

**ALEX AUGUSTO DOBIGNIES**

**ESTUDO DO RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO DE MATERIAL NA SOLDAGEM  
MIG/MAG EM CONDIÇÕES DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR  
CURTO-CIRCUITO FORÇADO**

**CURITIBA**

**2008**

**ALEX AUGUSTO DOBIGNIES**

**ESTUDO DO RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO DE MATERIAL NA SOLDAGEM  
MIG/MAG EM CONDIÇÕES DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR  
CURTO-CIRCUITO FORÇADO**

Dissertação apresentada como requisito para obter título de Mestre em Engenharia Mecânica do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da UFPR, na área de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Okimoto

**CURITIBA**

**2008**

Dobignies, Alex Augusto

Estudo do rendimento de deposição de material na soldagem MIG/MAG em condições de transferência metálica por curto-circuito forçado / Alex Augusto Dobignies. – Curitiba, 2008.

148 f.; il., tab., graf.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Okimoto  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Inclui bibliografia.

1. Soldagem MIG. 2. Soldagem MAG. 3. Processos de fabricação. 4. Curtos circuitos forçados. 5. Indutância. I. Okimoto. Paulo César. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 671.52

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**ALEX AUGUSTO DOBIGNIES**

**ESTUDO DO RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO DE MATERIAL NA SOLDAGEM  
MIG/MAG EM CONDIÇÕES DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR  
CURTO-CIRCUITO FORÇADO**

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO APRESENTADO AO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA DA UFPR SOB A ORIENTAÇÃO DO  
PROFESSOR PAULO CÉSAR OKIMOTO

**Área de concentração: Manufatura/Soldagem**

Banca Examinadora

---

**Prof. Dr. Américo Scotti**

**UFU**

---

**Prof. Dr. Ramón Paredes**

**UFPR**

---

**Prof. Dr. Paulo Okimoto.**

**UFPR**

Curitiba, 29 de fevereiro de 2008

## RESUMO

Sendo o mais importante processo de soldagem de metais a soldagem a arco com arame contínuo e proteção gasosa apresenta, entre outras características, relativa facilidade para a sua automação e elevada taxa de deposição. Neste processo a transferência metálica mais utilizada é por curto circuito pois, produz uma poça de fusão pequena e de rápido resfriamento, sendo por isto adequada para chapas, soldagem fora de posição e passes de raiz. Neste tipo de transferência alguns problemas de respingos poderão ocorrer. Porém podem ser eficientemente controlados por modificações de indutância, que são normalmente colocadas em série com o circuito de soldagem, diminuindo assim a velocidade de estabelecimento do pico de corrente de curto circuito. Na prática, muitas vezes é utilizada a transferência metálica por curto circuito forçado, transferência por curto-circuito em altas correntes, para aumentar a produtividade ou a penetração do cordão de solda no processo. Esta opção, contudo, apresenta uma maior sensibilidade às variações de seus parâmetros operacionais e uma maior tendência à ocorrência de problemas de instabilidade, gerando maior quantidade de respingos. O objetivo desta dissertação será avaliar o rendimento real do material depositado, tendo como parâmetro de controle a Indutância, distância bico de contato peça e velocidade de alimentação de arame. Para tanto, serão feitos testes em chapas de aço de onde serão feitas medições do peso inicial, antes da solda, e o peso final, depois da solda, para o cálculo do rendimento. Também será feita a coleta dos respingos pra a análise fotográfica da distribuição de tamanho. Dispondo de ferramentas como equipamento de aquisição de dados, oscilogramas de tensão e corrente, dados estatísticos e fotografias com microscópio serão avaliados os rendimentos e os respingos de solda obtidos. Verificou-se que a estabilidade do arco do curto-circuito forçado, o rendimento do material depositado e o tamanho dos respingos gerados são influenciados pela indutância, distância bico de contato peça e velocidade de alimentação de arame. Estes resultados poderão facilitar o melhor entendimento do processo de soldagem a arco, principalmente para o método de curto-circuito forçado, quando se têm dificuldades de selecionar parâmetros para ajuste.

**Palavras-chave:** Curto-circuito forçado. Rendimento de deposição. Indutância. Distância Bico de Contato Peça. Velocidade de Alimentação.

## ABSTRACT

The welding MIG/MAG, the most important process of welding metals the weld with arch with continuous wire and gaseous protection, presents, among other characteristics, relative easiness for it's own automation and a high deposition rate. In this process the metallic transfer used the most is short circuit because it produces a puddle of small fusion and of fast coldest, this way being appropriate for steel plates, out of position welding and root passes. In this kind of transfer some sparkling problems may occur, however, they can be efficiently controlled by inductance modifications which are usually placed in series with the welding circuit, this way reducing the speed of the short circuit's current pick establishment. In practice, a lot of times the metallic transfer by forced short circuit is used, the transfer by short circuit in average discharges, to increase the productivity or the welding penetration string in the process. This option, however, presents a larger sensivity to the variations of it's operational parameters and a larger tendency to the occurrence of instability problems generating a larger amount of sparkling. This paper's goal will be to evaluate the real performance of the deposited material, having as a control parameter the Inductance, the distance contact beak part and speed of wire supplying. Having this goal, they were made tests on steel plates from where were made measurements of it's initial weight, before welding , and the final weight, after welding , for the performance's calculation. It was also made the collection of the sparkling for the photographic analysis of the size distribution. Having tools as data acquisition equipment, tension and current graphics, statistical data and microscope pictures, the performance and the obtained welding was evaluated. It was verified that the stability of the forced short circuit's arch, the performance of the deposited material and the size of the generated sparkling are influenced by the inductance, by the distance between the contact beak part and speed of wire supplying. These results can facilitate the best understanding of the welding by arch process, mainly for the forced short circuit method when there are difficulties of selecting adjustment parameters.

**Key-Words** : Forced Short-circuit. Deposition Performance. Inductance. Distance Between Beak Part. Speed Supplying.

## LISTA DE FIGURAS

3.1	PRINCÍPIO BÁSICO DO PROCESSO MIG / MAG.....	16
3.2	EQUIPAMENTO BÁSICO PARA A SOLDAGEM MIG MAG.....	18
3.3	TOCHA PARA SOLDAGEM MIG – MAG.....	21
3.4	CURVAS DE VELOCIDADE DE FUSÃO DE ARAMES.....	25
3.5	TAXAS DE DEPOSIÇÃO COMUNS DE PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	26
3.6	DISTÂNCIA BICO DE CONTATO PEÇA (DBCP).....	27
3.7	RELAÇÃO ENTRE TENSÃO ARCO E CORRENTE DE SOLDAGEM.....	28
3.8	CÁLCULO INCLINAÇÃO DA CURVA DE SISTEMA DE SOLDAGEM.....	29
3.9	EFEITO DE INCLINAÇÃO GRANDE NA CURVA CARACTERÍSTICA.....	30
3.10	MUDANÇA NO AUMENTO DA CORRENTE DEVIDO INDUTÂNCIA.....	33
3.11	EFEITO DA INDUTÂNCIA NO ASPECTO DO CORDÃO DE SOLDA.....	34
3.12	CAMPO MAGNETICO NO INTERIOR DE UM CONDUTOR CILINDRICO.....	35
3.13	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FORMAÇÃO JATO DE PLASMA.....	36
3.14	SOPRO MAGNÉTICO POR MUDANCA NA DIREÇÃO DA CORRENTE.....	37
3.15	TRANSFERÊNCIA DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DO IIV.....	39
3.16	BALANÇO DE FORÇAS NA PONTA DO ELETRODO.....	40
3.17	MAPA DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA PARA MAG (GMAW).....	41
3.18	TRANSFERÊNCIA GLOBULAR REPULSIVA.....	43
3.19	OSCILOGRAMA DE CORRENTE TRANSFERÊNCIA GLOBULAR.....	43
3.20	OSCILOGRAMA PROCESSO COM TRANSFERÊNCIA GOTICULAR.....	45
3.21	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA PULSAÇÃO DE CORRENTE.....	46
3.22	TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO.....	48
3.23	CURTO-CIRCUITO , IMAGENS FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE.....	49
3.24	OSCILOGRAMA TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO.....	49
3.25	VARIAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO DE OPERAÇÃO.....	50
3.26	VARIAÇÃO CORRENTE MÉDIA E FATOR DE CURTO-CIRCUITO.....	51
3.27A	OSCILOGRAMA CURTO CIRCUITO BAIXO TEOR DE INDUTÂNCIA.....	52
3.27B	OSCILOGRAMA MESMAS CONDIÇÕES COM MAIOR INDUTÂNCIA.....	53
3.28	ÍNDICES DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO.....	54
3.29	DETALHE DA TRANSFERÊNCIA DURANTE CURTO-CIRCUITO.....	62
3.30	EFEITO DA INDUTÂNCIA NA CORRENTE DE CURTO.....	63
3.31	EFEITO “PINCH” INFLUÊNCIA NA QUANTIDADE DE RESPINGOS.....	64
4.1	CORPOS DE PROVA.....	65
4.2	FONTE DE SOLDAGEM.....	66
4.3	SISTEMA DE MOVIMENTAGAO E FIXAÇÃO DA TOCHA.....	67
4.4	COLETOR DE RESPINGOS.....	68
4.5	MEDIDOR DO COMPRIMENTO DE ARAME (TRILHO).....	69
6.1	RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO X INDUTÂNCIA DBCP 8MM.....	76
6.2	RENDIMENTO DEPOSIÇÃO X INDUTÂNCIA DBCP 12MM.....	76
6.3	RENDIMENTO DEPOSIÇÃO X VELOCIDADE ARAME DBCP 8MM.....	77
6.4	RENDIMENTO DEPOSIÇÃO X VELOCIDADE ARAME DBCP 12MM.....	78
6.5	RENDIMENTO DEPOSIÇÃO X DBCP PARA INDUTÂNCIA 0%.....	79
6.6	RENDIMENTO DEPOSIÇÃO X DBCP PARA INDUTÂNCIA 40%.....	79
6.7	RENDIMENTO DEPOSIÇÃO X DBCP PARA INDUTÂNCIA 80%.....	80
6.8	COMBINAÇÃO A.....	83
6.9	COMBINAÇÃO B.....	85
6.10	COMBINAÇÃO C.....	87

