dinâmicas .....	32
2.2.5 - Transferência de Metal de Adição .....	35

2.3 - Eletrodos Revestidos Básicos .....	40
2.3.1 - Composição Química dos Revestimentos <u>B</u> ásicos .....	41
2.3.2 - O arco do Eletrodo Revestido Básico .....	41

### CAPÍTULO III - MÉTODOS E INSUMOS

3.1 - Equipamentos para Análise Experimental .....	51
3.2 - Software .....	58
3.3 - Insumos .....	58
3.4 - Procedimento Experimental .....	59
3.4.1 - Características Dinâmicas do Arco .....	59
3.4.2 - Transferência de Metal de Adição .....	68
3.4.3 - Tensão de Soldagem .....	70
3.4.4 - Nível de Ruído e Geometria do Arco .....	70

### CAPÍTULO IV - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - Influência da Composição do Revestimento nas <u>Carac</u> terísticas Dinâmicas .....	93
4.1.1 - Corrente Alternada .....	93
4.1.2 - Corrente Contínua .....	102
4.2 - Influência da Composição do Revestimento no <u>Comp</u> ortamento Estático .....	114
4.2.1 - Corrente Alternada .....	114

4.2.2 - Corrente Contínua .....	121
4.2.3 - Considerações Gerais .....	123
4.3 - Influência da Composição do Revestimento na Transfe rência de Metal de Adição .....	125
4.3.1 - Corrente Alternada .....	125
4.3.2 - Corrente Contínua .....	128
4.3.3 - Considerações Gerais .....	131
4.4 - Influência da Composição do Revestimento no Nível de Ruído e Geometria do Arco .....	132
4.4.1 - Corrente Alternada .....	132
4.4.2 - Corrente Contínua .....	135
4.4.3 - Considerações Gerais .....	137
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES .....	138
CAPÍTULO VI - PROPOSIÇÃO DE NOVOS TRABALHOS .....	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	146
ANEXO 1 .....	152
ANEXO 2 .....	155
ANEXO 3 .....	158
ANEXO 4 .....	161

## LISTAGEM DE FIGURAS E TABELAS

FIGURA	1	- Representação esquemática do oscilograma de tensão e da corrente no instante do ascendimento do arco .....	06
FIGURA	2	- Repartição da tensão ao longo do arco .....	06
FIGURA	3	- Condutibilidade elétrica do Nitrogênio e Argônio em função da temperatura .....	10
FIGURA	4	- A condutibilidade térmica do Nitrogênio em função da temperatura .....	12
FIGURA	5	- Grau de ionização em função da temperatura ....	14
FIGURA	6	- Esquema da barreira eletrônica formada pelos ions de flúor na polaridade direta em CC .....	20
FIGURA	7	- Esquema mostrando a neutralização dos ions $F^-$ no ânodo na polaridade inversa em CC .....	21
FIGURA	8	- Características dinâmicas de eletrodos mostrando os parâmetros utilizados no cálculo do valor de B .....	24
FIGURA	9	- Influência da tensão em vazio da fonte sobre o tempo de reignição .....	25
FIGURA	10	- Características estáticas de eletrodos celulo	



	sicos .....	31
FIGURA 11	- Efeito do fluoreto do revestimento no rendimento de deposição, Eletrodo com 4.0mm de diâmetro I = 160A .....	47
FIGURA 12	- Características dinâmicas de eletrodo E - 7018 em C.A. ....	49
FIGURA 13	- Fonte de soldagem .....	52
FIGURA 14	- Controlador externo do simulador de soldagem com multímetro digital .....	53
FIGURA 15	- Dispositivo de acionamento do eletrodo e targa ruga .....	54
FIGURA 16	- Detalhe do arco fotografado da tela de projeção	54
FIGURA 17	- Detalhe da montagem experimental em C.A. ....	56
FIGURA 18	- Esquema da montagem do experimento para as características dinâmicas .....	62
FIGURA 19	- Tensão de soldagem em função do tempo obtida pelo sistema de aquisição de dados .....	63
FIGURA 20	- Características dinâmicas do eletrodo E - 7018 em C.A. ....	73
FIGURA 21	- Características dinâmicas do eletrodo VR/046 em C.A. ....	73

FIGURA 22	- Características dinâmicas do eletrodo VR/018 em C.A. ....	74
FIGURA 23	- Características dinâmicas do eletrodo VR/019 em C.A. ....	74
FIGURA 24	- Características dinâmicas do eletrodo VR/047 em C.A. ....	75
FIGURA 25	- Características dinâmicas do eletrodo VR/058 em C.A. ....	75
FIGURA 26	- Características dinâmicas de eletrodo VR/059 em C.A. ....	76
FIGURA 27	- Características dinâmicas do eletrodo VR/020 (f=1,5) em C.A. ....	76
FIGURA 28	- Características dinâmicas do eletrodo VR/020 (f=2,1) em C.A. ....	77
FIGURA 29	- Características dinâmicas do eletrodo E-7018 em CC <sup>+</sup> .....	77
FIGURA 30	- Características dinâmicas do eletrodo E-7018 em CC <sup>-</sup> .....	78
FIGURA 31	- Características dinâmicas do eletrodo VR/046 em CC <sup>+</sup> .....	78
FIGURA 32	- Características dinâmicas do eletrodo VR/046 em CC <sup>-</sup> .....	79

FIGURA 33	- Características dinâmicas do eletrodo VR/018 em $CC^+$ .....	79
FIGURA 34	- Características dinâmicas do eletrodo VR/018 em $CC^-$ .....	80
FIGURA 35	- Características dinâmicas do eletrodo VR/019 em $CC^+$ .....	80
FIGURA 36	- Características dinâmicas do eletrodo VR/019 em $CC^-$ .....	81
FIGURA 37	- Características dinâmicas do eletrodo VR/058 em $CC^+$ .....	81
FIGURA 38	- Características dinâmicas do eletrodo VR/058 em $CC^-$ .....	82
FIGURA 39	- Características dinâmicas do eletrodo VR/059 em $CC^+$ .....	82
FIGURA 40	- Características dinâmicas do eletrodo VR/059 em $CC^-$ .....	83
FIGURA 41	- Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=1,5$ ), $CC^+$ .....	83
FIGURA 42	- Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=1,5$ ), $CC^-$ .....	84
FIGURA 43	- Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=2,1$ ), $CC^+$ .....	84

FIGURA 44	- Características dinâmicas do eletrodo VR/020 (f=2,1), CC <sup>-</sup> .....	85
FIGURA 45	- Características dinâmicas do eletrodo VR/047 em CC <sup>+</sup> .....	85
FIGURA 46	- Características dinâmicas do eletrodo VR/047 em CC <sup>-</sup> .....	86
FIGURA 47	- Características dinâmicas do eletrodo VR/048 em CC <sup>+</sup> .....	86
FIGURA 48	- Características dinâmicas do eletrodo VR/048 em CC <sup>-</sup> .....	87
FIGURA 49	- Efeito do CaF <sub>2</sub> e CaCO <sub>3</sub> na estabilidade do arco	87
FIGURA 50	- Efeito do pó de ferro e CaCO <sub>3</sub> na estabilidade do arco .....	88
FIGURA 51	- Efeito do fator de revestimento na estabilidade do arco .....	88
FIGURA 52	- Efeito da densidade do pó de ferro na estabili- dade do arco .....	89
FIGURA 53	- Montagem experimental para verificação da trans- ferência de metal de adição .....	89
FIGURA 54	- Comportamento da tensão de soldagem em função do teor de CaCO <sub>3</sub> e CaF <sub>2</sub> .....	90

FIGURA	55	- Comportamento da tensão de soldagem em função do teor de $\text{CaCO}_3$ e pó de ferro .....	90
FIGURA	56	- Comportamento da tensão de soldagem em função do fator de revestimento .....	91
FIGURA	57	- Comportamento da tensão da soldagem em função da densidade e granulação do pó de ferro .....	91
TABELA	1	- Energia de ionização .....	15
TABELA	2	- Função dos constituintes dos revestimentos .....	42
TABELA	3	- Constituição e características dos eletrodos experimentais .....	60
TABELA	4	- Valores médios da tensão de soldagem .....	65
TABELA	5	- Parâmetros medidos e índice de estabilidade calculado .....	67
TABELA	6	- Comprimento do arco após a extinção .....	67
TABELA	7	- Número relativo de curtos-circuitos registrados e frequência de transferência .....	72
TABELA	8	- Nível de ruídos em Db(A) .....	72

## S I M B O L O G I A

B	$\Omega^{-1} s^{-1}$	- Índice de estabilidade
CA	-	- Corrente alternada
CC	-	- Corrente contínua
CC <sup>+</sup>	-	- Corrente contínua, polaridade inversa
CC <sup>-</sup>	-	- Corrente Contínua, polaridade direta
E	$V m^{-1}$	- Campo elétrico
E <sub>i</sub>	eV	- Energia de ionização
f	Hz	- Freqüência
I	A	- Corrente de soldagem
I <sub>1</sub>	A	- Corrente no momento da reignição
j	$A m^{-2}$	- Densidade de corrente
NR	-	- Nível de referência
Q	-	- Quantidade de calor
r	m	- Raio
T	K	- Temperatura
t <sub>1</sub>	s	- Tempo necessário para reignição
V	V	- Tensão de soldagem
V <sub>o</sub>	V	- Tensão em vazio
V <sub>efc.</sub>	V	- Tensão eficaz de soldagem
V <sub>1</sub>	V	- Tensão no momento de reignição

$\omega$	$2\pi f$	- Freqüência angular da rede
$x$	$\%$	- Potencial de ionização
$K$	$W m^{-1} K^{-1}$	- Condutividade térmica
$\psi$	rad	- Ângulo de fase entre tensão e corrente
$\sigma$	$\Omega^{-1} m^{-1}$	- Condutibilidade elétrica

## R E S U M O

Utilizando-se de eletrodos experimentais, confeccionados com composições químicas sistematicamente variadas, procurou-se encontrar e explicar a influência do teor dos compostos  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaF}_2$ , pó de ferro e fator de revestimento sobre a estabilidade do arco e modo de transferência de metal de adição. A verificação da estabilidade do arco foi feita através da análise de tensão e corrente de soldagem gravados em vídeo-tape, além da medição do nível de ruído e da energia de soldagem. A transferência de metal foi verificada pela contagem do número de gotas obtida com o uso de laser e pela análise dos oscilogramas. Para o controle do processo, os parâmetros elétricos foram medidos e registrados em um microprocessador. A inconstância do soldador foi evitada mediante a realização da soldagem com equipamento automático. Verificou-se que o aumento do  $\text{CaCO}_3$  e do pó de ferro parece favorecer a estabilidade do ponto de vista da física do arco, mas em altos teores o  $\text{CaCO}_3$  diminui a operacionalidade pelo elevado efeito canhão. O  $\text{CaF}_2$ , por sua vez, mostrou ser causador de instabilidade, enquanto verificou-se existir um ponto ótimo para o fator de revestimento. Foi verificado também que o tipo de pó de ferro influi na estabilidade. Devido aos vários efeitos atuantes em conjunto sobre a frequência de transferência de metal, não se pode chegar a nenhuma relação genérica entre a composição do revestimento e o modo de transferência. Sugere-se finalmente, novas formulações para poder reforçar as conclusões e explicações obtidas.



## A B S T R A C T

Several electrodes with different contents of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ) and iron powder in the covering, and with different covering thicknesses were tested.

A relationship between these variables with arc stability and transference mode was studied by means of the analysis of video tape recorded current and voltage oscillograms, and by noise level and welding power measurements. The transference mode was checked by counting the number of drops per second, making use of a laser beam and oscillogram analysis. For monitoring of the welding process, the electrical parameters were measured and registered in a microprocessor. The welds were produced in an automatic welding device. The increase of the calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) and iron powder contents showed to improve the stability in the sense of the arc physical characteristics. However, a higher calcium carbonate content, decreases the operationality. An increasing calcium fluoride content showed to cause instability, while the covering thickness has an optimum value. It was also verified that the kind of iron powder used has influence in the arc stability. No general relation between the composition of the covering and the transference mode was obtained because of many factors simultaneously influencing the metal transfer. Suggestions for new work to extend this research are made.

# C A P I T U L O I

## INTRODUÇÃO

A estabilidade do arco é uma característica de suma importância nos processos de soldagem a arco voltaico, destacando-se a soldagem manual com eletrodos revestidos. É sabido que muitos defeitos de soldagem, como poros, trinca de hidrogênio, mordeduras e falta de fusão, podem ser ocasionados devido a instabilidade do arco. Também é conhecido que as causas de instabilidade podem ser tanto de origem operacional, manuseio imprôprio ou sopro magnético, como de origem intrínseca ao eletrodo.

Diversos são os tipos de eletrodos utilizados no processo de soldagem manual, caracterizados pelos diferentes tipos de revestimentos. Os do tipo básico constituem a classe de eletrodos de maior aplicação em soldagem de grande responsabilidade, de grandes espessuras, e em estruturas rígidas, por possuir mínimo risco de fissuração a frio e a quente e melhores propriedades de resistência ao impacto. Caracterizam-se pela grande quantidade de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), além de ser um resvestimento com baixo teor de hidrogênio.

O tipo de transferência de metal de adição (predominantemente globular), a dificuldade de soldagem em corrente alternada e as diferenças de comportamento do arco na soldagem em corrente contínua direta ( $\text{CC}^-$ ) e inversa ( $\text{CC}^+$ ) fazem desse tipo de revestimento um objeto de estudo específico.

A composição química do revestimento, principalmente com relação aos teores de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  e pó de ferro, assim co

mo a sua espessura, determina o comportamento sobre o arco e sobre a solda quanto a proteção gasosa, desoxidação e basicidade, formação de escória, controle de viscosidade, estabilização do arco e transferência de elementos de liga, além de exercer influência marcante no tipo de transferência de metal de adição.

Pequenas variações nessas composições podem resultar em comportamentos bem diferentes. Atualmente ainda não se tem na literatura uma posição bem definida quanto a composição ótima dos constituintes dos revestimentos básicos, ao mesmo tempo em que se depara com os problemas de explicar a instabilidade de arco em corrente alternada e dificuldades de soldagem em CC. Também muito pouco se conhece sobre a natureza da transferência de material de adição em soldagem com estes eletrodos.

Baseado na expectativa de se conseguir contribuir para o estudo da influência da composição do revestimento sobre a estabilidade do arco e tipos de transferência, este trabalho se propõe, a partir da utilização de eletrodos experimentais com composições químicas sistematicamente variadas, identificar e explicar fenômenos que governam o desempenho dos mesmos. O desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de estudo, além da formulação e proposição de uma metodologia, caracterizam outra forma de contribuição pretendida.

Os resultados poderão constituir um ponto de partida para futuros trabalhos, que ampliarão o alcance deste.

A otimização das formulações deverá facilitar a nacionalização, absorção e aperfeiçoamento da tecnologia de fabricação de eletrodos revestidos básicos.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 - Arco Voltaico de Soldagem

Para se entender os processos de ionização da atmosfera do arco, e os diferentes comportamentos do mesmo para diversos tipos de revestimentos, é necessário conhecer as definições e características básicas das grandezas que envolvem a física do arco voltaico de soldagem.

##### 2.1.1 - Definição do Arco Voltaico de Soldagem

Pode-se definir de uma forma simplificada um arco voltaico como a passagem de corrente elétrica através de um gás. No entanto, nas condições normais de temperatura e pressão, todo gás é isolante elétrico, quando submetido a campos de intensidades normais. O ar, por exemplo, situado entre dois eletrodos afastados de 1 mm, necessita da aplicação de uma diferença de potencial de quatro mil volts para se tornar condutor (01).

Um gás torna-se condutor quando se ioniza, isto é, quando passa a possuir ions e elétrons livres, e seu comportamento muda de tal forma que recebe a denominação de plasma. Como se compõem de igual número de cargas positivas (cations) e negativas (elétrons), subsistem apenas em condições que as impeçam de se reunir. Estas condições são obtidas por hipo ou hiper pressão, por elevado aquecimento, por bombardeio dos átomos por elétrons, pela

aplicação de uma corrente alternada de alta frequência, etc<sup>(01)</sup>,

O arco voltaico de soldagem é uma forma particular de plasma, mantido pelo estabelecimento de uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos ligados a uma fonte de energia de capacidade adequada, transportando uma grande quantidade de corrente. As partículas de carga tem assim um sentido preferencial de percurso e os choques, entre si, com os eletrodos e com os átomos ainda neutros, criam as condições necessárias para a continuidade do processo.

### 2.1.2 - Abertura do Arco Voltaico de Soldagem

Na soldagem manual com eletrodo revestido, o processo comumente usado para obtenção do arco voltaico de soldagem, consiste, em aquecer o gás existente entre o eletrodo e a peça e sujeitá-lo a um bombardeio eletrônico. Uma vez dispondo-se de uma diferença de potencial entre o eletrodo e a peça, comumente referenciada como tensão em vazio, toca-se a peça com o eletrodo, no instante caracterizado por " $t_1$ " na figura 1. A tensão cai rapidamente, e a corrente cresce a um valor bem próximo da corrente de curto circuito, e por efeito Joule, a região de contato se aquece até a incandescência. A quantidade de calor despreendida torna fácil o arrancamento dos elétrons dos átomos do ambiente gasoso, o que acontece por efeito da emissão termoiônica da zona incandescente. Assim o meio se ioniza. Devido a alta temperatura no contato, o meio também é formado por vapores metálicos que também se ionizam. Desta forma, a energia de geração do arco dependerá também da natureza dos vapores metálicos. A energia de ionização dos vapores metálicos situa-se entre 4 e 10 eV, sendo,

por exemplo de 7,83 eV para o ferro<sup>(01)</sup>,

Obtida a ionização do ambiente entre o eletrodo e a peça pode-se afastá-los a alguns milímetros um do outro (de acordo com o valor do comprimento do arco), e o arco subsistirá.

### 2.1.3 - Regiões do Arco Voltaico de Soldagem

Uma vez estabelecido o arco, este apresenta-se de forma cônica, com o vértice numa zona pequena do eletrodo e com a base sobre a peça. Esse espaço compreendido entre o eletrodo e a peça pode ser dividido em três regiões distintas, cada uma com suas características básicas definidas. A região de incidência do arco no polo negativo toma o nome particular de região catódica, caracterizada por uma camada muito fina. Por outro lado a região situada imediatamente à frente do ânodo (polo positivo) recebe o nome de região anódica, que também é caracterizada por uma camada muito fina. Essas regiões particulares apresentam densidades de corrente da ordem de centenas de milhares de A/cm<sup>2</sup><sup>(02)</sup>. A região compreendida entre a queda anódica e a queda catódica é chamada de coluna do arco e sua medida é o comprimento do arco. A Figura 2 ilustra as regiões do arco.

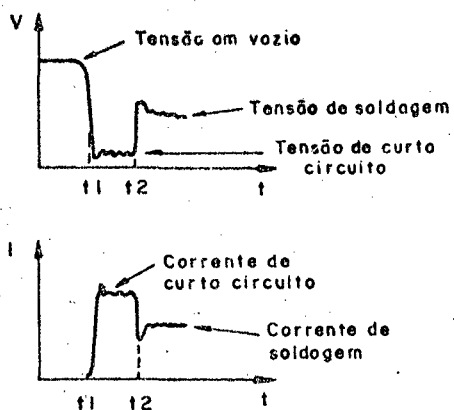


FIGURA 1. -- Representação esquemática do oscilograma da tensão e da corrente no instante do ascensão do arco.

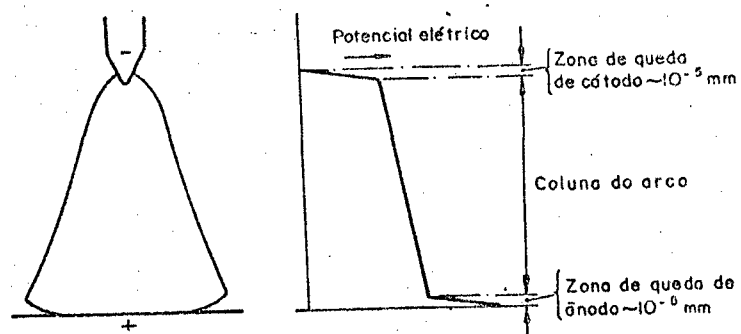


FIGURA 2 - Repartição da Tensão ao Longo do Arco.

### a) A Queda Catódica

Como já foi definida, a queda catódica é uma camada muito fina ( $10^{-5}$  mm) que conecta o cátodo, relativamente frio a coluna do arco. Valores normais de queda catódica estão entre 3 e 16 Volts para diferentes arcos.

É surpreendente que o valor da queda catódica não parece estar diretamente relacionado com o valor da energia de ionização do gás ou vapor do metal aqui interveniente, mas é de importância a relação entre a queda catódica e a corrente do arco. Descobriu-se que a queda catódica inicialmente diminui com o aumento da corrente do arco, para permanecer constante para maiores valores de corrente (03).

Na zona catódica devem passar os elétrons livres do cátodo ao extremo da coluna do arco, para que fique garantida a continuidade da corrente. Isto acontece de três formas distintas e simultâneas:

- 1 - Por emissão termoiônica, que devido ao fato dos ions acelerados na zona catódica atingirem o cátodo levando-o a incandescência.
- 2 - Devido a ação do campo elétrico que, por ter ai alto valor (em torno de  $10^6$  V/cm) é capaz de arrancar elétrons do cátodo.
- 3 - Por ionização térmica, devido ao calor gerado pelo choque de elétrons com ions neutralizados, emitindo novos eletrons.



## b) A Queda Anódica

A queda anódica é definida como uma camada muito fina diretamente em frente ao ânodo. Nesta camada está presente um campo elétrico muito alto (em torno de  $10^5$  V/cm) causado pela presença de um espaço de carga negativa. A queda anódica caracteriza-se por um gradiente de temperatura extremamente alto, uma vez que ela forma a conexão entre o ânodo relativamente resfriado e a coluna muito quente do arco. O valor da queda anódica normalmente varia entre 2 e 12 Volts, e depende da corrente do arco (03).

Teoricamente, o bombardeio a que os elétrons sujeitam o ânodo deve ser mais eficiente do que o bombardeio dos ions no cátodo, pelas seguintes razões:

- 1 - A energia cinética de cada elétron é  $M/m$  vezes maior que a de cada íon, sendo  $M$  a massa do íon e  $m$  a massa do elétron. A corrente se transporta principalmente e preferencialmente por elétrons devido a sua maior velocidade.
- 2 - A emissão termoiônica aumenta o número de elétrons que atingem o ânodo. A emissão termoiônica do ânodo não é considerada porque a força eletrostática a impede.
- 3 - O forte campo elétrico que existe junto ao cátodo arranca elétrons adicionais deste, aumentando ainda mais o número de elétrons que atingem o ânodo.
- 4 - A evaporação de elétrons do cátodo consome energia, enquanto que a entrega no ânodo se efetua com entrega de energia.

### c) A Coluna do Arco

Ao contrário das regiões anódica e catódica, que hoje não tem seus processos físicos bem definidos e explicados, os processos físicos na coluna do arco estão mais claramente definidos. A coluna do arco foi definida anteriormente como a região do arco que está compreendida entre as áreas da queda catódica e anódica. Ela é constituída de partículas neutras, como os átomos e moléculas e partículas com cargas como os elétrons e os íons. Um importante aspecto da coluna do arco é sua neutralidade elétrica o que significa que cada unidade de volume contém um número igual de partículas de carga positiva e negativa. Uma consequência da neutralidade elétrica ou da ausência de portadores no espaço é a presença de um campo elétrico constante na coluna do arco (Lei de Poisson). Este campo elétrico é na maioria dos casos da ordem de  $10 \text{ V/cm}$ <sup>(03)</sup>.

A coluna do arco é caracterizada por uma situação próxima do equilíbrio térmico, ou seja, uma troca quase completa de energia entre as partículas do gás. A temperatura do arco é um fator muito importante na determinação de muitas propriedades da coluna do arco, como o grau de ionização, condutibilidade elétrica e térmica.

A coluna do arco, simétrica radialmente, consta de um plasma de irradiação intensa, no qual a temperatura decresce rapidamente do centro para a periferia no sentido da temperatura ambiente. De acordo com essa queda de temperatura na direção radial do arco, a composição do plasma varia, e com isso, ocorre uma diminuição da condutibilidade elétrica<sup>(04)</sup>, que se determina essencialmente pela concentração de veículos de carga, (Figura 3). A falta de condutibilidade elétrica tem como conse

qüência o decréscimo proporcional da densidade de corrente ( $A/cm^2$ ) na direção radial, fazendo com que a parte principal da corrente flua em um canal relativamente estreito ao redor do eixo da coluna do arco.

A condutibilidade elétrica é pois, um dos parâmetros mais importantes da coluna do arco, e define a relação entre a densidade de corrente e o campo elétrico na coluna.

$$\sigma = j/E \dots\dots\dots (1)$$

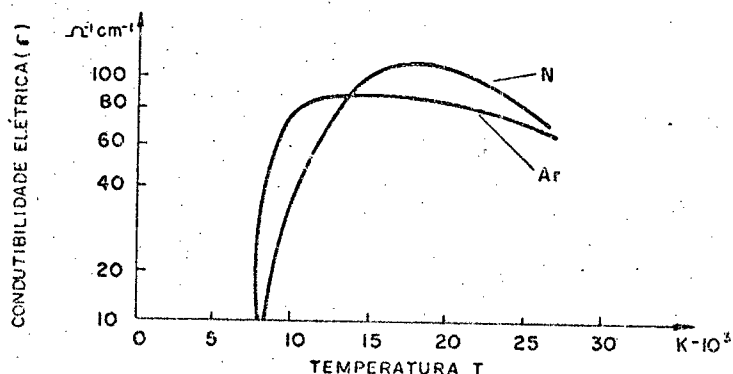


FIGURA 3 - Condutibilidade elétrica do Nitrogênio e Argônio em função da temperatura (04).

A condutibilidade elétrica depende do grau de ionização dos gases da atmosfera do arco, que depende da temperatura, e de termina a estabilidade do arco. Generalizando pode-se dizer que a estabilidade do arco é aumentada com um aumento da condutibilidade elétrica. E neste sentido a baixa energia de io

nização ou a alta temperatura do arco, são favoráveis.

Energeticamente, a queda rápida de temperatura do arco é de grande importância, e se o arco se encontra em estado estacionário a energia térmica recebida na coluna do arco elétrico (calor Joule) tem que ser igual à energia cedida ao exterior. O processo decisivo na transferência de energia, na maioria dos casos, é o transporte de energia por condução térmica, e o princípio de que em toda queda de temperatura se forma um gradiente térmico, que conduz a uma compensação de temperatura. Segundo as leis da termodinâmica, a quantidade de calor  $Q$  que flui por unidade de superfície em cada segundo é proporcional à queda de temperatura (gradiente) na região da superfície.

$$Q = - K \text{ grad } T \dots\dots\dots (2)$$

A constante  $K$  é a condutibilidade térmica e depende do meio e seu estado (pressão e temperatura). Visto que  $K$ , a uma dada pressão é uma grandeza função da temperatura, e com isso, em um arco dado, é função também da distância ao eixo, isto significa que o gradiente de temperatura  $\partial T/\partial r$  do arco tem que ajustar-se sempre de modo que satisfaça a equação integral do balanço de energia (a quantidade de calor recebida por segundo através do arco é igual ao calor produzido por efeito Joule no mesmo arco). Determinantes para a curva de  $K$  em função da temperatura são, sobretudo, as correntes de difusão que se formam no campo de temperatura do arco devido aos processos de dissociação e ionização, os quais estão unidos a um transporte de energia. Estas correntes conduzem a valores de  $K$  extraordinariamente altos em

tais zonas de temperatura onde a dissociação é especialmente forte e onde, com isto, o nível de concentração da molécula é muito elevado, Figura 4<sup>(03)</sup>.

Uma maneira mais simples para se entender a definição de condutibilidade térmica  $K$  que está ilustrada na Figura 4, é considerá-la como a soma das contribuições dos átomos, moléculas e íons (a condutibilidade térmica clássica  $K_c$ ), elétrons ( $K_e$ ), difusão de energia de ionização ( $K_i$ ) e a difusão de energia de dissociação ( $K_d$ ).

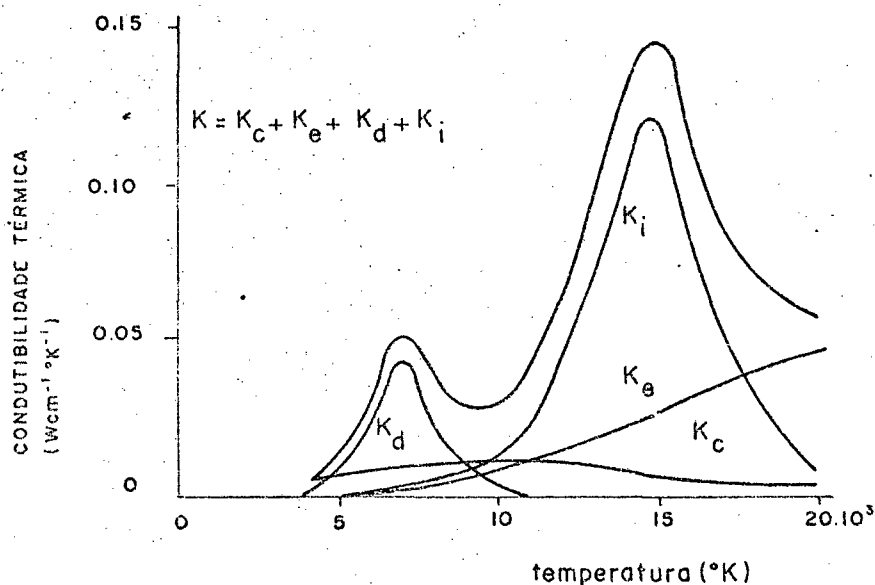


FIGURA 4 - Condutibilidade térmica do nitrogênio em função da temperatura<sup>(03)</sup>.

Pode-se notar que  $K_d$  e  $K_i$  são muito importantes para a condutibilidade térmica de um gás. Esta é a razão pela qual o  $CO_2$  possui uma condutibilidade térmica maior que a do argônio, já que este último não tem a parte  $K_d$ . A alta condutibilidade conduz a um pequeno diâmetro do arco, e conseqüente

mente um gradiente de temperatura maior, alta queda de potencial, podendo ainda surgir forças ascendentes agindo sobre a gota em fusão (caso do MAG com  $\text{CO}_2$ )<sup>(03)</sup>.

Além das condutibilidades térmica e elétrica, a temperatura da coluna do arco afeta profundamente o grau de ionização, da atmosfera gasosa do arco. O grau de ionização é definido como uma fração de átomos (ou moléculas) presentes na coluna do arco no estado ionizado. A relação entre temperatura e grau de ionização, é dado pela equação da Saha, e pode, de uma forma simplificada ser equacionada conforme segue, para uma pressão constante do gás:

$$\frac{x^2}{1 - x^2} = \text{Const. } T^{5/2} \exp. (-E_i/T) \dots\dots (3)$$

Onde:

$x$  = grau de ionização

$E_i$  = energia de ionização

$T$  = temperatura

A Figura 5 ilustra o grau de ionização em função da temperatura para alguns elementos.

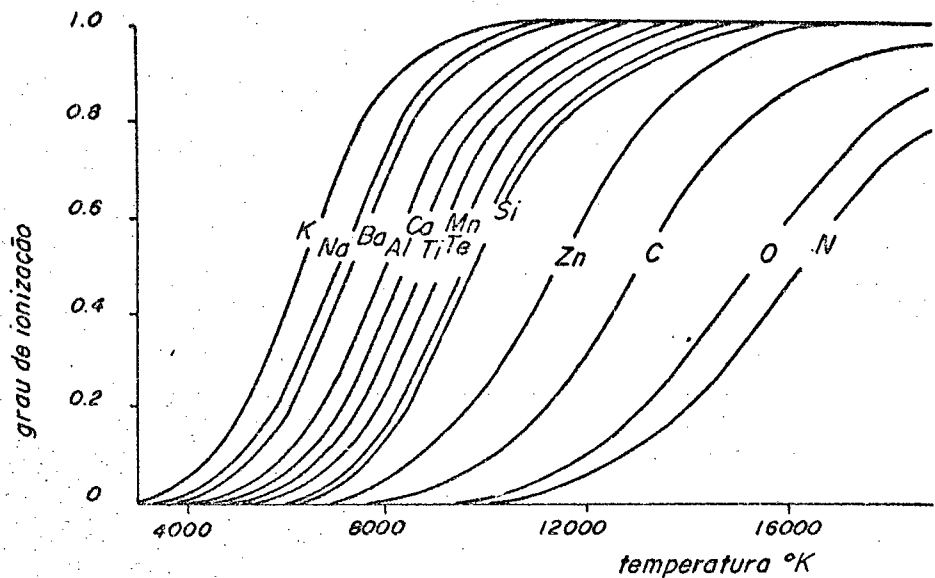


FIGURA 5 - Grau de ionização em função da temperatura (03).

A dependência do grau de ionização da temperatura do arco tem sido observada através de experiências, onde um elemento de energia de ionização mais baixa que a do metal a ser soldado, foi adicionado ao arco, enquanto que a corrente foi mantida constante. Observou-se que a temperatura do arco diminuiu. Os cálculos demonstram que, para uma corrente do arco relativamente alta, a temperatura é função linear da energia de ionização efetiva. Para uma corrente do arco relativamente baixa, a situação parece ser mais complexa. Ao lado da energia de ionização efetiva do arco de gás, verifica-se que a temperatura do arco é muito dependente da condutibilidade térmica. Quanto mais baixa for a condutibilidade térmica, em relação a uma mesma corrente no arco e mesma energia de ionização efetiva, mais alta será a temperatura do arco (03).

O Rubídio e o Césio, embora sejam os mais facilmente ionizados entre os elementos do grupo 1 da tabela periódica, não são usados em processos de soldagem como elementos ionizantes porque eles são relativamente raros. O Potássio e Sódio estão presentes nos revestimentos dos eletrodos como compostos de vários silicatos e aluminosilicatos complexos. A Tabela 1, mostra a energia de ionização para alguns elementos, compostos químicos e gases, utilizados em soldagem. É importante o conhecimento da energia de ionização, principalmente quando se trata do estudo das grandezas elétricas da coluna do arco.

Elemento	$E_i$ (eV)	Elemento	$E_i$ (eV)	Elemento	$E_i$ (eV)
Cs	3.88	Cu	7.70	O	13.50
Rb	4.16	Fe	7.83	Cl <sub>2</sub>	13.50
K	4.34	W	8.10	CO	14.10
Na	5.14	Si	8.10	CO <sub>2</sub>	14.30
Al	5.96	S	10.30	N	14.50
Ca	6.11	P	10.90	H <sub>2</sub>	15.40
Ti	6.84	C	11.20	N <sub>2</sub>	15.60
Mo	7.40	O <sub>2</sub>	12.50	A	15.70
Mn	7.40	H <sub>2</sub> O	13.20	F	18.60
Ni	7.60	H	13.50	He	24.50

TABELA 1 - Energia da ionização (03).



#### 2.1.4 - Estabilidade do Arco Voltaico de Soldagem

Para uma mesma corrente aplicada, suficiente para estabelecer o arco, as propriedades da atmosfera gasosa da coluna determinarão o comportamento e propriedades físicas do mesmo. Assim, o potencial de ionização, condutibilidade térmica, elétrica e suas variações com a temperatura para a atmosfera gasosa, deverão ser suficientes para garantir o melhor comportamento do arco, de acordo com o processo de soldagem utilizado.

A interação entre essas grandezas é um tanto complexa e inúmeras são as pesquisas voltadas para a otimização dessas grandezas objetivando um comportamento ótimo do arco. Assim, os fabricantes de eletrodos e insumos, procuram introduzir compostos facilmente ionizados, para facilitar a estabilização do arco, ao mesmo tempo que se deseja alta condutibilidade elétrica, e uma energia térmica que garanta a penetração desejada do cordão de solda. Como se vê, há todo um malabarismo para se chegar a uma solução ótima. É por isso que as composições químicas dos revestimentos de eletrodos, e fluxos de soldagem são tão complexas. Assim, não se tem até hoje, um modelo concluído que permita estudar e entender o comportamento de um arco elétrico de soldagem. E a situação torna-se ainda mais difícil quando se tem diferentes tipos de corrente; o arco muda completamente de comportamento quando se altera a polaridade em corrente contínua e em corrente alternada. E muitas vezes o arco nem se estabelece, principalmente quando se trabalha com eletrodos revestidos do tipo básico e celulósico.

Além dos fatores inerentes à composição da atmosfera gasosa, o arco voltaico de soldagem é afetado por forças ele

tromagnéticas. A corrente através do arco, provoca forças de indução magnéticas e essas forças, entre outras coisas, ocasionam a chamada força de Lorentz, a qual atua perpendicularmente através do arco. Esta força radial causa uma pressão sobre a coluna do arco. Como pressão é inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro, obtem-se uma maior pressão do gás quando o plasma é mais estreito possível, ocasionando um fluxo na direção axial, denominado jato de plasma. Este é o chamado efeito constrictão. E desse modo um aumento na condutibilidade térmica, que resulta em um arco mais estreito devido ao seu equilíbrio de energia, aumenta consideravelmente as forças axiais (caso do  $\text{CO}_2$ )<sup>(03)</sup>.

Além de todas as condições mostradas anteriormente, a transferência de metal de adição influencia enormemente o comportamento do arco. E muitas das teorias desenvolvidas para arcos sem material de adição, como o TIG, não são bem aceitas quando se trabalha com MIG, por exemplo. Mas, o caso torna-se mais crítico ainda quando se estuda arcos voltaicos de soldagem manual com eletrodos revestidos. Neste caso particular, a transferência de metal não é tão controlada como o MIG, e a quantidade de gases oriundos da queima do revestimento e a escória envolta nas gotas, dificultam a observação direta da transferência, causando explosões e produzindo fumaças, mudando completamente as condições de operação do arco. Neste caso, o mais comum é estudar o comportamento do arco através da observação dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem.

Finalmente, o arco elétrico de soldagem pode sofrer influência de outras forças eletromagnéticas; ocorrendo o seu desvio, isto é, o arco é desviado afastando-se do caminho mais curto do eletrodo à peça, tornando-se instável, bem como variações

em seu comprimento encurtando-se e alongando-se. Esse comportamento errático, conhecido como sopro magnético, causa vários problemas na solda e prejudica a transferência de metal através da coluna do arco. Embora esse fator não esteja relacionado com as propriedades anteriores mencionadas, foi introduzido aqui apenas como uma citação de sua existência. Um fato importante é que para se analisar o comportamento do arco com relação as grandezas citadas anteriormente, deve-se ter a garantia de que não há influência do sopro magnético.

O conceito de estabilidade de um arco elétrico de soldagem é muitas vezes mal empregado, pois, vários fenômenos fazem com que surjam esses erros de interpretação. Entretanto, a necessidade de se desenvolver eletrodos com propriedades cada vez mais específicas, é o motivo que leva especialistas em várias partes do mundo estudar mais atentamente a física ao arco.

Às vezes a estabilidade de um arco pode ser avaliada por sua aparência ou ruído, de uma forma macroscópica. Isto é, um eletrodo que permite soldagens com um arco geometricamente constante, com níveis de ruídos homogêneos e poucos salpicos, pode ser considerado um eletrodo de arco estável. Porém, como se sabe, estes aspectos são influenciados enormemente pela natureza da atmosfera gasosa (tipo de gás, revestimento ou fluxo), transferência de metal e tipo de corrente. Desta forma, a própria observação do aspecto do cordão e da produção de material de adição, pode ser usada como critérios para determinação da estabilidade.

Uma outra forma de avaliação é pelo valor de tensão de soldagem, onde pode-se considerar que os eletrodos que trabalham com menor tensão de arco, incluindo a tensão inicial para abertura, tem arco mais estável. A explicação estaria no fato de

que uma menor tensão do arco para as mesmas condições implica em uma atmosfera mais facilmente ionizável.