6.11	COMBINAÇÃO J.....	89
6.12	COMBINAÇÃO K.....	91
6.13	COMBINAÇÃO L.....	93
6.14	COMBINAÇÃO D.....	97
6.15	COMBINAÇÃO E.....	99
6.16	COMBINAÇÃO F.....	101
6.17	COMBINAÇÃO M.....	103
6.18	COMBINAÇÃO N.....	105
6.19	COMBINAÇÃO O.....	107
6.20	COMBINAÇÃO G.....	111
6.21	COMBINAÇÃO H.....	113
6.22	COMBINAÇÃO I.....	115
6.23	COMBINAÇÃO P.....	117
6.24	COMBINAÇÃO Q.....	119
6.25	COMBINAÇÃO R.....	121
6.26	IPM X DBCP (VA 12M/MIN).....	131
6.27	IPM X DBCP (VA=16M/MIN).....	132
6.28	IPM X DBCP (VA=20M/MIN).....	133
6.29	REND X IPM (DBCP 8MM).....	136
6.30	REND X IPM (DBCP 12MM).....	137
6.31	REND X DIDTS (DBCP 8MM).....	138
6.32	REND X DIDTS (DBCP 12MM).....	139
6.33	REND X DIPM (DBCP 8MM).....	140
6.34	REND X DIPM (DBCP 12MM).....	141
6.35	REND X TMC (DBCP 8MM).....	142
6.36	REND X TMC (DBCP 12MM).....	143

## LISTA DE TABELAS

3.1	VALORES COMPARATIVOS DE DENSIDADE DE CORRENTE.....	17
3.2	FAIXA DE CORRENTE DE SOLDAGEM ARAMES DE AÇO CARBONO.....	23
3.3	COEFICIENTES EQ. DE VELOCIDADE DE FUSÃO P/ AÇO CARBONO.....	24
3.4	CORRENTES TÍPICAS DE CURTO-CIRCUITO REQUERIDAS.....	31
3.5	FORMAS USUAIS DE TRANSFERÊNCIA DE ACORDO COM O (IIW).....	38
3.6	CORRENTE DE TRANSIÇÃO ARAMES DE AÇO E ALUMINIO.....	44
5.1	COMBINAÇÕES TESTADAS.....	71
6.1	RESULTADOS DE RENDIMENTOS DOS ENSAIOS EXECUTADOS.....	74
6.2.1	IMAGENS RESPINGOS E RENDIMENTOS, VELOCIDADE 12 M/MIN.....	82
6.2.2	IMAGENS RESPINGOS E RENDIMENTOS, VELOCIDADE 12 M/MIN.....	96
6.2.3	IMAGENS RESPINGOS E RENDIMENTOS, VELOCIDADE 12 M/MIN.....	110
6.3	RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS TESTES.....	124
6.4	CLASSIFICAÇÃO VELOC. DE ALIMENTAÇÃO E DBCP 8MM.....	125
6.5	CLASSIFICAÇÃO VELOC. DE ALIMENTAÇÃO E DBCP 12MM.....	125
6.6	COMPARAÇÃO DOS TESTES A E J.....	129
6.7	COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES J, K, L.....	134

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCF	Curto circuito forçado
c	Consumo linear em metros
<b>COMB</b>	<b>Combinação</b>
DidtS	DI/Dt subida (corrente)
Dlpm	Desvio-padrão dos picos de corrente
DPCP	Distância bico de contato peça
Dpmc	Desvio-padrão dos períodos de curto-circuito
lab	Corrente do arco aberto (A)
Icc	Corrente de curto-circuito (A)
Ibcc	Corrente no início do curto-circuito (A)
Iecc	Corrente final do curto-circuito (A)
IND	Indutância:
Ipm	Corrente de pico média
me	Massa linear do arame em g/m
Mf	Massa final do corpo em g
Mi	Massa inicial do corpo em g
MIG/MAG	Metal inert Gas / Metal active gas
nr	Rendimento real de deposição
Tmc	Média dos períodos de curto-circuito
tcc	Tempo de duração do curto (s)
tab	Tempo do arco aberto (s)
Um	Tensão média
Ui	Tensão de reignição do arco após o fim do curto-circuito (V)
Uab	Tensão do arco aberto (V)
Ucc	Tensão durante o curto circuito (V)
Ubcc	Tensão quando inicia o curto (V)
Uecc	Tensão quando termina o curto (V)
VA	Velocidade de alimentação do arame

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
3.1	PROCESSO MIG/MAG.....	16
3.2	EQUIPAMENTOS .....	18
3.3	FONTES DE ENERGIA .....	19
3.4	TOCHAS, BICOS DE CONTATO E BOCAIS.....	20
3.5	ALIMENTADOR DE ARAME.....	21
3.6	CONSUMÍVEIS.....	21
3.7	GASES DE PROTEÇÃO.....	22
3.8	PARÂMETROS DE CONTROLE DE SOLDAGEM.....	22
3.9	DIÂMETROS E COMPOSIÇÃO DO ARAME.....	23
3.10	VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO E FUSÃO DO ARAME.....	23
3.11	EXTENSÃO LIVRE ELETRODO E DISTÂNCIA BICO CONTATO PEÇA.....	26
3.12	TENSÃO DO ARCO.....	28
3.12.1	Inclinação da Curva.....	29
3.13	VELOCIDADE DE SOLDAGEM DE DESLOCAMENTO.....	31
3.14	INDUTÂNCIA.....	31
3.15	EFEITOS MAGNÉTICOS.....	35
3.15.1	Sopro Magnético.....	36
3.16	TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	37
3.16.1	Teorias para Transferência de Metal na Soldagem Mag.....	39
3.16.2	Identificação do Tipo de Transferência .....	41
3.16.3	Transferência Globular.....	42
3.16.4	Transferência Goticular.....	44
3.16.5	Transferência com Corrente Pulsada.....	45
3.16.6	Transferência por Curto-Circuito .....	46
3.16.7	Crêterios de Estabilidade do Arco em Transferência por Curto-Circuito.....	54
3.16.8	Curto Circuito-Forçado.....	57
3.17	ORIGEM DOS RESPINGOS.....	59
3.17.1	Efeito da Indutância na Estabilidade do Arco e Formação de respingos.....	60
<b>4</b>	<b>MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS</b> .....	65
4.1	CORPOS DE PROVA.....	65
4.2	ELETRODOS.....	65
4.3	GÁS DE PROTEÇÃO.....	65
4.4	FONTE DE SOLDAGEM.....	66
4.5	SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO DA TOCHA.....	66
4.6	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	67
4.7	COLETA DE RESPINGOS.....	68
4.8	MEDIDOR DO COMPRIMENTO DE ARAME (TRILHO).....	68
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	70
5.1	TESTES PRELIMINARES.....	70
5.2	COMBINAÇÕES DE TESTES (PLANEJAMENTO).....	70
5.3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	72
5.4	AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO.....	72
5.5	AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS E GRÁFICOS.....	73
5.6	AVALIAÇÃO DOS RESPINGOS.....	73
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	74

6.1	RESULTADOS DE RENDIMENTOS.....	74
6.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE RENDIMENTOS.....	75
6.3	RESULTADOS DOS RESPINGOS E OSCILOGRAMAS.....	81
6.3.1	Apresentação dos Resultados dos Respingos e Oscilogramas.....	81
6.4	RESULTADOS ESTATÍSTICOS.....	124
6.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS.....	126
6.5.1	Efeito da Variação da Velocidade do Arame.....	126
6.5.2	Efeito da Variação da Distância Bico de Contato Peça (DBCP).....	130
6.5.3	Efeito Da Variação Indutância.....	133
6.6	Gráficos complementares dos Dados Estatísticos.....	135
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>144</b>
7.1	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	145
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>146</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Dos processos de soldagem, o processo MIG/MAG tem se revelado, atualmente, como aquele de maior ascensão e utilização no ambiente industrial, decorrente de sua alta produtividade, boa qualidade dos cordões de solda, facilidade de operação e automação. Neste processo a transferência metálica mais utilizada é por curto circuito, pois produz uma poça de fusão pequena e de rápido resfriamento, sendo por isto adequada para chapas finas, soldagem fora de posição e passes de raiz.

Na prática, a indústria para atingir determinados objetivos, faz a transferência do material fundido por curto-circuito ser elevada a altos níveis de corrente, para aumentar a produtividade ou penetração da solda, sendo esta prática classificada como Curto-Circuito Forçado (CCF). Este modo de transferência alia as propriedades de alta produtividade e penetração da transferência goticular, devido as altas correntes utilizadas, e o baixo aporte térmico característico do curto-circuito.

Em compensação o problema da instabilidade de arco, que gera diversos problemas, é de difícil controle. Se para o curto-circuito convencional em que são usadas baixas correntes a instabilidade já é um problema difícil de ser controlado, logo, para velocidades de corrente ainda mais elevadas esses problemas se intensificam, a sensibilidade a mudanças de variáveis é maior e o controle da estabilidade é ainda pior.

Essa instabilidade pode gerar problemas de respingos que são o resultado do material que deveria ser depositado mas, que devido principalmente a uma instabilidade do arco na transferência, transforma-se em salpicos durante a fusão do material de adição e material de base. Além de causar um custo com a perda de material que deveria ser depositado os respingos geram um posterior retrabalho para retirá-los, pois grudam ao redor da região em que foi feita a solda.

Quando a quantidade de respingos gerada durante a solda é elevada, além dos gastos adicionais para removê-los, tem-se uma situação onde o soldador está sujeito a um maior desconforto e uma maior dificuldade de visualização da poça de soldagem, que pode induzir o mesmo a produzir uma solda com defeitos.

A necessidade de melhorar a qualidade, minimizar os custos e reduzir os tempos em produção faz com que se busquem pesquisas na tentativa de se controlar melhor o processo e minimizar os efeitos da instabilidade na formação dos

respingos. Muitos estudos buscam entender e quantificar a influência que cada fator têm na instabilidade do arco para tentar minimizar esse problema, mas normalmente estes estudos não são quantificados com precisão.

Sendo a quantidade de respingos uma medida de qualidade do processo, principalmente na questão de custos e retrabalho, e que está diretamente relacionada a estabilidade do arco, muitos autores pesquisaram o comportamento e estabilidade do arco para Curto circuito de diversas maneiras. Harwig (2006, p. 53) estudou o comportamento do arco através de métodos como modelamento matemático com shadowgrafia. Subramaniam (1999, p. 35) analisou o comportamento do arco através de modelamentos matemáticos da aquisição dados estatísticos e oscilogramas, Hermans (1999, p. 139) estudou o comportamento e estabilidade do processo por modelamento matemático relacionado às oscilações da poça de fusão. Kang (2005, p. 240) verificou especificamente o mecanismo de produção de respingos através do cálculo numérico da relação dos oscilogramas obtidos e medição do volume das gotas depositadas em cada curto-circuito. Kang (2003, p. 245) também estudou especificamente a estimação da geração de respingos em curto-circuito para MIG/MAG coletando os respingos gerados para pesagem e usando os dados estatísticos otimizados por uma rede neural, e, por fim, Kobayashi (2002, p. 139) estudou o rendimento real de deposição do processo MIG/MAG com arame tubular fazendo uma relação do material depositado na peça com o material que deveria ter sido depositado se não houvesse perdas, tendo assim o rendimento real de deposição e a sua relação com a formação de respingos.

## 2. OBJETIVOS

Para quantificar o efeito das variáveis na formação dos respingos no CCF, neste trabalho será focado o estudo no rendimento de deposição no modo de transferência por curto circuito forçado (CCF). O objetivo será avaliar o rendimento do material depositado tendo como parâmetros de controle a Indutância, distância de bico de contato peça (DBCP), velocidade de alimentação de arame ( $V_a$ ) e tensão ( $V$ ). Para isso serão coletados dados estatísticos, coletas de respingos e cálculo de rendimento de material depositado.

Sabe-se que o rendimento está relacionado à estabilidade do arco e conseqüente quantidade de respingos. Baixos rendimentos significam maiores perdas na forma de respingo para o tipo de transferência por curto-circuito. Com base no entendimento da influência das variáveis nesse rendimento e formação de respingos o CCF poderá ser melhor compreendido e a estabilidade da transferência melhor controlada. O rendimento de deposição para o modo por curto-circuito foi estudado por Kobayashi (2002, p. 145) e espera-se que o rendimento caia para o modo curto-circuito forçado.

Existem certa concorrência e dúvidas na utilização entre o CCF e o arame tubular, uma vez que o arame tubular também é caracterizado pela alta capacidade de deposição e boa qualidade de solda. Acredita-se que o modo de transferência por CCF, apesar de apresentar altas taxas de deposição, apresenta baixos rendimentos e dificuldades de remoção dos respingos em relação ao arame tubular, como citado em Joaquim (2003, p. 65).

Apesar de ser um processo de soldagem muito usual, a literatura corrente não explora a fundo alguns aspectos importantes para um melhor conhecimento do processo de CCF. Através desse entendimento é possível proporcionar, durante a soldagem, um melhor controle deste modo de transferência metálica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PROCESSO MIG/MAG

A soldagem a arco gás metal (MIG/MAG ou Gás metal *arc Welding*- GMAW) é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça (metal de base) com proteção de gás como descrito na figura 3.1 (MIG/MAG WELDING, 2003; MODENESI, 2000, p. 137).

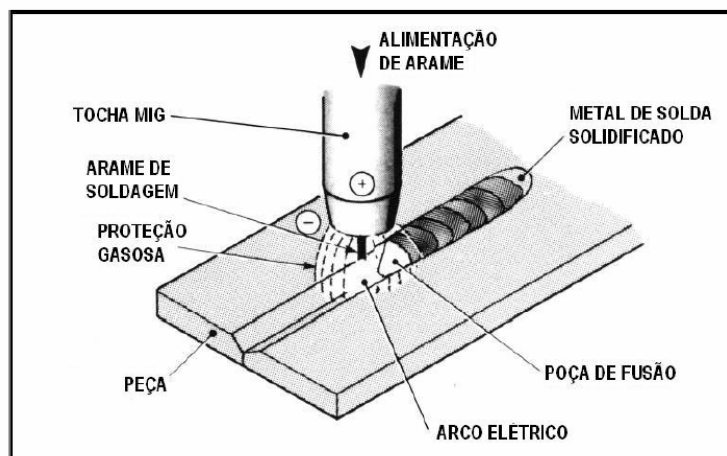


Figura 3.1 - Princípio básico do processo MIG / MAG.

É conhecida pelas denominações de MIG, quando a proteção gasosa utilizada for constituída de um gás inerte, ou seja um gás normalmente monoatômico como Argônio ou Hélio, e que não tem nenhuma atividade física com a poça de fusão e MAG, quando a proteção gasosa é feita com um gás dito ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão, normalmente CO<sub>2</sub> - dióxido de Carbono. GMAW, (abreviatura do inglês Gás Metal *Arc Welding*) que é a designação que engloba os dois processos acima citados. Os dois processos diferem entre si unicamente pelo gás que utilizam, uma vez que os componentes utilizados são exatamente os mesmos. Uma das características básicas deste processo, em relação aos outros processos de soldagem, é sua alta produtividade, que é motivada, além da continuidade do arame, pelas altas densidades de corrente que o processo pode ser utilizado.

A Tabela 3.1 abaixo apresenta uma comparação entre os valores de densidade de corrente dos processos MIG/MAG e eletrodo revestido (GIMENES, 2005, p. 15).

TABELA 3.1 - VALORES COMPARATIVOS DE DENSIDADE DE CORRENTE

<i>Processo</i>	<i>Densidade de Corrente</i>
E. revestido	5 a 20 A/mm <sup>2</sup>
MIG MAG	100 a 250 A/mm <sup>2</sup>

De um modo geral, pode-se dizer que as principais vantagens da soldagem MIG MAG são:

- Alta taxa de deposição e alto fator de trabalho do soldador, alta produtividade;
- Grande versatilidade, quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis;
- Não existência de fluxos de soldagem e, conseqüentemente, ausência de operações de remoção de escória;
- Processo automatizável, exigência de menor habilidade do soldador, quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos;
- Baixo custo;
- Cordão de solda com bom acabamento;
- Gera pouca quantidade de fumos;
- Soldas de relativa boa qualidade.

As principais limitações da soldagem MIG/MAG são:

- Regulagem do processo bastante complexa. Necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para solda, dificultada pela forte interdependência destes e por sua influência no resultado final da solda produzida;
- O maior custo do equipamento, a maior necessidade de manutenção deste, em comparação com o equipamento para soldagem com eletrodos revestidos;
- Não deve ser utilizado em presença de corrente de ar;
- Menor variedade de consumíveis;
- Posição de soldagem limitada;
- Probabilidade elevada de gerar porosidade no cordão de solda;

- Produção de respingos.