Hoje sabe-se que um fator muito importante que governa a estabilidade, é a característica dinâmica do arco, isto é, o comportamento da tensão e corrente com o tempo<sup>(05)</sup>. Um arco para se tornar estável deve manter sua coluna ionizada mesmo quando por motivos tais como, soldagem em corrente alternada ou transferência tipo curto circuito, a tensão atinja durante certos intervalos de tempo, valores insuficientes para mantê-lo aberto. A reignição será tão mais fácil quanto maior o grau de ionização em que se mantiver o arco. A estabilidade estaria, pois, relacionada com a facilidade de reignição.

Para se estudar as causas e fatores que governam o fenômeno da estabilidade de um arco, procurou-se em um recente trabalho<sup>(05)</sup> desenvolver um modelo que pudesse explicar como a composição química do revestimento influi sobre o comportamento dinâmico, da corrente e tensão, durante a operação de um arco. O modelo proposto que se segue, baseado na análise de oscilogramas de arcos de eletrodos revestidos do tipo celulósico, rutilico e básico, se fundamenta em observações de outros autores.

Em soldagem com polaridade direta, devido ao efeito termoiônico forma-se uma barreira de elétrons junto ao metal de base, que dificulta a passagem de corrente. Esta barreira pode ser anulada pelo uso de revestimentos que produzem escórias com facilidade para emitir ions positivos pelo efeito do calor. Se o revestimento ainda possuir compostos com elementos de grande eletronegatividade como os fluoretos, haverá a formação de outra barreira, esta junto ao eletrodo negativo. Esta barreira que também dificulta a passagem de elétrons, é formada pelos ânions que, de

vido sua massa e constante emissão junto ao eletrodo, têm dificuldade de se dirigir para o ânodo (Figura 6).

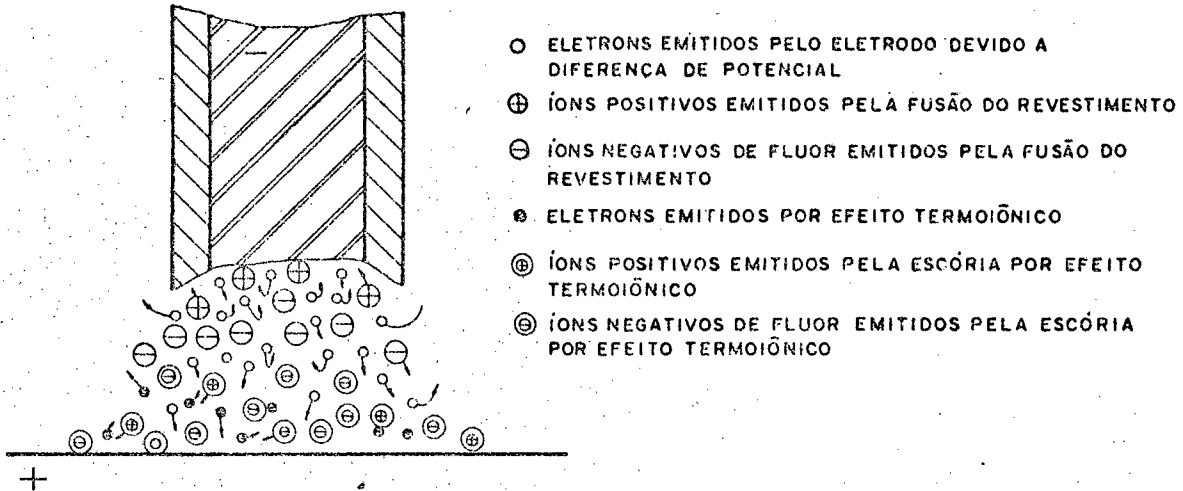


FIGURA 6 - Esquema da barreira eletrônica formada pelos íons de fluor na polaridade direta em corrente contínua.

Quando a soldagem é feita em polaridade inversa, a barreira de íons negativos junto ao eletrodo, ou a barreira de elétrons junto ao metal de base, inexistente devido a atração destas cargas pelo polo oposto (Figura 7).

Já em corrente alternada, é necessário uma tensão de reignição do arco após as transições de polaridade. Esta tensão, maior que a tensão nominal de soldagem, é causada pelo momentâneo apagamento do arco, e intensificada pela formação de camadas de elétrons termoiônicos junto ao polo positivo. Sua inexistência é possível quando a escória emite íons positivos de baixo

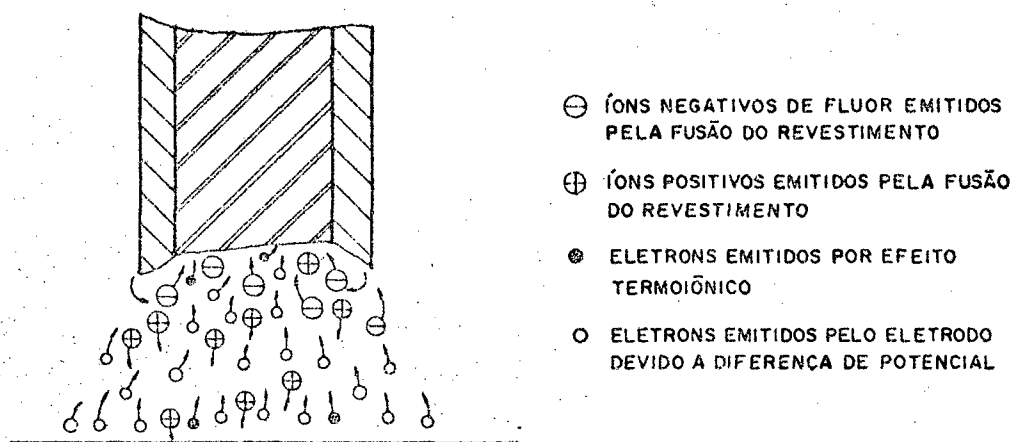


FIGURA 7 - Esquema mostrando a neutralização dos íons  $F^-$  no ânodo na polaridade inversa em corrente contínua.

potencial de ionização e em quantidade suficiente para anular a barreira de elétrons. Entretanto, se houver a emissão também de íons negativos, haverá a formação de uma barreira de ânions junto ao cátodo durante o ciclo negativo, e sempre que a polaridade inverter de negativa a positiva, produzirá um pico de reignição devido a facilidade de desionização pela combinação destes ânions com os cátions livres. Ao inverter-se de positivo para negativo, o pico diminui acentuadamente, chegando muitas vezes a desaparecer pela dificuldade de recombinação dos ânions, pois os mesmos estão sendo atraídos pelo eletrodo antes da extinção do arco.

Em outra publicação<sup>(06)</sup> tentou-se mostrar a dificuldade de se definir estabilidade de arco, e em particular a dificuldade maior em estabelecer um padrão de comparação. Após ana

lisar vários aspectos como nível de ruído, salpicagem, geometria do cordão de solda, tensão e aparência do arco conclui-se que a forma mais segura, apesar de mais complexa, é avaliar a estabilidade de um arco pela sua característica dinâmica em corrente alternada.

Esta avaliação é reforçada pela utilização de uma fórmula proposta por Pokhodnya et al<sup>(07)</sup>, que permite expressar numericamente a estabilidade de um arco e, desta forma, fazer comparações. De acordo com estes autores, a estabilidade do arco é definida pela taxa média do aumento da condutibilidade elétrica na coluna do arco durante o período de reignição, que acontece quando da transição de polaridade em corrente alternada, e é determinada de acordo com a fórmula:

$$B = \frac{I_1}{V_1 t_1} \dots \dots \dots (04)$$

Para analisar a característica "B", a tensão de reignição  $V_1$ , pode ser dada como:

$$V_1 = \sqrt{2} \quad V_o \quad \text{sen} (wt_1 + \psi) \dots \dots \dots (05)$$

tirando o valor de  $t_1$ , tem-se:

$$t_1 = \frac{\text{arc sen} (V_1/V_o \sqrt{2}) - \psi}{w} \dots \dots \dots (06)$$

fazendo  $w = 2\pi f$  e substituindo na fórmula (4), tem-se:

$$B = \frac{I_1 \cdot 2\pi f}{V_1 \left[ \left( \text{arc sen } \frac{V_1}{V_0 \sqrt{2}} \right) - \psi \right]} \dots\dots\dots (07)$$

Onde:

$B$  = índice de estabilidade do arco em C.A;  
( $\Omega^{-1} \text{ s}^{-1}$ )

$I_1$  = corrente no momento de reignição (A)

$V_1$  = tensão do arco no momento de reignição  
(V)

$t_1$  = tempo necessário para reignição (s)

$w$  = frequência angular da rede ( $2\pi f$ )

$\psi$  = ângulo de fase entre a corrente e a  
tensão em vazio da fonte ( $\psi = 0$  para  
circuito sem indutância)

$V_0$  = tensão em vazio da fonte (V)

$f$  = frequência da rede (Hz)

A equação 7 é o resultado final do desenvolvimento e pode ser mais facilmente entendida observando-se a Figura 8.



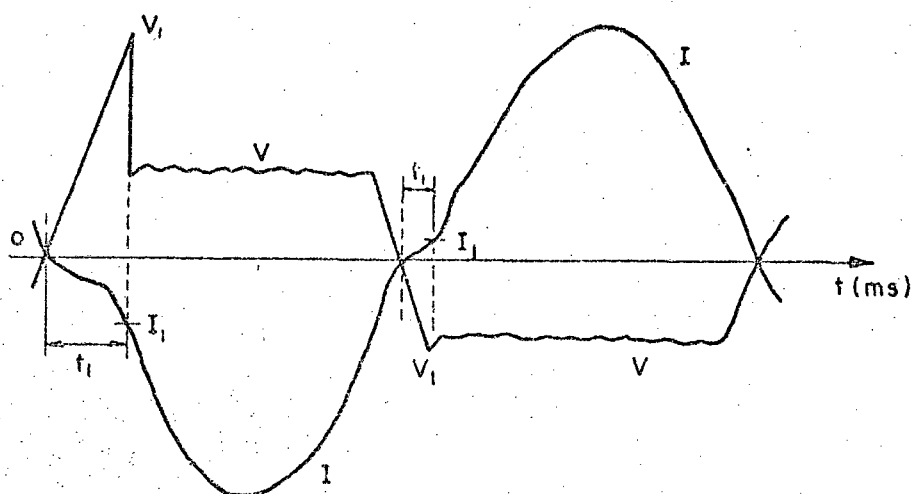


FIGURA 8 - Características dinâmicas de eletrodos mostrando os parâmetros utilizados no cálculo do valor de B.  
(sem indutância no circuito,  $\psi = 0$ ).

A tensão de reignição  $V_1$  e a intensidade de corrente  $I_1$  dependem fundamentalmente do meio ionizante. Entretanto, pode-se perceber que três fatores externos influem sobre a estabilidade do arco, ou seja, a frequência da rede, a tensão em vazio da fonte e a indutância do circuito. Estes fatores, juntamente com  $V_1$ , determinarão o tempo necessário para reignição,  $t_1$ .

Quanto maior o valor de B, maior será a estabilidade do arco e este índice cresce com a corrente, frequência, valor eficaz da tensão em vazio, e decresce com a tensão da reignição e ângulo de defasagem.

A tensão em vazio da fonte, apesar de ser fator externo, aparece como fator influente na estabilidade do arco. A Figura 9 mostra que quanto maior a tensão em vazio, menor é o tempo

para haver a reignição (para o mesmo valor de  $V_1$ ). Se o valor de  $t_1$  for menor, durante menos tempo o arco estará tendendo a se apagar, proporcionando assim maior estabilidade. O valor de  $\psi$  é função da indutância do circuito, intrínseco ao sistema fonte-eletródo.

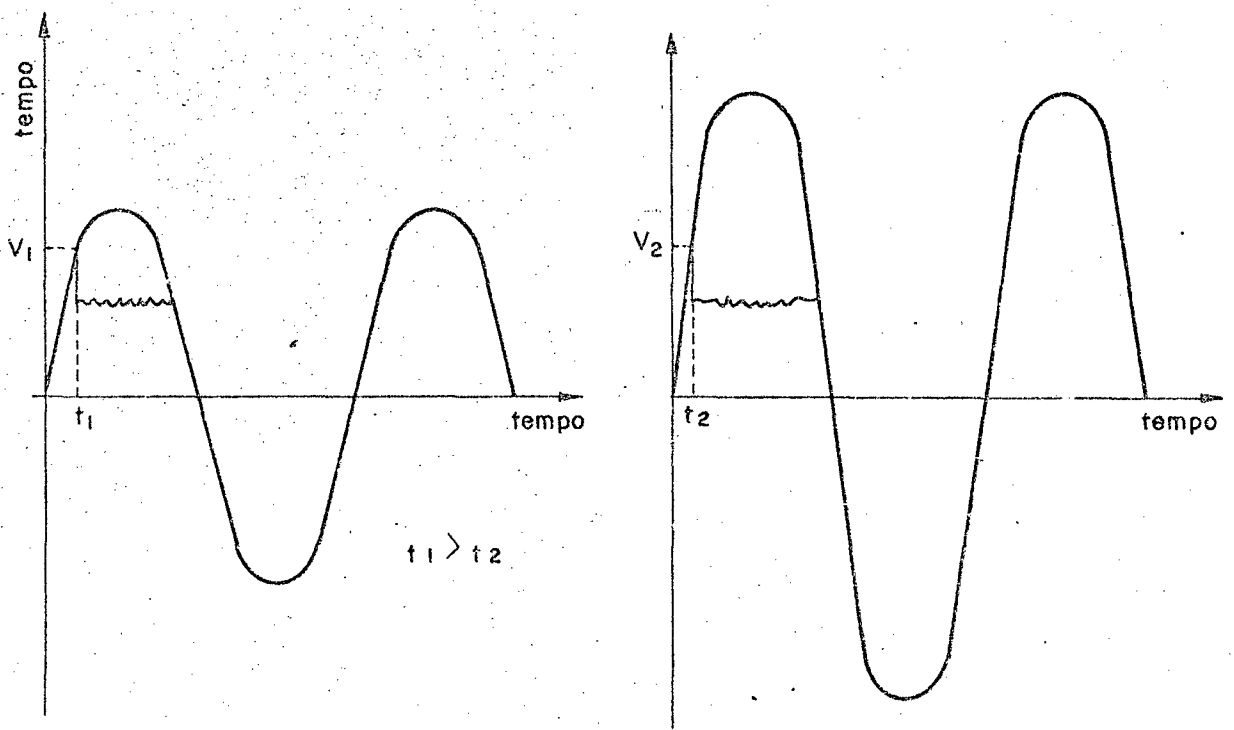


FIGURA 9 - Influência da tensão em vazio da fonte sobre o tempo de reignição.

Naturalmente, quanto menor a tensão de reignição, sendo o caso extremo a inexistência do pico, maior será a estabilidade. O crescimento da frequência faz também diminuir  $t_1$ , favorecendo assim a estabilidade. Já  $I_1$ , apesar de dependente de  $V_1$ , pode ser aumentado pelo crescimento da corrente de soldagem; quanto maior o calor gerado, mais fácil mantém-se a atmosfera ionizada.

## 2.2 - Eletrodos Revestidos

Embora o arco elétrico tenha sido descoberto em 1809 por Sir Humphry Davy<sup>(08)</sup>, ele só foi usado para soldagem em 1885 quando Nikolaus Bernardos e Olszewski inventaram o eletrodo de carvão. A solda era executada com adição de material à parte por meio de uma vareta, como se faz na soldagem a chama. Em 1892, o russo Slavianoff, usou pela primeira vez um arame de aço nu como eletrodo consumível, e deu o primeiro grande passo para o campo da soldagem a arco metálico que conhecemos hoje. No entanto, um eletrodo de aço nu (sem revestimento), após fusão ao ar, perde por oxidação grande parte do seu carbono, manganês e silício. Os óxidos e nitretos formados pelo nitrogênio do ar ficam na solda, reduzindo sua resistência e ductilidade.

Só a partir de 1900 é que se iniciou o uso dos eletrodos revestidos, caracterizados pelo núcleo metálico condutor de corrente (chamado de alma) e o revestimento. A técnica de eletrodos revestidos evita os inconvenientes da soldagem com arames de aço nus, pela criação, em torno do arco, de uma atmosfera gasosa adequada à deposição do metal de adição, bem como à estabilidade e direcionamento do arco. Esses gases produzidos pela queima do revestimento, assumem importância fundamental na soldagem, influenciando tanto sua composição química como sua espessura.

### 2.2.1 - Funções do Revestimento

Os revestimentos são constituídos de produtos complexos que exercem, durante a soldagem, inúmeras funções:

a) Isolante elétrico

O revestimento é mau condutor de eletricidade, ele isola o eletrodo evitando aberturas laterais de arco.

b) Isolante térmico

O eletrodo é percorrido por correntes altas e devido ao seu comprimento, há intensa geração de calor por efeito Joule; em parte, o revestimento abriga este calor e evita sua perda.

c) Direcionamento do arco

O revestimento, tendo baixa condutibilidade térmica, não se funde tão rapidamente como a alma. Conseqüentemente, pode-se formar na extremidade do eletrodo uma cratera que guia o metal fundido para a poça de fusão, estabilizando o arco e protegendo o metal fundido da ação do ar atmosférico. Este fenômeno é conhecido como "efeito canhão".

d) Função metalúrgica

A poça líquida resultante da operação de soldagem, pode ser comparada a uma forno em miniatura de redução de minério de ferro. Assim, no revestimento dos eletrodos são adicionados elementos desoxidantes, como o silício, devido a presença de oxigênio, oriundo da dissociação do  $\text{CO}_2$  (na queima de revestimentos com carbonatos) ou proveniente do vapor d'água (da umidade do revestimento, ou de sua própria água de constituição). Da queima do revestimento, surgem também gases redutores ( $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ ). Além de desoxidar o metal transferido, alguns revestimentos têm componentes que retiram as inclusões (óxidos de si

licio, manganês, etc) e impurezas tais como o fósforo e o enxofre. Essa ação, conhecida como ação de fluxo, depende da basicidade do revestimento. Após a solidificação da poça metálica, a escória solidificada acima do metal, trata termicamente a solda, evitando um resfriamento muito rápido das camadas superficiais. Em alguns casos, o revestimento pode conter elementos de liga que, quando fundidos, ficam adicionados no metal de solda. O caso mais comum é o pó de ferro, adicionado para obter-se um maior rendimento de deposição e um bom acabamento do cordão de solda<sup>(02)</sup>.

#### e) Proteção do metal fundido

O revestimento funde formando uma película de escória que recobre cada gota do metal em fusão e também a poça líquida, evitando o contato com o ar. A escória fundida modifica o comportamento superficial (tensão superficial) do banho de fusão, o que pode facilitar a soldagem em posições diferente da plana. Alguns revestimentos, durante a fusão, dão origem a grande quantidade de gases que, em temperatura elevada, sofrem grande expansão, como é o caso dos eletrodos celulósicos. Nesse caso, a proteção do metal fundido processa-se mais pela ação de uma cortina gasosa. Esses gases e mais os oriundos da própria alma do eletrodo, pela queima do carbono e outros constituintes, expandem-se violentamente, provocando micro-explosões na cratera do mesmo, que, se o eletrodo for dotado do efeito canhão, facilitam a transferência do metal para a peça.

#### f) Função ionizante

Os gases emanados do revestimento, quando de sua queima, são muito mais facilmente ionizáveis do que o ar e, por isso, propiciam uma abertura a manutenção do arco com maior facilidade (minimizando inclusive o efeito do sopro magnético).

#### 2.2.2 - Influência da Constituição do Revestimento

Em soldagem com eletrodos de um dado diâmetro e espessura do revestimento, o principal parâmetro é a magnitude da corrente, ao passo que a voltagem e o comprimento do arco dependem do tipo de revestimento e do soldador. Eles não são parâmetros ajustáveis como na soldagem a arco protegida por gás. Desse modo, as seguintes características e efeitos, entre outros dependem do tipo de revestimento:

- tensão do arco e intensidade de corrente;
- energia térmica;
- facilidade de soldagem em corrente contínua ou alternada e polaridade do eletrodo em CC;
- processos de emissão e ionização;
- tipo de transferência: curto-circuito, globular e spray;
- possibilidade de soldagem multiposicional;
- propriedades de penetração do arco.

Pode-se dizer que as propriedades pelas quais os eletrodos revestidos são distinguidos entre si, são controladas pe

lo revestimento, uma vez que o arame eletrodo (alma) é quase sempre o mesmo na maioria dos tipos. Desse modo, os revestimentos, quanto a sua constituição podem ser reunidos em três grandes grupos:

- a) revestimento a base mineral - possibilita a proteção do metal de solda, contra os efeitos nocivos do oxigênio e do nitrogênio do ar, fundamentalmente por meio de uma escória líquida. Os eletrodos do tipo oxidante, ácido e rutilico, constituem exemplo deste grupo de eletrodos;
- b) revestimento a base de matéria orgânica - protege principalmente por meio de uma cortina gasosa, que é produzida pela combustão do material orgânico do revestimento. Tratam-se de gases redutores ou neutros, constituído sobretudo por CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. O eletrodo celulósico pertence a este grupo;
- c) revestimento básico, a base de carbonato de cálcio - protege a solda por ambos os princípios, embora neles, a cortina de gás redutor (CO) não seja produzida pela combustão de um material orgânico, mas pela decomposição do carbonato de cálcio e sua reação com o ferro, manganês e silício, elementos presentes nestes eletrodos. Estes revestimentos geram escória de reação básica.

### 2.2.3 - Características Estáticas

As características estáticas de arco de eletrodos revestidos indicam a variação da tensão de soldagem com a inten

sidade de corrente para um mesmo comprimento de arco. A Figura 10 ilustra características estáticas para eletrodos celulósicos.

As características estáticas de arco são influenciadas pela fonte de energia. Elas dependerão da constituição do revestimento, da composição e diâmetro da alma, do tipo de corrente e comprimento do arco.

O conhecimento destas características expressa a variação da energia de soldagem, servindo como parâmetro para explicar aspectos referentes às propriedades da solda e das condições operacionais da mesma.

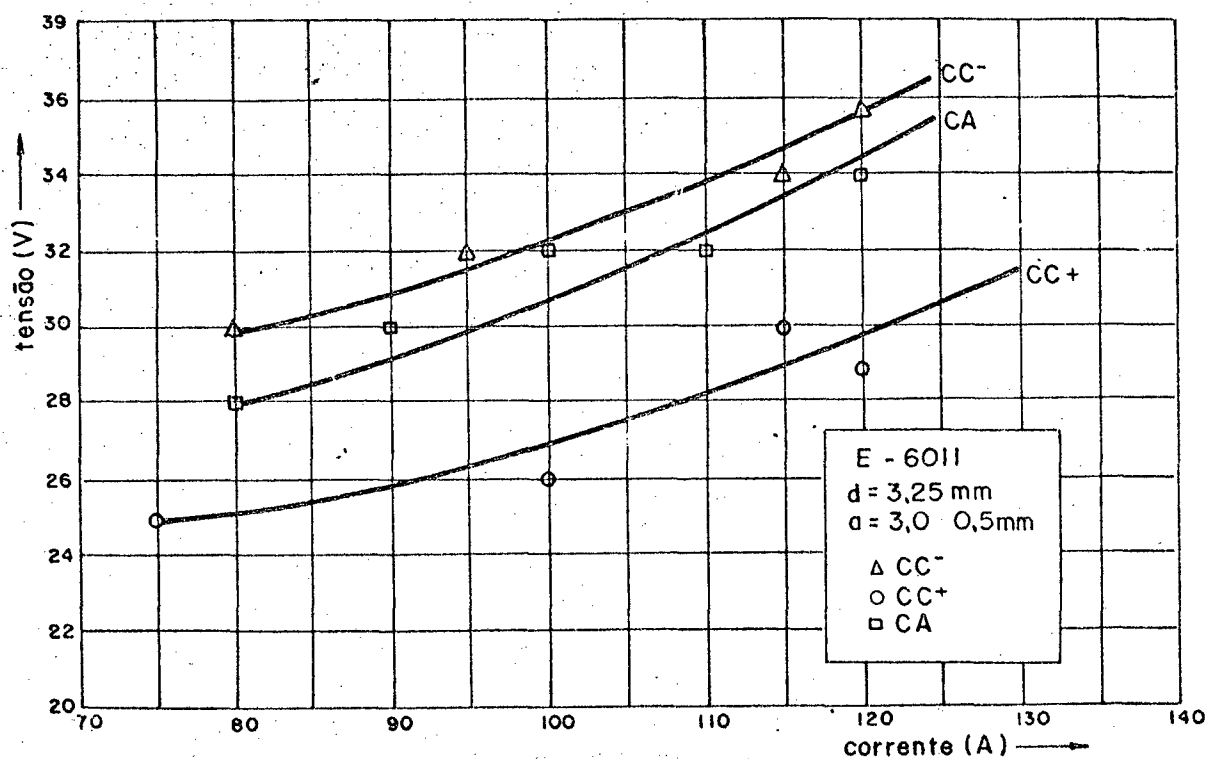


FIGURA 10 - Características Estáticas de Eletrodos Celulósicos (06)



#### 2.2.4 - Características Dinâmicas

As características estáticas de eletrodos revestidos fornecem condições de controlar a soldagem através dos parâmetros elétricos (tensão e corrente) e obter a energia de soldagem desejada para um determinado tipo de eletrodo e velocidade de soldagem.

Entretanto, quando o objetivo é controlar parâmetros elétricos de soldagem para verificar a estabilidade do arco, torna-se necessário conhecer as características dinâmicas do arco, isto é, a variação da tensão e corrente com o tempo, verificada em instrumentos de sensibilidade adequada.

Na coluna do arco, a passagem de corrente elétrica é feita por ação eletrostática causada pela diferença de potencial entre a ponta do eletrodo e o material de base, não bastando ter o meio ionizado. Entretanto, embora a intensidade do campo próximo ao cátodo ainda não tenha sido medida com precisão, acredita-se que é muito menor que a necessária para emitir elétrons. Na verdade, a emissão de elétrons é favorecida pela alta temperatura (emissão termoiônica) e pela formação de pontos catódicos, os quais podem emitir elétrons com densidade acima de  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> alcançando uma intensidade de campo de  $10^6$  V/cm<sup>(09)</sup>.

Apesar da atmosfera do arco estar ionizada, a diferença de massas entre elétrons e ions faz com que a velocidade do elétron seja muito maior e, conseqüentemente o fluxo de corrente é formado predominantemente de elétrons. Alguns pesquisadores mostram que o fluxo de corrente é influenciado pelo tipo de revestimento. Pokhodnya et al<sup>(10)</sup>, em um trabalho sobre emissão eletrônica e iônica em uma soldagem porpõem que:

- a) os metais emitem elétrons e ions positivos por efeito termo iônico. Os elétrons em maior número, formam uma camada de cargas negativas junto ao ânodo, dificultando o fluxo de elétrons vindo do cátodo;
- b) a escória, ao contrário, tem capacidade de emitir ions positivos em maior número que elétrons, podendo anular a camada de elétrons mencionada acima;
- c) mesmo na ausência de campo elétrico externo, no momento de transição de polaridade em corrente alternada existe plasma junto aos polos, devido a emissão simultânea de ions e elétrons da escória.

Jã Wegrzyn<sup>(09)</sup>, em um trabalho sobre arcos de eletrodos revestidos, amplia as hipóteses levantadas para a ação do revestimento sobre a dinâmica do arco:

- a) nem todo revestimento contribui num mesmo grau para a ionização do seu arco. O melhor é aquele que contém grande quantidade de elementos de baixo potencial de ionização (como o K e Na), pois o potencial de ionização médio de uma mistura de gases depende enormemente do potencial do elemento de maior facilidade de ionização. Quanto maior a facilidade de ionização de um arco menor é a sua temperatura;
- b) na atmosfera do arco é mais provável existir compostos de átomos ionizados do que átomos individuais, exceto alguns átomos ionizados ( $K^+$  e  $Na^+$ ) provenientes da evaporação da es

cória. Nos revestimentos que contêm ainda fluoretos (revestimentos básicos) podem ainda coexistir ânions. Os fluoretos e cloretos, devido a sua afinidade por elétrons, ao invés de perdê-los, tornam-se ions negativos ( $F^-$ ,  $Cl^-$ );

- c) durante a mudança de polaridade em corrente alternada, pode haver uma desionização, por exemplo  $K^+ + F^- = KF$ . A energia para ionizar ou desionizar um fluoreto, vai depender do composto;
- d) Em soldagem com polaridade inversa os ions  $F^-$  são atraídos e descarregados pelo ânodo. Desta forma, o efeito de neutralização dos cátions não é pronunciado. Por outro lado, em soldagem com polaridade direta, com eletrodos contendo no revestimento compostos de flúor de fácil dissociação, embora os ânions fluoretos sejam expelidos na direção do ânodo, sua concentração próximo ao cátodo não é reduzida, devido a constantes emissões. Esta região com grande quantidade de ânions dificulta a emissão de elétrons pelo cátodo.

Como se vê, a composição do revestimento torna-se fator fundamental no comportamento dinâmico do arco. E para entender melhor este fenômeno, é importante a verificação das características dinâmicas dos arcos sob ação de diferentes tipos de revestimentos, assim como dos diferentes tipos de correntes.

Vários são os trabalhos desenvolvidos no estudo do comportamento dinâmico do arco voltaico de soldagem. Morri e Gore<sup>(11)</sup>, estudaram o comportamento dinâmico para um arco de eletrodo de Tungstênio protegido por gás. Enquanto que Scheellhase e Weinschenk<sup>(12)</sup>, desenvolveram um modelo para estudar as caracte

terísticas dinâmicas, em arcos, envolvendo transferência de metal de adição no processo MIG. A utilização do comportamento dinâmico no estudo de arcos de eletrodos revestidos pode ser exemplificada pelo trabalho de Kimant<sup>(13)</sup>, que utilizou os oscilogramas de tensão e corrente para justificar os tipos de transferência observados pela projeção de filmes de alta velocidade.

#### 2.2.5 - Transferência de Metal de Adição

Independente do tipo de corrente e polaridade, a transferência de metal através da coluna se dá sempre do eletrodo ao material de base.

O material de adição pode se transferir do eletrodo à peça por curtos-circuitos ou sem curtos-circuitos:

- a) transferência por curtos-circuitos - neste tipo de transferência, as gotas de metal liquefeito na ponta do eletrodo crescem até entrar em contato com a poça de fusão, quando se processa a transferência;
- b) transferência sem curtos-circuitos - neste tipo de transferência, pode-se ter dois casos distintos. A transferência globular, onde o metal é transferido em grandes gotas que caem lentamente. E a transferência por spray, onde o metal é transferido em forma de partículas finíssimas que caem rapidamente. A transferência por spray pode ser axial, quando o jato de partículas é cônico coincidente com o eixo do eletrodo, ou rotativa, quando forma-se na extremidade do eletrodo de metal fundido, cujo centro fica deslocado do eixo do mesmo e giran

do dando um efeito rotativo ao jato de partícula.

O tipo de transferência do metal através da coluna do arco depende do comprimento, diâmetro e material do eletrodo, do revestimento, do tipo de corrente, de sua intensidade e do comprimento do arco. Muitas vezes pode ocorrer uma combinação dos vários tipos de transferência.

Observa-se que, quando a corrente do arco é baixa e o seu comprimento é grande, a transferência é globular. Quando a corrente excede a um certo nível, dito de transição, passa a ocorrer a transferência por spray. Quando o arco é curto, a transferência geralmente é por curto-circuito. Neste último caso, a gota toca a poça de fusão ainda ligada ao eletrodo e separa-se de le pela vaporização imediata do metal que forma o pescoço de ligação com o eletrodo.

Wegrzyn<sup>(09)</sup>, mostrou que o fator mais importante na determinação do tipo de transferência na soldagem com eletrodos revestidos é a condição de secagem dos mesmos. Assim, um eletrodo básico que tem sua transferência predominantemente do tipo globular, pode apresentar transferência por spray quando em seu revestimento encontram-se teores elevados de umidade.

Embora a corrente seja uma grandeza muito importante no mecanismo de transferência de metal através da coluna do arco, uma vez que esta dá origem a forças magnéticas (efeito constricção, força de Lorentz, etc), em soldagem manual com eletrodos revestidos, outros fatores, principalmente metalúrgicos, são mais importantes. Em soldagem com eletrodos revestidos, os vários tipos de transferência de metal no arco estão relacionados com o tipo de revestimento. Na maioria dos casos, gotas de vários

tamanhos são transferidas, mas, o tipo de revestimento determina o modo predominante. Para que a gota saia do eletrodo até a peça através da coluna do arco, é necessário que forças atuem favoravelmente ao destacamento da gota.

Desse modo, as seguintes forças que atuam na gota quando ela ainda está presa ao eletrodo, são responsáveis pelo mecanismo de transferência de metal através da coluna do arco:

- força gravitacional;
- tensão superficial e viscosidade;
- forças de origem eletromagnéticas;
- forças de arraste, pressão hidrostática e jato de plasma;
- efeitos metalúrgicos.

a) Força gravitacional - favorece a transferência de metal em soldagens na posição plana, mas atua com componentes em sentido contrário em soldagens fora da posição plana, principalmente em soldagens na posição sobre cabeça.

b) Tensão superficial e viscosidade - a magnitude da tensão superficial e viscosidade do metal líquido e escória na transferência de metal, tem efeito importante no tipo de transferência e movimento do metal na poça fundida. A tensão superficial prende as gotas na ponta do eletrodo e faz com que ela adote uma forma esférica. A tensão superficial é, pois, a maior força que tende a evitar a transferência de uma gota do eletrodo.

Porém, ao menor contato, a poça de fusão atrai a gota para si, porque agora a tensão superficial é mais forte no sentido o posto. Quando a corrente é baixa e não há contato entre a go ta e a peça, a força gravitacional e a tensão superficial se opõem, sendo elas as principais forças atuantes.

- c) Forças de origem eletromagnéticas - a ação de forças de Lorentz, responsável pelo efeito constricção na transferência de material através da coluna do arco, é mais significativa com aplicações de altas densidades de corrente (MIG/MAG, arco submerso, arame tubular, etc). A soldagem com eletrodos revestidos, utiliza baixas densidades de correntes e as forças resultantes da ação eletromagnética podem ser desprezadas<sup>(09)</sup>.
- d) Forças de arraste - não são muito importantes nos processos de transferência de metal em eletrodos revestidos, devido a ausência do fluxo de gás.
- e) Efeitos metalúrgicos - as forças que resultam das reações metalúrgicas e de gases na fusão dos eletrodos e seus revestimentos em particular, parecem ser predominantes na transferência de escória e metal através da coluna do arco. Os eletrodos revestidos destinados a soldagem em todas as posições, freqüentemente perdem sua habilidade para soldagem na posição sobre cabeça após secados a uma temperatura acima de 700°C. Portanto, a remoção dos gases do revestimento dos eletrodos, ou seja, a parcial eliminação das reações de gases na escória líquida e reações entre compostos gasosos do revestimento e metal líquido, tem um efeito muito mais importante do que as

outras forças. Quanto mais o metal difere do estado acalmado, maiores serão as forças que atuam na sua transferência<sup>(09)</sup>.

Na fusão de eletrodos revestidos, as reações de gases produzidas na fusão da alma dos eletrodos são influenciadas predominantemente pela penetração de hidrogênio e oxigênio nas gotas, particularmente em soldagem com eletrodos oxidantes e ácidos.

Em soldagem com eletrodos básicos uma pequena quantidade de hidrogênio penetra na ponta do eletrodo fundido. Além disso, o silício também penetra e metalurgicamente desoxida o metal. Por isso, esses eletrodos têm uma transferência do tipo globular.

É conhecida a ação do oxigênio na redução da tensão superficial do metal nos processos a eletrodo revestido. A tensão interfacial (escória-metal) que diminui linearmente com o aumento da temperatura tem seu valor aumentado em função do aumento do  $\text{CaO}$  e  $\text{CaF}_2$ . O  $\text{CaF}_2$  também reduz os níveis de viscosidade<sup>(14)</sup>.

A verificação experimental da transferência de metal através do arco é facilmente realizada em processos de soldagem com transferência controlada como MIG<sup>(15)</sup>. No estudo da transferência em eletrodos revestidos, Klimant<sup>(13)</sup> utilizou câmeras fotográficas de alta velocidade e oscilogramas de tensão e corrente. Já Lancaster<sup>(16)</sup> analisou a transferência de metal em eletrodo revestido através de filmes de raio X de alta velocidade, com relação a influência do fluoreto de cálcio. Outros trabalhos<sup>(17, 18)</sup> determinaram a importância do estudo da transferência de metal por métodos empíricos.



### 2.3 - Eletrodos Revestidos Básicos

A soldagem com eletrodos revestidos constitui-se atualmente como um dos processos de maior versatilidade. Quando se deseja uma solda com boas propriedades mecânicas, e menor risco de fissuração a frio e a quente, deve-se soldar com eletrodos básicos. Esses eletrodos, a base de carbonato de cálcio e fluorita, caracterizam-se por seu baixo teor de hidrogênio.

Embora o eletrodo básico, seja reconhecido como a melhor solução para soldagem de grande responsabilidade, muitos são os trabalhos desenvolvidos com o objetivo de melhorar suas características tecnológicas, econômicas e operacionais. Evans, tem mostrado a influência do manganês, do diâmetro do eletrodo, do teor de carbono, e da posição de soldagem, sobre a microestrutura e propriedades mecânicas dos eletrodos revestidos básicos. Boniszewski<sup>(19)</sup> mostrou a influência do pó de ferro dos eletrodos básicos para soldagem em todas posições. Shafransky e Abrashin<sup>(2)</sup> comprovaram o efeito da desionização da fluorita no momento da mudança de polaridade em corrente alternada na soldagem com eletrodos básicos. Outros trabalhos mostram a dificuldade de soldagem com esses eletrodos em CC<sup>-</sup>, e os picos intensos de reignição do arco em CA<sup>(05,07,10)</sup>.

Como se vê, é difícil analisar o comportamento desses eletrodos a partir dos conhecimentos genéricos, uma vez que o arco dos eletrodos básicos, representa um tipo diferente de funcionamento. Por isso, esse Capítulo visa definir bem esse comportamento específico, baseando-se em trabalhos recentes, buscando fundamentos e métodos para o desenvolvimento do procedimento experimental.

### 2.3.1 - Composição Química dos Revestimentos Básicos

Os eletrodos básicos comerciais são constituídos de 20 - 35% da  $\text{CaCO}_3$ , 20 - 30% da  $\text{CaF}_2$ , rutilo, silicatos, pó de ferro e outros elementos estabilizadores de arco, desoxidantes, etc (08).

Cada constituinte do revestimento tem suas funções bem definidas. A Tabela 2 mostra os constituintes do revestimento básico, e suas funções no arco de soldagem e na fabricação do revestimento.

A decomposição dos constituintes do revestimento como resultado das elevadas temperaturas presentes na atmosfera do arco, proporcionando todas as funções indicadas abaixo, é muito complexa, exigindo procedimentos experimentais rigorosos que possam determinar com segurança a influência de cada constituinte nas reações ocorridas, durante a operação de um arco.

### 2.3.2 - O Arco do Eletrodo Revestido Básico

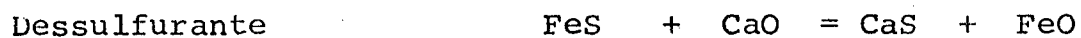
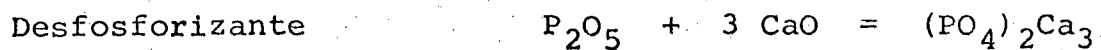
O estudo do comportamento do arco elétrico de soldagem com eletrodos básicos pode ser visto sob vários aspectos, mas uma análise de cada aspecto separadamente não caracteriza bem o seu comportamento.

Para efeito de melhor compreensão da dinâmica do arco, pode-se abordar os seguintes aspectos: principais reações metalúrgicas e física do arco.