Segundo Modenesi (2000, p. 65):

[...] o processo de soldagem MIG/MAG pode ser utilizado em materiais em uma ampla faixa de espessuras. No Brasil, o diâmetro dos arames-eletrodo normalmente utilizados varia entre 0,8 e 1,2 mm. No Japão, encontramos arames de menores diâmetros (0,5 mm) que irão facilitar os trabalhos em posições de soldagem diferentes da posição plana. A transferência contínua de metal pela coluna de arco faz com que a eficiência do calor adicionado seja superior a maioria dos processos. A transferência é tão eficiente neste processo que até elementos muito ativos como o Titânio conseguem ser recuperados no metal de solda com relativa eficiência, desde que presentes no arame em forma de elementos de liga.

### 3.2 EQUIPAMENTOS

O processo de soldagem MIG/MAG é considerado um processo semi-automático, em que a alimentação do arame-eletrodo é feita mecanicamente através de um alimentador motorizado, ficando para o soldador a responsabilidade pela iniciação e interrupção do arco, além da condução da tocha durante a execução da soldagem. A alimentação do arco é garantida pela contínua alimentação do arame-eletrodo, enquanto que o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, dentro de certos limites, independente dos movimentos do soldador. O calor gerado pelo arco é usado para fundir as peças a serem unidas e o arame-eletrodo que é transferido para a junta como metal de adição (MIG/MAG WELDING, 2003; MODENESI, 2000).

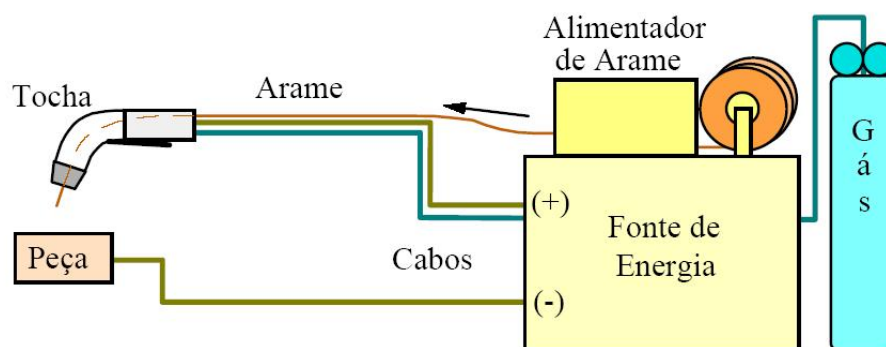


Figura 3.2 - Equipamento básico para a soldagem MIG/MAG

O equipamento básico para soldagem MIG/MAG, Figura 3.2, consiste de uma fonte de energia, uma tocha de soldagem com um jogo de bocais, um alimentador de arame, um par de cabos elétricos, um jogo de válvulas redutoras para o gás de proteção, canalizações para transporte do gás, sistema de controle, uma fonte para o gás de proteção e uma garra para fixação do cabo a peça. Estes equipamentos podem ser vistos na figura acima e são descritos em seguida.

### 3.3 FONTES DE ENERGIA

Fontes de energia para soldagem a arco voltaico podem ser consideradas simplesmente como o ponto de alimentação da energia elétrica ao processo. Existem três requisitos básicos para uma fonte de energia para soldagem a arco:

- Produzir saídas de corrente e tensão a níveis e com características adequadas para o processo de soldagem (baixa tensão e alta corrente);
- Permitir o ajuste adequado dos valores de corrente e/ou tensão para aplicações específicas;
- Controlar a variação e a forma de variação dos níveis de corrente e/ou tensão de acordo com os requerimentos do processo de soldagem e da aplicação.

Adicionalmente, o projeto de uma fonte para soldagem precisa atender outros requisitos, tais como:

- Estar em conformidade com normas e códigos relacionados com a segurança e funcionalidade;
- Apresentar resistência e durabilidade à ambientes fabris, com instalação e operação simples e seguras.

Entretanto, o desempenho dos processos de soldagem (qualidade e produtividade) é enormemente influenciado pelas características das fontes de energia. Um mesmo conjunto de parâmetros que teria comprovado sua eficácia num certo equipamento pode não demonstrar o mesmo desempenho quando ajustado em outro equipamento. Isto se deve às diferenças construtivas das fontes, que

afetam o desempenho das mesmas. A transportabilidade de um procedimento usado com sucesso em um equipamento pode ficar prejudicada. Desta forma, um maior conhecimento das características e princípios de funcionamento das fontes de energia torna-se condição necessária. Os comportamentos estáticos e dinâmicos do sinal de saída são duas características importantes que determinam o funcionamento de uma fonte de soldagem.

De acordo com Scotti (2001, p. 389),

[...] a primeira característica é determinada pela curva corrente-tensão (conhecida como Característica Estática da Fonte - CEF) para cada ajuste (regulagem) de trabalho possível na fonte. A segunda característica é influenciada pela indutância da fonte, correspondendo ao tempo necessário gasto pela fonte para permitir alterações das condições de regime (resposta dinâmica). A determinação destas características das fontes possibilita não só um melhor entendimento do processo de soldagem, como também intercambiar parâmetros entre equipamentos com maiores chances de acerto. Uma padronização desta determinação permite ainda aplicar estes dados em controle de qualidade de fabricação e manutenção dos equipamentos.

### **3.4 TOCHA, BICOS DE CONTATO E BOCAIS**

Segundo Gimenez (2005, p. 132) a tocha de soldagem consiste basicamente de um bico de contato, que faz a energização do arame-eletrodo, de um bocal que orienta o fluxo de gás protetor e de um gatilho de acionamento do sistema. O bico de contato é um pequeno tubo à base de cobre, cujo diâmetro interno é ligeiramente superior ao diâmetro do arame-eletrodo, e serve de contato elétrico deslizante. O bocal é feito de Cobre ou material cerâmico e deve ter um diâmetro compatível com a corrente de soldagem e o fluxo de gás a ser utilizado numa dada aplicação. O gatilho de acionamento movimenta um contator que está ligado ao primário do transformador da máquina de solda, energizando o circuito de soldagem, além de acionar o alimentador de arame e uma válvula solenóide, que comanda o fluxo de gás protetor para a tocha. As tochas para soldagem MIG/MAG podem ser refrigeradas a água ou pelo próprio gás de proteção, dependendo de sua capacidade, dos valores de corrente utilizados e do fator de trabalho. Quanto ao formato, as tochas podem ser retas ou curvas, sendo as mais utilizadas as do tipo "pescoço de cisne" que são as que oferecem maior maneabilidade. Na figura 3.3 pode ser observado o esquema de uma tocha de soldagem MIG/MAG.

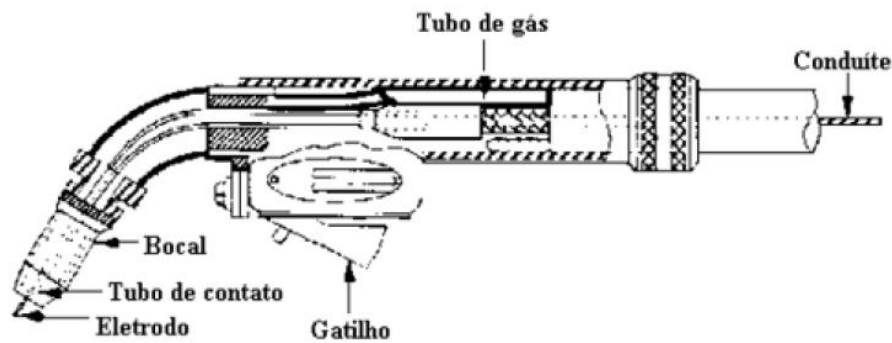


Figura 3.3 - Tocha para soldagem MIG - MAG

### 3.5 ALIMENTADOR DE ARAME

Para Modenesi (2000, p. 80) o alimentador de arame normalmente utilizado, é acionado por um motor de corrente contínua e fornece arame a uma velocidade constante ajustável numa ampla faixa. Não existe qualquer ligação entre o alimentador e a fonte de energia, entretanto ajustando-se a velocidade de alimentação de arame, ajusta-se a corrente de soldagem fornecida pela máquina, devido às características da fonte e do processo. O arame é passado entre um conjunto de roletes chamados de roletes de alimentação que podem estar próximos ou longe da tocha de soldagem e, dependendo da distância entre o carretel de arame e a tocha de soldagem, um ou outro tipo de alimentador apresenta melhores resultados.

### 3.6 CONSUMÍVEIS

Segundo Marques (1991, p. 15), os principais consumíveis utilizados na soldagem MIG/MAG, são o arame-eletrodo e os gases de proteção. Os arames para soldagem são constituídos de metais ou ligas metálicas que possuem composição química, dureza, condições superficiais e dimensões bem controladas. Arames de má qualidade em termos destas propriedades citadas, podem produzir falhas de alimentação, instabilidade do arco e descontinuidades no cordão de solda. Arames de aço Carbono geralmente recebem uma camada superficial; de cobre com o objetivo de melhorar seu acabamento superficial e seu contato elétrico com o bico de Cobre.

Os arames de aço usados com proteção de CO<sub>2</sub> contêm maiores teores de Silício e Manganês em sua composição, devido a sua ação desoxidante. A

seleção do arame a ser utilizado em uma dada operação, é feita em termos da composição química do metal de base, do gás de proteção a ser usado e da composição química e propriedades mecânicas desejadas para a solda (MARQUES, 1991, p. 16)

### 3.7 GASES DE PROTEÇÃO

A simples mudança do gás por sua vez, será responsável por uma série de alterações no comportamento das soldagens. Estes gases, segundo sua natureza e composição, tem uma influência preponderante nas características do arco, no tipo de transferência de metal do eletrodo à peça, na velocidade de soldagem, nas perdas por projeções, na penetração e no formato do cordão. Além disto, o gás também tem influência nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade a fissuração e porosidade, bem como na facilidade da execução da soldagem em diversas posições. Os gases inertes apresentam vantagens metalúrgicas enquanto o CO<sub>2</sub> puro, apresenta vantagens econômicas (GIMENES, 2005, p. 137).

Com a mistura de argônio com CO<sub>2</sub> (ou com O<sub>2</sub>) com alto percentual de Ar é possível obter:

- (a) a inertização do arco, arame e zona fundida;
- (b) o molhamento adequado devido ao pequeno percentual de gás ativo;
- (c) a mínima repulsão da gota o que propicia a transferência em modo goticular.

### 3.8 PARÂMETROS DE CONTROLE DE SOLDAGEM

Durante a soldagem, o soldador ou operador controla um número de fatores que afetam o formato final do cordão, as condições gerais de operação e outras características do processo. Um soldador bem treinado procura, intuitivamente, ajustar todos esses fatores para manter o processo operando corretamente. Adicionalmente, diversos outros fatores, como o tipo de eletrodo, o seu diâmetro, tipo e polaridade da corrente, precisam ser selecionados antes da soldagem.

São parâmetros de controle importantes, que afetam as características da soldagem MIG/MAG:

- Diâmetro e composição do arame;
- Tipo do gás de proteção;
- Velocidade de alimentação do arame;

- Extensão livre de eletrodo (*stick-out*) e distância de bico de contato à peça;
- Posicionamento da tocha em relação à peça;
- Velocidade de soldagem;
- Indutância;
- Técnica de manipulação e inclinação da pistola de soldagem;

### 3.9 DIÂMETRO E COMPOSIÇÃO DO ARAME

A composição do arame depende do tipo de metal de base, das propriedades desejadas para a solda e, do tipo de gás de proteção. O tipo de arame é, em geral, indicado com base em classificações dadas por normas de especificação como, por exemplo, as da *American Welding Society (AWS)*. O diâmetro do arame é escolhido principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e de outros fatores que limitem o tamanho da poça de fusão ou o aporte de calor na solda. Para cada diâmetro e composição de arame, existe uma faixa de corrente adequada à sua utilização, isto é, para a qual a estabilidade do processo e as condições de formação do cordão de solda são satisfatórias (tabela 3.2), (GIMENES, 2005, IBQN, 1987, MARQUES, 1991).

Tabela 3.2 – Faixa de corrente (A) de soldagem para arames de aço carbono.

Referência	Diâmetro do arame (mm)						Gás de Proteção
	0,8	0,9	1,0	1,2	1,6	2,0	
(1)	50-130	--	70-180	100-240	150-400	200-550	CO <sub>2</sub>
(2)	40-220	100-260	--	140-310	280-450	--	--

### 3.10 VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO E DE FUSÃO DO ARAME

Segundo Modenesi (2004, p. 75) na soldagem a arco com eletrodo consumível, este é fundido a uma velocidade que deve ser, para o processo funcionar de forma adequada, igual a velocidade com que ele é alimentado. No processo MIG/MAG um estado estacionário é atingido no qual o comprimento do eletrodo ("*stickout*") é mantido relativamente constante. A velocidade de fusão de arame controla a quantidade de metal depositado na solda por unidade de tempo

(taxa de deposição), influenciando diretamente o custo e a produtividade da soldagem.

Segundo Allum & Quintino (1984, p. 127)

Na soldagem a arco, a fusão do arame depende principalmente de seu aquecimento pelo arco e por efeito *Joule* (aquecimento por resistência elétrica) ao longo do eletrodo. Considerando estes dois efeitos pode-se mostrar que a velocidade de fusão do arame pode ser representada, para o processo MIG/MAG pela equação 1:

$$w = \alpha i + \beta s^2 \quad (1)$$

Onde  $w$  é a velocidade de fusão,  $\alpha$  e  $\beta$  são, respectivamente, coeficientes ligados ao aquecimento do eletrodo pelo arco e por efeito *Joule*,  $s$  é o comprimento livre do eletrodo e  $i$  é a corrente.

A tabela 3.3 mostra valores de  $\alpha$  e  $\beta$  obtidos experimentalmente para arames de aço carbono. A figura 3.4 mostra a curvas típicas de  $w$  para o processo MIG/MAG com arames de diferentes materiais e bitolas.

Tabela 3.3 - Valores dos coeficientes da equação de velocidade de fusão para aço carbono

Diametro (mm)	A (mm/sA)	(1/sA <sup>2</sup> )
0,8	0,70	26,3x10 <sup>-5</sup>
1,0	0,47	9,1x10 <sup>-5</sup>
1,2	0,27	5,9x10 <sup>-5</sup>
1,6	0,18	1,2x10 <sup>-5</sup>

A fusão do eletrodo pode ser alternativamente descrita em termos de massa de arame por unidade de tempo, taxa de fusão,  $W_m$ , e q u a ç ã o ( 2 ) .

A passagem de  $W$  para  $W_m$  é simples quando se conhece a densidade ( $\rho$ ) e o diâmetro ( $d$ ) do arame:

$$w_m = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \rho w \quad (2)$$

A taxa de deposição ( $z_m$ ) equação (3) relaciona-se com a de alimentação por:

$$Zm = \varphi \cdot Wm \quad (3)$$

Onde  $\varphi$  é a eficiência de deposição.

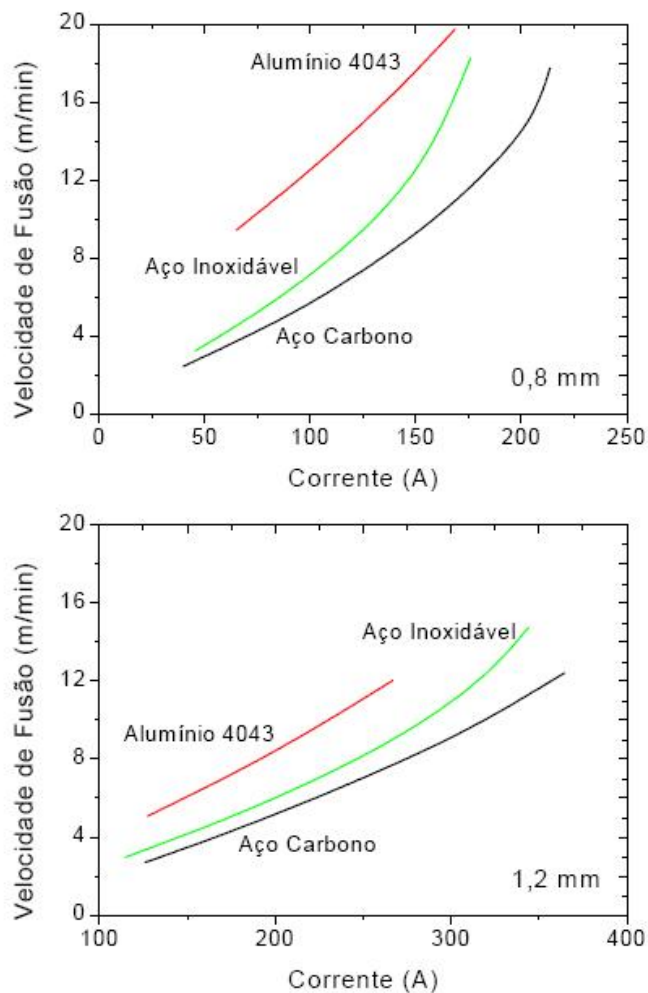


Figura 3.4 - Curvas de velocidade de fusão para arames de 0,8 e 1,2mm (Cary, 1994)

A figura 3.5 mostra intervalos típicos de taxa de deposição para alguns processos de soldagem. Diferentes técnicas podem ser usadas para aumentar estes intervalos.