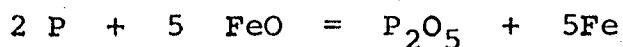
Constituintes do Revestimento	Proteção Gasosa	Desoxidante e Fluxos	Formadores de Escória	Controle de Viscosidade	Estabilizadores do arco	Aglomerantes	Agentes lubrificantes	Agentes Ligantes	Coloração do Revestimento	Desulfuração
CaCO <sub>3</sub>	X	X	X	X	X		X			
CaF <sub>2</sub>	X	X		X						
Pó de ferro					X			X		X
TiO <sub>2</sub>		X	X	X	X				X	
Fe - Mn		X	X					X		
Fe - Si		X	X					X		
Silicato de Na			X	X	X	X				
Asbesto			X	X	X	X				
Talco		X	X	X	X		X			
Silicato de K			X		X	X				
Argila			X	X	X	X	X			
Feldspato			X	X	X					
Quartzo		X	X	X	X					
Celulose	X	X					X			
Mn Metálico								X		X

TABELA 2 - Funções dos constituintes dos revestimentos básicos (08).

a) Principais reações metalúrgicas - este aspecto está relacionado com as funções metalúrgicas que o revestimento deve apresentar. Num eletrodo de revestimento básico, quando se estabelece o arco, o revestimento gera gases e escórias que protegerão o metal transferido, evitando a introdução de oxigênio e nitrogênio do ar, assim como de inclusões no metal de solda. A proteção por meio de gás se dá, principalmente pela decomposição do  $\text{CaCO}_3$  em  $\text{CO}_2$  e  $\text{CaO}$ . O  $\text{CO}_2$  resultante desta decomposição, atua como gás de proteção, e devido a sua alta condutibilidade térmica, resulta em um arco de pequeno diâmetro e alta queda de tensão, além de exercer grande influência na transferência do metal de adição. O  $\text{CaO}$ , atua como desfosforizante e dessulfurante, evitando a inclusão de óxidos não metálicos no cordão de solda. Esta ação pode ser melhor entendida pelas reações abaixo:



Os produtos das reações acima são estáveis, e permanecem na escória. O óxido de ferro também atua como desfosforizante de acordo com a reação abaixo:



A proteção por escória é feita pelo revestimento fundido que encobre completamente cada gotinha que é transferida do eletrodo à poça de fusão, evitando a inclusão de  $\text{O}_2$

e  $N_2$  que formariam óxidos e nitretos, os quais comprometeriam a tenacidade do metal de solda. A eficiência da ação metalúrgica e da proteção por escória, dependem da composição química do revestimento.

Outras funções metalúrgicas dos revestimentos básicos são a desoxidação, obtida pela introdução no revestimento de Ti, Al, Si, Zr, etc., que combinarão com todo oxigênio presente, formando óxidos que ficarão na escória e adição de elementos de liga, principalmente o Fe e Mn que além de se transferirem para o metal de solda, têm funções de estabilizadores do arco. Finalmente, os revestimentos básicos não podem ter na sua composição compostos que, ao se decompor, originem alto teor de hidrogênio, uma vez que esses eletrodos são caracterizados pelo baixo teor de hidrogênio introduzido no metal de solda.

Todas essas funções complexas que dependerão da composição do revestimento, atuarão de uma maneira ou de outra, no comportamento dinâmico do arco, facilitando ou dificultando a soldagem em um determinado tipo de corrente, e proporcionando desse modo, características diferentes do metal depositado.

b) Física do arco - o comportamento do arco dos eletrodos básicos é muito diferente dos demais com outros revestimentos. No mínimo três fatores devem ser associados a esse comportamento, diferente:

- a transferência de metal através da coluna do arco é predominantemente do tipo globular, podendo ser em alguns casos, gotas bem grandes.

- a soldagem em corrente contínua, apresenta grandes diferenças de acordo com o tipo de polaridade.
- a soldagem em corrente alternada é muito difícil, e muitas vezes não é recomendada.

Os eletrodos básicos, produzem metal bem desoxidado, acalmado e com baixo teor de hidrogênio.

Devido ao seu baixo teor de gases, as forças de tensão superficial, na ponta do eletrodo fundido não são destruídas pela efervescência do metal.

No entanto, a transferência do tipo globular não é uma propriedade específica da composição do revestimento, pois verificou-se que a transferência de metal com eletrodos básicos que não tenham sido secados durante a fabricação, apenas ao ar após a extrusão, e com grande quantidade de hidrogênio potencial, é essencialmente do tipo spray. Neste caso, o hidrogênio causa efervescência na ponta do eletrodo fundido, destruindo a ação da força de tensão superficial<sup>(09)</sup>.

Ao contrário de outros tipos de eletrodos revestidos, os de revestimento básico contêm compostos de flúor, dos quais, a maior proporção é fluorita ( $\text{CaF}_2$ ). Esse mineral é introduzido para diminuir o ponto de fusão e viscosidade da escória. Eletrodos com fluoretos em seus revestimentos exibem transferência estável quando são usados em  $\text{CC}^+$ . Na polaridade positiva, os ânions de flúor que são formados perto do eletrodo, são atraídos por ele e descarregados. Sendo o número de cátions na área do ânodo pequeno, os ânions de flúor não têm ação pronunciada na neutralização dos cátions, não reduzindo, desse modo, o grau de ionização do arco. A emissão do cátodo (poça de fusão) é realizada com relativa facilidade. A queda da poten

cial do cátodo é relativamente pequena, assim como a tensão total de soldagem.

Um efeito totalmente diferente ocorre quando o eletrodo está no polo negativo. Com o aumento do teor de fluoreto no revestimento, que formam íons negativos facilmente, a tensão do arco é aumentada, a corrente é reduzida, aumenta a salpicagem, e a transferência de metal tende mais ao tipo spray (Figura 11). Tem sido encontrado<sup>(09)</sup>, que num revestimento com grande quantidade de fluoretos facilmente ionizáveis, no polo negativo, a tensão do arco pode aumentar até 50%, e a queda de corrente de aproximadamente 30%, quando comparado com valores obtidos usando o mesmo eletrodo no polo positivo para uma mesma característica estática da fonte.

Essas mudanças ocorrem devido a formação de ânions  $F^-$  por reações do tipo  $CaF_2 = Ca^{++} + 2F^-$ . Embora os íons de flúor movam-se em direção ao ânodo, sua concentração na região do cátodo não é reduzida porque a queima do revestimento é uma fonte de íons  $F^-$ . A emissão de elétrons do cátodo na região que contém uma pequena quantidade de cátions é então inibida, e requer uma intensidade de campo relativamente alta e uma alta voltagem. Resultando numa transferência do tipo spray. A salpicagem resulta da transferência simultânea no arco de elétrons e matéria carregada negativamente contendo íons de flúor, que produzem forças de repulsão<sup>(09,21)</sup>.

Shevchenko et al<sup>(22)</sup> mostraram que a temperatura do arco aumenta com o teor de  $CaF_2$  dos revestimentos básicos. Enquanto que Lapin et al<sup>(23)</sup> estudaram o efeito do fluoreto na distribuição radial da temperatura e condutibilidade elétrica do arco, concluindo que há um aumento da taxa de redução de temperatu

ra e condutividade elétrica do plasma, na direção do eixo da coluna do arco para sua periferia, com o aumento do teor de fluorita no revestimento.

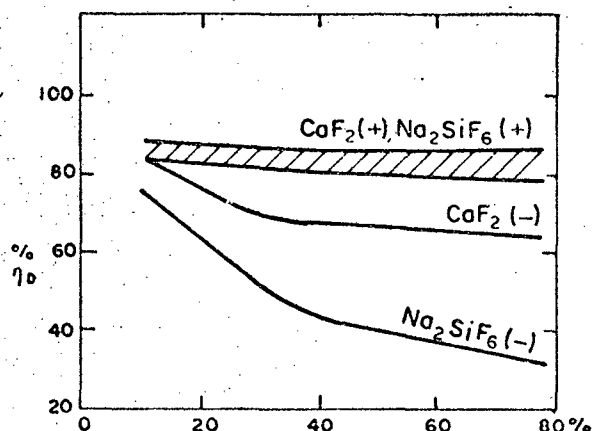


FIGURA 11 - Efeito do fluoreto do revestimento no rendimento de deposição. Eletrodo com 4,0 mm de diâmetro  $I = 160A^{(09)}$ .

Ao lado da desionização da coluna do arco quando a direção da corrente e do fluxo do íons muda, tem-se observado na soldagem em corrente alternada com eletrodos básicos, que a reignição do arco torna-se mais difícil quando o material de base é o cátodo. A ignição do arco ocorre com um pequeno atraso e com uma maior tensão de reignição do que quando o eletrodo é o cátodo. Quanto menor a tensão em vazio da fonte, maior é este efeito.

A baixa estabilidade do arco na soldagem com eletrodos básicos em CA é causada, primeiro de tudo, pela presença de  $CaF_2$



no revestimento. A ação desestabilizadora do fluoreto é usualmente associada com a alta eletronegatividade de seus átomos. Neste caso o espaço intereletrodo, sendo resfriado rapidamente, torna-se reduzido de elétrons, e conseqüentemente reduzido do principal portador de corrente durante o período de transição<sup>(20)</sup>. Os compostos de potássio são formadores de plasma possuidores de baixo potencial de ionização. Com a presença de potássio na coluna do arco, o plasma residual é retido por mais tempo facilitando a reignição do mesmo<sup>(07)</sup>. Recentemente foi provado o papel positivo dos ions de potássio em compensar os espaços volumétricos de elétrons acima dos eletrodos, isso também favorece o restabelecimento do arco sobre as condições de pré-ionização<sup>(10)</sup>.

A Figura 12 ilustra um oscilograma de soldagem com eletrodo básico da classe E-7018.

A assimetria em relação ao eixo zero da curva de tensão confirma que a formação do cátodo na poça de fusão é mais difícil do que no eletrodo, por necessitar de maior energia. Isso pode ser confirmado pela menor temperatura média da poça de fusão verificada (independente se o metal base é o cátodo ou o ânodo), e pela maior taxa de resfriamento das regiões ativas, devido a dissipação de calor para a peça<sup>(07)</sup>. Isto faz com que a temperatura junto ao eletrodo seja sempre maior que junto ao metal de base e sempre que este último passa a ser o cátodo, a dificuldade para emitir os elétrons é aumentada, necessitando pois maior energia.

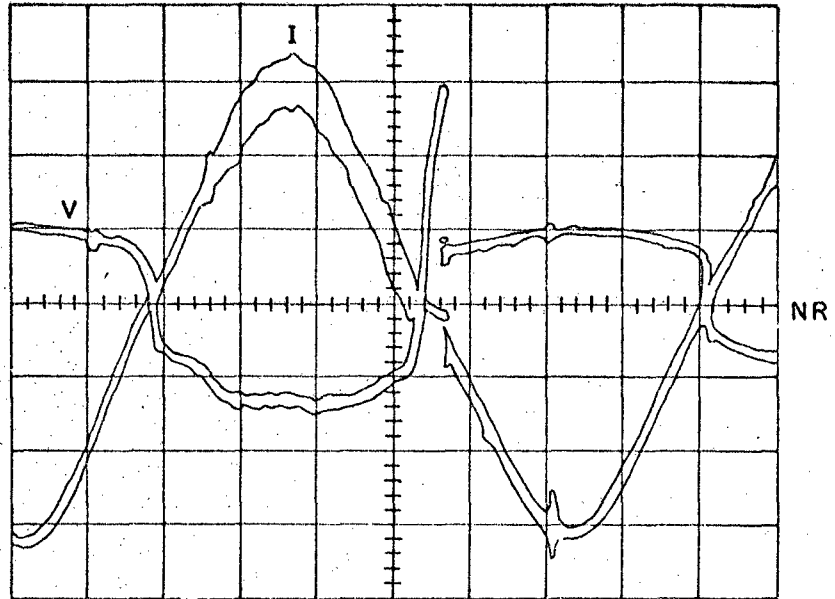


FIGURA 12 - Característica dinâmica típica do eletrodo E-7018 em CA<sup>(05)</sup>.

Diâmetro = 3,25 mm

I = 50A/div.

V = 20V/div

f = 60 Hz.

### C A P Í T U L O III

#### MÉTODOS E INSUMOS

O objetivo deste trabalho é estudar e tentar explicar como variações na composição química de um revestimento básico pode influir na estabilidade do arco e no modo de transferência de material de adição.

Utilizou-se para isto eletrodos experimentais com variação do teor de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaF}_2$ , teor e tipo de pó de ferro e fator de revestimento. Nestes eletrodos procurou-se não usar muitos outros elementos normalmente presentes, principalmente os estabilizadores de arco, exceto o ligante, para não mascarar a influência dos compostos citados.

Para avaliar a estabilidade, procurou-se realizar os seguintes ensaios:

- Análise da característica dinâmica do arco em CC. e C.A., através da filmagem e projeção da imagem osciloscópica.
- Análise do comportamento estático através de medição e cálculos da tensão e corrente eficazes e médias por meio de um microcomputador.
- Análise do ruído, através da medição e comparação de som emitido pelos arcos.

- Análise da forma geométrica do arco, através de sua projeção em uma tela.

O modo de transferência foi estudado utilizando-se:

- Contagem de gotas transferidas por unidade de tempo, com uso de raio laser.
- Contagem de curtos-circuitos, com uso das imagens osciloscópicas.

Os equipamentos, insumos e procedimento experimental são descritos a seguir.

### 3.1 - Equipamentos Para Análise Experimental

#### 3.1.1 - Fonte de Soldagem

Para a realização da soldagem foi utilizada uma fonte do tipo corrente constante e um simulador de soldagem manual, onde automaticamente o eletrodo é alimentado na direção da solda, sem a interferência do homem, garantindo-se a repetibilidade dos ensaios. A velocidade de soldagem é mantida pelo controle da velocidade de uma tartaruga, sobre a qual vai a peça. O comprimento do arco é mantido constante por um dispositivo eletrônico<sup>(25)</sup> denominado controlador externo, que a partir de uma tensão de referência pré ajustada, varia a velocidade de avanço do eletrodo na direção da peça, sempre que a tensão de soldagem difere da tensão de referência. Como a tensão de referência equivale a

um determinado comprimento de arco, o aumento ou redução temporária da velocidade de avanço consegue corrigir o comprimento desejado sempre que o valor deste for alterado. As Figuras 13, 14 e 15 ilustram os equipamentos usados para realização das soldagens.

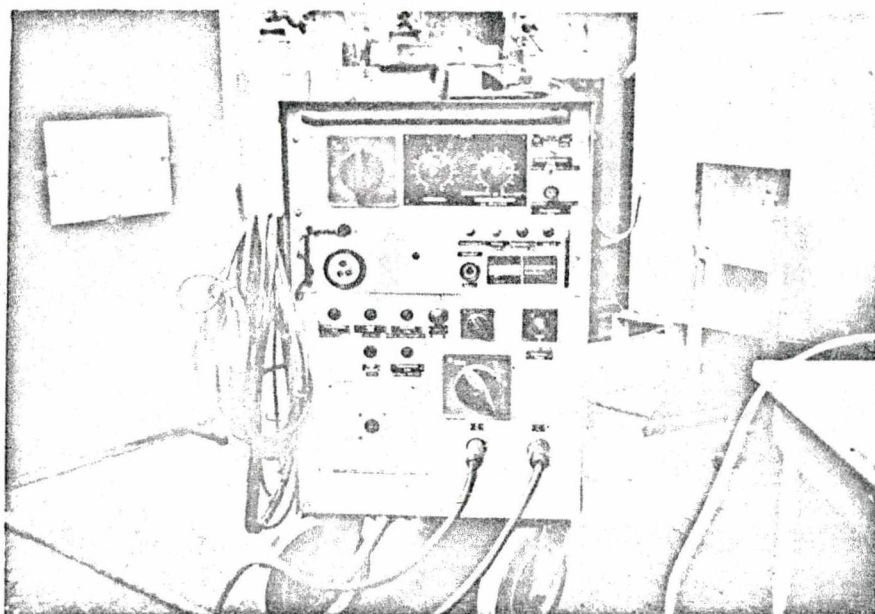


FIGURA 13 - Fonte de Soldagem.

Fabricante: Oerlinkon  $I_n = 280 \text{ A}$

Modelo: AD 360 WR  $\text{Cos } \psi = 0,72$

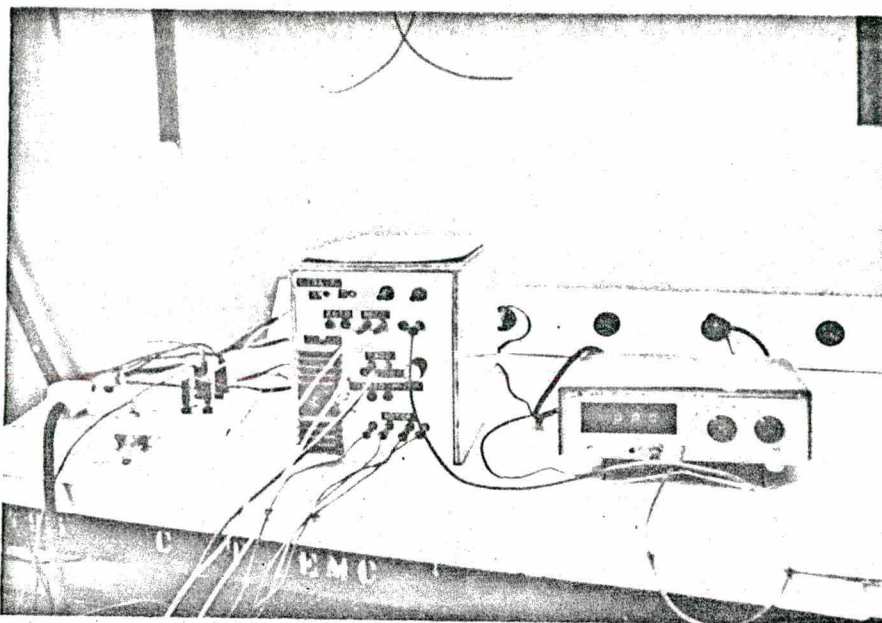


FIGURA 14 - Controlador externo do Simulador de Soldagem com multímetro digital.

Tartaruga:

Faixas de velocidade: 80-1300mm/min

Tipo: de corte portátil

Modelo: MR - 510

### 3.1.2 - Equipamento Para Medição do Comprimento do Arco

Para avaliar o comprimento do arco foi utilizado uma lente à frente do sistema mecânico de acionamento do eletrodo, conforme Figura 15, e a leitura do comprimento era feita numa tela graduada onde se tinha a projeção do arco, como mostra a Figura 16.

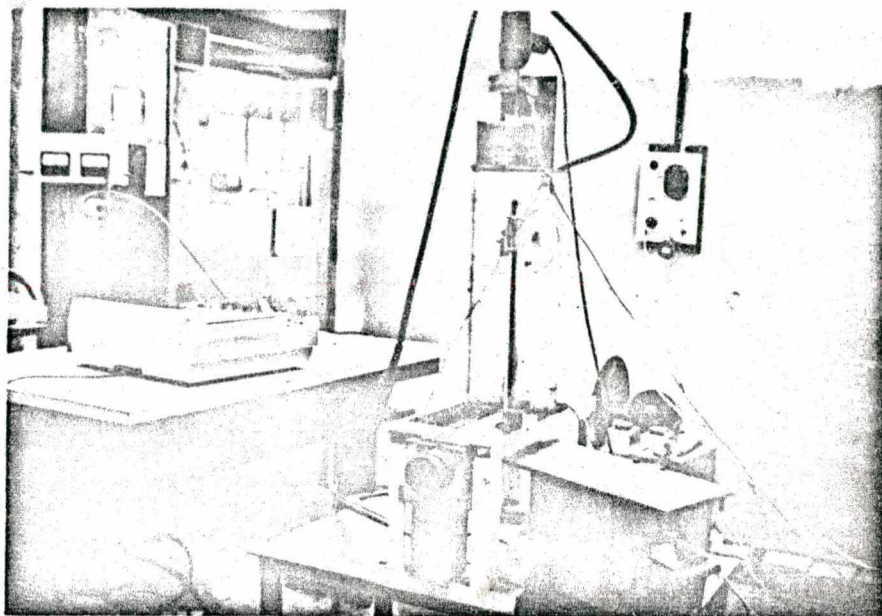


FIGURA 15 - Dispositivo de acionamento do eletrodo e tartaruga.

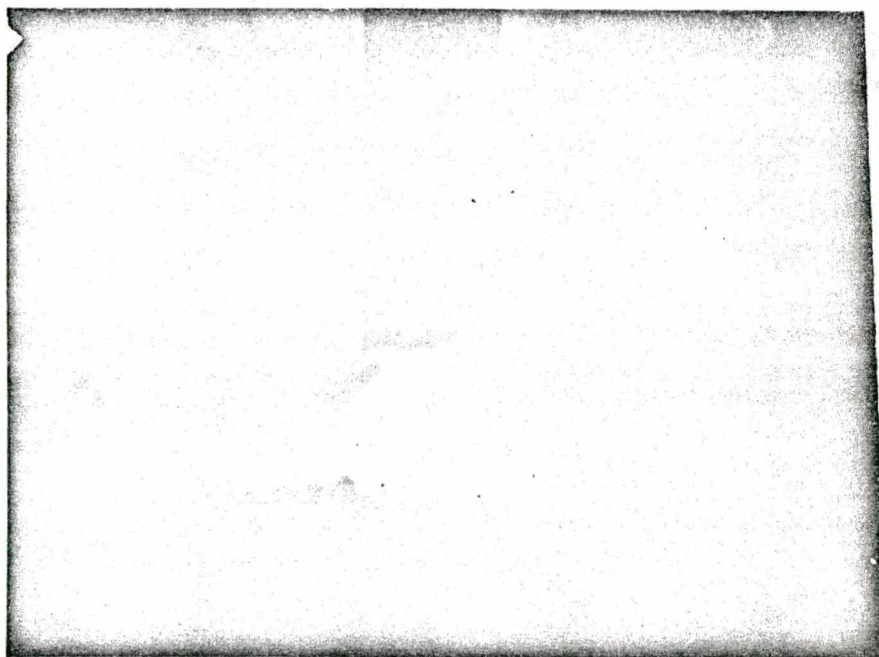


FIGURA 16 - Detalhe do arco fotografado da tela de projeção.

### 3.1.3 - Equipamento Para Medição de Tensão e Corrente de Soldagem

A tensão e corrente de soldagem foram medidas com um sistema de aquisição de dados interfaciado com um micro-computador HP-85. Em corrente alternada, foi utilizado um voltímetro rápido interfaciado ao micro-computador para medição de tensão, enquanto que a corrente foi medida com um amperímetro analógico diretamente. A Figura 17 mostra a montagem experimental destacando o sistema de aquisição de dados em corrente alternada.

### 3.1.4 - Equipamento Para Medição de Corrente e Tensão Dinâmicas

Foi utilizado um osciloscópio de memória (Figura 17) ligado em série com os demais sistemas de medição de tensão e corrente de soldagem. Uma câmera de video-cassete à frente da tela do osciloscópio registrava as imagens. Foi ainda usada uma máquina fotográfica para retratar imagens gravadas na memória do osciloscópio.

Osciloscópio de memória:

Marca: Tektronix 434

### 3.1.5 - Equipamento para Verificação da Transferência de Metal de Adição

Foi montado um procedimento experimental constante dos seguintes equipamentos (Figura 17):



Fonte de laser Aerotech, Inc. PS 5/220V

Tubo de laser Aerotech, Inc. LSR 5P

Espelho Refletor

Fotodetector

Registrador X - Y HP 7045 A

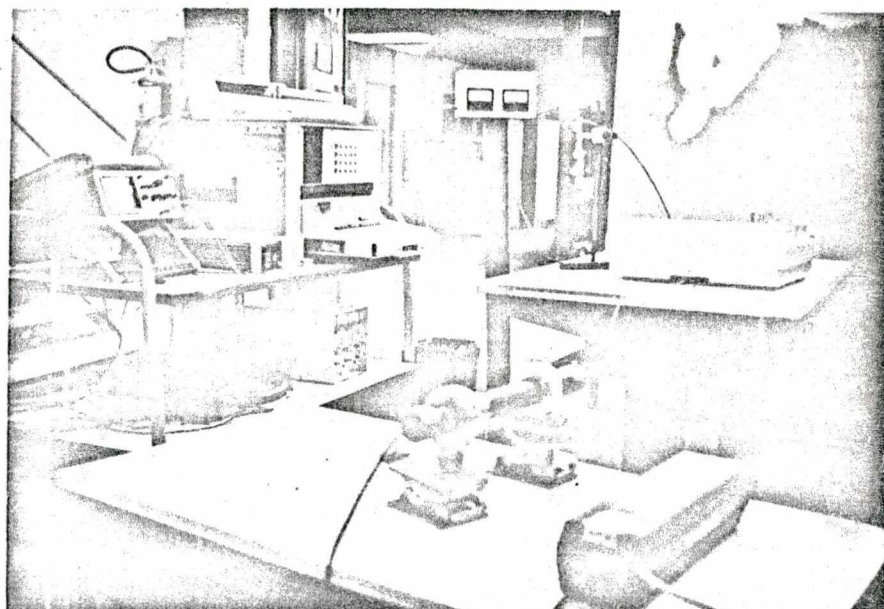


FIGURA 17 - Detalhe de montagem experimental em CA.

Microcomputador HP-85 3054 DL

Voltímetro digital HP 3437 A (CA)

Amperímetro analógico tipo bobina móvel (CA)

Shunt tipo: 300A - 60mV (CA, CC)

Data acquisition/Control unit 3497 A (CC)

### 3.1.6 - Equipamento Para Medição do Nível de Ruído e Verificação de Geometria do Arco

O nível de ruído foi medido diretamente na indicação do medidor do nível sonoro em Db(A). A geometria do arco foi acompanhada pela sua projeção na tela graduada.

Medidor de Nível Sonoro:

Fabricante: Brüel Kjaer

Tipo: 2219

### 3.1.7 - Equipamentos para Documentação e Processamentos dos Resultados

Os resultados de tensão e corrente de soldagem foram armazenados em fita. Para execução da documentação e processamento dos resultados foram utilizados os seguintes equipamentos:

Microcomputador HP-85 3054 DL

Impressora HP 9871

Plotter HP 7225

As curvas dinâmicas de tensão e corrente foram armazenadas numa fita de video-cassete. Para documentação e processamento dos resultados utilizou-se:

Sistema de video-cassete VHS para projeção

Televisor

### 3.2 - SOFTWARE

a) Medição de Tensão e Corrente em CC.

Os programas empregados para medição de tensão e corrente de soldagem estão listados no anexo 1.

b) Medição de Tensão em Corrente Alternada.

O programa utilizado para aquisição de dados em CA encontra-se no anexo 2.

c) Registro e Processamento em CC.

Os programas para a listagem dos valores de tensão e corrente de soldagem, assim como os seus valores médios e desvios padrões encontram-se no anexo 3.

d) Registros e Processamento em CA.

Para a confecção dos gráficos de tensão de soldagem em corrente alternada, assim como para o cálculo dos valores eficazes, recorreu-se aos programas listados no anexo 4.

### 3.3 - Insumos

Foram utilizados nove tipos de eletrodos experimentais, especialmente fabricados para este trabalho. Os eletro

dos, com diâmetro de 4.00mm e 450mm de comprimento, foram divi  
didos em quatro grupos com variações sistemáticas na caracte  
rização do revestimento conforme a Tabela 3.

GRUPO	I	-	variação do teor de $\text{CaCO}_3$ e $\text{CaF}_2$
GRUPO	II	-	variação do teor de $\text{CaCO}_3$ e pó de ferro
GRUPO	III	-	variação do fator de revestimen- to
GRUPO	IV	-	variação de densidade aparente do pó de ferro.

A quantidade de silicatos introduzidos no reves  
timento durante a fabricação foi de 170ml/Kg de revestimento, com  
uma relação de potássio para sódio de 3 : 1.

Como material de base usou-se chapa de aço ABNT  
1020 (250 x 50 x 6.4mm). Nas mesmas condições foi utilizado, pa  
ra comparação, um eletrodo básico comercial da classe AWS E-7018.

### 3.4 - Procedimento Experimental

#### 3.4.1 - Características Dinâmicas do Arco

Para garantir a repetibilidade, os ensaios foram  
realizados em um equipamento simulador de soldagem manual do  
LABSOLDA<sup>(25)</sup> que possibilita fixar um comprimento do arco e man  
tê-lo constante durante a soldagem, através de um sistema ele  
trônico. O comprimento do arco foi medido pela sua projeção em

TABELA 3 - Constituição e Característica dos Eletrodos Experimentais (%)

COMPOSIÇÃO ELETRODO	CaCO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	Pó de Ferro	Feldspato	Quartzo	Celulose	Mn Metálico	Fe-Si
VR 046	20	30	32	2	5	2	5	4
VR 018	25	25	32	2	5	2	5	4
VR 019	30	20	32	2	5	2	5	4
VR 047 ***	20	30	32	2	5	2	5	4
VR 058 ***	30	30	22	2	5	2	5	4
VR 059 ***	40	30	12	2	5	2	5	4
VR 020 *	20	30	32	2	5	2	5	4
VR 020 **	20	30	32	2	5	2	5	4
VR 048 ****	20	30	32	2	5	2	5	4

\* fator de revestimento (D/d) = 1.5

\*\* fator de revestimento (D/d) = 2.1

\*\*\* densidade aparente do pó de ferro = 2.6g/cm<sup>3</sup> e granulometria 325 #

\*\*\*\* densidade aparente do pó de ferro = 2.45g/cm<sup>3</sup> e granulometria 150 #

Os demais eletrodos têm fator de revestimento = 1.7,

densidade aparente do pó de ferro = 3.45g/cm<sup>3</sup> e granulometria 325 #

uma tela graduada. A Figura 18 mostra o esquema da montagem do experimento,

Os ensaios foram realizados fixando-se os seguintes parâmetros:

- diâmetro dos eletrodos ..... 4.00 (mm)
- comprimento dos eletrodos ..... 450 (mm)
- comprimento do arco .....  $4.00 \pm 0.5$  (mm)
- velocidade de soldagem ..... 12 (cm/min)
- corrente de soldagem .....  $160 \pm 5$  (A)
- tensão em vazio da fonte ..... 70 (V)
- corpo de prova de aço ABNT 1020 250x50x6.4 (mm)

Os eletrodos foram secados conforme instruções do fabricante,  $250^{\circ}\text{C}$  por uma hora. As soldagens foram realizadas por simples deposição, na posição plana. Para cada tipo de eletrodo e cada tipo de corrente (CA,  $\text{CC}^+$  e  $\text{CC}^-$ ) utilizou-se três amostras.

A tensão e corrente de soldagem foram medidas por um sistema de aquisição de dados interfaceado a um computador HP-85 (Figura 17).

Em corrente alternada, apenas a tensão de soldagem foi medida com a ajuda do computador, pois desejava-se obter a frequência máxima de leitura (1800/s) e com isto uma curva de tensão em função do tempo mais representativa. A Figura 19 mostra, como exemplo, um gráfico obtido para a tensão de soldagem de um eletrodo VR/046. Para garantir o controle imediato da corrente, e acompanhar os valores de tensão eficaz de soldagem, foram

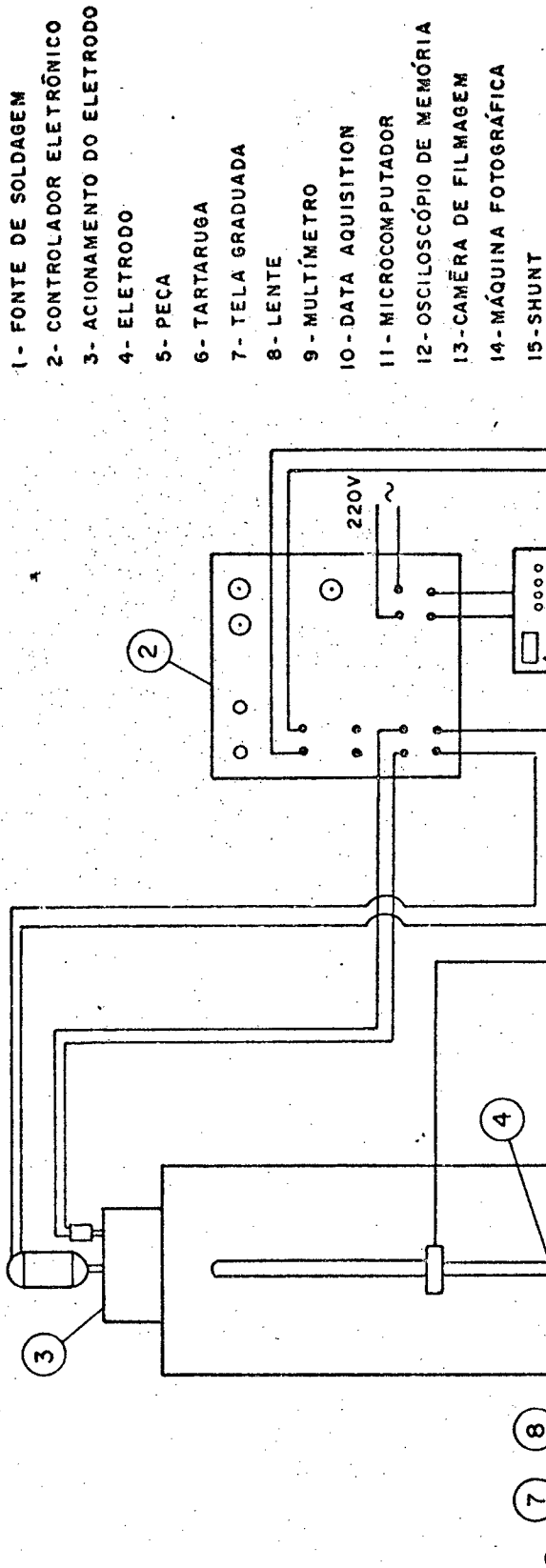
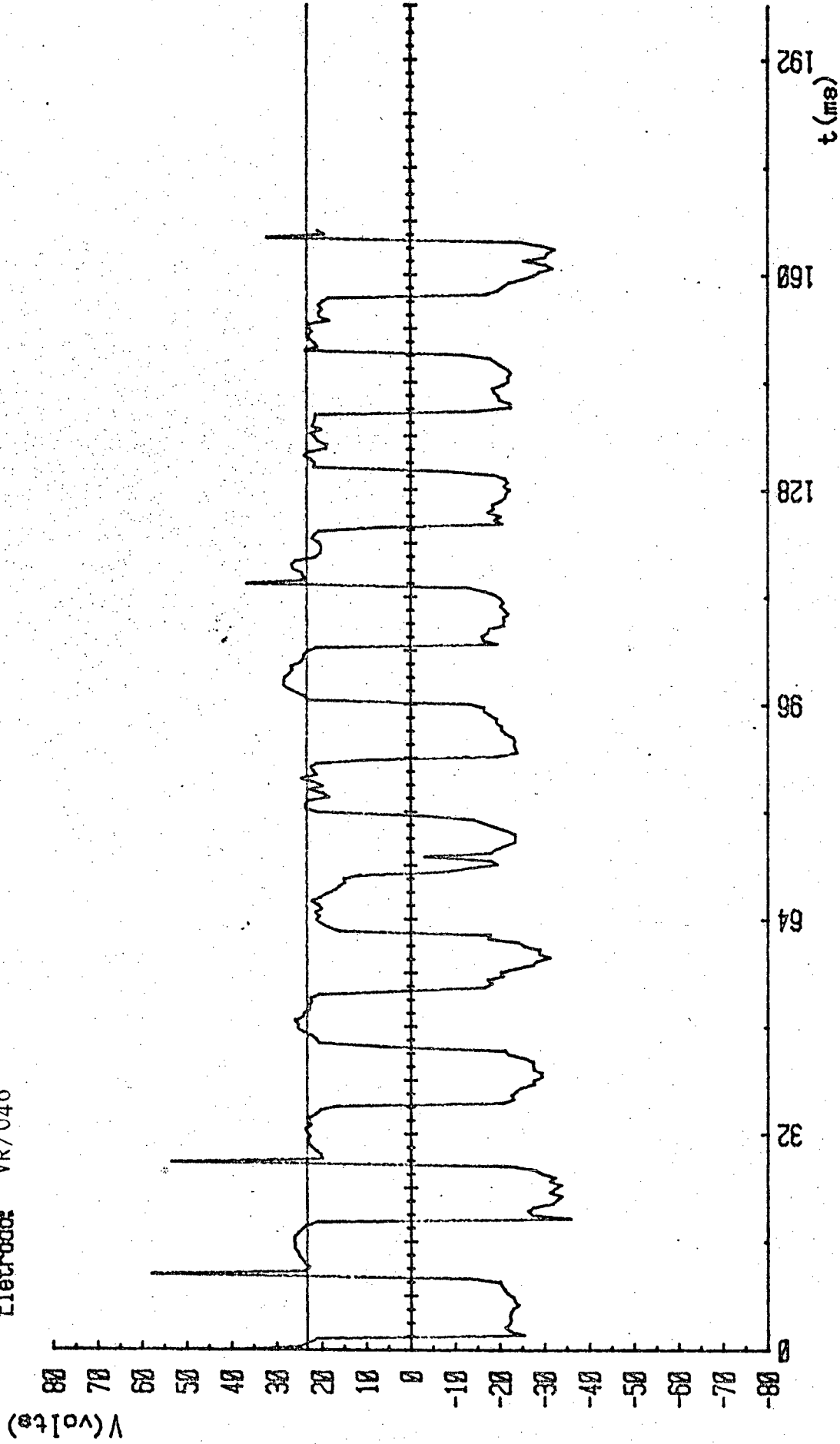


FIGURA 18 - Esquema da montagem do experimento para as características dinâmicas.

Exp4

Eletrodos: VR/046



Vefc. (total)=23.34volts

Vefc. (posit)=23.80volts

Vefc. (negat)=23.41volts

FIGURA 19 - Tensão de soldagem em função do tempo obtida pelo sistema de aquisição de dados.



utilizados voltímetros e amperímetros analógicos, do tipo bobina móvel. Os valores de tensão medidos encontram-se listados na Tabela 4.

As características dinâmicas do arco foram registradas por um osciloscópio de memória, e durante um tempo de vinte segundos, para cada eletrodo, a imagem foi filmada por um sistema de vídeo-cassete para ser posteriormente projetada por quadrados. Em seguida fotografou-se vários instantes dos oscilogramas. Todos os oscilogramas, durante a soldagem, foram acompanhados por um exame visual rigoroso, e, todas as observações, registradas nas planilhas de ensaio. As Figuras 20 a 28 mostram oscilogramas típicos para soldagem dos eletrodos em CA, enquanto as Figuras (29 a 48) referem-se a soldagem em corrente contínua.

Em corrente alternada, além da aplicação do modelo proposto, para análise do comportamento dinâmico do arco, a estabilidade foi facilmente avaliada através da aplicação da equação 4, item 2.1. As Figuras 49 a 52 apresentam a variação do índice B com a caracterização do revestimento, calculado a partir dos valores médios (Tabela 5) encontrados pela leitura de aproximadamente 200 quadros projetados dos oscilogramas gravados em vídeo-cassete.

Já em corrente contínua, verificou-se a necessidade de estudar, além das características dinâmicas dos arcos, as de abertura e extinção do mesmo.

Pavlyuk <sup>(26)</sup> utilizando um modelo matemático, de desenvolveu uma fórmula para estudar os processos de ignição do arco, com soldagem MAG. A fórmula inclui todos os fatores que afetam os processos de abertura do arco: as características da fonte de soldagem, as propriedades do metal soldado e da atmosfera de

ELETRODO	CC+		CC-		C.A.		
	V	S	V	S	Vef	Vef+	Vef-
E-7018	23	4,5	21	5,5	20	22	20
VR/046	24	5,1	27	6,7	22	23	22
VR/018	26	5,9	29	5,3	26	27	25
VR/019	27	5,6	30	4,5	23	23	23
VR/047	23	4,9	25	6,1	23	24	22
VR/058	25	5,8	28	6,8	22	23	21
VR/059	30	5,5	30	5,1	23	24	22
VR/020 (1,5)	25	4,5	23	7,5	24	24	25
VR/020 (2,1)	27	6,3	31	6,9	27	27	28
VR/048	23	5,1	24	6,7	-	-	-

TABELA 4 - Valores Médios de Tensão de Soldagem (V).

proteção, e o efeito devido a condição superficial do metal e da ponta do eletrodo. No entanto na soldagem com eletrodo revestido, a presença de outros fatores inerentes ao processo, dificulta a formulação do sistema de ignição do arco.