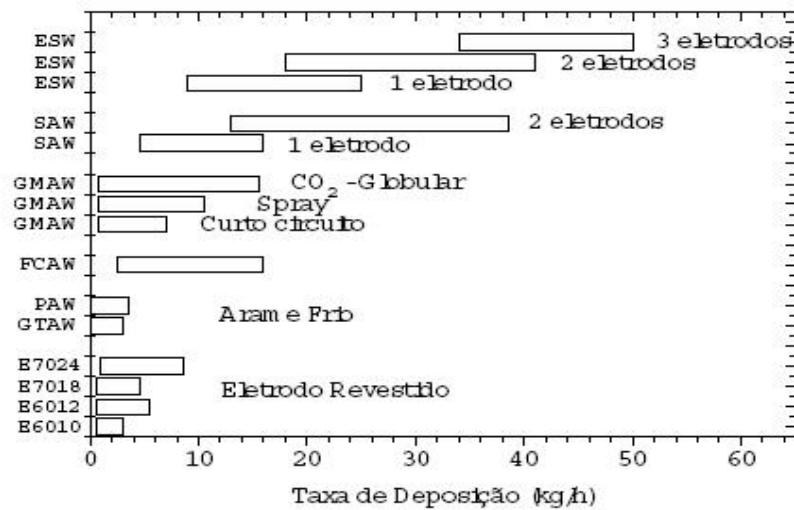
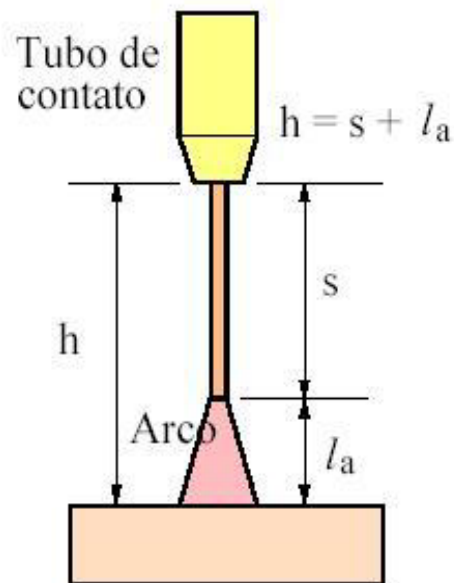


Figura 3.5 - Taxas de deposição comuns de alguns processos (Cary, 1994).

### 3.11 EXTENSÃO LIVRE DO ELETRODO E DISTÂNCIA BICO DE CONTATO PEÇA (DBCP)

No estudo de Gimenes (2005, p. 136) sobre Conceitos de Soldagem Mig/Mag, define-se:

[...] como extensão livre do eletrodo ou *stick-out* (figura 3.6), a distância entre o último ponto de contato elétrico do arame (normalmente o tubo de contato), e a ponta do eletrodo ainda não fundida. Quando esta distância aumenta, aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, que terá assim mais tempo para aquecer-se por efeito *Joule*. Com esta elevação da temperatura do eletrodo, será necessária uma menor corrente para fundir o eletrodo para a mesma taxa de alimentação, ou vindo de outra forma, para a mesma corrente de soldagem utilizada, se obterá uma maior taxa de deposição, porém com menor penetração. A distância bico de contato peça (DBCP) é a extensão da soma do *stickout* e o comprimento  $l_a$ , Figura 3.6. As extensões normalmente utilizadas situam-se na faixa entre 6 e 13 mm para a transferência por curto-circuito.



Distância do ponto de tomada de corrente à peça ( $h$ ),  
 “stickout” ( $s$ ) e comprimento de arco ( $l_a$ )

Figura 3.6 Distância bico de contato peça (DBCP)

Posteriormente será visto que neste trabalho foi avaliado efeito que a DBCP tem na geração de respingos para CCF. Sabe-se que para obter comprimentos de arcos diferentes para mesmas faixas de corrente e velocidades de alimentação em fontes convencionais (característica estática tipo tensão constante), utilizou-se o artifício de variar a Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP). Quando, por exemplo, se aumenta a DBCP, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes (inclusive Velocidade de Alimentação), há uma diminuição do valor da corrente, pois há um aumento do comprimento energizado do eletrodo, apesar do comprimento do arco ficar praticamente o mesmo. Confirma-se, então, que o aumento do comprimento energizado do eletrodo ocasiona um aumento da resistência elétrica, que, por efeito *joule*, aumenta a energia em forma de calor para o arame, diminuindo assim a corrente demandada para manter a mesma taxa de fusão (mesma velocidade de alimentação). Em seguida, aumenta-se a regulagem da tensão até que a corrente retorne para o valor desejado. Já este aumento da tensão, para uma dada corrente e DBCP, significa aumento desejado de comprimento do arco. (GROETLAARS, 2002, p. 125).

### 3.12 TENSÃO DO ARCO

A tensão do arco é a tensão entre a extremidade do arame e a peça. Devido às quedas de tensão encontradas no sistema de soldagem a tensão do arco não pode ser lida diretamente do voltímetro da fonte.

A tensão de soldagem (comprimento do arco) tem um importante efeito no modo de transferência de metal desejado. A soldagem por curto-circuito requer tensões relativamente baixas, enquanto a soldagem goticular necessita de tensões maiores. Deve ser observado também que, quando a corrente de soldagem e a taxa de fusão do arame são aumentadas, a tensão de soldagem também deve ser aumentada um tanto para manter a estabilidade. A Figura 3.7 mostra uma relação entre a tensão do arco e a corrente de soldagem para os gases de proteção mais comuns empregados na soldagem MIG/MAG de aços carbono. A tensão do arco é aumentada com o aumento da corrente de soldagem para proporcionar a melhor operação (MIG/MAG WELDING, 2003, 70).

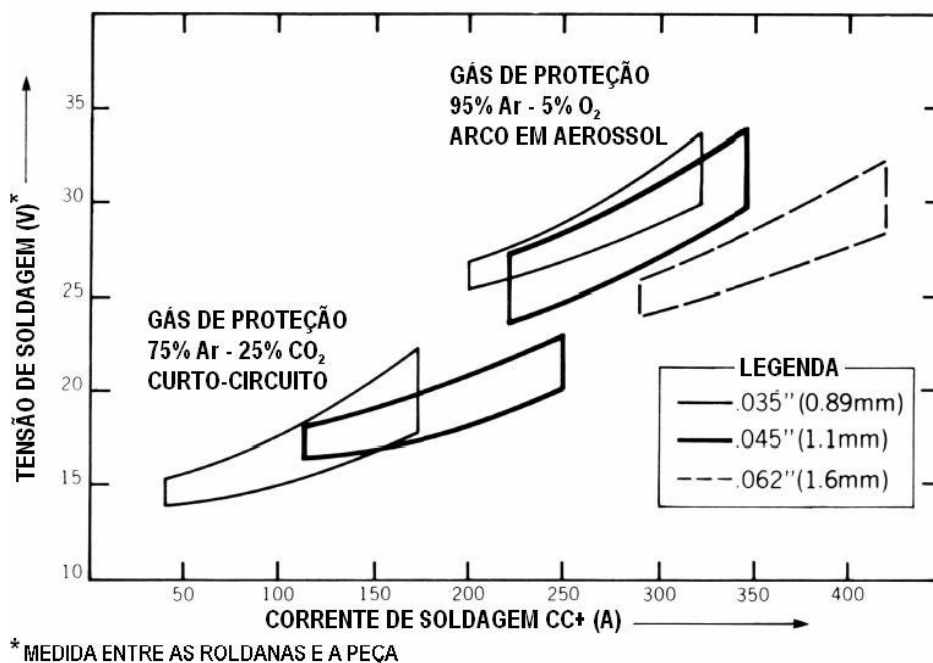


Figura 3.7 - Relação entre a tensão do arco e a corrente de soldagem

### 3.12.1 Inclinação da curva

A Figura 3.8 ilustra as características tensão-corrente de uma fonte MIG/MAG.

O ângulo da curva com a horizontal é definido como a inclinação da curva da fonte. Esse parâmetro refere-se à redução na tensão de saída com o aumento da corrente. Então uma fonte de tensão constante com inclinação da curva na realidade não proporciona tensão constante por razões a serem consideradas (MIG/MAG WELDING, 2003, p. 74).

A inclinação da curva de uma fonte, como especificada pelo fabricante e medida nos terminais de saída, não representa a inclinação total do sistema. Qualquer componente que acrescente resistência ao sistema de soldagem aumenta a inclinação da curva e a queda de tensão para uma dada corrente de soldagem. Cabos, conexões, terminais, contatos sujos, etc., todos fazem aumentar a inclinação da curva. Por isso, em um sistema de soldagem, a inclinação da curva deve ser medida no arco.

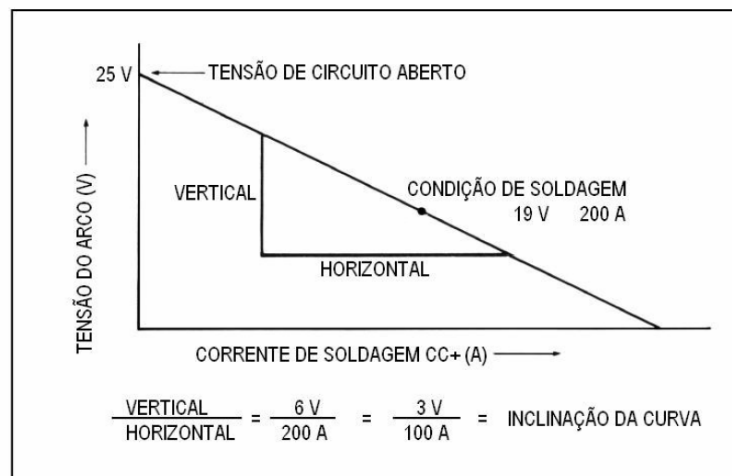


Figura 3.8 - Cálculo da inclinação da curva de um sistema de soldagem.