Neste caso, o critério mais importante para a análise da estabilidade do arco, foi o modelo da emissão de íons e elétrons, apresentado anteriormente, uma vez que em CC não se encontrou um índice numérico para expressá-la. A abertura do arco, para análise, foi realizada manualmente, sendo registrada no osciloscópio e gravado por vídeo cassete. A verificação desses oscilogramas mostrou-se impraticável devido os tempos infinitesimais envolvidos, no processo. Desse modo, fez-se uma avaliação prática da maior ou menor facilidade de abertura do arco, contando com a experiência do soldador.

Já a extinção do arco, por ser um fenômeno de maior duração, pode ser acompanhado pela projeção dos oscilogramas filmados. Neste ensaio, realizado nas mesmas condições dos ensaios de características dinâmicas, interrompeu-se a ação do equipamento simulador, de modo que o eletrodo não mais avançasse em direção à poça de fusão, enquanto o arco fosse aumentando até a sua extinção. Os valores do comprimento final do arco para cada tipo de eletrodo encontram-se listados na Tabela 6.

Verificou-se durante os experimentos, que aqueles eletrodos com diferentes teores de  $\text{CaCO}_3$  apresentaram uma variação crescente da profundidade da ponta do eletrodo em relação à ponta do revestimento, em função do aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$ . Os eletrodos revestidos geralmente têm a fusão da alma adiantada em relação a fusão do revestimento, caracterizando na ponta do eletrodo um formato tipo taça, cujo fundo é a alma, por

TABELA 5 - Parâmetros Medidos e Índice de Estabilidade Calculado para 200 pontos.

ELETRODO	$V_1^+$	$t_1^+$	$I_1^+$	$V_1^-$	$t_1^-$	$I_1^-$	$B^+$		$B^-$	
							MEDIA	S	MEDIA	S
E-7018	46	0.49	30	14	0.17	43	1969	1665	19936	6497
VR/046	63	0.66	28	24	0.25	38	897	709	10066	5722
VR/018	59	0.66	28	23	0.23	40	963	725	10830	5560
VR/019	56	0.60	31	23	0.20	40	1149	878	11974	5010
VR/047	60	0.61	30	19	0.17	38	987	558	11981	2729
VR/058	57	0.61	24	22	0.23	40	852	582	9878	3757
VR/059	59	0.61	20	24	0.24	38	678	404	9392	4565
VR/020 (1,5)	61	0.64	24	24	0.25	40	864	800	9967	4692
VR/020 (2,1)	63	0.60	22	26	0.23	39	748	681	9338	4894

TABELA 6 - Comprimento do Arco após a Extinção (mm)

ELETRODO	E-7018	VR/046	VR/018	VR/019	VR/058	VR/059	VR/020 (1,5)	VR/020 (2,1)	VR/047	VR/048
CC <sup>+</sup>	15.3	8.0	12.6	15.2	10.7	14.4	11.3	7.5	10.7	9.8
CC <sup>-</sup>	12.7	13.2	16.3	14.4	16.6	17.7	11.0	15.0	19.4	10.8

onde sai o arco, e as paredes são do revestimento. Esta característica é conhecida como efeito canhão, pois consegue direcionar o arco e as gotas.

Estes valores diferentes de tamanho do efeito canhão, levaram a valores diferentes de comprimento do arco, sempre maiores do que o desejado (4.00mm), ocasionando muitas vezes sua extinção. As extinções aconteciam ao se trabalhar com o controle automático e para evitá-las, procurava-se corrigir manualmente o comprimento do arco, mas a inercia da resposta chegava, muitas vezes, a causar curtos-circuitos. Em alguns casos foi possível registrar, na fita do vídeo-cassete, os oscilogramas durante o período de maior constância do arco. Em outros, não foi possível, principalmente para os teores mais elevados de  $\text{CaCO}_3$  com baixo pó de ferro (VR/058 e VR/059).

#### 3.4.2 - Transferência de Metal de Adição

Para analisar a variação do tipo de transferência de metal de adição, montou-se um procedimento experimental conforme Figura 53, paralelo ao ensaio de características dinâmicas. O modelo experimental proposto, foi uma tentativa de se melhorar a quantificação da transferência globular de material através do arco. O processo derivou-se de uma série de experimentos realizados com eletrodos básicos comerciais AWS E-7018 para grandes comprimentos de arco (acima de 4.00mm), baseando-se em um trabalho de estudos de transferência realizado por Waszink<sup>(15)</sup>.

Um feixe de raio Laser foi incidido na metade do comprimento do arco perpendicularmente à linha imaginária que passa no centro da seção transversal do eletrodo. Para cada obs

trução do feixe de laser (o que equivaleria a uma gota sendo transferida) o fotodetector acusava um sinal nulo de tensão, registrando no oscilograma do registrador X-Y. Por outro lado, ter-se-ia uma tensão máxima no momento em que o feixe fosse desobstruído totalmente. Com isso, o total de picos registrados, equivaleria ao número de gotas transferidas por unidade de tempo.

Paralelamente ao método proposto, analisou-se os oscilogramas de características dinâmicas para identificar a frequência de curtos-circuitos. A contagem do número de curtos-circuitos, porém, só foi possível ser feita em CC através da análise dos dados obtidos durante a medição da tensão média, pelo sistema de aquisição de dados, descrito no item 3.1.3. A desvantagem deste método, é que não traduz um resultado absoluto, devido a pequena frequência de leitura e o sistema ser digital, mas pode ser usado comparativamente (valor relativo), devido a aquisição ter sido feita durante um grande tempo de soldagem.

Os resultados mostram que o método experimental proposto precisa ainda ser melhorado. A desvantagem do método é que ele acusa qualquer corte do raio laser, mesmo numa passagem de gotas de escória ou uma gota que gira ao redor da ponta do eletrodo antes de destacar-se, cortando o raio mais de uma vez. Outro problema é a grande instabilidade dos arcos destes eletrodos, com sucessivos e rápidos aumentos e reduções do comprimento do arco, prejudicando a ação do feixe de laser, pelas interrupções frequentes. A transferência em corrente alternada e corrente contínua direta, mostrou ser mais irregular; sendo mais crítica para CC<sup>-</sup>, com tendências a menores diâmetros das gotas. De uma maneira geral, o número de curtos-circuitos foi menor em CC<sup>-</sup> como mostra a Tabela 7. Uma avaliação mais precisa do tipo de transferência

teria de ser verificada em conjunto com um estudo da produção e consumo.

### 3.4.3 - Tensão de Soldagem

Foram consideradas as tensões de soldagem medidas durante a determinação das características dinâmicas. Cada valor médio de tensão representa um ponto da curva característica estática para o eletrodo ( $I = 160A$ ). As Figuras 54 a 57 mostram as curvas de variação da tensão de soldagem em corrente contínua e corrente alternada. Os valores de tensão em CA estão apresentados na forma de valores máximos e mínimos das médias obtidas.

### 3.4.4 - Níveis de Ruído e Geometria do Arco

Os ensaios para determinação dos níveis de ruído foram realizados nas mesmas condições apresentadas para os ensaios das características dinâmicas.

Um arco voltaico de soldagem nada mais é do que um conversor de energia. Energia elétrica é introduzida no arco, e é gerado calor luz e outras energias. O som é produzido por movimento de alguma espécie, ou mudança no nível de energia. Quando um arco entra em regime perfeito, sua energia é constante e há muito pouco ou nenhum ruído. Algum efeito é necessário para mover as moléculas do ar em torno do arco com o objetivo de criar som. Além disso, existem outros fatores a considerar, como a frequência e amplitude da mudança. Desse modo, para cada pulso de energia introduzido no arco, é criado um pulso de som<sup>(24)</sup>.

Para objetivos práticos, não há nenhum tempo de atraso entre a mudança na forma do arco e o pulso que ocasionou a mudança. Essa relação entre a energia elétrica, forma e tamanho do arco, faz com que o arco possa ser comparado com um autofalante.

Em soldagens com eletrodos revestidos, além do som característico do arco, existem ainda sons associados com as reações metalúrgicas e transferência de metal através da coluna do arco. Portanto, pode-se comparar diversos tipos de eletrodos entre si, comparando os seus níveis de ruído e geometria de seus arcos. O arco que apresenta um maior nível e frequência de ruído, tem um comportamento mais instável, com maiores variações de forma, de transferência de metal e de energia.

Para a verificação dos níveis de ruído em arcos voltaicos de soldagem pode-se seguir a norma AWS F6.1.78. No entanto, nas condições do laboratório de soldagem da U.F.S.C., foi impossível obter a qualificação do campo segundo a referida norma, e um investimento para executar o completo isolamento acústico do campo, foge dos limites deste trabalho. Procurou-se então, medir os níveis de ruídos em Db(A) para todos os eletrodos dentro das reais condições do campo, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 8.

A verificação da geometria do arco foi feita pela sua projeção numa tela graduada com a ajuda de um estroboscópio mecânico.

Observou-se que os níveis de ruídos e suas frequências foram maiores em  $CC^-$ , notando-se grandes irregularidades na geometria do arco. Os arcos em corrente alterna apresentaram comportamento intermediários entre  $CC^+$  e  $CC^-$ .



TABELA 7 - Frequência de Curtos Circuitos e de Transferência Global (Hz)

ELETRODO	E-7018	VR/046	VR/018	VR/019	VR/047	VR/058	VR/059	VR/020 (1,5)	VR/020 (2,1)	VR/048
CURTOS	0,14	0,14	0,11	0,08	0,08	0,19	0,22	0,24	0,03	0,08
CIRCUITOS	0,17	0,12	0,02	0,004	0,03	0,19	0,20	0,19	0,02	0,22
FREQUENCIA	1,76	1,88	1,80	1,76	1,80	1,52	1,76	2,24	2,12	1,80
DE	1,63	1,93	1,67	2,03	1,90	1,73	-	2,28	2,32	1,90
TRANSFE	2,68	2,96	2,08	2,96	2,40	2,00	-	-	-	-
RÊNCIA										

TABELA 8 - Nível de Ruídos em Db(A)

ELETRODO	E-7018	VR/046	VR/018	VR/019	VR/047	VR/058	VR/059	VR/020 (1,5)	VR/020 (2,1)	VR/048
CC+	69-73	68-74	68-74	68-72	68-74	66-76	66-76	68-74	66-74	68-74
CA	60-72	69-77	68-74	67-73	64-76	66-78	66-78	66-82	64-82	64-76
CC-	69-75	70-86	70-82	70-80	70-82	70-86	62-86	70-84	70-86	70-82

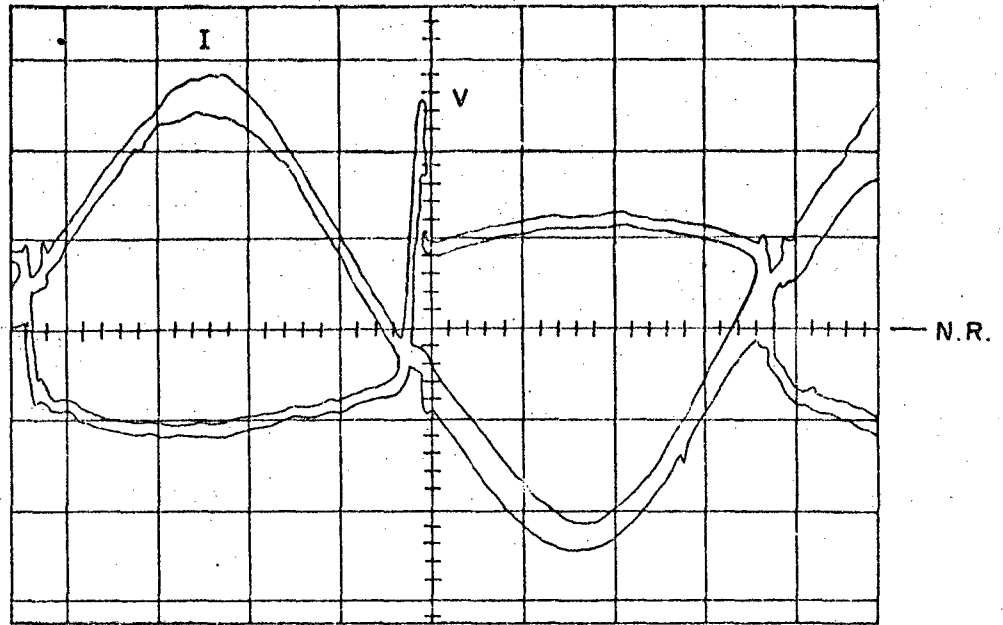


FIGURA 20 - Características dinâmicas do eletrodo E-7018 em C.A.

Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

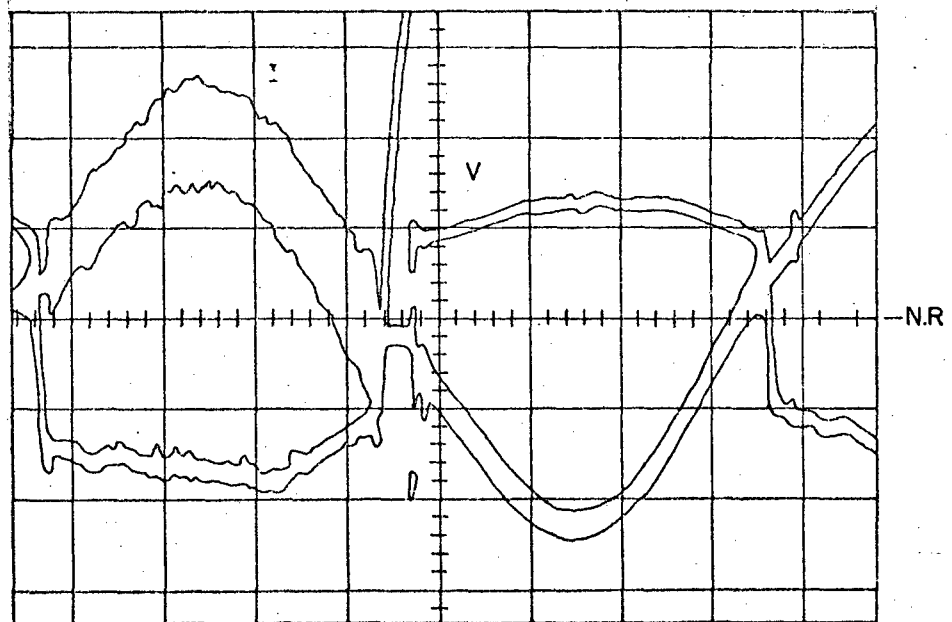


FIGURA 21 - Características dinâmicas do eletrodo VR/046 em C.A.

Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

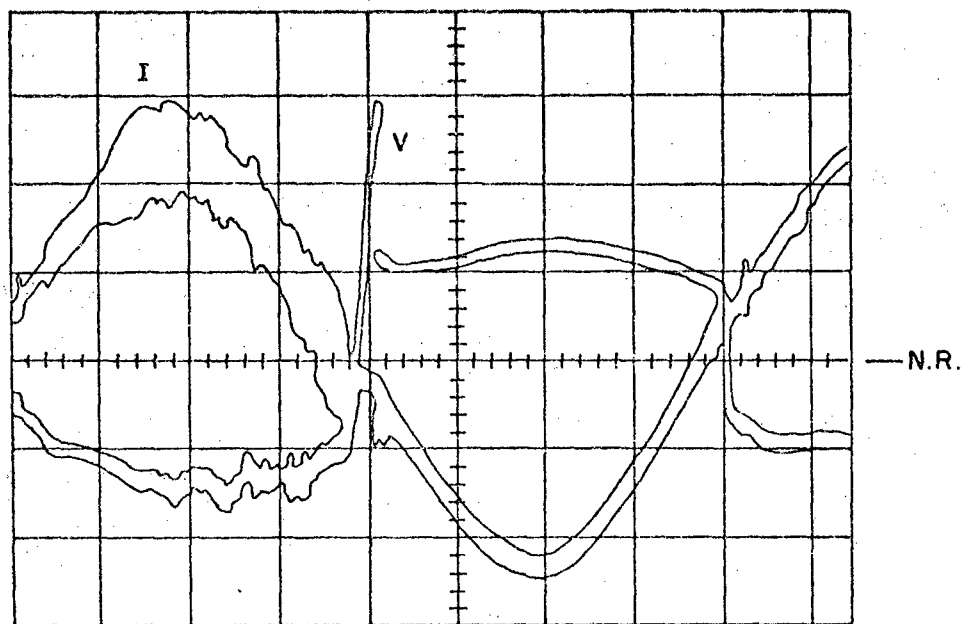


FIGURA 22 - Características dinâmicas do eletrodo VR/018 em C.A.

Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

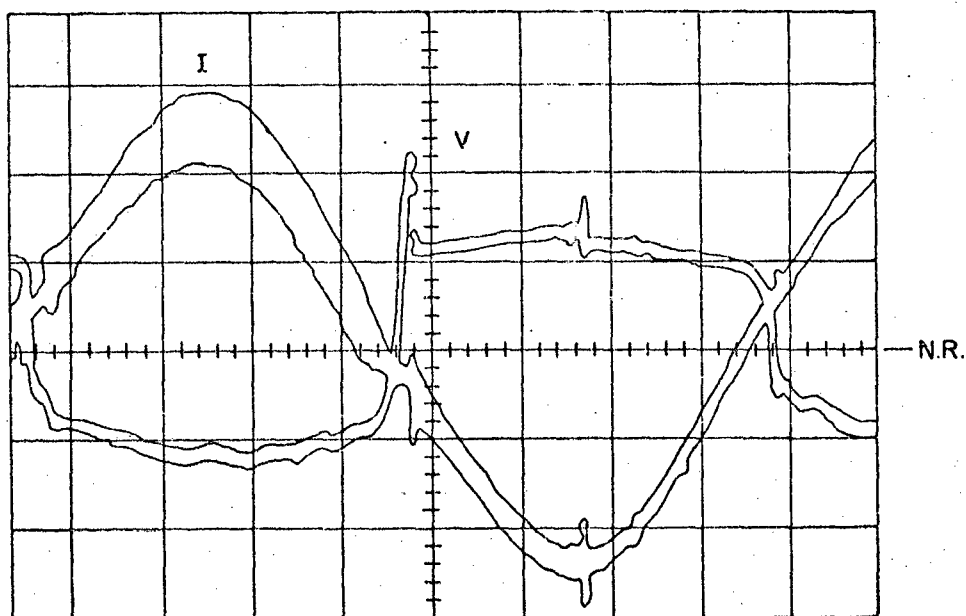


FIGURA 23 - Características dinâmicas do eletrodo VR/19 em C.A.

Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

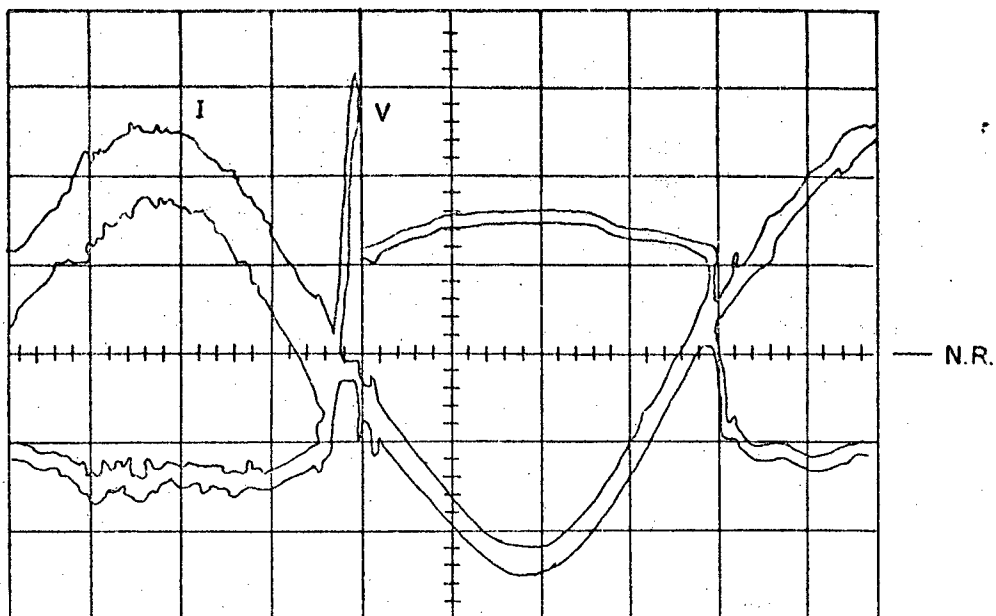


FIGURA 24 - Características dinâmicas do eletrodo VR/047 em C.A.  
Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)  
Tempo: 2 (ms/DIV)

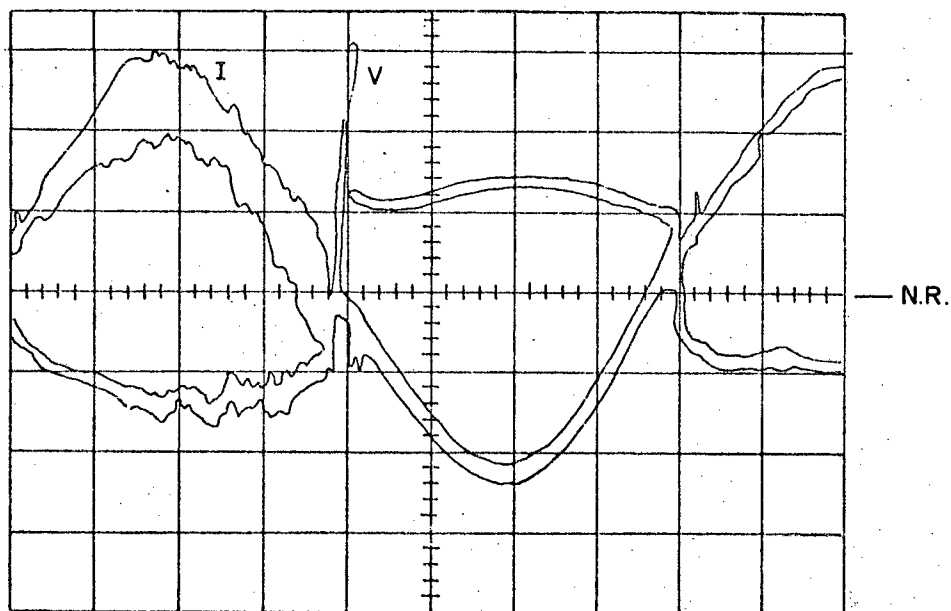


FIGURA 25 - Características dinâmicas do eletrodo VR/058 em C.A.  
Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)  
Tempo: 2 (ms/DIV)

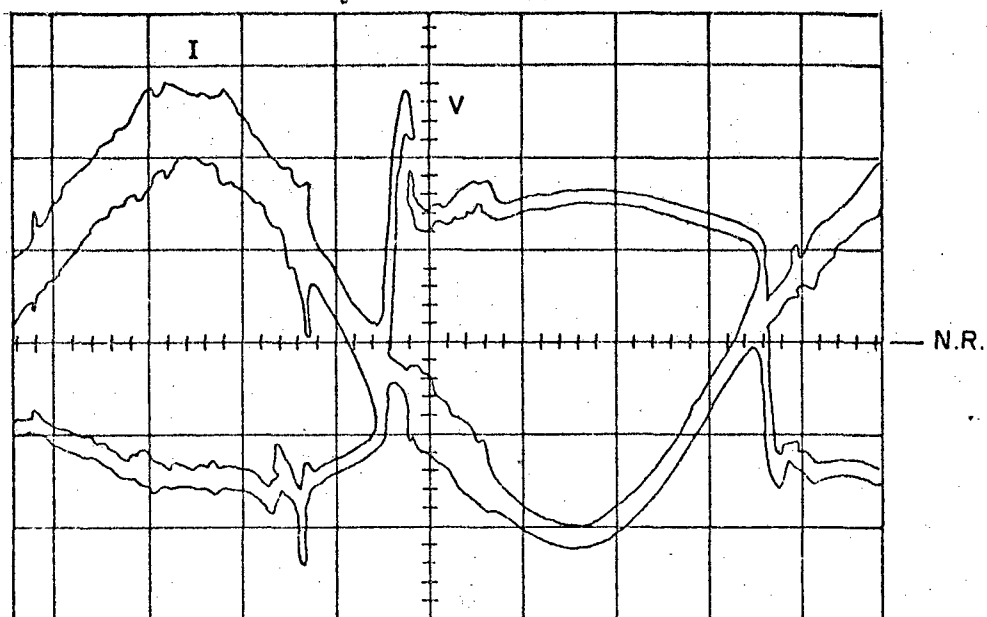


FIGURA 26 - Características dinâmicas do eletrodo VR/059 em C.A.

Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

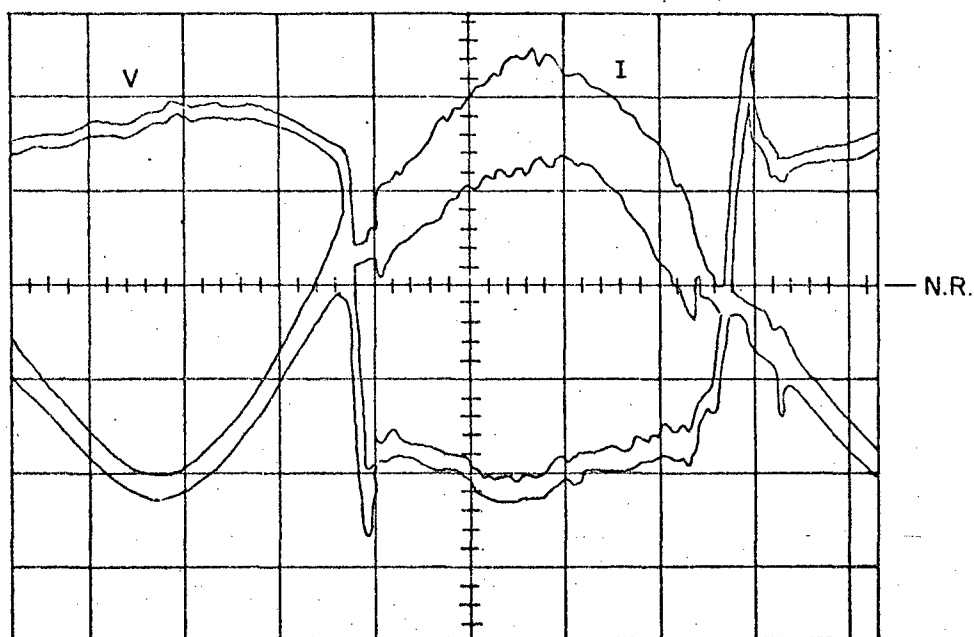


FIGURA 27 - Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=1,5$ ) em C.A.

Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

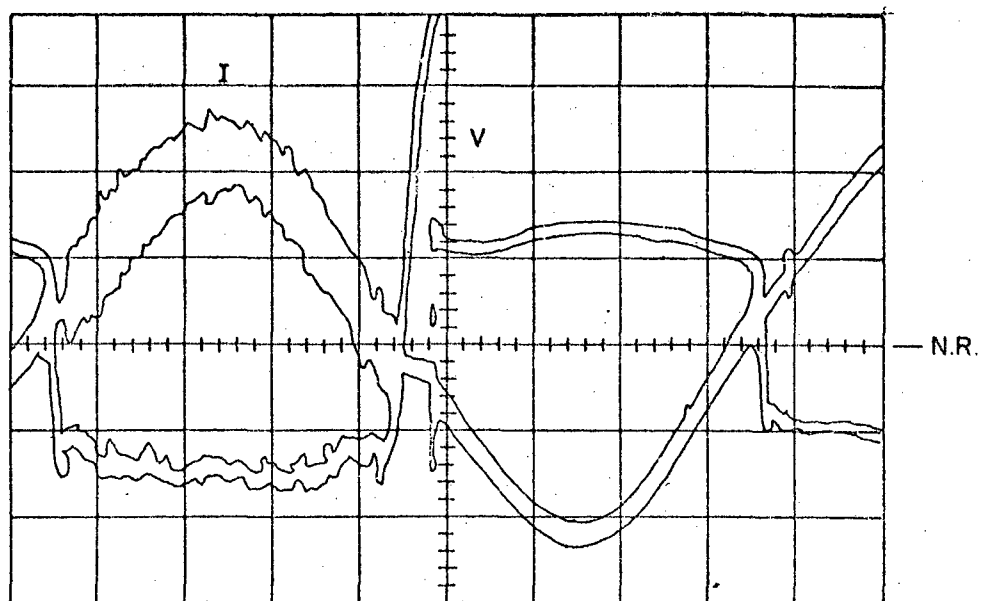


FIGURA 28 - Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=2,1$ ) em C.A.

Corrente: 100 (A/DIV) - Tensão: 20 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

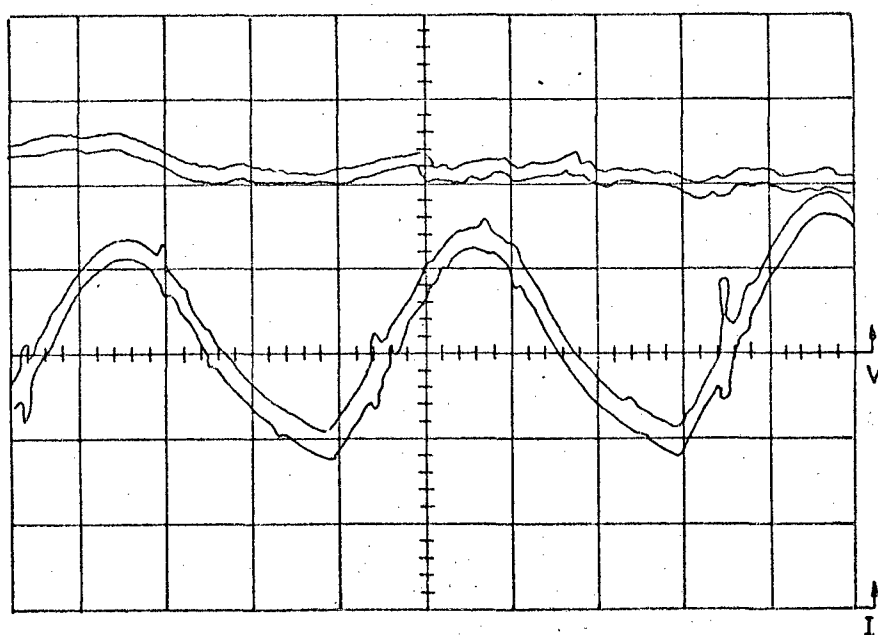


FIGURA 29 - Características dinâmicas do eletrodo E-7018 em CC +

Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

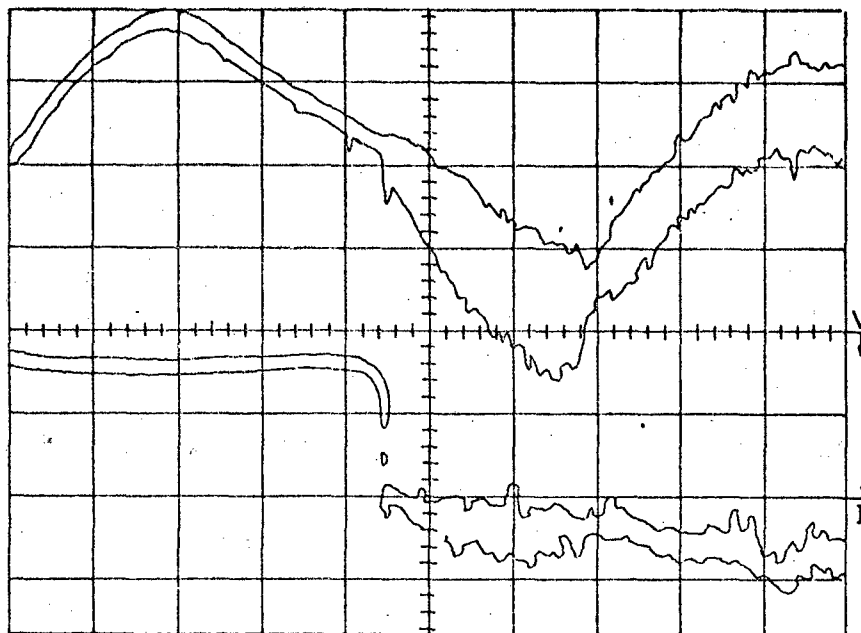


FIGURA 30 - Características dinâmicas do eletrodo E-7018 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 1 (ms/DIV)

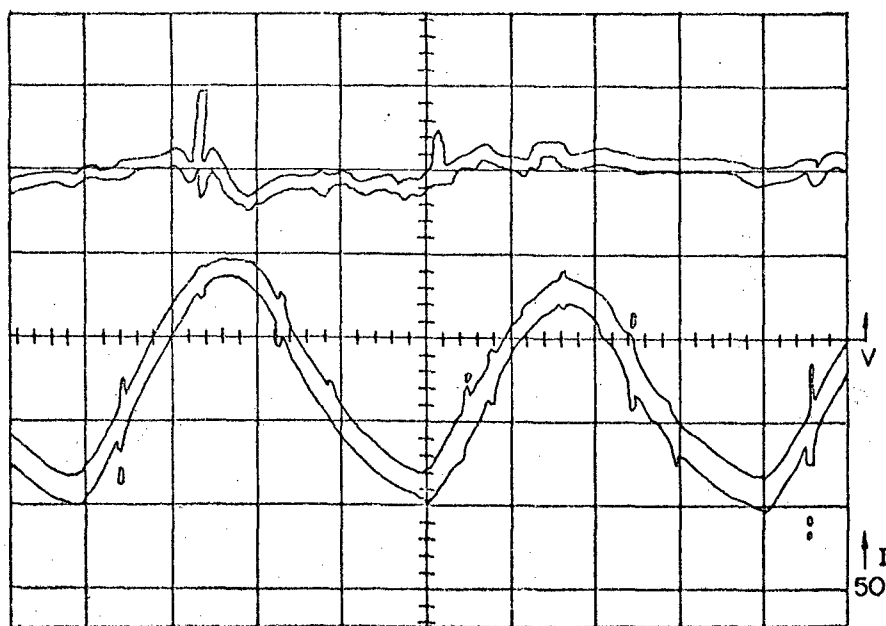


FIGURA 31 - Características dinâmicas do eletrodo VR/046 em CC+  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

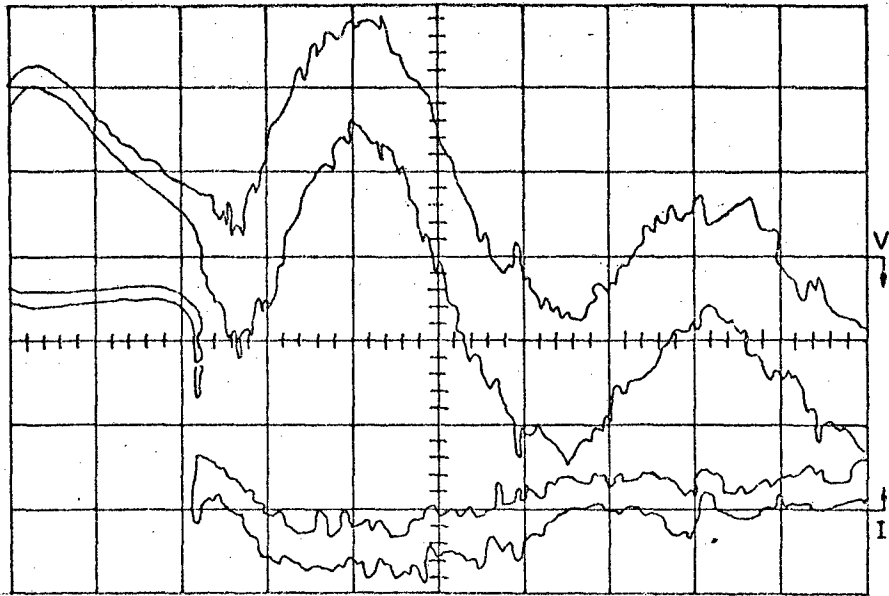


FIGURA 32 - Características dinâmicas do eletrodo VR/046 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

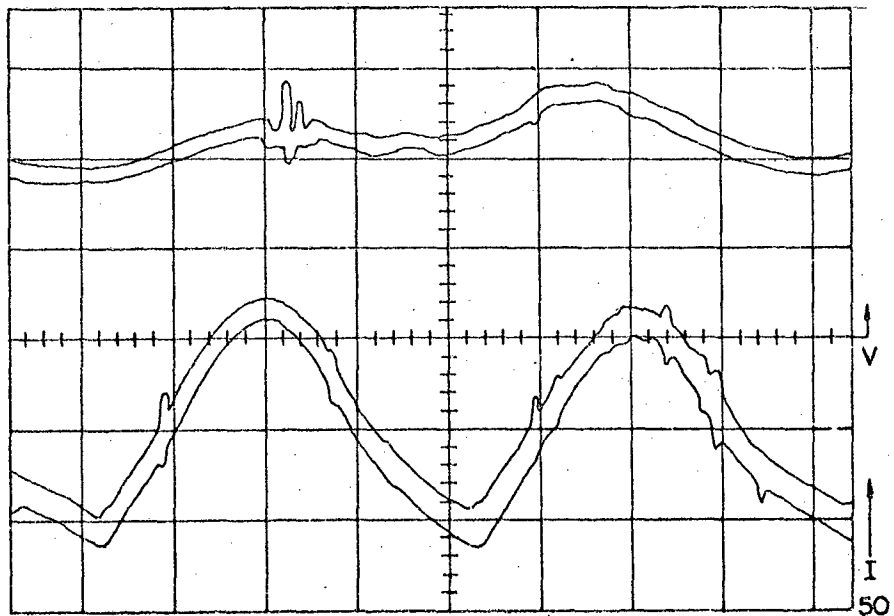


FIGURA 33 - Características dinâmicas do eletrodo VR/018 em CC+  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)



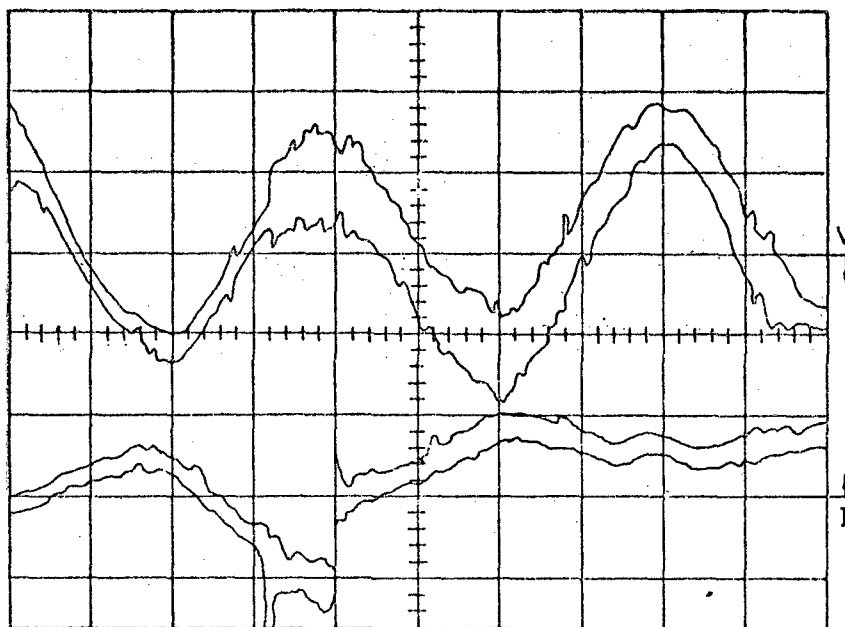


FIGURA 34 - Características dinâmicas do eletrodo VR/018 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 TEMPO: 2 (ms/DIV)