A inclinação da curva em um sistema MIG/MAG é usada durante a soldagem por curto-circuito para limitar a corrente de curto-circuito de tal modo a reduzir a quantidade de respingos quando os curtos-circuitos entre o arame e a peça forem interrompidos. Quanto maior for a inclinação da curva, menores serão as correntes de curto-circuito e, dentro dos limites, menor será a quantidade de respingos. (MIG/MAG WELDING, 2003, p. 75)

O valor da corrente de curto-circuito deve ser alto o suficiente (mas não tão alto) para desprender as gotas fundidas do arame. Quando a inclinação é quase nula no circuito de soldagem a corrente aumenta até um valor muito alto, causando uma reação violenta, mas restrita. Isso causa respingos.

Quando uma corrente de curto-circuito for limitada a valores excessivamente baixos por causa de uma inclinação muito alta, o arame pode conduzir toda a corrente, e o curto-circuito não se interromperá por si só. Nesse caso o arame pode apinhar-se na peça ou ocasionalmente topa na poça de fusão e romper-se. Esses fenômenos são mostrados esquematicamente na Figura 3.9 (MIG/MAG WELDING, 2003, p. 74).

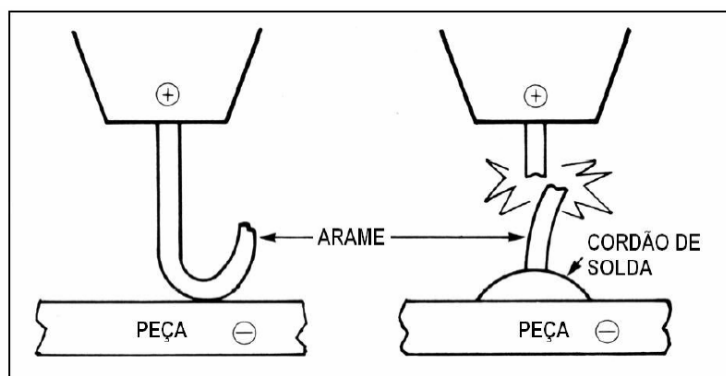


Figura 3.9. Efeito de uma inclinação muito grande na curva característica

Quando a corrente de curto-circuito estiver no valor correto a separação da gota fundida do arame é suave, com muito poucos respingos. As correntes de curto-circuito típicas requeridas para a transferência de metal e a melhor estabilidade do arco podem ser observadas na Tabela 3.4. (MIG/MAG WELDING, 2003, p. 77).

Tabela 3.4 - Correntes típicas de curto-circuito requeridas para a transferência de metal.

Tipo de arame	Diâmetro do arame		Corrente de curto-circuito (A)
	pol (")	mm	
Aço carbono	0,030	0,76	300
	0,035	0,89	320
	0,045	1,10	370
	0,052	1,30	395
	0,062	1,60	430
Alumínio	0,030	0,76	175
	0,035	0,89	195
	0,045	1,10	225
	0,062	1,60	290

### 3.13 VELOCIDADE DE SOLDAGEM, DESLOCAMENTO

Quanto maior a velocidade de soldagem, mantendo-se constantes a tensão e a corrente, menor é o aporte térmico (energia fornecida por unidade de comprimento de metal de base) e, portanto, menor a largura da poça de fusão, fato confirmado por Campos (2002, p. 12). Velocidade de soldagem: inversamente proporcional à penetração, largura e reforço do cordão.

Uma velocidade de soldagem baixa resultará em um cordão muito largo com muito depósito de material. Já velocidades muito altas produzem cordões estreitos e com pouca penetração. Quando a velocidade é excessivamente alta, a tendência é de que cause mordeduras no cordão de solda (GIMENES, 2005, p. 138).

### 3.14 INDUTÂNCIA

O controle conhecido como “indutância” permite o ajuste das características dinâmicas da fonte, em particular, da velocidade de variação da corrente de

soldagem como resultado de variações no comprimento do arco ou da ocorrência de um curto-circuito entre o eletrodo e a peça.

Este controle é particularmente importante quando se trabalha com transferência por curto-circuito, controlando a variação da corrente quando o arame toca a peça e impedindo que esta aumente de forma explosiva (baixa indutância), o que aumentaria a instabilidade de processo, ou de forma muito lenta (indutância elevada), o que poderia levar à solidificação da poça de fusão e o agarramento nesta do eletrodo (KANG, 2003, p. 245; MIRANDA, 1998, p. 166).

A indutância é uma importante característica dinâmica deste processo e deve ser ajustada adequadamente. Ela permite regular a taxa de variação da corrente elétrica no decorrer da soldagem pois possibilita o controle do efeito de constrição (efeito “*pinch*”) do eletrodo durante o aumento da corrente elétrica no instante do curto - circuito. A taxa de variação da corrente deve ser alta o bastante para causar a transferência da gota e baixa o bastante para minimizar os respingos e melhorar a estabilidade. (KANG, 2003, p. 246, MIRANDA, 1998, p. 167)

Acredita-se que o controle da indutância pode minimizar ou maximizar as perturbações geradas no arco, pois atua diretamente na cinética das forças que atuam na transferência. Além disso, a adição de indutância causa na soldagem, um acréscimo na transferência de curto-circuito no tempo de abertura de arco e de curto-circuito, resultando em menos curtos-circuitos por segundo. Uma redução na frequência de curto-circuito (tempo de arco maior) gera mais calor na solda, o que pode alterar o rendimento e as características geométricas da solda (AWS 1991, p. 65).

Para se compreender melhor o efeito da indutância pode ser entendido analisando-se a curva mostrada na Figura 3.10. A curva *A* mostra uma curva típica de corrente-tempo com indutância presente quando a corrente aumenta de zero até o valor final. A curva *B* mostra o caminho que a corrente percorreria se não houvesse indutância no circuito. A corrente máxima alcançada durante um curto é determinada pela inclinação da curva característica da fonte. A indutância controla a taxa de aumento da corrente de curto-circuito. A taxa pode ser reduzida de maneira que o curto possa ser interrompido com um mínimo de respingos. A indutância também armazena energia. Ela fornece ao arco essa energia armazenada depois que o curto é interrompido, e causa um arco mais longo. (MIG/MAG WELDING, 2003, p. 78)

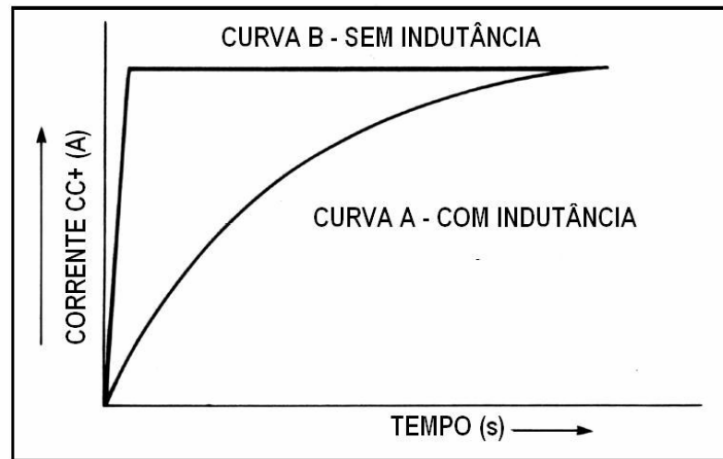


Figura 3.10 - Mudança no aumento da corrente devido à indutância (MIG/MAG WELDING, 2003).

Na soldagem por curto-circuito um aumento na indutância aumenta o tempo de arco "ativo". Isso, por sua vez, torna a poça de fusão mais fluida, resultando em um cordão de solda mais achatado. A diminuição da indutância causa o efeito contrário. A Figura 3.11 mostra a influência da indutância no aspecto de cordões de solda feitos por meio da soldagem por curto-circuito com misturas argônio-oxigênio e hélio-argônio-dióxido de carbono.

O cordão de solda no 1, confeccionado com uma mistura 98% Ar / 2% O<sub>2</sub> e sem indutância, apresenta uma crista, como pode ser observado na seção reta. No meio do cordão de solda foi imposta uma indutância de 500  $\mu$ H. A crista não ficou tão proeminente, e o cordão de solda permaneceu convexo. O cordão de solda no 2, confeccionado com uma mistura de He-Ar-CO<sub>2</sub>, também se apresenta convexo. A quantidade de respingos na chapa é considerável. Quando a indutância foi introduzida no meio da amostra, a redução da quantidade de respingos foi notável; o cordão tornou-se achatado e a seção reta abaixo à direita mostra que a penetração na peça aumentou (MIG/MAG WELDING, 2003, p. 79).