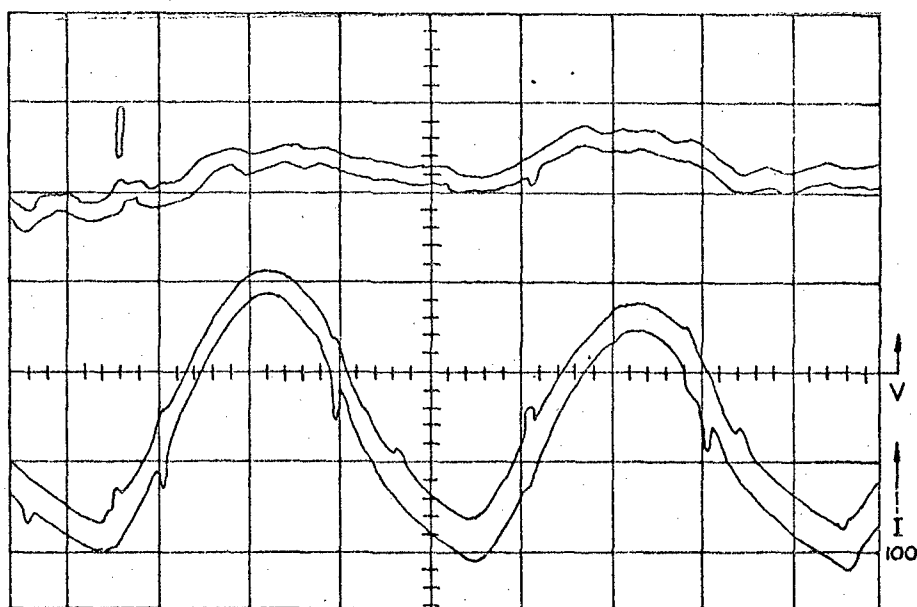


FIGURA 35 - Características dinâmicas do eletrodo VR/019 em CC+  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

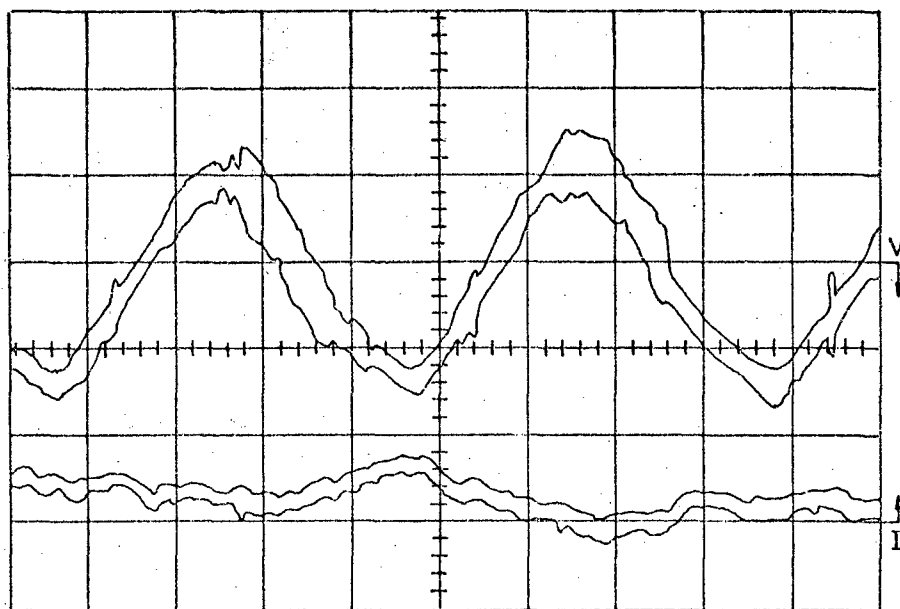


FIGURA 36 - Características dinâmicas do eletrodo VR/019 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

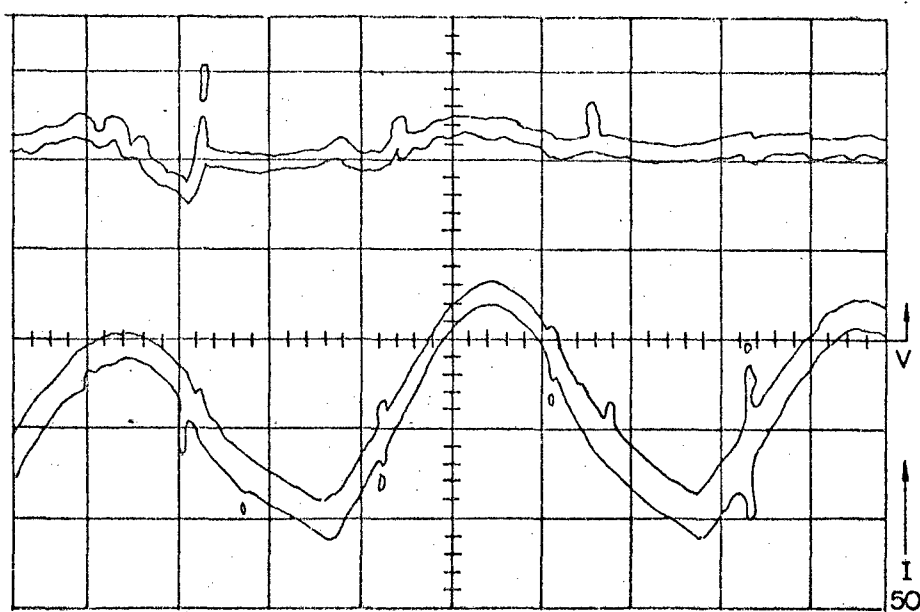


FIGURA 37 - Características dinâmicas do eletrodo VR/058 em CC+  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

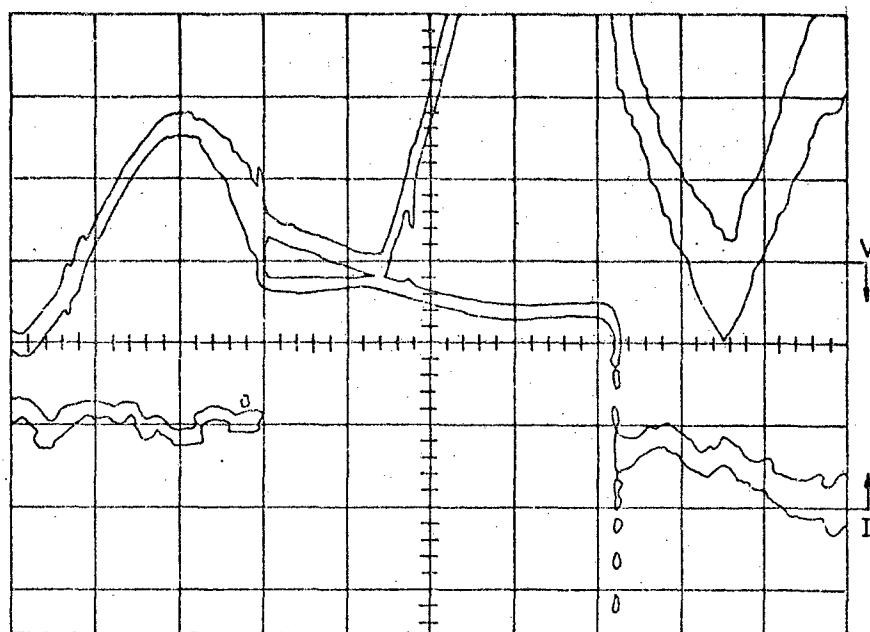


FIGURA 38 - Características dinâmicas do eletrodo VR/053 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

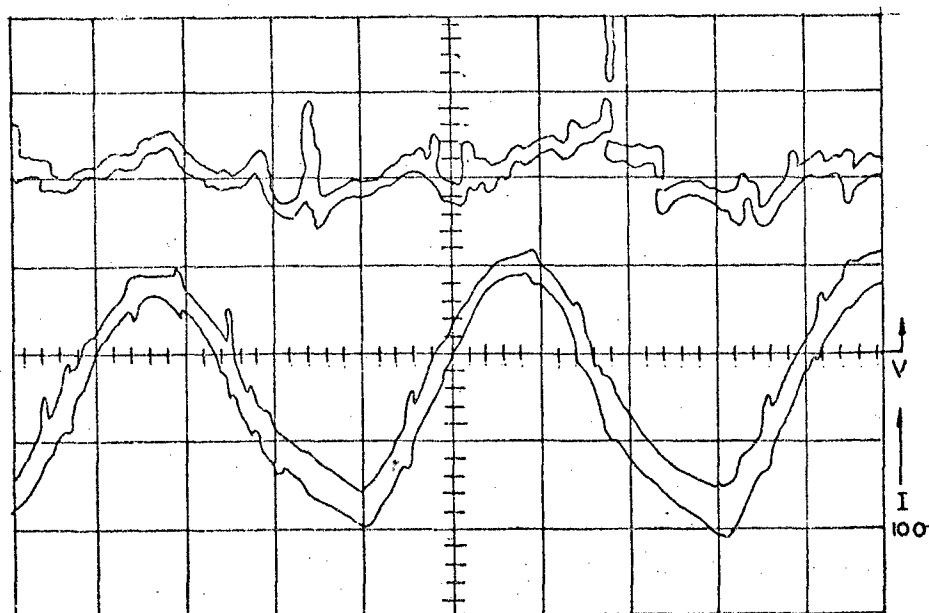


FIGURA 39 - Características dinâmicas do eletrodo VR/059 em CC+  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

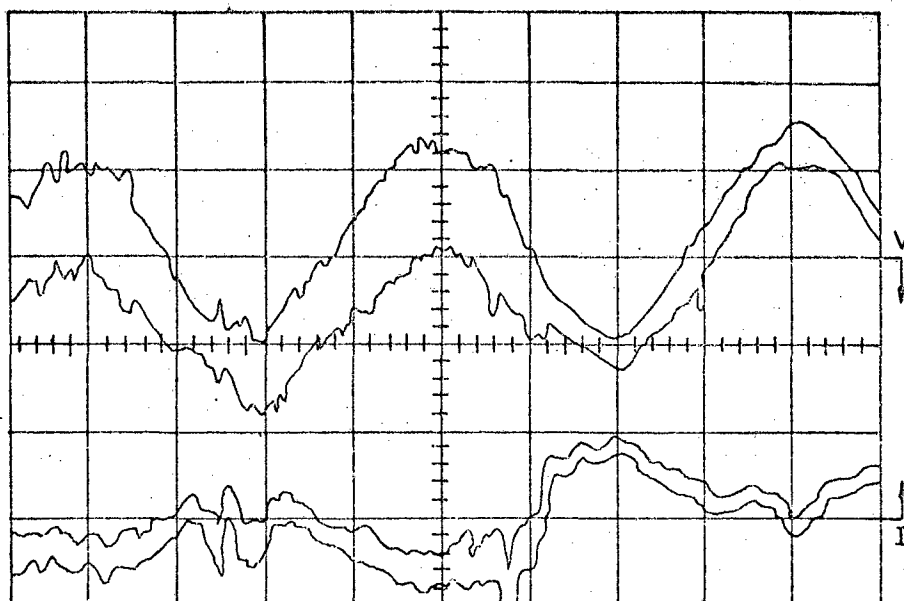


FIGURA 40 - Características dinâmicas do eletrodo VR/059 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

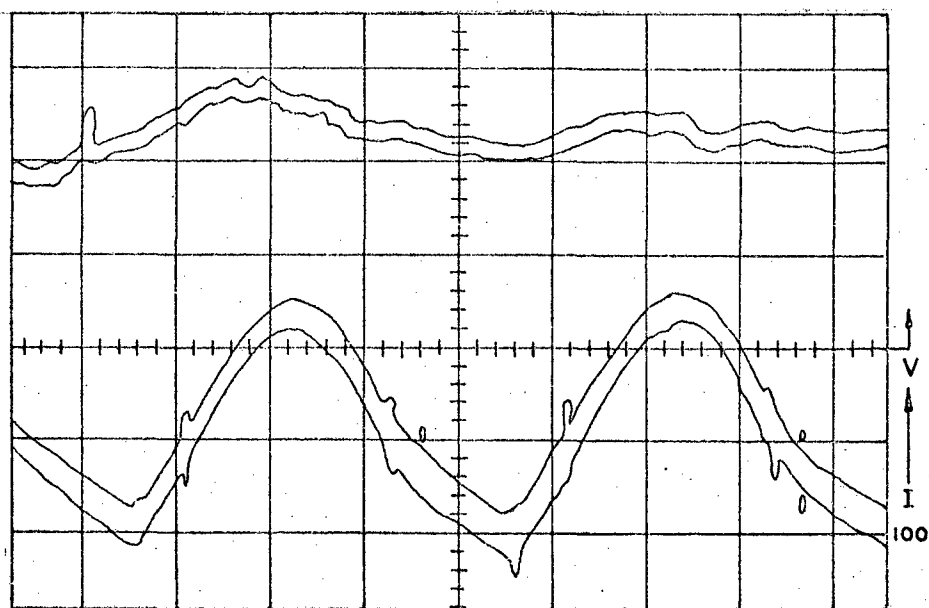


FIGURA 41 - Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=1,5$ )  
 em CC+  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

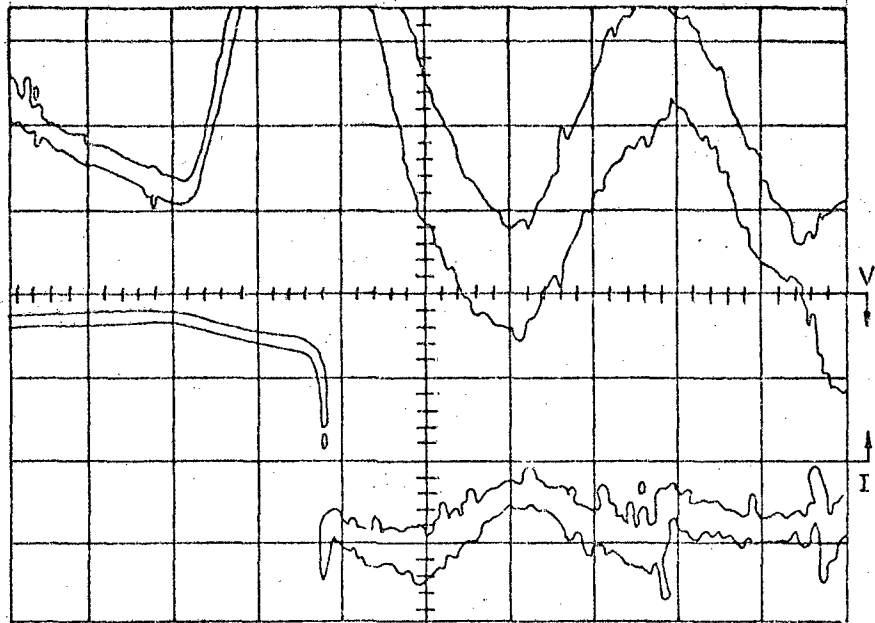


FIGURA 42 - Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=1,5$ ) em CC-

Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV) Tempo: 2 (ms/DIV)

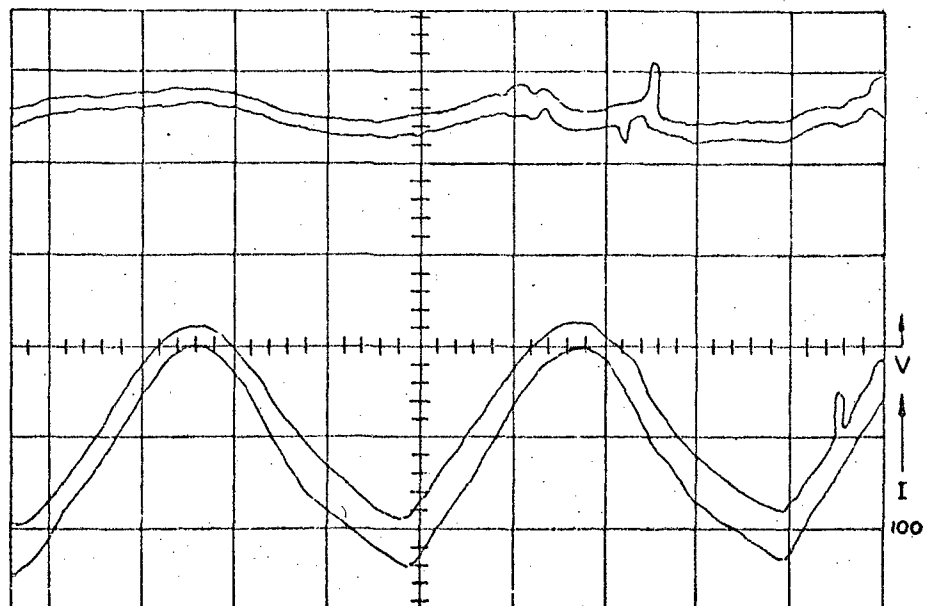


FIGURA 43 - Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=2,1$ ) em CC+

Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV) Tempo: 2 (ms/DIV)

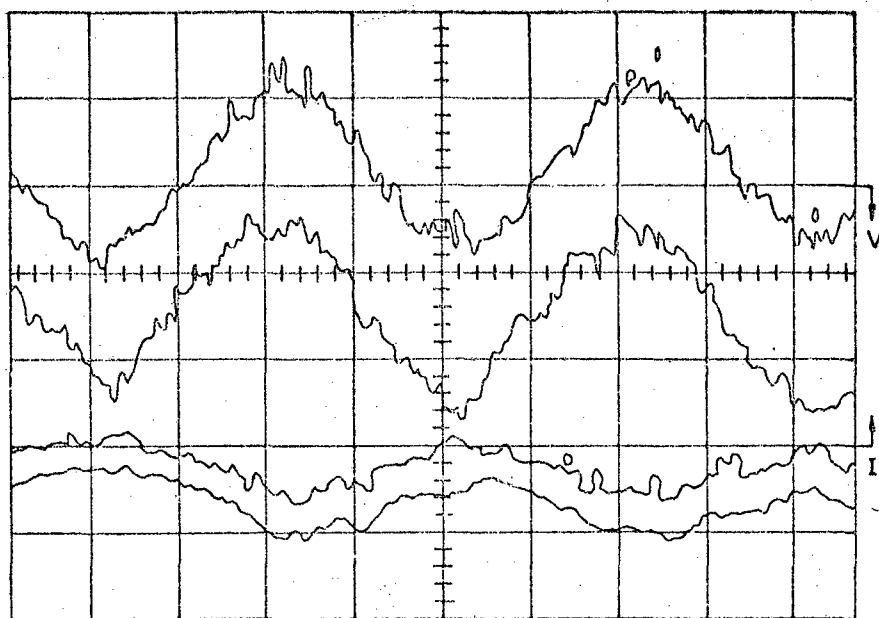


FIGURA 44 - Características dinâmicas do eletrodo VR/020 ( $f=2,1$ ) em CC-

Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV) Tempo: 2 (ms/DIV)

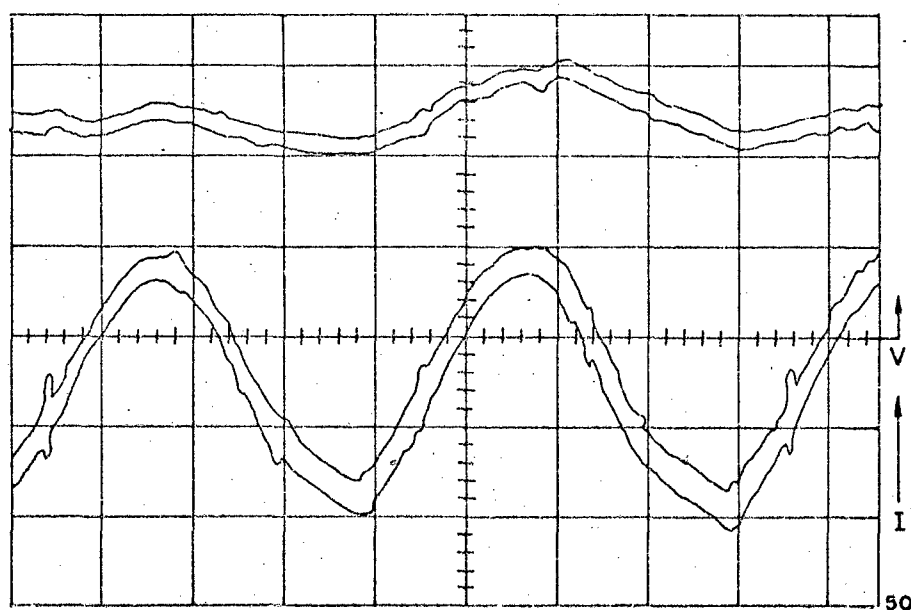


FIGURA 45 - Características dinâmicas do eletrodo VR/047 em CC+

Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)

Tempo: 2 (ms/DIV)

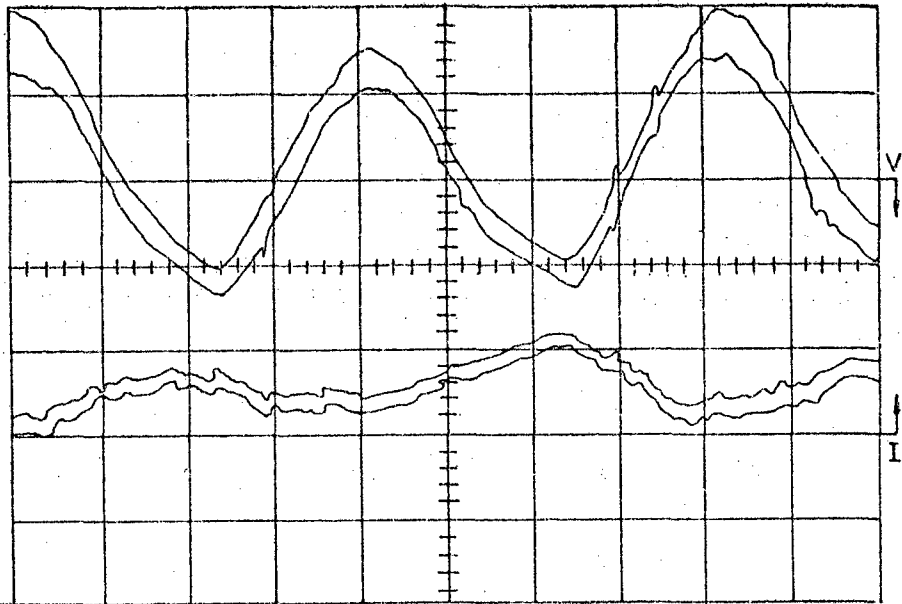


FIGURA 46 - Características dinâmicas do eletrodo VR/047 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

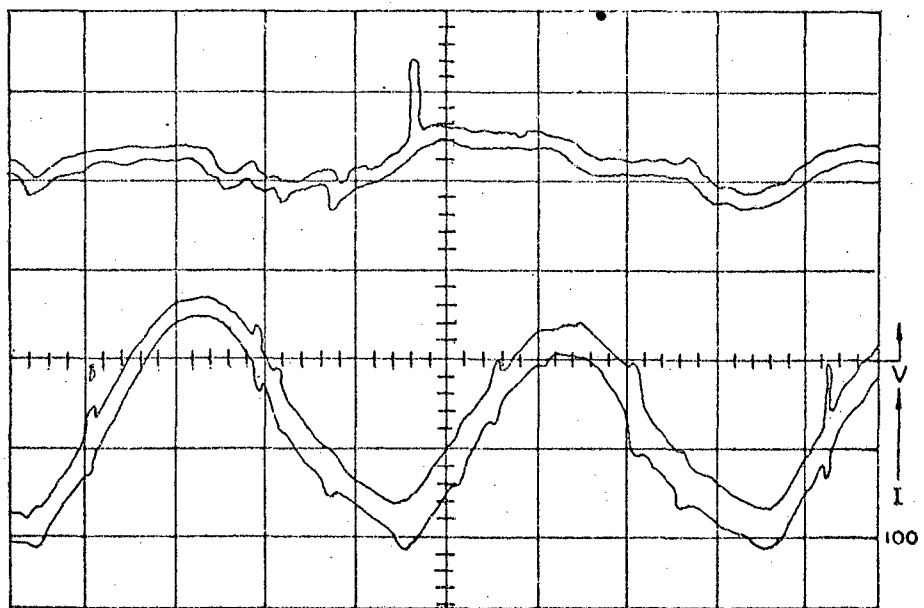


FIGURA 47 - Características dinâmicas do eletrodo VR/048 em CC+  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

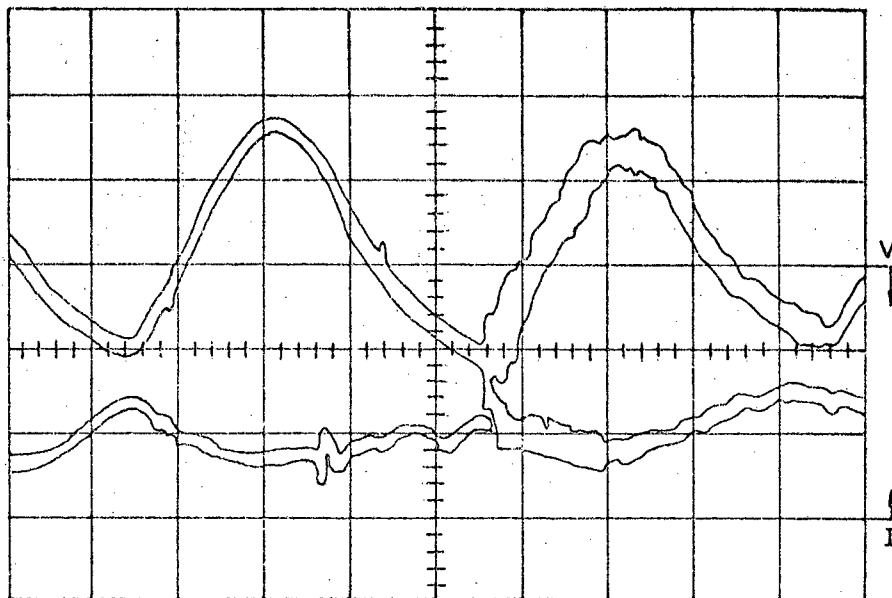


FIGURA 48 - Características dinâmicas do eletrodo VR/048 em CC-  
 Corrente: 50 (A/DIV) - Tensão: 10 (V/DIV)  
 Tempo: 2 (ms/DIV)

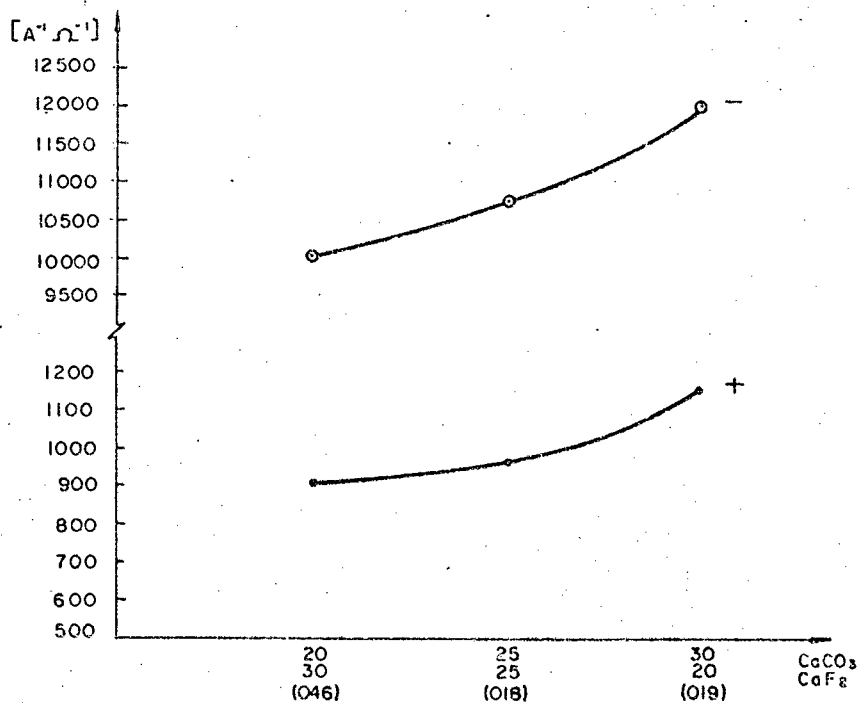


FIGURA 49 - Efeito do CaF<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub> na estabilidade do arco.



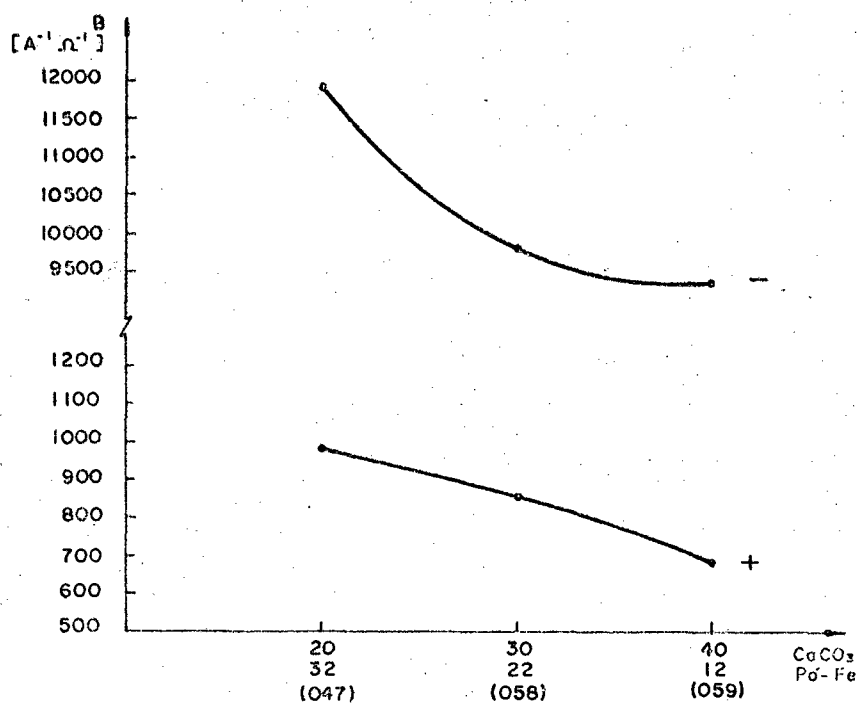


FIGURA 50 - Efeito do pó de ferro e  $\text{CaCO}_3$  na estabilidade do arco.

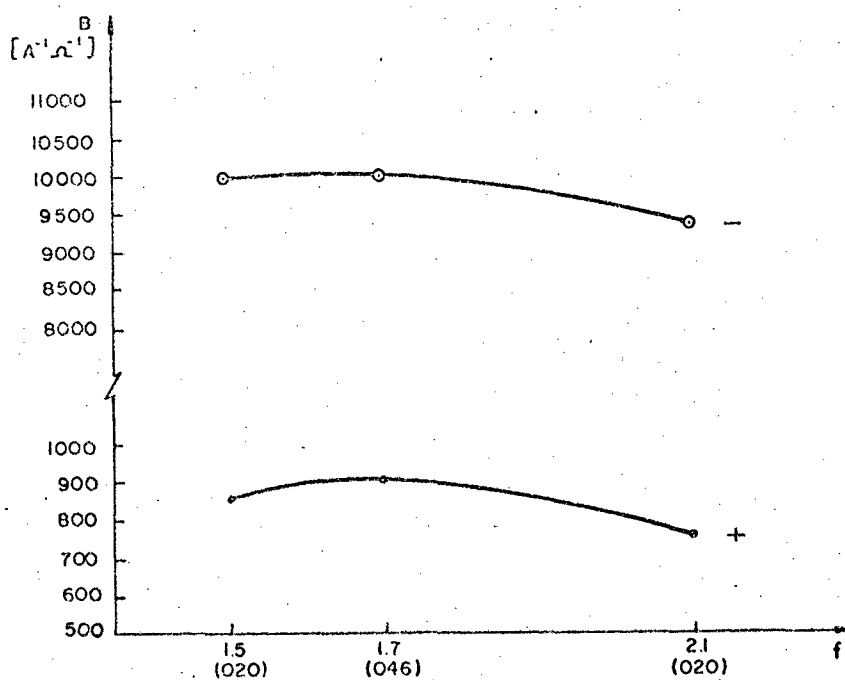


FIGURA 51 - Efeito do fator de revestimento na estabilidade do arco.

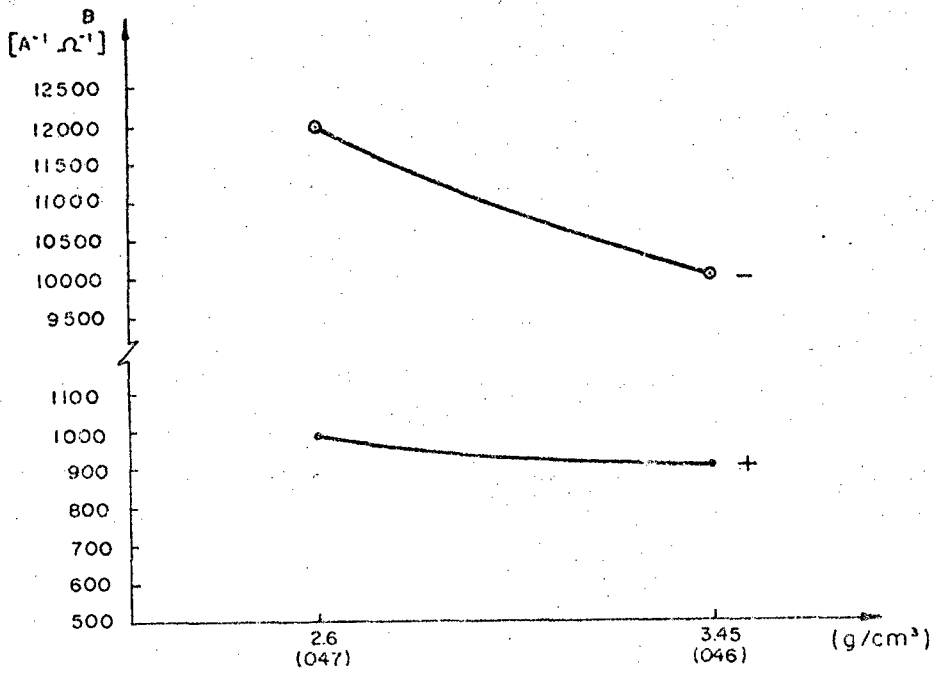


FIGURA 52 - Efeito da densidade do pó de ferro na estabilidade do arco.

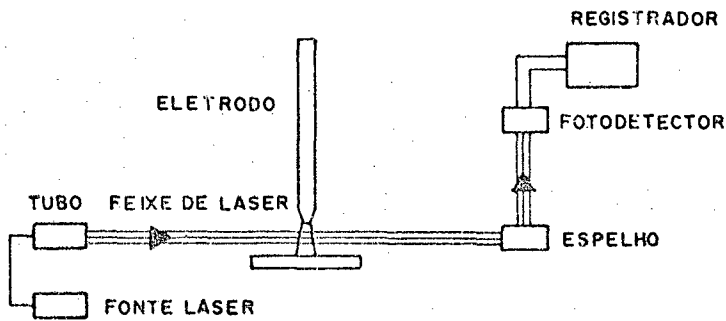


FIGURA 53 - Montagem experimental para verificação da transferência de metal de adição.

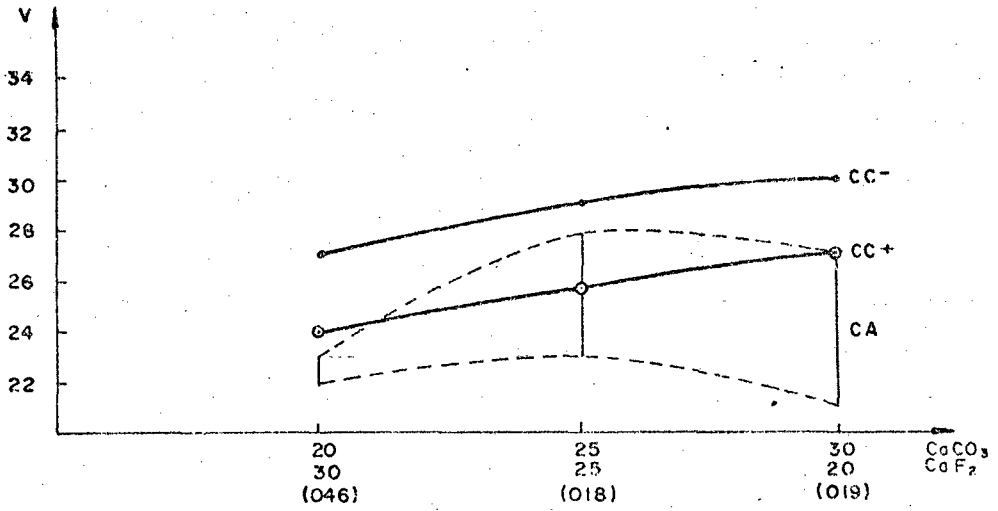


FIGURA 54 - Comportamento da tensão de soldagem em função do teor de CaCO<sub>3</sub> e CaF<sub>2</sub> I = 160 (A)

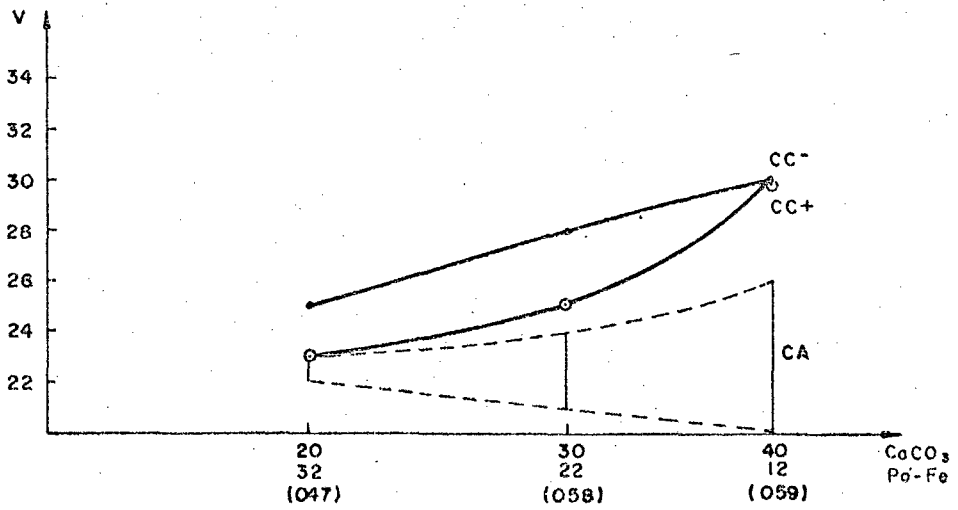


FIGURA 55 - Comportamento da tensão de soldagem em função do teor de CaCO<sub>3</sub> e p $\sigma$  de ferro. I = 160 (A)

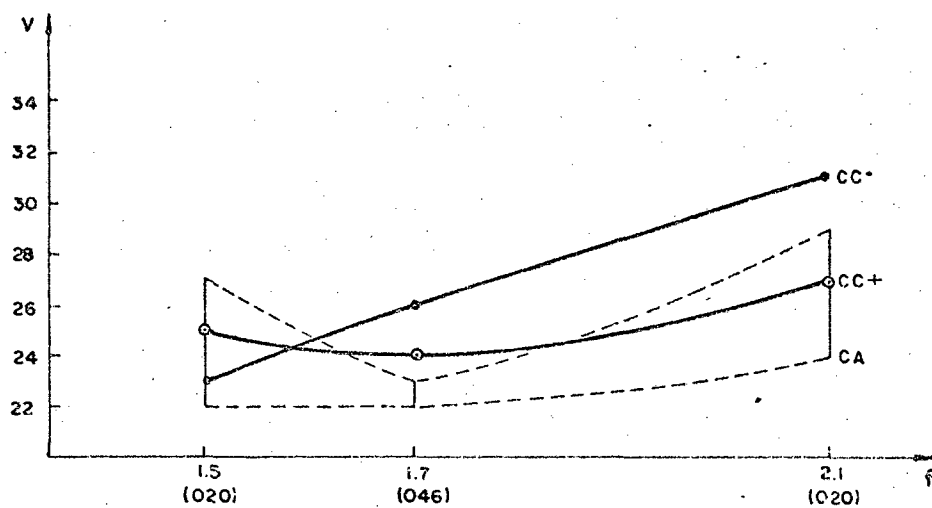


FIGURA 56 - Comportamento da tensão de soldagem em função do fator de revestimento.  $I = 160$  (A)

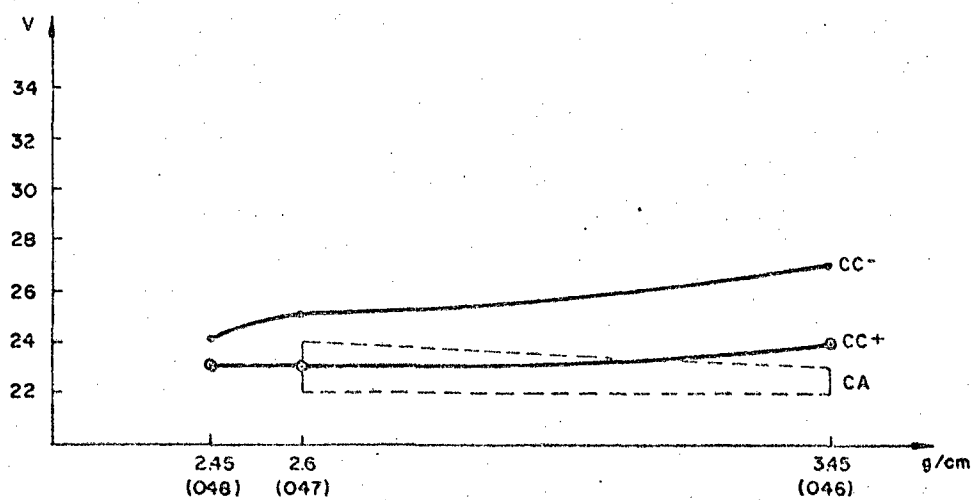


FIGURA 57 - Comportamento da tensão de soldagem em função da densidade e granulação do pó de ferro.  $I = 160$  (A)

## C A P Í T U L O   I V

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A observação do comportamento de um componente da escória, conjuntamente com variações de outros, é muito difícil, apesar de mais real, devido a fenômenos interdependentes ou concorrentes.

No estudo do comportamento de um componente do revestimento seria importante se ter varias formulações com variações apenas no teor deste, possibilitando conclusões objetivas sobre sua ação específica no comportamento do arco.

No presente trabalho estudou-se a variação simultânea de dois componentes. Os resultados obtidos não permitiram conclusões sobre a ação isolada de cada um deles, e são apresentados apenas como hipóteses reforçadas pelo conhecimento teórico.

As hipóteses referentes à influência do fator de revestimento e propriedades do pó de ferro, ficaram um tanto vagas devido a ausência de trabalhos publicados com relação a estas características.

De qualquer forma, os resultados obtidos têm importancia fundamental como ponto de partida para futuros trabalhos que tenham como objetivo estudar a influência da composição química do revestimento na estabilidade e transferência de metal através do arco.

#### 4.1.- Influência da Composição do Revestimento nas Características Dinâmicas

##### 4.1.1 - Corrente Alternada

A análise dos resultados expressos na Tabela 5 e Figuras de 20 - 28 e de 49 - 52, baseia-se nos modelos descritos, objetivando encontrar a forma de como é influenciado o comportamento do arco variando-se a composição química do revestimento básico.

##### a) Influência do $\text{CaCO}_3$ e $\text{CaF}_2$

Para se fazer esta análise, utilizou-se dos dados para os eletrodos VR/046, VR/018 e VR/019 que tinham composições idênticas, exceto a variação do  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaF}_2$  da seguinte forma:

	VR/046	VR/018	VR/019
$\text{CaCO}_3$	20	25	30
$\text{CaF}_2$	30	25	20

A Figura 49 ilustra a variação do índice de estabilidade com o aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$  (e queda do teor de  $\text{CaF}_2$ ). Como pode se ver, quanto menos  $\text{CaF}_2$  e mais  $\text{CaCO}_3$ , maior o índice de estabilidade, tanto no ciclo positivo como no ciclo negativo. Esta característica é facilmente visualizada pelas Figuras 21, 22 e 23, que são características dinâmicas típicas destes eletrodos.

A flourita, devido a ação dos ânions de flúor como barreira para elétrons, tem seu comportamento caracterizado como desestabili

zador de arco. Justifica-se então, os crescentes picos de reignição ( $V_1$ ) na proporção do aumento do  $\text{CaF}_2$ .

O efeito do  $\text{CaCO}_3$  se caracteriza por sua decomposição, e como visto, é considerado estabilizador de arco. Entretanto, apesar do Ca ser um elemento de baixo potencial de ionização, o  $\text{CO}_2$  (ou CO) além de não ser de tão baixo potencial de ionização, é um gás de alta condutividade térmica. É conhecido<sup>(27)</sup> que o transporte de calor de uma coluna de plasma para o meio ambiente é por radiação, convecção e condução, sendo este último muito importante. Um gás que transfere facilmente o calor, tem a tendência de se resfriar mais rapidamente no momento de transição de polaridade e, conseqüentemente, de se desionizar. Desta forma a reionização será dificultada.

Baseado no modelo inicialmente exposto, é de se esperar que o CaO por formar escória de fácil emissão de ions positivos, impeça a formação da barreira de elétrons junto do ânodo, evitando assim os picos de reignição. Por outro lado, o  $\text{CO}_2$ , por facilitar a desionização, pode exigir maior energia para reignição do arco. Caso a ação do  $\text{CaCO}_3$  fosse neutra, em relação à estabilidade, era de se esperar que o aumento do índice B só se fizesse sentir no ciclo positivo, pois na transição para o negativo o flúor não é tão prejudicial. Se sua ação fosse negativa, a redução da fluorita, caso predominante, faria aumentar a estabilidade do arco no ciclo positivo, mas o aumento da  $\text{CaCO}_3$  faria diminuir a estabilidade do ciclo negativo. Desta forma, pode-se supor que a calcita é estabilizante, porém, o efeito negativo da fluorita é superior. É importante ressaltar que após reignido o arco, a maior instabilidade se dá na ciclo negativo, como mostra as larguras dos traços de corrente dos oscilogramas das Figuras 21, 22 e 23. Isto,

como explica o modelo, é também causado pela barreira de ânions que se forma junto ao eletrodo. O efeito do  $\text{CO}_2$  se faz sentir pela tensão média do arco, embora um aumento no teor de  $\text{CaCO}_3$  tenha intensificado, por outro lado, o efeito canhão (o maior potencial de ionização e condutibilidade térmica do  $\text{CO}_2$  associados ao maior efeito canhão, proporcionaram um aumento na tensão média do arco para aumentos nos teores  $\text{CaCO}_3$ ).

Apesar do índice proposto por Pokhodnya et al<sup>(07)</sup> não ser influenciado pelo comportamento do arco após a reignição, pode-se notar que também este comportamento tem uma melhora na razão da diminuição da fluorita.

#### b) Influência do $\text{CaCO}_3$ e Pó de Ferro

Tomou-se três eletrodos que têm as composições fixas exceto uma variação sistemática na calcita e pó de ferro, ou seja:

	VR/047	VR/058	VR/059
$\text{CaCO}_3$	20	30	40
Pó de Ferro	32	22	12

Pela Figura 50 pode-se avaliar o efeito do aumento do  $\text{CaCO}_3$  (e decréscimo de pó de ferro) sobre a estabilidade do arco. O índice de estabilidade decresce no sentido do aumento da calcita e redução do pó de ferro, principalmente no ciclo negativo. Esta característica pode ser ilustrada nos cilogramas típicos para estes eletrodos pelas Figuras 24, 25 e 26.

A existência do alto pico de reignição pode ser atribuída, por si só, ao elevado teor de fluorita desses eletrodos (30%). Entretanto, observando a Tabela 5, vê-se que apesar do índice de esta



bilidade do VR/059 ser menor do que VR/047, a tensão de reignição também é menor. Pode-se perceber ainda que a queda do índice se deu devido a queda de  $I_1$ .

É conhecido que a adição de pó de ferro no revestimento objetiva aumentar o rendimento de deposição, mas, paralelamente o pó de ferro tem outros efeitos. Boniszewski<sup>(19)</sup> verificou que o aumento do pó de ferro diminui a resistência ao impacto mas melhora as características operacionais dos eletrodos, proporcionando uma redução de salpicos e facilitando consideravelmente a abertura e reignição do arco.

Pode-se atribuir o aumento de estabilidade no uso do pó de ferro ao seu razoável baixo potencial de ionização (do mesmo nível do Ca). A queda de seu teor na composição do revestimento justificaria o menor  $I_1$ , mas torna-se difícil ao mesmo tempo justificar a menor tensão de reignição, mesmo considerando que a calcita aumenta a estabilidade. Outros fatores são importantes como se verá a seguir.

Um fato que chamou a atenção foi que, diferentemente dos outros eletrodos, a soldagem com o VR/058 e VR/059 foi mais difícil. Houve uma dificuldade muito grande em se manter o comprimento do arco pelo controle automático, pois o arco chegava a se extinguir impossibilitando o controle pela tensão de referência.

Esta extinção pode ser atribuída ao excessivo efeito canhão, originado pelos altos teores de carbonato de cálcio.

Procurou-se na entando, manter o comprimento do arco o mais curto possível por uma ação manual sobre o controle automático, resultando num comprimento de arco real em torno de 4,0 (mm) (incluindo agora o efeito canhão). A menor tensão de reignição estaria associada ao efeito dos íons de Ca de baixo potencial de ioni

zação, enquanto que a maior corrente ocorre devido a redução do teor de pó de ferro e seu efeito sobre o potencial de ionização da atmosfera do arco.

Assim, a instabilidade causada, seria mais pelo aumento da cal cita que pela redução do pó de ferro, sendo que o primeiro não agiria sobre a física do arco, sobre a qual seria até benéfico, mas sobre a operacionalidade do mesmo.

É importante ressaltar que o envolvimento de todos os parâmetros de soldagem, interdependentes ou não, no índice proposto por Pokhodnya et al<sup>(07)</sup> possibilitou a maior precisão deste. Uma aná lise apenas pela tensão de reignição levaria a resultados anta gônicos.

#### c) Influência do Fator de Revestimento (f)

Usou-se três eletrodos que têm as composições fixas exceto u ma variação sistemática no fator de revestimento.

	VR/020	VR/046	VR/020
f(D/d)	1,5	1,7	2,1

O aumento da espessura do revestimento equivale a um aumento da quantidade de gases e escória a serem ionizados, não havendo uma variação da composição química. Por conseguinte, supõe-se que os constituintes da atmosfera do arco estão sempre presentes nas mesmas composições (percentagem), não alterando o potencial de io nização da atmosfera.

O comportamento dos eletrodos com f=1,5 e f=2,1, durante os en saios, foram marcados por constantes interrupções do arco. Para o eletrodo com f=1,5, esperava-se realmente um comportamento er

rático do arco, pelo fato de um revestimento muito fino não produzir quantidade suficiente de gases e escória para garantir os processos de ionização do arco, além de diminuir o efeito canhão. Já o eletrodo com  $f=2,1$  apresentou comportamento surpreendente, ao apresentar um índice de estabilidade menor que, até mesmo, o eletrodo VR/020 com  $f=1,5$  como mostra a Figura 51. Verificou-se um ponto ótimo para o fator de revestimento de 1,7, embora pouco diferindo dos valores encontrados para  $f=1,5$ .

Pela Tabela 5, e características dinâmicas, pode-se também verificar que o aumento de  $f$  acarretou em uma leve tendência ao aumento na tensão de reignição, e no ciclo positivo, uma queda na corrente. Pode-se fazer algumas proposições para explicar este comportamento. Primeiro tem-se que analisar um fator inerente ao processo que contribui para a variação do comprimento do arco. Trata-se do efeito canhão que nestes eletrodos só foi significativo para o VR/020 com  $f=2,1$ . Na soldagem com estes eletrodos, verificou-se grandes profundidades do canhão, que aumentava demasiadamente o comprimento do arco, chegando muitas vezes a interrompê-lo. Entretanto o restabelecimento se fazia automaticamente, sem necessidade da ação do controle manual. Isto sugere que mesmo para esses grandes valores de comprimento do arco (estimado em torno de 6 mm), a atmosfera do arco retinha um elevado grau de ionização, não ocorrendo a extinção completa.

Em segundo lugar, poderia-se levantar a hipótese que: com o aumento do volume dos gases e íons na atmosfera do arco, resultante de uma maior espessura do revestimento, além de um certo limite (de transição), poder-se-ia ter multiplicados as ações de cada um deles nos processos de emissão e ionização. Assim, teria-se uma maior quantidade de íons de flúor, de  $CO_2$  e Ca e de pó de fer

ro. Embora saiba-se que o potencial de ionização de uma mistura, depende enormemente do potencial de ionização do elemento de menor energia de ionização<sup>(09)</sup>, a ação desestabilizadora dos íons de flúor deve ser analisada criteriosamente.

Essas duas proposições, embora contraditórias, são possíveis. Não encontrou-se nenhum trabalho publicado em relação a esse estudo, e uma decisão entre as duas proposições só poderia ser feita, se fosse possível evitar o efeito canhão, garantindo-se o comprimento de arco constante para todos os eletrodos. Com base no exposto acima, seria muita precipitação afirmar que o eletrodo VR/020 com  $f=2,1$  é o menos estável. Embora a Figura 51, e as características dinâmicas comprovem isto, os valores deste referem-se a condições diferentes aos dos outros dois eletrodos, onde foi possível controlar o valor de "a", em 4.0 (mm), com variações mais discretas.

Pela análise das curvas das características dinâmicas dos eletrodos VR/020 com  $f=1,5$  e  $f=2,1$ , Figuras 27 e 28, pode-se ter uma idéia do comportamento verificado para tempos maiores (no videocassete). O eletrodo com revestimento mais fino ( $f=1,5$ ) apresentou menores tensões de pico no momento da reignição, mas, os tempos foram maiores, e as correntes bem menores. Esperava-se valores de  $V_1$  (tensão de pico) também maiores.

Acredita-se que, uma diferença de 2 volts com relação ao eletrodo VR/046 ( $V_1=63(V)$ ), pode ter sido causada por uma pequena diferença no formato da ponta dos eletrodos durante a soldagem.

O eletrodo VR/046, tem um pequeno efeito canhão que pode ter alterado o comprimento real do arco, enquanto que para o eletrodo com  $f=1,5$ , não se verificou efeito canhão. Os valores de  $I_1$  menores para  $f=1,5$ , eram esperados, comprovando a grande resistência

elétrica da atmosfera gasosa no momento de transição. As espessuras da curva de corrente alcançaram valores da ordem de 130 (A) ou mais (no ciclo negativo) para o eletrodo de revestimento mais fino, e as curvas de tensão apresentam-se muito irregulares, comprovando os baixos índices de estabilidades encontrados para esse tipo de eletrodo, devido, principalmente, a ação dos íons  $F^-$ .

d) Influência de Densidade do Pó de Ferro.

Para se fazer esta análise, utilizou-se os dados obtidos para os eletrodos VR/046 e VR/047, com composição idêntica exceto uma variação na densidade aparente do pó de ferro, da seguinte forma:

	VR/046	VR/047
g/cm <sup>3</sup>	3,45	2,50
características	pouco poroso	poroso
	alto teor de	baixo teor de
	H <sub>2</sub> e O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> e O <sub>2</sub>
granulometria	325 #	325 #

O eletrodo VR/047 com menor densidade, e baixo teor de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> apresentou melhor estabilidade do arco principalmente no ciclo negativo (Tabela 5, e Figura 52).

As diferenças de comportamento dinâmico observadas pela análise dos oscilogramas mostram uma contribuição positiva da redução da densidade aparente do pó de ferro e dos teores de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> do revestimento sendo esta mais expressiva no ciclo negativo. Acredita-se que o pó de ferro de menor densidade e mesma granulometria por ter maior superfície específica, reaja mais fácil, facilitan

do a fusão e posterior ionização. Deve-se observar também a contribuição dos teores de  $O_2$  e, principalmente  $H_2$  de elevados potenciais de ionização, e efeitos ativos sob o ponto de vista metalúrgico.

A pequena variação do índice B no ciclo positivo com relação ao negativo (Figura 52) sugere que o efeito dos íons  $F^-$  seja predominante sobre os demais, embora tenha-se percebido menores valores de tensão de pico, de tempo de reignição e maior valor de corrente para o eletrodo VR/047 neste ciclo (Tabela 5), comprovando a ação positiva descrita anteriormente.

#### e) Eletrodo Comercial Classe E-7018

Pelos dados da Tabela 5 e pela Figura 20 pode-se perceber que o índice B para o eletrodo comercial é bem maior que os demais isto se reflete principalmente pelo menor pico de reignição, apesar da corrente  $I_1$ , também se mostrar em nível dos mais altos. Percebe-se também que os traços das curvas oscilográficas são bem mais finos, identificando uma maior estabilidade.

Acredita-se que a ação dos íons flúor no ciclo negativo para este tipo de eletrodo, é reduzida pela presença de escorificantes em quantidades suficientes, como explica o modelo exposto anteriormente, o que confere um pico de reignição menor na mudança de polaridade. Mesmo assim, ainda percebe-se claramente a ação desestabilizadora dos íons  $F^-$  no ciclo negativo pela análise da espesura média das linhas de tensão e corrente dinâmicas. Este comportamento é facilmente explicado pelo modelo de emissão descrito no item 2.1.

#### 4.1.2 - Corrente Contínua

As variações e interferências registradas nas linhas dos oscilogramas foi a forma escolhida para comprovar os efeitos dos componentes sobre o comportamento do arco. Quanto maior a largura dos traços, maior a instabilidade. Outra forma seria pela faixa de amplitude dos valores de tensão e corrente, isto é, os valores máximos e mínimos.

Um fator importante que poderia provocar estas variações é a formação da barreira de íons de flúor quando soldando em  $CC^-$  como já visto anteriormente.

##### a) Influência do $CaCO_3$ e $CaF_2$

Para se fazer esta análise utilizou-se os dados para os eletrodos VR/046, VR/018 e VR/019, que tinham composições idênticas, exceto uma variação do  $CaCO_3$  e  $CaF_2$  da seguinte forma:

	VR/046	VR/018	VR/019
$CaCO_3$	20	25	30
$CaF_2$	30	25	20

As Figuras de 31 a 36 ilustram as características dinâmicas típicas destes eletrodos. Como pode se ver, na soldagem em corrente contínua com polaridade inversa ( $CC^+$ ) ocorre pouca variação nas curvas de tensão e corrente, enquanto que na polaridade direta ( $CC^-$ ), observa-se uma irregularidade crescente com o teor de  $CaF_2$ .

Em polaridade inversa, a diferença marcante entre os eletrodos foi

o aumento do valor da tensão média com o aumento no teor de  $\text{CaCO}_3$ , como pode ser visto nas Figuras 31, 33 e 35, passando de 24 para 27 (V) o que já era esperada devido a ação do  $\text{CO}_2$  de alta condutibilidade térmica, e da ação do efeito canhão. Neste caso, o arco comporta-se de acordo com a Figura 7 e não se verifica a ação do  $\text{CaF}_2$  sobre a estabilidade do arco. A análise dos oscilogramas mostrou variações consideráveis apenas nas amplitudes das curvas de tensão e corrente, sem aparecer grandes variações na espessura média das diferentes curvas.

As faixas de variações da amplitude verificadas foram de 20 a 40 (V) para os eletrodos VR/019, tendo o limite superior reduzido em função da redução do teor de carbonato de cálcio, sendo da ordem de 30 (V) para o VR/046.

Não foram observadas diferenças marcantes nas curvas de corrente de soldagem.

Já a soldagem em polaridade direta, caracterizada pela Figura 6, apresenta um comportamento completamente diferente. Como pode ser visto pelos oscilogramas típicos (Figuras 32, 34 e 36). Houve um aumento considerável da instabilidade do arco com o aumento do teor de fluorita no revestimento dos eletrodos, facilmente caracterizado pela variação da espessura das curvas de tensão e corrente dos oscilogramas.

Verificou-se ainda uma variação de amplitude das curvas de tensão mais acentuadas do que em  $\text{CC}^+$ . O eletrodo VR/046 teve sua curva de tensão variando de 25 a 40 (V) com alguns picos discretos excedendo este valor. A tensão só se apresentou abaixo de 25 (V) nos casos onde ocorreu curto circuito como mostra a Figura 32. A espessura média da linha de tensão verificada nos oscilogramas ficou em torno de 7,0 (mm), enquanto que a de corrente atingiu



valores da ordem de 12,0 (mm). Já o eletrodo VR/018 apresentou u ma variação da curva de tensão na faixa de 20 a 30 (V) com al guns picos excedendo este valor, como pode ser visto na Figura 34. Os valores médios da linha de tensão e corrente foram res pectivamente 4,0 (mm) e 7,0 (mm). Finalmente o eletrodo VR/019, com menor teor de fluorita, teve sua curva de tensão variando de 25 a 35 (V), com excessão da presença de picos discretos com mais de 35 (V). A curva de tensão apresentou espessura média em torno de 3,0 (mm), enquanto que esse valor ficou em 4,0 (mm) para as curvas de corrente.

Baseando-se no modelo inicialmente proposto, já esperava-se ob ter esses resultados. O fluoreto de cálcio mostrou influenciar bas tante o comportamento do arco na soldagem em polaridade direta, de vido a formação da nuvem de íons de flúor próximo aos cátodo, pre judicando os processos de emissão e ionização nesta região. Com a redução do teor de fluorita e aumento do carbonato de cálcio, hou ve uma redução da ação dos íons  $F^-$ , enquanto predominava a ação do  $CO_2$ , cuja elevada condutibilidade térmica contribuía para au mentar a tensão média de soldagem. Acredita-se que, este fato tam bém está associado com o aumento do efeito canhão.

Na polaridade inversa, os íons  $F^-$  anulam-se ao chocarem-se com o ânodo, e os processos de emissão são realizados sem problemas. Neste caso, não há influência dos íons de flúor na estabilidade do arco. Ao contrário, o carbonato de cálcio, aumenta considera velmente a tensão de soldagem. Este fato não causa nenhuma per turbação visível nas curvas de tensão e corrente, exceto um des locamento completo nas curvas no sentido vertical, sem variação da espessura média de suas linhas. Este deslocamento, quando ex cessivo, com um grande aumento da tensão e redução da corrente,

tende a extinguir o arco, sendo necessário recorrer a uma ação manual sobreposta ao controle automático do simulador, tanto em  $CC^+$  como em  $CC^-$ . Só nestes casos, verifica-se aumentos nas espessuras médias das linhas.

#### b) Influência do $CaCO_3$ e Pó de Ferro

Usou-se três eletrodos que têm as composições fixas, exceto uma variação sistemática na calcita e pó de ferro, ou seja:

	VR/047	VR/058	VR/059
$CaCO_3$	20	30	40
Pó de Ferro	32	22	12

As Figuras de 37 a 40 e 45 e 46 mostram exemplos de características dinâmicas para aos eletrodos acima. O aumento no teor de pó de ferro mostrou melhorar a estabilidade do arco, enquanto altos teores de  $CaCO_3$  aumentaram a tensão média de soldagem.

Mais uma vez, foi verificada a ação prejudicial da fluorita na polaridade direta, através da análise dos oscilogramas. Observou-se também que os eletrodos VR/058 e VR/059 apresentaram arcos com comportamento errático, sendo impossível manterem-se sem a ação do controle manual sobreposto ao automático, nas duas polaridades. Verificou-se um efeito mais pronunciado na polaridade direta:

Ao contrário do caso anterior, observou-se variações consideráveis principalmente nas curvas de tensão em  $CC^+$ . Como pode ser visto na Figura 39, além do aumento da tensão verificado pelo deslocamento de toda a curva para cima, verificou-se a ocorrência de pequenos picos e perturbações mais frequentes, em função do aumen

to do  $\text{CaCO}_3$  e redução do pó de ferro. Isto deve-se ao fato do pó de ferro possuir baixo potencial de ionização, que com a sua redução, para níveis muito baixos e na presença de altos teores de  $\text{CO}_2$ , causa instabilidade dificultando os processos de ionização. Paralelamente a este fato, verifica-se um aumento da instabilidade devido ao aumento do efeito canhão.

Na polaridade direta, constatou-se uma irregularidade crescente com a redução do pó de ferro e aumento do  $\text{CaCO}_3$ , como mostram as Figuras 38, 40 e 46. Observa-se um aumento na espessura média das linhas de tensão e corrente, um deslocamento das curvas de tensão para valores maiores, e as de corrente para valores menores, registrando-se também várias extinções para os eletrodos VR/058 e VR/059.

A Figura 46 registra um comportamento estável em CC<sup>-</sup> para o eletrodo VR/047. Acredita-se que este instante represente uma aproximação máxima do eletrodo na poça de fusão, uma vez que a observação das características dinâmicas registradas no vídeo-cassete demonstram um comportamento instável, porém menor com relação ao VR/058.

Algumas vezes, pode-se verificar para esses eletrodos um aumento excessivo de tensão, com uma correspondente ausência da corrente, ocorrendo a extinção momentânea do arco. Em seguida, o arco reacendia automaticamente e se restabelecia o fluxo de corrente, havendo uma variação contrária; a tensão diminuía e a corrente aumentava, continuando a soldagem.

### c) Influência do fator de Revestimento (f)

Foram analisados três eletrodos onde o fator de revestimento variava na seguinte proporção:

	VR/020	VR/046	VR/020
f(D/d)	1,5	1,7	2,1

As Figuras 31, 32 e 41 a 44 mostram as características dinâmicas típicas para os eletrodos acima.

Mais uma vez, pode-se verificar que o efeito sobre a polaridade inversa se dá apenas pela amplitude varrida pelas cruvas, de modo que as espessuras médias das linhas de tensão e corrente se equivalem. Observou-se menores variações para o eletrodo VR/046, e para o eletrodo com  $f=2,1$  aconteceram as maiores variações, com frequentes extinções do arco.

O eletrodo com revestimento mais fino ( $f=1,5$ ) apresentou um comportamento intermediário, ficando mais próximo do VR/046.

Na soldagem em polaridade direta, observou-se grande instabilidade para os três eletrodos como mostra as Figuras 32, 42 e 44. Esta instabilidade é causada, sobretudo, pela presença do alto teor de fluorita, e é menor para o eletrodo VR/046. O eletrodo com  $f=2,1$  apresentou o comportamento mais instável, enquanto o VR/020 com  $f=1,5$  apresentou um comportamento intermediário bem próximo do VR/046, embora com mais tendências à extinção do arco.

Como já foi relatado na análise em C.A., pode-se sugerir hipóteses para explicar este comportamento. Deve-se observar que a diminuição na espessura do revestimento reduz proporcionalmente a quantidade de gases, estabilizadores e desestabilizadores. Desse modo, deve-se analisar os efeitos de ambos, e fica difícil afirmar qual a ação predominante, uma vez que para teores excessivos desses elementos registra-se comportamentos também muito instáveis.

Deve-se observar ainda, que os comportamentos verificados são intensificados por um problema de ordem operacional, o efeito cañão que é mais pronunciado para o eletrodo com  $f=2,1$ , dificultando a manutenção do arco. Em todo caso, tem-se um comportamento ótimo para o eletrodo VR/046 sugerindo que o aumento do teor de gases e escorificantes tem um limite, a partir do qual inicia-se um efeito maléfico, ao contrário do que se poderia esperar.

d) Influência da Densidade e Granulometria do Pó de Ferro.

Foram analisados três eletrodos com as seguintes características:

	VR/048	VR/047	VR/046
g/cm <sup>3</sup>	2,45	2,60	3,25
granulação	150 #	325 #	325 #
H <sub>2</sub> e O <sub>2</sub>	baixo	baixo	alto
porosidade	menor do que 047	poroso	pouco poroso

As Figuras 31, 32 e 45 a 48 representam as características dinâmicas dos eletrodos. Na soldagem em polaridade inversa observou-se um comportamento um tanto variável, já em polaridade direta observou-se um comportamento mais estável para os eletrodos VR/047 e VR/048.

O eletrodo VR/046 com alto teor de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> apresentou comportamento muito instável, como descrito anteriormente. A redução na densidade e granulação do pó de ferro melhorou sensivelmente a estabilidade do arco. Sabe-se também, que paralelamente a este

fator, o teor de  $H_2$  e  $O_2$  foi reduzido, contribuindo para a manutenção de uma atmosfera menos ativa.

Entre os eletrodos VR/048 e VR/047 registrou-se um comportamento levemente mais estável para o primeiro, nas duas polaridades. Observa-se que entre estes dois eletrodos variou-se levemente a densidade, mas principalmente a granulometria do pó de ferro. As diferenças de comportamento dinâmico verificada pela análise dos oscilogramas mostra uma contribuição positiva da redução na densidade e nos teores de  $H_2$  e  $O_2$  do pó de ferro, sendo esta, mais expressiva na soldagem em polaridade direta. Acredita-se que o pó de ferro de menor densidade, e mesma granulação, por ter maior superfície específica, reage mais fácil, facilitando a fusão e posterior ionização. Deve-se observar também a contribuição dos teores de  $O_2$ , e principalmente do  $H_2$ , de elevados potenciais de ionização, e de efeitos ativos sob o ponto de vista metalúrgico.

A analisando as curvas de tensão e corrente dos oscilogramas verifica-se menores espessuras médias para os eletrodos VR/047 e VR/048, principalmente na polaridade direta. Sabe-se que a fluoreta é responsável pela camada de íons  $F^-$ , prejudicando a soldagem nesta polaridade. Este efeito, associado à alta densidade do pó de ferro e elevados teores de  $O_2$  e  $H_2$  justifica a maior instabilidade para o eletrodo VR/046.

#### e) Eletrodo Comercial Classe E-7018

As Figuras 29 e 30 mostram que mesmo nestes eletrodos comerciais, verifica-se uma grande instabilidade do arco na polaridade direta, devido a ação dos íons  $F^-$  descrita anteriormente. No entanto, o comportamento da tensão e corrente em  $CC^+$  é prático

camente invariável, com excessão de alguns curtos-circuitos.

Para completar a análise das características dinâmicas dos eletrodos, analisa-se a seguir os resultados de abertura e extinção do arco, para as duas polaridades em corrente contínua.

Os ensaios de abertura do arco dão apenas uma idéia da maior ou menor facilidade de ionização. A ignição do arco procede-se em tempos tão pequenos, que mesmo com o osciloscópio não foi possível registrá-la e analisar o comportamento dinâmico da tensão e corrente, até o estabelecimento do mesmo. Assim sendo, as análises foram feitas em função das dificuldades encontradas para abrir manualmente o arco.

A dificuldade de abertura do arco foi proporcional à estabilida de verificada nas duas polaridades. Na maioria das vezes o arco só foi aberto após a segunda ou terceira tentativa, verificando-se a dificuldade de mantê-lo, principalmente em  $CC^-$ .

A variação do fluoreto de cálcio mostrou influenciar bastante a abertura do arco em  $CC^-$ , enquanto um aumento no teor de carbonato de cálcio tornou difícil a manutenção do arco após a abertura em  $CC^+$ . Entre os eletrodos VR/046, VR/018 e VR/019, não observou-se diferença nas condições de abertura do arco em  $CC^+$ . E foram necessários, em média duas tentativas para abrir o arco. Já em  $CC^-$ , o eletrodo VR/046 mostrou-se de difícil abertura, sendo necessário em média quatro tentativas, e as vezes chegou-se a danificar o revestimento sem conseguir a abertura do arco. A dificuldade diminuiu para menores teores de  $CaF_2$  observando-se a mesma dificuldade na manutenção após a abertura.

Já os eletrodos VR/047, 058 e 059 apresentaram os mesmos níveis de dificuldade para abrirem o arco em ambas polaridades, sendo mais difícil a ignição na polaridade direta. Porém verificou-se u

ma maior dificuldade no estabelecimento do arco, com o aumento do teor de carbonato de cálcio e redução do pó de ferro, sendo esta mais significativa na polaridade direta. Este comportamento deve-se ao efeito prejudicial dos íons flúor que dificultam a abertura e consequente estabelecimento do arco, e parece dominar no processo de abertura. A diferença verificada no comportamento após a ignição do arco, deve-se a ação da redução do pó de ferro de fácil ionização e do aumento do teor de carbonato de cálcio com seus produtos dissociados (Ca e  $\text{CO}_2$ ), atuando conjuntamente com a ação do fluoreto de cálcio. Embora o Ca tenha baixo potencial de ionização, sabe-se que o  $\text{CO}_2$  de alto potencial de ionização atua principalmente devido sua alta condutibilidade térmica que reduz a eficiência térmica do arco, devido a perda de calor para o meio. A resistência elétrica do arco aumenta consideravelmente, exigindo maiores níveis de tensão para garantir a intensidade de corrente desejada.

Entre os eletrodos com diferentes fatores de revestimento, observa-se maior dificuldade para abrir o arco no eletrodo com  $f=2,1$ . A abertura com o VR/020 com  $f=1,5$ , foi levemente mais difícil do que para o eletrodo VR/046. Desta vez, houve diferença de comportamento na polaridade inversa, uma vez que o comportamento descrito acima foi verificado em ambas polaridades. Como já foi discutido anteriormente, encontra-se um ponto ótimo para o eletrodo VR/046 com  $f=1,70$ . Isto sugere formulações de algumas hipóteses, como já foi apresentado. Um revestimento mais espesso requer maior energia para sua total fusão, enquanto um mais delgado exige menos energia, embora não contenha gases e escória suficiente para garantir suas funções com eficiência. O ideal, portanto, seria obter a fusão com o mínimo de energia possível, garantido a per



feita proteção e ionização da atmosfera do arco, com fácil ignição e estabelecimento do mesmo.

Finalmente, a variação na densidade do pó de ferro, mostrou influenciar apenas o estabelecimento do arco. Observou-se diferenças na abertura apenas quando se mudou a polaridade de inversa (mais fácil) para a direta (mais difícil), sem nenhuma diferença considerável entre os eletrodos. Os eletrodos VR/047 e VR/048 apresentaram uma manutenção de arco mais fácil após a ignição com relação ao VR/046. Este comportamento foi justificado no item anterior. (2.1-d).

Esperava-se que quanto maior fosse a altura da extinção, mais fácil seria a manutenção do arco. Porém, os resultados não mostraram ser tão diretos assim.

Os ensaios de extinção do arco tiveram como resultados as características dinâmicas durante a extinção, ou seja o comportamento dinâmico da tensão e corrente de soldagem até o total apagamento do arco, e o comprimento final do mesmo, que foi medido pela distância entre a ponta do eletrodo e a peça. A Tabela 6 mostra os valores médios do comprimento do arco no momento da extinção, realizado em três eletrodos de cada tipo.

De uma maneira geral os valores para o comprimento do arco após a extinção foram menores em CC<sup>+</sup>, exceto para o eletrodo VR/020 com  $f=1,5$  e o comercial da classe AWS E-7018. Na verdade, estes valores estão relacionados aos níveis de energia associados a cada tipo de polaridade, e só pode-se associá-los com a estabilidade, pela análise dos oscilogramas de tensão e corrente.

Sob o ponto de vista do valor do comprimento final do arco, pode-se verificar dois grupos de eletrodos com comportamentos diferentes. O primeiro refere-se aqueles eletrodos com variação siste

mática no teor de carbonato de cálcio. Neste caso, observou-se um aumento do comprimento final do arco com o aumento no teor de  $\text{CaCO}_3$ , nas duas polaridades. Estes valores foram maiores na polaridade direta apesar do fato de haver nesta polaridade uma grande resistência à passagem de corrente, tanto pela presença dos íons  $\text{F}^-$ , como pelo  $\text{CO}_2$  dissociado. Por outro lado é de esperar-se que quanto maior o comprimento do arco, menor é a densidade de corrente junto ao metal de base, tornando-o menos quente, dificultando a emissão termoiônica. Se o cátodo for o eletrodo, não sofrerá essa influência, facilitando o transporte de corrente, que em parte se deve ao efeito termoiônico.

O segundo grupo refere-se aos eletrodos com variações no fator de revestimento e aqueles com diferentes densidades e granulação do pó de ferro. Na variação do fator de revestimento, os eletrodos apresentaram tendências diferentes quando se mudou a polaridade. Em polaridade inversa o valor do comprimento final do arco, diminui com o aumento de "f", enquanto que na polaridade direta, verificou-se o contrário.

A diminuição da densidade do pó de ferro mostrou aumentar o comprimento final do arco em ambas polaridades; o que poderia ser justificado pelos fatores discutidos, que mostraram melhorar a estabilidade do VR/047 em relação ao VR/046. Porém, o aumento da granulometria (VR/048 para VR/047) mostrou efeito semelhante, apesar de não ter sido verificado o mesmo na análise da estabilidade.

É importante ressaltar, que da mesma forma do primeiro grupo, registrou-se maiores valores do comprimento final do arco na polaridade direta, reforçando a hipótese levantada. Contudo, o eletrodo comercial AWS E-7018 mostrou comportamento inverso, o que di

ficulta uma conclusão final.

A análise dos oscilogramas de extinção do arco não foge do exposto para características dinâmicas. De uma maneira geral, encontra-se comportamentos mais instáveis com curvas mais irregulares em  $CC^-$ , sendo estas mais críticas para maiores valores de  $CaF_2$ . Durante a extinção do arco verifica-se um aumento progressivo na tensão de soldagem, enquanto a corrente procura se manter através de variações bruscas e sucessivas, aumentando e diminuindo, até que o grau de ionização caia abaixo dos índices toleráveis, a resistência aumenta consideravelmente, e a corrente finalmente se anula. Toda essa dinâmica é acompanhada por variações nas espessuras médias das curvas de tensão e corrente, e por picos localizados, que são mais significativos na polaridade direta, e seguem a mesma tendência das características dinâmicas dos eletrodos, discutidos anteriormente.

#### 4.2 - Influência da Composição do Revestimento no Comportamento Estático

O comportamento estático dos eletrodos expressa a variação do valor médio da tensão de soldagem com a variação da constituição do revestimento para os diferentes grupos de eletrodos definidos anteriormente.

##### 4.2.1 - Corrente Alternada

É conhecida a irregularidade das curvas de tensão na soldagem em corrente alternada, como visto no item 4.1.1. No entanto, para controle da energia de soldagem, são utiliza

dos voltímetros analógicos para medição da tensão eficaz do arco, que são aferidos para medir formas de ondas senoidais regulares (como a tensão em vazio da fonte por ex.). Pensando neste aspecto desenvolveu-se uma montagem experimental com "HARDWARE" e "SOFTWARE" capaz de medir a "tensão eficaz real do arco", através da integração da curva construída com os pontos medidos e armazenados em fita (Figura 19).

A grande dificuldade foi conseguir um número de leituras para cada período (16,66ms). Chegou-se a um desenvolvimento experimental que possibilitou a aquisição de 1800 medidas por segundo, utilizando a montagem apresentada na Figura 17, cujo resultados apresentados na Tabela 4, serão discutidos posteriormente.

Verificou-se pela análise dos gráficos obtidos, que um aumento na frequência de leitura pode, até substituir o uso do osciloscópio, tornando o estudo do comportamento dinâmico do arco mais rápido e menos complexo.

Com a continuação do trabalho, já obtém-se uma frequência de leituras da ordem de 3.600 (Hz), a que nos garante 60 pontos por período (duas vezes mais do que o apresentado na Figura 19). E a intenção é chegar a valores cada vez maiores garantindo, um controle mais preciso da energia de soldagem em corrente alternada.

Para que os resultados sejam representativos, a tomada de dados deve ser feita durante toda a soldagem. No entanto, devido a limitação da capacidade da fita utilizada, e do grande número de ensaios, limitou-se em 300 leituras (o que representa 10 ciclos). Isto equivale a um tempo de 166 (ms) de leitura, aproximadamente, e representa 0,28% do tempo médio de

soldagem (60s) para cada eletrodo. De qualquer forma, os resultados representam uma média de três valores eficazes de tensão nas condições descritas acima, e com excessão do eletrodo VR/059, verificou-se uma tendência esperada do comportamento estático.

Um fato curioso é que todos os valores de tensão eficaz obtidos em C.A., estão abaixo dos valores encontrados para C.C<sup>+</sup>, fato verificado em outro trabalho com eletrodos básicos<sup>(06)</sup>.

#### a) Influência do CaCO<sub>3</sub> e CaF<sub>2</sub>

O comportamento estático desse grupo de eletrodo foi marcado por grandes variações do comprimento do arco, resultando em extinções momentâneas quando o arco aumentava, e definitivas quando ocorria o avanço do eletrodo na direção da poça de fusão, grudando-se na mesma.

O eletrodo VR/046 (20% CaCO<sub>3</sub> e 30% CaF<sub>2</sub>) apresentou um comportamento muito instável durante a soldagem em C.A. Dos três eletrodos soldados, dois grudaram no material de base, devido as variações incontroláveis do comprimento do arco. Apresentaram uma variação de 22-26 (V) observada no voltímetro analógico, embora, a Figura 54 apresenta apenas uma pequena variação de 22-23 (V), que representa os valores de tensão para os intervalos de tempo medidos. Este comportamento parece ser característico de eletrodos com alto teor de CaF<sub>2</sub> em seu revestimento, na soldagem em C.A. Os fatores que contribuem para este comportamento, foram descritos na análise das características dinâmicas dos arcos (4.1).

O eletrodo VR/018 com menos CaF<sub>2</sub> (25%) e mais CaCO<sub>3</sub> (25%) do que o VR/046, apresentou um comportamento um pouco diferente. Verificou-se uma maior variação no valor da tensão de soldagem de 22-30 (V) apresentado no voltímetro analógico du

rante toda a operação, e da 23-28(V) registrada pela aquisição computadorizada, nos intervalos de tempo medidos (Figura 54). Verificou-se extinção do arco, porém com posteriores reascendimentos que se faziam automaticamente. Os três eletrodos testados tiveram seus arcos facilmente abertos e em nenhum caso houve extinção definitiva. As maiores variações no valor da tensão de soldagem, pode ser facilmente explicado pela análise da forma da ponta do eletrodo após a soldagem. Verificou-se um acentuado efeito canhão, o que provoca erro na medição de comprimento do arco (como visto no ítem 3.4). Este fato, juntamente com a maior condutibilidade térmica (resultante do aumento de  $\text{CO}_2$ ) justifica os maiores valores de tensão encontrados.

O eletrodo VR/019 (30%  $\text{CaCO}_3$  e 20  $\text{CaF}_2$ ), apresentou uma maior variação ainda no comprimento do arco, devido seu efeito canhão, maior que o do caso anterior. Esperava-se também uma maior tensão de soldagem, o que foi verificado no voltímetro analógico (22-32(V)). Embora as medições pelo computador tenha resultado em um valor máximo menor (21-27(V)), comprovam uma faixa de variação maior. Ocorreram extinções nos três eletrodos testados com reascendimento automático, registrando-se duas extinções definitivas para o primeiro eletrodo utilizado. Este comportamento, justifica-se pelo elevado teor de  $\text{CaCO}_3$  no revestimento.

Embora tenha-se comprovado o efeito estabilizador do  $\text{CaCO}_3$  pela análise das características dinâmicas dos eletrodos (4.1), verifica-se a sua ação contrária na operacionalidade nas condições dos testes, devido a presença do efeito canhão. Acredita-se que o efeito canhão está associado ao ponto de fusão do revestimento, e conseqüentemente, à sua velocidade de fusão, em relação à da alma de eletrodo. Observa-se também que o aumento na tensão de solda

gem, devido tanto ao efeito canhão como as propriedades físicas de atmosfera do arco, não representou numericamente, uma redução de estabilidade do arco como já comprovado em um trabalho anterior (06).

#### b) Influência do $\text{CaCO}_3$ e Pó de Ferro

O eletrodo VR/047 (20%  $\text{CaCO}_3$  e 32% pó de ferro), apresentou um arco de comportamento regular, com fácil manutenção. O arco variou pouco, sendo registrado apenas uma tendência à extinção. A tensão de soldagem, variou de 22-24 (V) como mostra a Figura 55. Mesmo no voltímetro analógico não se registrou variação acima de 24 (V) exceto num momento particular de tendência à extinção. Não se observou efeito canhão considerável, o que facilitou a manutenção do comprimento do arco em 4.00 (mm) pelo simulador.

O eletrodo VR/058, com maior teor de  $\text{CaCO}_3$  (30%) e menor pó de ferro (22%) do que o VR/047, apresentou um comportamento mais instável. Neste caso, pode-se verificar uma variação da tensão de soldagem, de 20 a 30 (V) no voltímetro analógico, enquanto a Figura 55 mostra a variação registrada pela computador (21-24 (V)), nos tempos medidos. Observou-se ainda uma maior dificuldade na abertura do arco, e na manutenção do mesmo durante a soldagem. Este eletrodo apresentou um efeito canhão considerável. Ocorreram variações visíveis do comprimento do arco, e tendências a extinção sempre quando o valor de "a" aumentava. Neste tipo de eletrodo, o valor do arco projetado na tela foi menor do que 4.00 (mm), uma vez que procurou-se mantê-lo menor de modo a evitar extinções definitivas do mesmo.

Já o eletrodo VR/059 com alto teor de  $\text{CaCO}_3$  (40%) e baixo pó de ferro (12%), foi o eletrodo que apresentou menor estabilidade.

O arco teve que ser controlado manualmente sempre que ocorria tendências à extinção. A tensão variou bastante, de 20-32(V) no voltímetro analógico durante a soldagem, o que prejudicou a ação controladora do simulador. Os valores de tensão encontradas pelo sistema computadorizado (20-26(V)), representam um instante da soldagem e comprovam o aumento da variação da tensão com o aumento do  $\text{CaCO}_3$  e redução do pó de ferro, como pode ser visto na Figura 55.

Este é um caso típico de combinação de efeitos nocivos ao estabelecimento do arco. O alto teor de  $\text{CaCO}_3$ , que contribui para o aumento da condutibilidade térmica da atmosfera do arco, acredita-se ser o principal responsável pela formação do efeito canhão, que dificulta o controle do comprimento do arco. O elevado teor de fluorita (30%) tem um efeito importante na desionização do arco no momento de transição, e é responsável pelas diferenças de energia de soldagem em cada ciclo da corrente alternada. O pó de ferro é apontado como estabilizador de arco, devido principalmente ao seu baixo potencial de ionização (7,83 eV) e alta condutibilidade elétrica do óxido de ferro fundido ( $\sigma = 230-320 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  para  $1500^\circ\text{C}$ ) (14).

#### c) Influência do fator de revestimento (f)

Neste caso, os eletrodos com a mesma composição química, diferem-se entre si apenas pelas distintas espessuras do revestimento.

O eletrodo de revestimento mais fino ( $f=1,5$ ), não apresentou efeito canhão considerável após a soldagem. Verificou-se dificuldade na abertura, e o comportamento do arco durante a soldagem foi irregular, ocorrendo várias extinções por curtos-circuitos. Acre



dita-se que o efeito canhão está relacionado também com a espesura do revestimento, uma vez que este foi crescente para valores maiores do índice  $f$ .

As tensões de soldagem do VR/020 ( $f=1,5$ ) variam de 22-27 (V), como mostra a Figura 56, observando-se grande instabilidade do arco, com várias tendências a curtos-circuitos, devido a reduções do comprimento do arco.

O eletrodo de revestimento mais espesso ( $f=2,1$ ), apresentou um grande efeito canhão. O arco variou bastante de comprimento, com tensão de soldagem oscilando de 24-29 (V) (Figura 56). No voltímetro analógico observou-se variações maiores durante a soldagem (22-30 (V)). Registrou-se várias tendências à extinção do arco, com restabelecimento automático.

Mais uma vez, a presença do efeito canhão dificultou a análise dos resultados. De uma forma geral, observou-se uma tendência a um comportamento mais regular para o eletrodo VR/046 ( $f=1,7$ ), sugerindo que existe um limite de espessura do revestimento, acima do qual o comportamento do arco se torna crítico.

#### d) Influência da densidade do Pó de Ferro

Foram analisados os comportamentos para os eletrodos VR/046 e VR/047, já descritos. Eles tem a mesma composição química, mas diferem entre si pela diferença nas propriedades do pó de ferro. O pó de ferro do eletrodo VR/046 tem densidade aparente de 3,45 ( $\text{g/cm}^3$ ) e granulação de 325. Constitui uma matéria-prima pouco porosa com alto teor de  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$ . Já o pó de ferro do eletrodo VR/047 tem uma densidade aparente de 2,6 ( $\text{g/cm}^3$ ) e granulação também de 325. É uma matéria-prima porosa com baixo  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$  (28).

As diferenças nos teores de  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$  são muito importantes sob o

ponto de vista de propriedades mecânicas da solda (principalmente resistência ao impacto), o que não é objetivo deste estudo, mas, podem ter importância singular nos processos de ionização da atmosfera gasosa (Tabela 1). Nestas condições, acredita-se que o eletrodo VR/046 com elevado teor de  $O_2$  e  $H_2$  requer maior energia para manutenção do arco, devido seus elevados potenciais de ionização (Tabela 1).

#### 4.2.2 - Corrente Contínua

Os valores de tensão de soldagem para os eletrodos (Tabela 4) encontram-se representados nas Figuras 54-57 em função da composição do revestimento.

##### a) Efeito do $CaCO_3$ e $CaF_2$

Pela Figura 54 vê-se que há um aumento da tensão média de soldagem com o aumento do  $CaCO_3$  e redução do  $CaF_2$ , em ambas polaridades, sendo estes valores maiores em  $CC^-$ . A barreira de íons  $F^-$  justifica as maiores tensões na polaridade direta, e o aumento no teor de  $CO_2$  decorrente da decomposição do  $CaCO_3$  justifica o aumento da tensão para a mesma polaridade. Verifica-se também um aumento do efeito canhão com o aumento do teor de carbonato de cálcio.

As dificuldades encontradas na soldagem com esses eletrodos não fugiram das condições expostas no item anterior (4.2.1). Observou-se uma melhora de comportamento em  $CC^+$ , enquanto que em  $CC^-$  verificou-se um comportamento pior do que o ocorrido em C.A.

### b) Efeito do $\text{CaCO}_3$ e Pó de Ferro

O comportamento da tensão de soldagem em função da variação de  $\text{CaCO}_3$  e pó de ferro, é dado na Figura 55. Verifica-se um aumento de tensão média de soldagem com o aumento do  $\text{CaCO}_3$  e redução do pó de ferro. No caso particular do eletrodo VR/059, encontra-se valores iguais de tensão de soldagem nas duas polaridades. Este comportamento para baixo teor de pó de ferro e elevado teor de carbonato de cálcio, pode ser justificado pelas péssimas condições de ionização e alta condutibilidade térmica da atmosfera do arco, além do efeito canhão muito pronunciado.

Quanto a extinção e variação do comprimento do arco, observou-se a mesma tendência do comportamento em corrente alternada, sendo este intermediário entre  $\text{CC}^+$  e  $\text{CC}^-$  que apresentou as piores condições de soldagem, devido, além da redução do pó de ferro, do elevado teor de  $\text{CaF}_2$ .

### c) Efeito do Fator de Revestimento (f)

A Figura 56 mostra a variação da tensão de soldagem em função do aumento do fator de revestimento. Observa-se uma tensão de soldagem em  $\text{CC}^-$  menor do que em  $\text{CC}^+$  para o eletrodo VR/020 ( $f=1,5$ ). Esta tendência já foi verificada em trabalho anterior com eletrodos básicos<sup>(06)</sup>, e não se encontrou justificativa para o fato. Em seguida tem-se um aumento de tensão proporcional ao fator de revestimento, sendo maior na polaridade direta. Observou-se um maior efeito canhão para o eletrodo VR/020 ( $f=2,1$ ). Fica difícil se fazer uma análise mais precisa devido o inconveniente do efeito canhão.

De toda forma, verificou-se um comportamento ótimo para o eletrodo VR/046 com fator de revestimento (1,7) intermediário entre

o VR/020 ( $f=1,5$ ) e VR/020 ( $f=2,1$ ), a exemplo do que ocorreu na soldagem em corrente alternada.

#### d) Efeito da Densidade e Granulometria do Pó de Ferro

Estas características do revestimento mostraram influenciar pouco a tensão de soldagem em corrente contínua, a exemplo do que se verificou em corrente alternada. A Figura 57 ilustra este comportamento, e verifica-se apenas uma leve tendência ao aumento da tensão média de soldagem com o aumento da granulometria do pó de ferro do revestimento. Neste caso, os altos níveis de  $O_2$  e  $H_2$  do pó de ferro do revestimento do eletrodo VR/046, parecem contribuir um pouco para o aumento do potencial de ionização do arco, justificando o leve aumento da tensão média para este eletrodo.

A barreira de ions  $F^-$  justifica as maiores tensões em  $CC^-$ , e o comportamento destes eletrodos, durante a soldagem, seguem as observações descritas para análise em corrente alternada, sendo o eletrodo VR/048 de um comportamento muito próximo ao do VR/047, principalmente na polaridade inversa.

#### 4.2.3 - Considerações Gerais

Já foi mostrado em um trabalho anterior<sup>(06)</sup> a dificuldade da análise da tensão média de soldagem como critério de avaliação da estabilidade do arco. Naquele caso dificuldades se fizeram sentir, associadas aos efeitos de transferência de metal de adição e influência dos escorificantes oriundos da queima do revestimento. Com os eletrodos experimentais, uma dificuldade maior apareceu, associada às dificuldades operacionais.

As extinções do arco ocorridas durante a soldagem podem ser justificadas pelo aumento excessivo da resistência elétrica da atmosfera do arco, causada pelo aumento do seu comprimento (por causa do efeito canhão). Nestes casos, verificou-se ausência de corrente e um aumento na tensão. Acredita-se que nestes instantes, a tensão necessária seja maior que a tensão em vazio da fonte, e o arco se extingue momentaneamente, enquanto uma pequena corrente fica mantida apenas por emissão termoiônica. Imediatamente, o simulador aumenta a velocidade de mergulho do eletrodo, e é reascendido o arco, com tensão inferior a  $V_0$ , devido ao menor comprimento do mesmo.

Procurou-se calcular a tensão eficaz para cada ciclo, apesar de não ser um cálculo convencional em eletrotécnica, para associar com a estabilidade em cada condição. Os resultados expressos na Tabela 4, e ilustrado na Figura 19 mostram um fato curioso; na maioria dos eletrodos, observou-se uma maior tensão no ciclo positivo. Como uma maior tensão significa uma maior energia necessária para vencer a resistência, pode-se explicar o fato baseado em que, durante a mudança do ciclo positivo para o negativo, ainda existe uma condição estável, que demora um certo tempo para sofrer a influência da barreira dos íons de  $F^-$ . Isto faz com que a tensão no ciclo negativo cresça lentamente, atingindo na final do ciclo um maior valor, como foi verificado na análise dos oscilogramas e ilustrado pela maioria das Figuras apresentadas.

Por outro lado, a mudança de negativo para positivo, por acontecer em condição instável, já inicia o ciclo com alto valor de tensão, que vai decrescendo lentamente. O que justificaria uma maior área sob a curva no ciclo positivo do que

no negativo. As excessões verificadas para os eletrodos VR/020, justifica-se pela existência de picos de reignição elevados, também no polo negativo, o que impede o crescimento lento da tensão neste ciclo.

#### 4.3 - Influência da Composição do Revestimento na Transferência de Metal de Adição

As dificuldades encontradas no estudo da transferência do metal de adição através da coluna do arco de eletrodo revestido, assim como as forças predominantes que atuam na transferência destes eletrodos, foram apresentados no Capítulo 2 item (2.2.5).

O método proposto para avaliação da transferência de metal mostrou-se prejudicado pelas grandes variações de comprimento do arco e pelas irregularidades verificadas na transferência. Mesmo assim, tentou-se através dos oscilogramas traçados pelo registros x-y, determinar a frequência de transferência das gotas, como mostra a Tabela 7. A análise foi reforçada pelo estudo visual dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e contagem relativa do número de curtos-circuitos em CC (Tabela 7).

##### 4.3.1 - Corrente Alternada

A soldagem em corrente alternada, apresentou grandes níveis de instabilidade do arco, como visto anteriormente (item 4.1). Do mesmo modo, a transferência de metal através do arco, foi muito irregular. As grandes variações do comprimento de arco, dificultaram a ação do feixe de laser, tornando duvidosos

alguns resultados inesperados.

a) Influência do  $\text{CaF}_2$  e  $\text{CaCO}_3$

Observa-se inicialmente uma tendência à redução da frequência de transferência com a redução do  $\text{CaF}_2$  (VR/046 e VR/018) mas para um teor maior de  $\text{CaCO}_3$  e menor de  $\text{CaF}_2$ , (VR/019) registrou-se um aumento da frequência.

Lancaster<sup>(16)</sup> concluiu que o diâmetro da gota transferida diminui com o aumento do teor de  $\text{CaF}_2$ , justificado pela instabilidade do arco.

Por outro lado, outros fatores devem contribuir para a variação da frequência de transferência de gotas.

A tensão superficial, seguramente, dificulta a transferência de gotas, fazendo-as aumentar de tamanho e, reduzindo a frequência de transferência. Desta forma é de se esperar que o  $\text{CaF}_2$  diminua a tensão superficial, assim como o  $\text{CaCO}_3$ , mas em menor escala<sup>(37)</sup>.

O efeito canhão, mostrado ser intensificado pelo aumento do  $\text{CaCO}_3$ , também deve favorecer o aumento de tamanho de gotas por impedir a ação de forças externas, porém, sabe-se que excesso de formação de gases auxiliam a transferência.

Desta forma, a redução do  $\text{CaF}_2$  reduziria a frequência de transferência pela ação da tensão superficial, mas aumentaria pela ação da instabilidade. Da mesma forma, o aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$ , aumenta a frequência pela ação da geração de gases, mas diminui pela ação da tensão superficial e pelo efeito canhão.

A ação conjunta destes efeitos, pode servir para explicar a inflexão na curva da tendência da frequência de transferência.

## b) Influência do $\text{CaCO}_3$ e Pó de Ferro

A grande instabilidade encontrada para o eletrodo VR/059 im possibilitou a ação do feixe de laser na determinação da frequência de transferência, e numa tentativa por análise visual, mesmo considerando o aumento no teor de  $\text{CaCO}_3$  e redução do pó de ferro, não se observou diferenças marcantes no modo de transferência entre os eletrodos VR/058 e VR/059.

De qualquer forma, observa-se uma tendência à redução de frequência de transferência com o aumento do  $\text{CaCO}_3$  e redução do pó de ferro pela análise dos resultados para os eletrodos VR/047 e VR/058 (Tabela 7).

Baseado nas considerações expostas anteriormente para o  $\text{CaCO}_3$ , aliado ao fato de que o aumento do teor de pó de ferro tenderia a aumentar a frequência de transferência, pela redução da tensão superficial, é possível justificar a tendência observada. É importante ressaltar, que neste caso, havia um maior número de ações no sentido da facilidade de transferência de gotas no eletrodo VR/047, do que ações contrárias, o que não se verificou no caso anterior.

## c) Influência do Fator de Revestimento

Na soldagem com os eletrodos VR/020 (com  $f=1,5$  e  $f=2,1$ ), não se pode chegar a uma relação da tendência do tamanho das gotas. Observou-se uma transferência globular para os dois tipos de eletrodos, com muitas explosões, salpicagem e variação do comprimento do arco, a ponto de causar grandes interferências no feixe de laser.



Ao contrário dos casos anteriores, onde foram observados poucos curtos-circuitos, o eletrodo com  $f=1,5$ , apresentou uma frequência considerável de curtos-circuitos. Acredita-se que como este eletrodo não apresentou efeito canhão, e tinha comportamento muito instável, as reduções do comprimento do arco sempre se faziam com curto-circuito da gota na poça de fusão

Neste caso, apenas o eletrodo V/046 ( $f=1,7$ ) teve a sua frequência de transferência definida, comprovando a tendência observada anteriormente, de melhores características com relação aos outros dois ( $f=1,5$  e  $2,1$ ).

#### d) Influência de Densidade do Pó de Ferro

Os eletrodos VR/046 e VR/047 apresentaram comportamentos distintos quanto a transferência globular observada. O VR/047 apresentou uma transferência globular mais uniforme e mais lenta, chegando algumas vezes a curto-circuitar a poça de fusão. Presume-se que o mais alto teor de  $O_2$  e  $H_2$ , característico do revestimento do eletrodo VR/046, pode causar uma maior efervescência no momento da formação e destacamento da gota, aumentando a frequência de transferência e reduzindo o tamanho médio das gotas. Acredita-se portanto, que neste caso, haveria uma contribuição maior das forças de expansão gasosa.

#### 4.3.2 - Corrente Contínua

Na soldagem em corrente contínua, observou-se qualitativamente, através da análise dos oscilogramas, uma maior ocorrência de curtos-circuitos do que em corrente alternada, principalmente na polaridade inversa. Os valores listados na Tabela

7 foram obtidos através da análise de aproximadamente 900 pontos de características dinâmicas para os eletrodos. Verificou-se ainda a predominância de transferência globular para todos os eletrodos.

Apenas dois eletrodos apresentaram uma maior ocorrência de curtos-circuitos em  $CC^-$ , o tipo comercial E-7018 e o VR/048.

#### a) Influência do $CaCO_3$ e $CaF_2$

Observa-se pela Tabela 7, que há uma tendência à redução da frequência de transferência com o aumento da  $CaCO_3$  (e redução de  $CaF_2$ ) em  $CC^+$ , apesar da pequena diferença entre o VR/018 e VR/019. No entanto, em  $CC^-$  registrou-se uma maior frequência para o eletrodo VR/019, enquanto o VR/018 apresenta uma frequência levemente menor do que em  $CC^+$ .

Estes resultados acompanham o verificado em C.A. A menor tendência da curva de inflexão em  $CC^+$ , pode ser justificada pelo fato de, nesta polaridade, não haver a influência da instabilidade causada pelo  $CaF_2$ .

Já a análise do número de curtos-circuitos mostra uma tendência mais definida. A maior frequência ocorreu em  $CC^+$ , e verifica-se uma redução do número de curtos-circuitos com o aumento de teor da  $CaCO_3$  e redução do  $CaF_2$ .

#### b) Influência do $CaCO_3$ e Pó de Ferro

Observa-se pela Tabela 7 que há um aumento do número de curtos-circuitos com o aumento do teor de  $CaCO_3$  tanto em  $CC^+$  como em  $CC^-$ , coerente com o verificado acima. Verificou-se neste caso,

grandes variações no comprimento do arco para os eletrodos VR/058 e VR/059, pois teve-se de usar o controle manual para evitar extinção. O alto índice de curtos-circuitos pode estar relacionado com este fato, que inclusive, foi acompanhado visualmente. O comportamento mais variável notado para o eletrodo VR/059, em CC<sup>-</sup> e C.A., causou grande interferência no feixe de laser, impossibilitando a sua ação.

Observou-se uma tendência à redução de frequência de transferência com a redução do teor de pó de ferro e aumento do  $\text{CaCO}_3$ , o que concorda com a análise em C.A.

#### c) Influência do Fator de Revestimento

A variação no fator de revestimento mostrou influenciar principalmente a transferência de metal quanto a frequência de curtos-circuitos.

O eletrodo VR/046 apresentou a maior frequência de curtos-circuitos, e a menor frequência de transferência de gotas. Caracterizando-se como o eletrodo de melhor comportamento neste grupo. O VR/020 com  $f=1,5$  apresentou menor frequência de curtos-circuitos do que o VR/046, mas, apresentou-se como o de maior frequência de transferência. No eletrodo com  $f=2,1$  registrou-se pouquíssimos curtos-circuitos, e uma frequência de transferência de metal intermediário entre o VR/046 e o de  $f=1,5$ .

Aparentemente, o aumento da frequência de transferência foi um pouco maior para os VR/020, devido a ação de maior instabilidade verificada nestes eletrodos, já que a composição química não variou.

#### d) Influência da Densidade e Granulometria do Pó de Ferro

Há uma leve tendência a redução da frequência de transferência, com a redução da densidade aparente do pó de ferro em CC. Entretanto, como pode ser visto principalmente em CC<sup>-</sup>, a redução é tão pequena, que supõe-se haver um efeito predominante da ação dos demais constituintes (CaF<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub>), aliado ao pequeno efeito da reação dos gases, como explicado na análise em C.A. Quanto a frequência de curtos-circuitos, observa-se que não há uma tendência bem definida nas duas polaridades (Tabela 7). Também não se verificou influência da granulometria sobre a frequência de transferência (VR/047 x VR/048).

#### 4.3.3 - Considerações Gerais

Um fator importante a se considerar na análise e discussão desses resultados, é a causa dos curtos-circuitos. Observou-se dois tipos de ocorrências. A primeira, é referente ao curto-circuito "natural"; a gota cresce e destaca-se da ponta do eletrodo por curto-circuito. A outra, é o curto-circuito forçado, devido a variação do comprimento do arco, fazendo com que, muitas vezes, o eletrodo toque a poça de fusão durante a formação da gota, prejudicando a transferência e grudando na poça. Outra consideração importante em relação à dificuldade de medição, é a "transferência repelida" onde a gota antes de se transferir, principalmente em CC<sup>-</sup>, movimenta-se em torno da ponta do eletrodo.

Estes aspectos característicos nos eletrodos ensaiados prejudicaram a aplicação do método proposto para verificação da transfe

rência de metal, por interferir no feixe de laser indevidamente. No entanto, novas tentativas tornam-se válidas, até se conseguir chegar a um método prático que solucione o problema difícil da verificação da transferência de metal através do arco de eletrodos revestidos.

#### 4.4 - Influência da Composição do Revestimento no Nível de Ruído e Geometria do Arco

Os resultados dos ensaios de nível de ruído, apresentados na Tabela 8, indicam de uma forma geral, comportamentos mais variáveis para a soldagem em  $CC^-$ . Em corrente alternada verifica-se valores intermediários entre  $CC^+$  e  $CC^-$ . A mesma tendência foi observada quanto às variações da forma geométrica do arco, acompanhadas pela sua projeção numa tela.

Hutt e Lucas (32) verificaram que as explosões e conseqüentes variações ocorridas nos arcos de soldagem, estão relacionadas com o momento de desprendimento das gotas durante a transferência de metal. No entanto, concluíram que os resultados disponíveis na literatura para soldagem com eletrodos revestidos, relacionam-se de uma forma muito genérica. Desse modo, um estudo mais aprofundado é importante para dirimir dúvidas e caracterizar os mecanismos influentes no comportamento do arco durante sua operação.

##### 4.4.1 - Corrente Alternada

Em corrente alternada observou-se pouca diferença entre os valores médios do nível de ruído medido para todos ele

trodos (70-74 Db(A)). No entanto, pelas faixas de variações, pode-se verificar comportamentos diferentes, como se verá a seguir. A frequência de explosões, outra grandeza que caracteriza o comportamento dos eletrodos, não pode ser detectada pelo medidor analógico de ruído. Sua análise foi, portanto, feita através do ouvido humano.

#### a) Influência do $\text{CaCO}_3$ e $\text{CaF}_2$

Observou-se uma leve tendência na redução do nível de ruído com o aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$  e redução de  $\text{CaF}_2$ . Ao mesmo tempo verificou-se um maior número de explosões e tendências a extinção no sentido do aumento do  $\text{CaF}_2$  e redução do  $\text{CaCO}_3$ .

A análise da forma geométrica do arco, mostrou-se prejudicada pelo efeito canhão, o qual foi mais pronunciado para os eletrodos VR/018 e VR/019. É importante ressaltar que estes critérios de análise do comportamento do arco sob o ponto de vista macroscópico; estão interrelacionados, e presume-se que a variação em um deles, acarreta necessariamente uma variação dos outros<sup>(31)</sup>.

Verificou-se um arco mais irregular para o eletrodo VR/046, observando-se uma maior variação no nível de ruído (69-77 Db(A)), enquanto os eletrodos VR/018 e VR/019 apresentaram faixas de variações equivalentes entre si (Tabela 8).

Pode-se identificar estes resultados com os de estabilidade do arco discutidos anteriormente, embora se tenha observado comportamentos muito similares entre os eletrodos VR/018 e VR/019.

#### b) Influência do $\text{CaCO}_3$ e Pó de Ferro

O eletrodo VR/047 apresentou os mais baixos níveis de ruído (64-76 Db(A)), enquanto para os eletrodos VR/058 e VR/059 os ní

veis de ruído se equivalem (66-78 Db(A)).

Observou-se uma tendência crescente do nível de ruído com o aumento do  $\text{CaCO}_3$  e redução do pó de ferro, embora não se tenha identificado diferenças marcantes entre o comportamento dos eletrodos VR/058 e VR/059.

A mesma tendência foi observada quanto ao número de explosões e variações da forma do arco, que apresentaram-se, da mesma forma anterior, similares com as de estabilidade do mesmo, discutida no item 4.1.

#### c) Influência do Fator de Revestimento (f)

Embora os valores médios do nível de ruído (73-74) não tenham diferido muito, observou-se uma maior faixa de variação para os eletrodos VR/020 (64-82 Db(A)).

Isto está, sem dúvida, relacionado com a grande instabilidade apresentada pelos eletrodos com  $f=1,5$  e  $f=2,1$ . A grande variação do comprimento de seus arcos e as maiores irregularidades observadas na transferência, resultando em grande números de explosões, justificam os comportamentos encontrados.

#### d) Influência da Densidade do Pó de Ferro

O eletrodo VR/047 apresentou comportamento diferente quanto ao nível de ruído e geometria do arco com relação ao eletrodo VR/046. Hutt já havia observado<sup>(32)</sup> a importância do oxigênio presente nos eletrodos revestidos, sobre a transferência de metal de adição. Durante a soldagem, verificou-se que algumas gotas de metal pareciam aumentar de tamanho e haviam maiores explosões em presença de monóxido de carbono (CO). No entanto, supos-se que a

reação do monóxido de carbono é mais dependente do tipo, número, distribuição e tamanho das inclusões reativas presentes na alma do eletrodo.

Pode-se supor também, que o alto teor de oxigênio presente no revestimento do eletrodo VR/046, possa gerar forças de expansão gasosa, que poderiam contribuir para um maior nível de ruído.

#### 4.4.2 - Corrente Contínua

Verifica-se um maior nível de ruído para todos os eletrodos na polaridade direta. A mesma tendência foi observada para a frequência de explosões. A forma geométrica do arco também foi mais uniforme na polaridade inversa. Esses resultados já eram esperados devido a ação desestabilizadora do  $\text{CaF}_2$  predominante, descrita anteriormente.

##### a) Efeito do $\text{CaCO}_3$ e $\text{CaF}_2$

Para os eletrodos VR/046, VR/018 e VR/019 observou-se um aumento no número e frequência de explosões para um aumento no teor de  $\text{CaF}_2$ , marcadamente em polaridade direta, devido a ação desestabilizadora dos ions  $\text{F}^-$ . Os níveis de ruído, em Db(A), apresentam-se levemente inferiores para o eletrodo VR/019 em  $\text{CC}^+$ , enquanto não se detectou diferenças entre os outros dois nesta polaridade.

Na polaridade direta, o eletrodo VR/046 apresentou um valor médio de nível de ruído, levemente superior aos dos VR/018 e VR/019 (Tabela 8). No entanto, a faixa de variação observada no medidor de ruído foi consideravelmente maior para o eletrodo com maior teor de fluorita (VR/046), sendo observado uma queda gradativa com a



redução do teor de  $\text{CaF}_2$  e aumento do  $\text{CaCO}_3$ .

Embora os eletrodos VR/018 e VR/019 tenham apresentado menores números de explosões e menores variações no nível de ruído, observou-se para esses eletrodos, as maiores variações da forma geométrica do arco, principalmente com relação a inconstância do seu comprimento. Este fato, relacionado ao efeito canhão, dificulta também a observação das variações do arco ao longo do seu raio.

#### b) Efeito do $\text{CaCO}_3$ e Pó de Ferro

Os valores médios para os níveis de ruído observados, foram levemente maiores para o eletrodo VR/047, no entanto, as grandes variações do comprimento do arco observadas para os eletrodos VR/058 e VR/059, resultam numa grande variação do nível de ruído, chegando a alcançar 24 Db(A) (para o eletrodo VR/059 em  $\text{CC}^-$ ) contra apenas 12 Db(A) para o eletrodo VR/047.

Registrou-se diferenças marcantes no comportamento do arco para os três eletrodos. O VR/059 apresentou o comportamento mais instável, com grandes variações do comprimento do arco nas duas polaridades. O aumento do teor de  $\text{CaCO}_3$  e redução do pó de ferro, tornou o arco mais instável geometricamente, apresentando maiores frequências de extinções e chegando inclusive ser necessário mantê-lo com a ação do controle manual sobre o automático, nas duas polaridades. A redução do pó de ferro, dito estabilizador de arco, e aumento do  $\text{CaCO}_3$  (devido ao efeito canhão), além do elevado teor de fluorita, justificam este comportamento.

#### c) Influência do Fator de Revestimento

Os comportamentos aqui registrados foram praticamente equivalentes

tes. Registrou-se grande instabilidade do arco, excesso de explosões e variações geométricas bruscas para os três tipos de eletrodos, marcadamente em polaridade direta.

O eletrodo VR/046 apresentou um comportamento levemente melhor com relação apenas ao número de explosões, sendo observado também menores frequências de variações bruscas do comprimento do arco.

#### d) Influência da Densidade e Granulometria do Pó de Ferro

Deste grupo de eletrodos, apenas o VR/046 destacou-se com seu comportamento mais instável, em polaridade direta. Não detectou-se diferenças consideráveis entre os eletrodos VR/047 e VR/048.

#### 4.4.3 - Considerações Gerais

Já é conhecida a dificuldade de se estabelecer critérios de avaliação do comportamento do arco<sup>(06, 32)</sup> relacionado com a sua forma geométrica, nível de ruído e explosões. Estes fenômenos dependem enormemente de outros fatores tais como: modo de transferência de metal, constância do comprimento do arco e, conseqüentemente, dos níveis de energia que envolvem o processo em cada instante, exigindo um estudo complementar das características dinâmicas do arco.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

O presente trabalho utilizou uma metodologia pioneira no Brasil, para o estudo do comportamento de um arco voltaico de soldagem com eletrodos revestidos. Uma montagem experimental foi desenvolvida, onde durante a operação do arco obtinha-se todos os dados possíveis para a avaliação do seu comportamento quanto a estabilidade (comportamento dinâmico), transferência de metal e características operacionais (variação da energia, geometria do arco e nível de ruído). Portanto, como conclusões dos estudos realizados, tem-se além dos resultados encontrados, uma avaliação da metodologia empregada, com o objetivo de facilitar a otimização desses métodos em estudos posteriores.

#### 5.1 - Influência da Composição do Revestimento

A observação do comportamento de um componente da escória, conjuntamente com variações de outros componentes, é muito difícil, apesar de mais real, devido a fenômenos interdependentes ou concorrentes. Entretanto, algumas tendências aparentemente ficaram claras, como se mostra a seguir:

5.1.1 - A fluorita mostrou ser o maior responsável pela queda da estabilidade de um arco. O seu efeito, apesar de poder ser amenizado com adição de elementos de fácil ionização, não pode ser suprimido. Por isto, o seu teor deve ser o míni

mo possível.

5.1.2 - Na soldagem em corrente contínua com polaridade direta, a fluorita mostrou exercer um efeito desestabilizador que pode ser atribuído aos íons  $F^-$  junto ao cátodo, predominante mesmo sobre outros efeitos estabilizadores.

5.1.3 - O carbonato de cálcio parece contribuir para estabilidade do arco em relação aos fenômenos físicos, mas em grandes quantidades pode provocar instabilidade por questões operacionais.

5.1.4 - A análise do comportamento do pó de ferro ficou prejudicada pela ação do alto teor de calcita, mas pode-se esperar uma melhora na estabilidade do arco com o aumento do seu teor.

5.1.5 - O fator de revestimento mostrou influenciar bastante a estabilidade do arco. Embora a análise do eletrodo com  $f=2,1$  tenha sido prejudicada pelo excessivo efeito canhão, acredita-se que para as mesmas condições de teste, há um ponto até onde a estabilidade aumenta com o fator de revestimento, para depois diminuir.

5.1.6 - A estabilidade do arco parece aumentar com a redução da densidade aparente do pó de ferro, para as condições testadas. Enquanto a ação da granulometria, verificada em corrente contínua, não permitiu conclusões seguras, devido a variação conjunta da densidade aparente do pó de ferro.

5.1.7 - Tomando-se como referência o eletrodo classe AWS E-7018 comercial testado, verificou-se que para as faixas de composições utilizadas, é necessário a adição de outros elementos que facilitem a estabilização do arco.

5.1.8 - A relação entre as intensidades das tensões de soldagem não foi proporcional à estabilidade do arco em todas as formulações testadas. Pois, em alguns casos as características operacionais podem apresentar efeitos dominantes sobre a física do arco.

5.1.9 - O carbonato de cálcio parece ser o principal responsável pelo aumento da tensão média de soldagem em corrente contínua, e pela maior variação da tensão eficaz em C.A.

5.1.10 - A análise da transferência de metal ficou prejudicada por problemas operacionais (efeito canhão), mas observou-se uma transferência mais irregular em corrente contínua na polaridade direta.

5.1.11 - Devido aos vários efeitos atuantes em conjunto sobre a frequência de transferência, não se pode tirar nenhuma relação genérica entre a composição do revestimento e o modo de transferência.

5.1.12 - As soldagens apresentam uma tendência a uma frequência maior de curtos-circuitos em corrente contínua na polaridade inversa.

## 5.2 - Metodologia

Com relação a metodologia utilizada, pode-se concluir que:

5.2.1 - A equação proposta por Pokhdonya et al para expressar o índice de estabilidade mostrou-se segura, apesar da complexidade para a medição de seus índices.

5.2.2 - O modelo de comportamento dinâmico proposto no item 2 mostrou-se adequado para estas condições.

5.2.3 - O controle da energia de soldagem, com utilização do microcomputador, mostrou-se importante para a determinação do comportamento estático do arco.

5.2.4 - O uso do microcomputador, para a determinação das curvas de tensão de soldagem, em corrente alternada, mostrou poder ser otimizado e substituir o uso do osciloscópio no estudo das características dinâmicas dos arcos, tornando-o menos complexo.

5.2.5 - O estudo da estabilidade do arco em corrente alternada pode ser utilizado como fator genérico para a determinação da estabilidade do arco.

5.2.6 - O método empregado para ensaios de abertura do arco não contribui muito para conclusões objetivas, uma vez que não se conseguiu analisar as características dinâmicas

do arco durante a sua ignição. É possível, porém otimizar este método, com o objetivo de registrar no osciloscópio de memória o instante de abertura do arco.

5.2.7 - Nos ensaios de extinção do arco, todos e eletrodos experimentais apresentam um comprimento final do arco maior em corrente contínua, polaridade direta. No entanto, a análise das características dinâmicas durante a extinção do arco apresentou a mesma tendência da estabilidade encontrada em corrente alternada. O comprimento final do arco parece estar relacionado com os níveis de energia envolvidos em cada polaridade, e deve ser analisado criteriosamente.

5.2.8 - O método proposto para a análise da transferência de metal de adição, mostrou-se prejudicado por problemas operacionais dos eletrodos. Embora tenha-se tentado diminuir as interferências no laser, com a adaptação de um filtro passa baixas, os resultados obtidos não foram satisfatórios em termos quantitativos. Obteve-se apenas uma idéia da tendência da frequência de transferência pela análise dos oscilogramas traçados pelo registrador x-y, possibilitando porém, uma análise comparativa.

5.2.9 - A análise da frequência de curtos-circuitos foi considerada satisfatória, no entanto, ao se detectar um instante de curto-circuito nas características dinâmicas do arco, não se sabe facilmente se foi um curto-circuito normal (devido a transferência) ou se foi induzido por uma excessiva variação do arco. Os curtos-circuitos puderam também ser detectados estatisticamente pela análise dos valores de tensão de soldagem

registrados pelo microcomputador, apesar de não serem valores ab  
solutos.

5.2.10 - A análise do nível de ruído e geometria do arco mostrou-se válida para o estudo da operacionalidade do arco. A otimização do método proposto, pode contribuir bastante para o estudo de transferência de metal, salpicagem e consequen  
tes explosões durante a operação de um arco.



## C A P Í T U L O VI

PROPOSIÇÃO DE NOVOS TRABALHOS

Foi constatada a importância da utilização do microcomputador no estudo da estabilidade do arco. Verificou-se que com a otimização do Software, pode-se tornar o estudo mais prático e mais preciso, possibilitando a análise do comportamento dinâmico da tensão e corrente durante toda a soldagem. Desse modo, todos os parâmetros para a determinação da estabilidade do arco ( $V_1$ ,  $t_1$  e  $I_1$ ), assim como as tensões e correntes médias e eficazes seriam determinadas diretamente pelo computador, com economia de tempo e com resultados mais precisos e representativos.

Um fator importante que deve ser observado em futuros trabalhos é a ação do efeito canhão na variação do comprimento do arco. A partir de um estudo preliminar, nas condições de teste, pode-se determinar a profundidade média do canhão, e com isto controlar o comprimento real do arco.

Seria ainda, muito importante se determinar uma relação entre as condições dinâmicas para a abertura do arco em corrente contínua, e aquelas para a reignição em corrente alternada. Para isto, ter-se-ia que desenvolver um método de ensaio que permitisse acompanhar o comportamento dinâmico da tensão durante a ignição em CC.

No campo do estudo da transferência de metal de adição, tem-se que criar condições viáveis que permitam acompanhar o processo, apesar de todas as dificuldades conhecidas.

A utilização do feixe de laser poderia ser otimizado na soldagem com eletrodos mais estáveis. No entanto, acredi

ta-se que qualquer que seja o método utilizado, este estudo deve ser acompanhado com a análise das características dinâmicas de tensão e corrente.

A verificação da viabilidade do uso de medidores de som mais sensíveis, que permitam, por exemplo obter espectros de ondas sonoras poderia também possibilitar um estudo mais preciso sobre a estabilidade e modo de transferência de um arco.

Como se vê, uma das propostas mais importantes deste trabalho é a provocação para a otimização de sua metodologia, que pode ser aplicada também no estudo de estabilidade de arcos em outros processos de soldagem como o MIG/MAG e arame tubular.

Além das sugestões quanto a metodologia no caso particular de eletrodos revestidos básicos, seria muito importante a continuação do trabalho com novas formulações dos revestimentos, para se definir alguns pontos obscuros, principalmente quanto as variações no fator de revestimento e das propriedades do pó de ferro. Seria interessante utilizar formulações mais próximas da comercial, para verificar se as tendências observadas se manteriam mesmo que em menor escala.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - QUITES, A.M.; DUTRA, J.C. - "Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico". 1979. Florianópolis, S.C. p. 33-36; 69-75; 129-148.
- (2) - GLICKSTEIN, S.S. - "Arc Modeling for Welding Analysis". In Arc Physics and weld Pool Behaviour. Vol. I Abington Hall. Cambridge 1980. Anais ... The Welding Institute. p. 01-16.
- (3) - BENGHT, A. and STIG, B. - "Resumo do Trabalho Apresenta do no Welding Gas Seminar 1974.
- (4) - KOCH, H. - "Manual de la Tecnologia de la Saldadura Elé trica por Arco. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, 1965. p. 24-31, 40-43.
- (5) - SCOTTI, A.; QUITES A.M.; FARIAS, J.P.; KOBAYASHI, Y. - "Características Dinâmicas de Eletrodos Revestidos". In: X Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. Vitô ria, E.S., Outubro, 1984, Anais ... ABM/ABS, p. 297-314.
- (6) - FARIAS, J.P.; KOBAYASHI, Y.; SCOTTI, A.; QUITES, A. M.; "Avaliação da Estabilidade de Eletrodos Revestidos". In: X Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. Vi tória , E.S., Outubro, 1984. Anais ... ABM/ABS. p.315-335.

- (7) - POKHODNYA, I. K.; et alii; - "Study of Alternating Current Arc Stability". In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour. Vol. I. Abington Hall. Cambridge, 1980. Anais ... The Welding Institute p. 93-99.
- (8) - JACKSON, C; E. - "Fluxes and Slags in Welding". In: Welding Research Council. Bulletin 190. Dec. 1973. p. 01.09.
- (9) - WEGRZYN, J.W. - "The Covered - Electrode Arc". In: Weld Pool Chem. and Metall. Vol. I. Abington Hall. Cambridge, 1980. Anais ... The Welding Institute, p. 241-250.
- (10) - POKHODNYA, I. K.; et alii - "The Emission of Eletrons and Positive Ions from a Weld Pool and the Stability of A.C. Arc Burn". In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour. Vol. I. Abington Hall. Cambridge, 1980. Anais... The Welding Institute. p. 87-92.
- (11) - MORRIS, A.D. and GORE, W.C. - "Analysis of the Direct-Current Arc". In: Welding Research Supplement. Welding Journal. March 1956. p. 135-160.
- (12) - SCHELLHASE, M.; WEINSCHENK, H.E. - "Dynamic Behaviour of Consumable Metal Arcs". In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour. Vol. I. Abington Hall. Cambridge, 1980. Anais ... The Welding Institute. p. 59-66.

- (13) - KLIMANT, U. - "Beitrag zum Werkstoffübergang beim Lichtbogenschweißen mit dick umhüllten Elektroden". Dissertation, 1967, Aachen.
- (14) - COE, F. R. - "Fluxes and Slags in Arc Welding". Abington Hall. Abington, Cambridge. The Welding Institute. November, 1978.
- (15) - WASZINK, J. H. and GRAAT, L. H. - "Experimental Investigation of The Forces Acting on a Drop of Weld Metal". Welding Journal. April, 1983. p. 108-116.
- (16) - LANCASTER, J. F. - "The Transfer of Metal from Coated Electrodes". In: Metal Construction and British Welding Journal. October, 1971. p. 370-373.
- (17) - ESSERS, W. G. and TICHELAAAR, G. W. - "Metal Transfer from Coated Electrodes". Metal construction, 3(4), 1971, 151-154.
- (18) - PANIBRATSEV, K. K.; CADYZHANSKII, A. and ZUBOV, A. "Modeling the Process of Droplet Formation and Transfer in Various Spatial Positions". In: Svar. Proiz. 1983. № 6. p. 37-38.
- (19) - BONISZEESKI, T. - "The Effects of Iron Powder in Basic Low Hydrogen All-Positional Electrodes". In: International Conference. Vol. 1. Abington Hall. Cambridge, 1979. Papers ... The Welding Institute.

- (20) - SHAFRANSKY, L. G. and ABRASHIN, A, V. - "The De-ionising Effect of Fluorspar in Welding with Electrode with Fluoride-calcium Type Coverings". Svar. Proiz. (12), 1974, p. 12-13.
- (21) - ZARUBA, I. I. - "Mechanism of Metal Spatter During Arc Welding". In: Aut. Svarka, 1970, nº 11, p. 12-16.
- (22) - SCHVCHENKO, G. D.; et alii - "Effect of Fluorspar on the Temperature of the Welding arc". Svar. Proiz. 1974, (11), p. 3.4.
- (23) - LAPIN, L. L.; TURKIN, P. S.; and SAMSONOV, V. I. "Effect of Fluorspar on The Radial Distribution of Temperature and Electrical Conductivity of the Electric Arc Running in Air". In: Svar. Proiz. 1983. (04). p. 8-10.
- (24) - MANZ, A. F. - "Welding Arc Sounds". In: Welding Journal (60). May, 1981. p. 23-27.
- (25) - SIMULADOR DE SOLDAGEM MANUAL, - "Projeto Pioneiro". LAMEP/LABSOLDA/U.F.S.C.; 1980 (projeto não Publicado).
- (26) - PAVLYUK, S. K. and BELOKON, V. M. - "On The Stability of the Process of Arc Ignition in Welding with a Consumable Electrode" In: Svar. Proiz. 1974, (4). p. 51-52.

- (27) - LANCASTER, J. F. - "The physics of Welding". 1ª Edi  
ção, Pergamon Press; Oxford, 1984.
- (28) - CONARCO - Alambres e Soldaduras, Correspondência com  
Raiter; Notas de Fabricação das Eletrodos Experimen  
tais e Trabalhos Realizados com Eletrodos Experi  
mentais. Bs. Aires 1974.
- (29) - JACKSON, C. E. - "The Science of Arc Welding". In:  
Welding Research Supplement. Welding Journal. April,  
1960. p. 129-140. May, 1960, p. 177-190. June,  
1960. p. 225-230.
- (30) - BOLEY, F. I. - "Plasma en el Laboratorio y en el  
Cosmos". Van Nostrand Company, Inc. 1968. p. 1-27;  
61-113.
- (31) - FRANK, Y.; SPEIGHT; and HALLOCK, C. - "Arc Welding  
and Cutting Noise". A research Report on On  
Aspect of the Welding Environment. American Welding  
Society. 1979.
- (32) - HUTT, G. A. and LUCAS, W. - "Arc Disturbances in  
Consumable Eletrodes Welding - A Review of the  
Literature". The Welding Institute. Feb. 1982.
- (33) - LUCAS, W. and BUTLER, M. - "An Evaluation of  
Minicomputador Techniques for Data Aquisition  
and Analysis in Arc Welding Process Research". In:

Research, Feb. 1981. The Welding Institute.

- (34) - MECHEV, V. S.; et alii - "Calculation of the Welding Arc Characteristics in Consumable Electrodes Welding". In: Svar Proiz. 1983. (07). p. 24-27.
- (35) - DONCKENKO, E. A. and PANASENKO, L. - "Electrodes with Double Layer Covering". Svar. Proiz. 1976. (05). p. 31.
- (36) - EARVOLINO, C. P. - "Evaluation of Moisture Resistant E-70XX Electrodes of Extended Exposure Times". In: Welding Journal. March, 1984. p. 36-38.
- (37) - HAZLETT, T. H. - "Coating Ingredients' Influence on Surface Tension, Arc Stability and Bead Shape". Welding Journal. Research Suppl. 1957. p. 18S-22S.



```

10 ! Ensaio Aquisicao ['v';'l']
20 ! "LAB SOLDA"
30 !
40 OPTION BASE 1
50 DIM BS[32],NS[32],CS[6],FS[4],TS[3],AS[4],DS[14],ES[3]
60 SUPLY v(500),I(500),A,M1,M2,D1,D2
70 LET BS,NS,CS,FS,TS,AS,DS=" "
80 INTEGER J,K,N,w,T,C
90 N=0 @ P=0 @ C=0
100 ON KEY# 3,"Arquiv" COSUB 1080
110 ON KEY# 1,"MEDE" COSUB 210
120 ON KEY# 2,"DISP" COSUB 1310
130 ON KEY# 6,"GRAVA" COSUB 350
140 ON KEY# 8,"    " FIN" GOTO 180
150 CLEAR @ W=0
160 KEY LABEL
170 IF W=1 THEN 150 ELSE 160
180 CLEAR 709 @ LOCAL 709
190 CLEAR @ DISP "** FIN **"
200 END
210 ! rece
220 OUTPUT 709 ;"VR5VD4TE0" @ W=0 @ C=0
230 OUTPUT 709 ;"TE2" @ CLEAR @ DISP "LEND0"
240 N=N+1
250 OUTPUT 709 ;"AC12"
260 ENTER 709 ; v(N)
270 OUTPUT 709 ;"AC10"
280 ENTER 709 ; I(N)
290 IF I(N)<.901 OR N=500 THEN 310
300 GOTO 240
310 OUTPUT 709 ;"TELTE"
320 ENTER 709 ; T
330 CLEAR 709
340 W=1 @ RETURN
350 ! grava
360 COSUB 610 ! monta
370 W=1 @ J=0 @ A=0 @ CLEAR
380 DISP "Entre c/ o num. da EXPERIENCIA"
390 INPUT ES
400 A=16*(N-1)/256
410 IF FP(A)<=.5 THEN J=IP(A)+1
420 IF FP(A)>.5 THEN J=IP(A)+2
430 CLEAR @ DISP "Num. de DADOS Coletados:";N-1
440 DISP "Tempo gasto:";T;"s"
450 DISP @ DISP "Regist. Fisicos brutos:";A
460 DISP "Regist. Fisicos do ARQUIVO:";J
470 DISP "::::::::::::::::::::::::::::::::::" @ DISP
480 DISP "Deseja continuar ?[S/N]"
490 INPUT BS
500 IF BS#"S" THEN 600
510 CLEAR @ DISP "### CRIANDO ARQUIVO DE DADOS ###"
520 CREATE "Exp"&ES,J
530 CLEAR @ DISP "### GRAVANDO ###"
540 ASSIGN# 1 TO "Exp"&ES
550 PRINT# 1 ; NS,CS,TS,AS,DS,T,N

```

```

550 PRINT# 1 ; NS,CS,TS,AS,DS,T,N
560 FOR K=1 TO N-1
570 PRINT# 1 ; V(K),I(K)
580 NEXT K
590 ASSIGN# 1 TO *
600 RETURN
610 ! monta
620 W=1 @ CLEAR
630 DISP "Executor ?(32cr)" @ DISP NS
640 INPUT BS@ IF BS="" THEN 650 ELSE BS=BS
650 DISP @ DISP "Eletrodo ?(5cr)";CS
660 INPUT BS@ IF BS="" THEN 670 ELSE CS=BS
670 DISP @ DISP "Fator de Revestimento ?(4cr)";FS
680 INPUT BS@ IF BS="" THEN 690 ELSE FS=BS
690 CLEAR @ DISP "Tipo de CORRENTE ?(3cr)";TS
700 INPUT BS@ IF BS="" THEN 710 ELSE TS=BS
710 DISP @ DISP "Comprimento do AFCC ?(4cr)";AS
720 INPUT BS@ IF BS="" THEN 730 ELSE AS=BS
730 DISP @ DISP "Entre c/ a data ?";DS @ DISP "DD/MM/HH:MM:SS"
740 INPUT BS@ IF BS="" THEN 750 ELSE DS=BS
750 RETURN
760 ! read
770 W=1 @ CLEAR
780 DISP "Entre c/ o num. da EXPERIENCIA"
790 INPUT BS
800 ASSIGN# 1 TO "Exp"&BS
810 READ# 1 ; NS,CS,TS,AS,DS,T,N
820 FOR K=1 TO N-1
830 READ# 1 ; V(K),I(K)
840 NEXT K
850 ASSIGN# 1 TO *
860 RETURN
870 ! calc
875 CLEAR @ DISP "*** CALCULANDO ***"
880 M1=0 @ M2=0 @ C=1
890 FOR J=1 TO N-1
900 M1=M1+V(J)
910 M2=M2+I(J)
920 NEXT J
930 M1=M1/(N-1)
940 M2=M2/(N-1)
950 D1=0 @ D2=0
960 FOR J=1 TO N-1
970 D1=D1+(V(J)-M1)^2
980 D2=D2+(I(J)-M2)^2
990 NEXT J
1000 D1=SQR(D1/(N-2))
1010 D2=SQR(D2/(N-2))
1020 CLEAR @ RETURN
1030 ! Pause
1040 DISP "-----"
1050 DISP "      Pressione+ [CONT]"
1060 PAUSE
1070 RETURN
1080 ! Arquiv
1090 CLEAR @ W=1
1100 GOSUB 760 ! read

```

```
1100 GOSUB 760 ! read
1110 GOSUB 870 ! calc
1120 DISP "Executor:";N$
1130 DISP @ DISP "Eletrodo:";C$
1140 DISP @ DISP "Fator de Revestimento:";F$
1150 DISP @ DISP "Tipo de Corrente:";T$
1160 DISP @ DISP "Comprimento do Arco:";A$
1170 DISP @ GOSUB 1030 ! pause
1180 K=0
1190 FOR J=1 TO N-1
1200 IF K=13 THEN 1210 ELSE 1220
1210 K=0 @ DISP @ GOSUB 1030 @ CLEAR
1220 K=K+1
1230 DISP USING 1240 ; J,V(J),I(J)
1240 IMAGE "#",3D,3X,M5D.2D,3X,M5D.3D
1250 IF J=N-1 AND K#13 THEN GOSUB 1030
1260 NEXT J
1270 CLEAR
1280 GOSUB 1350 ! P1
1290 GOSUB 1030 ! pause
1300 RETURN
1310 ! disp
1320 IF C=0 THEN GOSUB 870 ! calc
1330 GOSUB 1350 ! P1
1340 RETURN
1350 ! P1
1360 DISP USING 1390 ; "V",M1,D1
1370 DISP @ DISP
1380 DISP USING 1390 ; "I",M2,D2
1390 IMAGE 3A,"media=",M5D.3D,2X,"S=",5D.3D
1400 DISP @ DISP "Numero de Leituras=",N
1405 DISP @ DISP "Tempo Gasto:";T;"s"
1410 RETURN
```

```

10 ! Ensaio Aquisicao ['v']
20 ! "LAB SOLDA"
30 !
40 ! >>> DIM Z$(2108) ## V(300)
50 !
60 OPTION BASE 1
70 DIM BS[32],RS[3],Z$(1)
80 SHORT V(1),A
90 LET BS=" "
100 INTEGER J,K,W,T
110 T=0
115 CLEAR @ W=0
120 ON KEY# 3,"Arquiv" GOSUB 420
130 ON KEY# 1,"MEDE" GOSUB 680
140 ON KEY# 7,"Plot" GOSUB 900
150 ON KEY# 2,"PARE" GOSUB 780
160 ON KEY# 4,"DISP" GOSUB 550
170 ON KEY# 5,"PLOTTER" GOSUB 1060
180 ON KEY# 6,"GRAVA" GOSUB 260
190 ON KEY# 8," FIM" GOTO 230
210 KEY LABEL
220 IF W=1 THEN 115 ELSE 210
230 CLEAR 709 @ LOCAL 709
240 CLEAR @ DISP "** FIM **"
250 END
260 ! grava
270 W=1 @ J=0 @ A=0 @ CLEAR
280 DISP "Entre c/ o num. da EXPERIENCIA"
290 INPUT ES
300 DISP "Tempo gasto: ";T;"s"
310 DISP "::::::::::::::::::::::::::::::::::" @ DISP
320 DISP "Deseja continuar?[S/N]"
330 INPUT ES
340 IF BS#"S" THEN 410
350 CLEAR @ DISP "### CRIANDO ARQUIVO DE DADOS ###"
360 CREATE "Ex$"&ES,10
370 CLEAR @ DISP "### GRAVANDO ###"
380 ASSIGN# 1 TO "Ex$"&ES
390 PRINT# 1 ; T,V()
400 ASSIGN# 1 TO *
410 RETURN
420 ! read
430 W=1 @ CLEAR
440 DISP "Entre c/ o num. da EXPERIENCIA"
450 INPUT ES
460 ASSIGN# 1 TO "Ex$"&ES
470 READ# 1 ; T,V()
480 ASSIGN# 1 TO *
490 RETURN
500 ! pause
510 DISP "-----"
520 DISP " Pressione+ [CONT]"
530 PAUSE
540 RETURN
550 ! disp
560 K=0 @ CLEAR
570 DISP "Tempo gasto: ";T;"s"

```

```

570 DISP "Terpo gasto: "; T; "s"
580 FOR J=1 TO 150
590 IF K=12 THEN 600 ELSE 610
600 K=0 ? DISP @ GOSUB 500 ? CLEAR
610 K=K+1
620 DISP USING 630 ; J, V(J), J+150, V(J+150)
630 IMAGE 2("+", 3D, "=" , M2D.2D, 2X)
640 IF J=150 AND K#12 THEN GOSUB 500
650 NEXT J
660 CLEAR
670 RETURN
680 ! mode
690 CLEAR @ CLEAR 724 @ CLEAR 709
700 IOBUFFER Z$
710 OUTPUT 709 ; "TEOTE2TE"
720 WAIT 5000
730 OUTPUT 724 ; "BOSN9000SR3FLT1"
740 TRANSFER 724 TO Z$ FMS
750 STATUS Z$, 0 ; T0, T1, T2, T3
760 IF T3<>0 THEN 750
770 RETURN
780 ! pare
790 OUTPUT 709 ; "TEL"
800 ENTER 709 ; T
810 OUTPUT 709 ; "TD"
820 ENTER 709 ; DS
830 J=0 ? DISP "** CONVERTEENDO"
840 FOR I=1 TO 2100 STEP 7
850 J=J+1
860 V(J)=VAL(Z$[I, I+5])
870 NEXT I
880 CLEAR @ W=1
890 RETURN
900 ! plot
910 PLOTTER IS. 1
920 GCLEAR
930 FRAME
940 LOCATE 20, 130, 20, 95
950 SCALE 0, 80, -80, 80
960 FXD 0
970 LAXES 15, 10, 0, -80, 1, 2
980 AXES 1, 0, 0, 0, 5, 0
990 I=0
1000 MOVE I, V(1)
1010 FOR K=2 TO 160
1020 I=I+.55
1030 DRAW I, V(K)*11
1040 NEXT K
1050 RETURN
1060 ! plotter
1070 GOSUB 1160 ! off key
1080 CLEAR @ W=0
1090 ON KEY# 1, "PLOTT" COSUB 1220
1100 ON KEY# 6, "LABEL" COSUB 1390
1110 ON KEY# 4, "RET" GOTO 1140
1120 KEY LABEL
1130 IF W=1 THEN 1080 ELSE 1120

```

```
1130 IF W=1 THEN 1080 ELSE 1120
1140 GOSUB 1160 ! off key
1150 W=1 @ RETURN
1160 ! off key
1170 OFF KEY# 1 @ OFF KEY# 2
1180 OFF KEY# 3 @ OFF KEY# 4
1190 OFF KEY# 5 @ OFF KEY# 6
1200 OFF KEY# 7 @ OFF KEY# 8
1210 RETURN
1220 ! plot2
1230 PLOTTER IS 705 @ CLEAR @ W=1
1240 DISP @ DISP "Defina o local de Plotagem !"
1250 LOCATE
1260 SCALE 0,200,-80,80
1270 FXD 0 @ CSIZE 3,.5
1280 LAXES 16,5,0,-80,2,2,1
1290 AXES 2,0,0,0,4,0,1
1300 CLEAR @ DISP "** TROQUE A PENA... press.[CONT]"
1310 PAUSE
1320 I=0 @ MOVE 0,V(1)
1330 FOR K=2 TO 300
1340 I=I+.55
1350 DRAW I,V(K)*11
1360 NEXT K
1370 PENUP
1380 RETURN
1390 ! label
1400 CLEAR @ DISP
1410 DISP "Defina a ORIGEM do label ?" @ DISP "press.[ENTER]"
1415 DISP "Teço total GASTO: ";T;"s" @ DISP
1420 DIGITIZE X,Y
1430 MOVE X,Y
1440 CLEAR @ DISP "Entre c/ Label,Tamanho,Ldir."
1450 INPUT B$,X,Y
1460 DEG @ CSIZE X,.5 @ LDIR Y
1470 LABEL B$
1480 @=1 @ RETURN
```

A N E X O 3

```

10 ! Relatorio Ensaio ['v';'I'].
20 ! "LAB.SOLDA"
30 !
35 PRINTER IS 701,132
40 OPTION BASE 1
50 DIM BS[32],NS[32],CS[6],FS[4],TS[3],AS[4],DS[14],ES[3],IS[1]
60 SHORT V(1),I(1),A,M1,M2,D1,D2,M
70 INTEGER J,K,N,W,T,C
80 ON KEY# 3,"Arquiv" GOSUB 470
90 ON KEY# 8," FIM" GOTO 130
100 CLEAR @ C=0
110 KEY LABEL
120 IF C=1 THEN 100 ELSE 110
130 CLEAR @ DISP "*** FIM ***"
140 END
150 ! read
160 C=1 @ CLEAR
170 DISP "Entre c/ o num. da EXPERIENCIA"
180 INPUT ES
190 ASSIGN# 1 TO "Exp"&ES
200 READ# 1 ; M$,CS,TS,AS,DS,T,N
210 FOR K=1 TO N-1
220 READ# 1 ; V(K),I(K)
230 NEXT K
240 ASSIGN# 1 TO *
250 RETURN
260 ! calc
265 CLEAR @ DISP "### CALCULANDO ###"
270 M1=0 @ M2=0
280 FOR J=1 TO N-1
290 M1=M1+V(J)
300 M2=M2+I(J)*5000
310 NEXT J
320 M1=M1/(N-1)
330 M2=M2/(N-1)
340 D1=0 @ D2=0
350 FOR J=1 TO N-1
360 D1=D1+(V(J)-M1)^2
370 D2=D2+(I(J)*5000-M2)^2
380 NEXT J
390 D1=SQR(D1/(N-2))
400 D2=SQR(D2/(N-2))
410 CLEAR @ RETURN
420 ! pause
430 DISP "ACERTE O PAPEL -----"
440 DISP " Pressione+ [CONT]"
450 PAUSE
460 CLEAR @ RETURN
470 ! Arquiv
480 CLEAR @ C=0
484 DISP "Fator de Revestimento?"

```

```

484 DISP "Fator de Revestimento?"
485 INPUT FS
490 GOSUB 150 ! read
500 GOSUB 260 ! calc
510 GOSUB 420 ! pause
520 GOSUB 540 ! print
530 RETURN
540 ! print
550 N=N-1 @ IS="|"
560 M=N/4 @ J=0 @ W=0
570 GOSUB 840 ! Pr1
580 GOSUB 980 ! Pr2
590 FOR J=1 TO N STEP 4
600 K=K+1 @ W=W+1
610 IF K=37 AND W=37 THEN GOSUB 980 ! Pr2
615 IF K=55 AND W>37 THEN GOSUB 980 ! Pr2
620 IF W=IP(M+1) THEN GOSUB 1050 ! Pr3
630 IF W<=IP(M) THEN GOSUB 660 ! p4
640 NEXT J
650 C=1 @ RETURN
660 ! p4
670 I(J)=I(J)*5000 @ I(J+1)=I(J+1)*5000 @ I(J+2)=I(J+2)*5000 @ I(J+3)=I(J+
3)*5000
680 PRINT USING 685 ; J,V(J),I(J),IS,J+1,V(J+1),I(J+1),IS,J+2,V(J+2),I(J+2
),IS,J+3,V(J+3),I(J+3),IS
685 IMAGE 5X,4(X,"#",3D,3X,M3D.2D,5X,3D.2D,4X,A)
686 RETURN
690 ! p3
700 I(J)=I(J)*5000 @ I(J+1)=I(J+1)*5000 @ I(J+2)=I(J+2)*5000
710 PRINT USING 720 ; J,V(J),I(J),IS,J+1,V(J+1),I(J+1),IS,J+2,V(J+2),I(J+2
),IS
720 IMAGE 5X,3(X,"#",3D,3X,M3D.2D,5X,3D.2D,4X,A)
730 RETURN
740 ! p2
750 I(J)=I(J)*5000 @ I(J+1)=I(J+1)*5000
760 PRINT USING 770 ; J,V(J),I(J),IS,J+1,V(J+1),I(J+1),IS
770 IMAGE 5X,2(X,"#",3D,3X,M3D.2D,5X,3D.2D,4X,A)
780 RETURN
790 ! p1
800 I(J)=I(J)*5000
810 PRINT USING 820 ; J,V(J),I(J),IS
820 IMAGE 6X,"#",3D,3X,M3D.2D,5X,3D.2D,4X,A
830 RETURN
840 ! Pr1
850 PRINT TAB(5);"Exp"&ES;TAB(30);ES
860 PRINT
870 PRINT TAB(5);"Executor:";NS @ PRINT
880 PRINT TAB(5);"Eletrodo:";CS @ PRINT
890 PRINT USING 930 ; FS,PS,AS @ PRINT
900 PRINT TAB(5);"Tempo Gasto:";T;"s" @ PRINT

```



```
900 PRINT TAB(5);"Tempo Gasto:";T;"s" @ PRINT
910 PRINT USING 940 ; M1,D1 @ PRINT
920 PRINT USING 950 ; M2,D2 @ PRINT
930 IMAGE 4X,"Fator de Pevestimento:",4A,19X,"Tipo de Corrente:",3',10X,"C
omp. do Arco:",4A,"mm"
940 IMAGE 4X,"TENSÃO (media)=",M3D.2D,X,"V",5X,"S=",2D.3D
950 IMAGE 4X,"CORRENTE (media)=",3D.2D,X,"A",4X,"S=",2D.3D
960 PRINT @ PRINT
970 RETURN
980 ! Pr2
990 IF J#0 THEN GOSUB 420 ! pause
995 DISP " ### IRRADIANDO ###"
1000 PRINT USING 1010 ; IS,IS,IS,IS
1010 IMAGE 5X,4(X,"num.",2X,"TENSÃO(V)",2X,"CORRENTE(A)",X,A)
1020 PRINT USING 1030 ; IS,IS,IS,IS
1030 IMAGE 5X,4(30X,A)
1040 K=0 @ RETURN
1050 ! Pr3
1060 IF FP(K)=.25 THEN GOSUB 790 ! p1
1070 IF FP(K)=.5 THEN GOSUB 740 ! p2
1080 IF FP(K)=.75 THEN GOSUB 690 ! p3
1090 RETURN
```

```

10 ! Ensaio Aquisicao ['v']
20 ! "LAB SOLDA"
30 !
40 ! 'Processamento dos DADOS
50 ! 'Coletados.'
55 !
60 OPTION BASE 1
70 DIM ES[32],ES[3]
80 SHORT V(300),A,P,N,V0,V1,I
90 LET ES=""
100 INTEGER J,K,W,T
115 CLEAR @ W=0
120 ON KEY# 3,"Arquiv" GOSUB 420
140 ON KEY# 7,"plot" GOSUB 900
160 ON KEY# 4,"DISP" GOSUB 550
170 ON KEY# 5,"PLOTTER" GOSUB 1060
190 ON KEY# 8," FIM" GOTO 230
210 KEY LABEL
220 IF W=1 THEN 115 ELSE 210
230 CLEAR 709 @ LOCAL 709
240 CLEAR @ DISP "*** FIM ***"
250 END
420 ! read
430 W=1 @ CLEAR
440 DISP "Entre c/ o num. da EXPERIENCIA"
450 INPUT ES
460 ASSIGN# 1 TO "ExS"&ES
470 READ# 1 ; V()
480 ASSIGN# 1 TO *
485 GOSUB 1500
490 RETURN
500 ! pause
510 DISP "-----"
520 DISP " Pressione+ [CONT]"
530 PAUSE
540 RETURN
550 ! disp
560 K=0 @ CLEAR
580 FOR J=1 TO 150
590 IF K=12 THEN 600 ELSE 610
600 K=0 @ DISP @ GOSUB 500 @ CLEAR
610 K=K+1
620 DISP USING 630 ; J,V(J),J+150,V(J+150)
630 IMAGE 2("#",3D,"= ",#2D.2D,2X)
640 IF J=150 AND K#12 THEN GOSUB 500
650 NEXT J
660 CLEAR
670 RETURN
900 ! plot
910 PLOTTER IS 1
920 GCLEAR
930 FRAME
940 LOCATE 20,130,25,95
950 SCALE 0,80,-80,80
960 FXD 0
970 LAXES 15,10,0,-80,1,2
980 AXES 1,0,0,0,5,0
981 MOVE 4,80 @ LOG 2 @ LABEL "V(v)"
982 MOVE -10,-110 @ LOG 2 @ LABEL "Exr"&ES
983 MOVE 65,-105 @ LOG 2 @ LABEL "t(ms)"

```

```

983 MOVE 65,-105 @ LOGC 2 @ LABEL "t(ms)"
984 MOVE -10,-123 @ LOGC 2
985 LABEL USING "6A,2D.2D,2(4A,2E.2D)" ; "Vefc.=" ,V0," +P=" ,P," -N=" ,N
990 I=0
1000 MOVE I,V(1)
1010 FOR K=2 TO 160
1020 I=I+.555
1030 DRAW I,V(K)*11
1040 NEXT K
1045 MOVE 0,V0 @ DRAW 80,V0
1050 RETURN
1060 ! plotter
1070 GOSUB 1160 ! off key
1080 CLEAR @ W=0
1090 ON KEY# 1,"Plot'v'" GOSUB 1220
1100 ON KEY# 6,"LABEL" GOSUB 1390
1110 ON KEY# 4,"FET" GOTO 1140
1120 KEY LABEL
1130 IF W=1 THEN 1080 ELSE 1120
1140 GOSUB 1160 ! off key
1150 W=1 @ RETURN
1160 ! off key
1170 OFF KEY# 1 @ OFF KEY# 2
1180 OFF KEY# 3 @ OFF KEY# 4
1190 OFF KEY# 5 @ OFF KEY# 6
1200 OFF KEY# 7 @ OFF KEY# 8
1210 RETURN
1220 ! plot2
1230 PLOTTER IS 705 @ CLEAR @ W=1
1240 DISP @ LIMIT 0,270,0,200
1250 LOCATE 20,135,20,80
1260 SCALE 0,200,-80,80
1270 FXD 0 @ CSIZE 3.4,.6
1280 LAXES 16,5,0,-80,2,2,1
1290 AXES 2,0,0,0,4,0,1
1320 I=0 @ MOVE 0,v(1)
1330 FOR K=2 TO 300
1340 I=I+.555
1350 DRAW I,V(K)*11
1360 NEXT K
1361 MOVE 0,V0 @ DRAW 200,V0
1362 MOVE 5,100 @ CSIZE 4,.5 @ LABEL "Exp"&ES
1363 LABEL "Eletrodc:"
1364 MOVE -10,65 @ CSIZE 3.5,.7 @ DEG @ LDIR 90 @ LABEL "V(volts)"
1365 MOVE 120,-95 @ LDIR 0 @ LABEL "t(ms)"
1366 MOVE -5,-100 @ LOGC 2 @ LABEL USING "13A,2D.2D,5A" ; "Vefc.(total)=" ,
V0,"volts"
1367 LABEL USING "13A,2D.2D,5A" ; "Vefc.(posit)=" ,P,"volts"
1368 LABEL USING "13A,2D.2D,5A" ; "Vefc.(negat)=" ,N,"volts"
1379 PFNUP
1380 RETURN
1390 ! label
1400 CLEAR @ DISP
1410 DISP "Defina a ORIGEM do label ?" @ DISP "press.[ENTER]"
1415 DISP "Tempo total GASTO:";T;"s" @ DISP
1420 DIGITIZE X,Y
1430 MOVE X,Y
1440 CLEAR @ DISP "Entre c/ Label,Tamanho,Ldir."

```

```

1440 CLEAR @ DISP "Entre c/ Label,Tamanho,Ldir."
1450 INPUT BS,X,Y
1460 DEG @ CSIZE X,.5 @ LDIR Y
1470 LABEL BS
1480 W=1 @ RETURN
1500 ! calc
1501 ! Metodo de Integracao:
1502 ! SIMPSON
1505 W=1 @ CLEAR @ DISP "....em processamento..... AGUARDE !!!!!
!"
1510 LET L,A,K,P,N=0 @ I=1
1520 IF V(I)>0 THEN L=1
1530 IF V(I)<0 THEN L=2
1535 V1=V(I+1)
1540 IF L=1 AND V(I+1)<0 THEN 1565
1550 IF L=2 AND V(I+1)>0 THEN 1565
1560 I=I+1 @ IF L=0 THEN 1520 ELSE 1535
1565 I=I+1
1570 GOTO 1610
1580 IF V(I)<0 AND V(I+1)>0 THEN 1610 ELSE 1630 ! P+
1590 !
1600 IF V(I)>0 AND V(I+1)<0 THEN 1610 ELSE 1630 ! N-
1610 J=0 @ K=K+1
1620 J=J+1
1630 IF K=8 AND J=20 AND V(I+1)*V(I+2)<0 THEN 1680
1635 I=I+1 @ T=I/2 @ T1=I/2
1640 GOSUB 1720 ! area
1650 IF J<20 THEN 1620
1660 IF K<=8 AND L=1 THEN 1600
1670 IF K<=8 AND L=2 THEN 1580
1680 V0=SQR(1/16.666*(.555/3)*(A/8+(V1*11)^2+(V(I+1)*11)^2))
1690 P=SQR(2/16.666*(.555/3)*(P/8+(V1*11)^2+(V(I+1)*11)^2))
1700 N=SQR(2/16.666*(.555/3)*(N/8+(V1*11)^2+(V(I+1)*11)^2))
1710 RETURN
1720 ! area
1730 IF T=T1 THEN A=A+(V(I)*11)^2*4
1740 IF T<>T1 THEN A=A+(V(I)*11)^2*2
1750 IF V(I)>0 THEN 1760 ELSE 1780
1760 IF T=T1 THEN P=P+(V(I)*11)^2*4
1770 IF T<>T1 THEN P=P+(V(I)*11)^2*2
1775 GOTO 1600
1780 IF T=T1 THEN N=N+(V(I)*11)^2*4
1790 IF T<>T1 THEN N=N+(V(I)*11)^2*2
1800 RETURN

```

```

1500 ! calc
1501 ! Metodo de Integracao:
1502 ! TRAPEZIOS
1505 #=1 @ CLEAR @ DISP "....em processamento..... AGUAFEE !!!!!
!"
1510 LET L,A,K,P,N=0 @ I=1
1520 IF V(I)>0 THEN L=1
1530 IF V(I)<0 THEN L=2
1540 IF L=1 AND V(I+1)<0 THEN 1570
1550 IF L=2 AND V(I+1)>0 THEN 1570
1560 I=I+1 @ IF L=0 THEN 1520 ELSE 1540
1570 IF L=1 THEN 1600
1580 IF V(I)<0 AND V(I+1)>0 THEN 1610 ELSE 1630 ! P+
1590 !
1600 IF V(I)>0 AND V(I+1)<0 THEN 1610 ELSE 1630 ! N-
1610 J=0 @ K=K+1 @ IF K=9 THEN 1680
1620 J=J+1
1630 I=I+1
1640 GOSUB 1720 ! area
1650 IF J<20 THEN 1620
1660 IF K<=8 AND L=1 THEN 1600
1670 IF K<=8 AND L=2 THEN 1580
1680 V0=SQR(1/16.666*(A/8))
1690 P=SQR(2/16.666*(P/8))
1700 N=SQR(2/16.666*(N/8))
1710 RETURN
1720 ! area
1730 IF V(I)>=V(I+1) THEN A=A+.555*((V(I+1)*11)^2+((V(I)*11)^2-(V(I+1)*11)^2)/2)
1740 IF V(I)<=V(I+1) THEN A=A+.555*((V(I)*11)^2+((V(I+1)*11)^2-(V(I)*11)^2)/2)
1750 IF V(I)>0 THEN 1760 ELSE 1780
1760 IF V(I)>=V(I+1) THEN P=P+.555*((V(I+1)*11)^2+((V(I)*11)^2-(V(I+1)*11)^2)/2)
1770 IF V(I)<=V(I+1) THEN P=P+.555*((V(I)*11)^2+((V(I+1)*11)^2-(V(I)*11)^2)/2)
1775 GOTO 1800
1780 IF V(I)>=V(I+1) THEN N=N+.555*((V(I+1)*11)^2+((V(I)*11)^2-(V(I+1)*11)^2)/2)
1790 IF V(I)<=V(I+1) THEN N=N+.555*((V(I)*11)^2+((V(I+1)*11)^2-(V(I)*11)^2)/2)
1800 RETURN

```