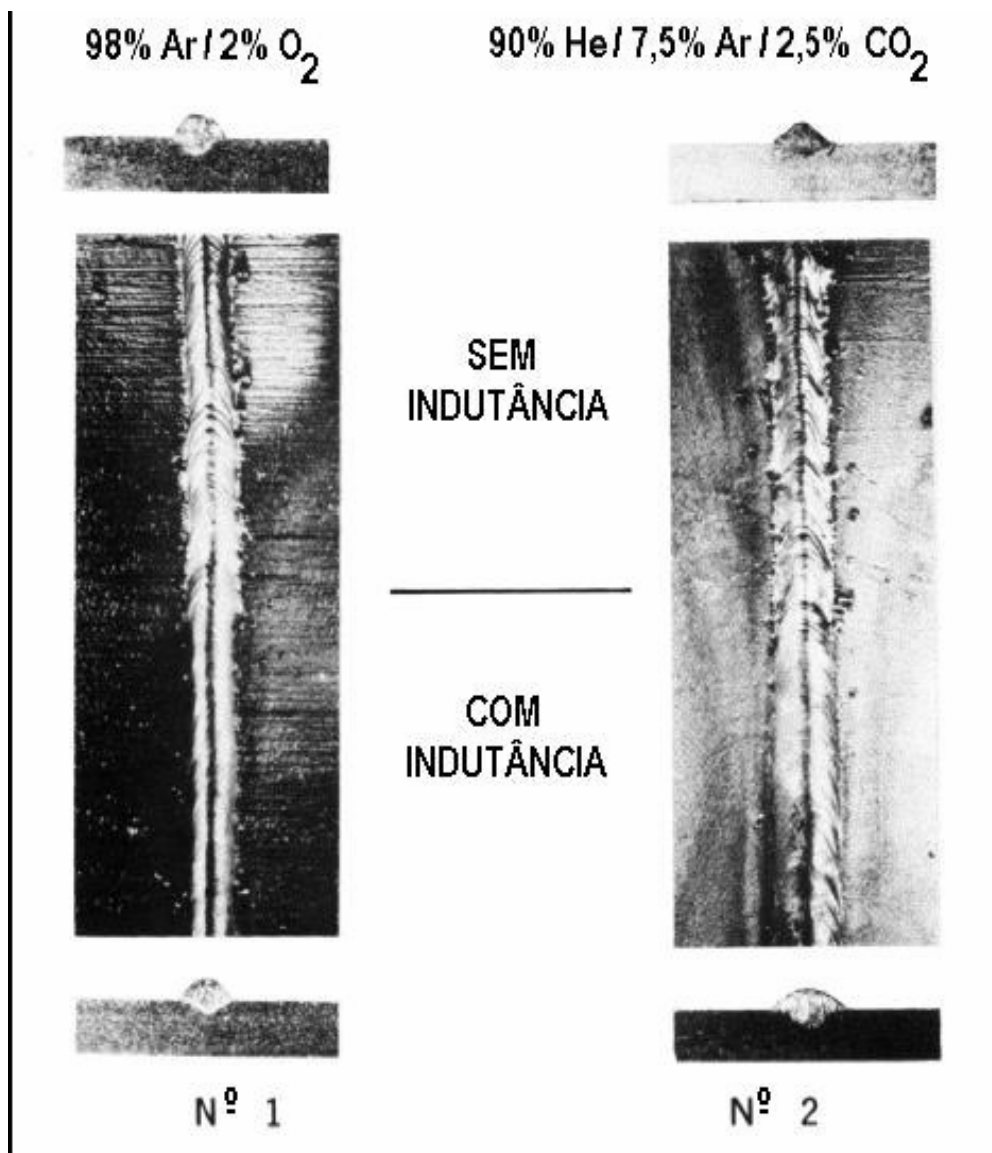


Figura 3.11 - Efeito da indutância no aspecto do cordão de solda (MIG/MAG WELDING, 2003).

Na soldagem curto-circuito a adição de indutância na fonte produzirá uma melhor partida de arco. Indutância excessiva resultará numa partida errática. Quando for alcançada a condição de uma corrente de curto-circuito correta e uma taxa de aumento de corrente também correta, a quantidade de respingos será mínima. Os ajustes necessários na fonte para a condição de respingo mínimo variam com o material e diâmetro do arame. Como regra geral, o valor da corrente de curto-circuito e o valor da indutância necessária para a operação ideal aumentam à medida que o diâmetro do arame aumenta. (CRAIG, 1991, p. 63; MIG/MAG WELDING, 2003, p. 80)

### 3.15 EFEITOS MAGNÉTICOS

O arco é um condutor, em muitos aspectos, similar aos cabos que o ligam a máquina de soldagem. Diferentemente destes, contudo, o arco é gasoso sendo, portanto, muito mais sensível as diferentes forças atuando sobre ele. Em particular, o campo magnético (B) induzido pela corrente (I) em torno de um condutor arco gera uma pressão (P) ao longo da seção (r) deste condutor que é dada por:

$$P = P_a + \frac{\mu_0 \cdot I J}{4\pi} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Onde  $P_a$  é a pressão atmosférica,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética  $J$  é a densidade da corrente ( $I / \pi R^2$ ) e  $R$  é o raio do condutor, Figura 3.12.

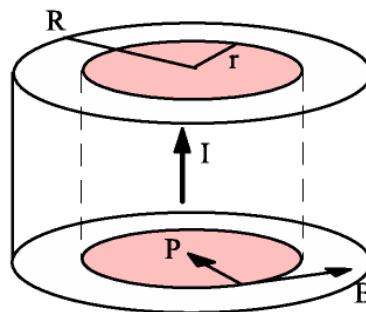


Figura 3.12 - Campo magnético no interior de um condutor cilíndrico. B – indução magnética.

A diferença de pressão ( $P - P_a$ ) é máxima no centro do arco ( $r = 0$ ). Considerando valores de corrente usuais na soldagem, pode-se verificar que esta pressão é muito baixa (entre  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  do limite de escoamento do cobre), sendo assim, desprezível para condutores sólidos. Para o arco, um condutor gasoso, esse valor é significativo e causa diversos fenômenos como Jato de plasma, Sopros magnéticos, e Transferência de metal (MODENESI, 2004, p. 88).

Jato de Plasma:

Sabe-se que, em geral, que os gases são absorvidos pelo arco junto do eletrodo e impulsionados como um jato a alta velocidade (de até  $10^2$  m/s) para a peça independentemente da polaridade usada (figura 3.13). Este jato confere ao arco uma certa rigidez ou resistência a correntes de ar e influencia características do processo como, por exemplo, a soldagem fora da posição plana, o formato do cordão, a estabilidade do processo e a absorção de gases pela poça de fusão. O jato de plasma é causado pela forma do arco, mais concentrado junto do eletrodo do que na peça. Esta forma faz com que a densidade de corrente ( $J$ ) da região próxima do eletrodo seja maior e, desta forma, a pressão de origem magnética (equação 11) fica maior junto ao eletrodo, causando a aceleração dos gases desta região em direção à peça (MODENESI, 2004, p. 89).

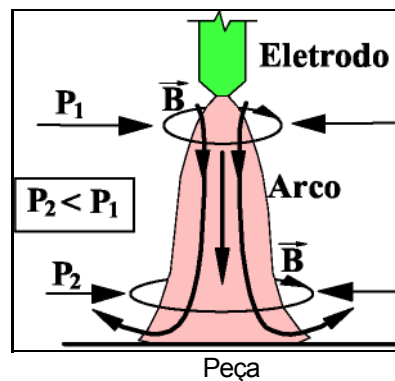


Figura 3.13- Representação esquemática da formação do jato de plasma.

### 3.15.1 Sopros Magnético

O campo magnético induzido pela corrente tende a se distribuir uniformemente em torno do arco (figura 3.13). Quando esta distribuição é perturbada, levando a uma maior concentração do campo magnético em um dos lados do arco, a força magnética passa a possuir uma componente transversal que tende a empurrar lateralmente o arco (como se este estivesse sendo soprado). Este efeito, sopro magnético, dificulta a soldagem e aumenta a chance de formação de descontinuidades no cordão. A perda de simetria na distribuição do campo magnético em torno do arco pode ser causada por diversos fatores, destacando-se mudanças bruscas na direção da corrente elétrica e uma distribuição assimétrica de material ferromagnético em torno do arco. Estes efeitos ocorrem, quando a corrente passa do arco para a peça e muda bruscamente de direção (figura 3.14), na soldagem junto da borda de peças de aço (material ferromagnético) ou na soldagem de peças de aço com espessuras diferentes.

O sopro magnético pode ser minimizado por medidas como:

- Inclinar o eletrodo para o lado que se dirige o arco;
- Reduzir o comprimento do arco;
- Balancear a saída de corrente da peça, ligando-a a fonte por mais de um cabo;
- Reduzir a corrente de soldagem;
- Soldar com corrente alternada, pois, com esta, o sopro magnético é sempre menor

Indução magnética

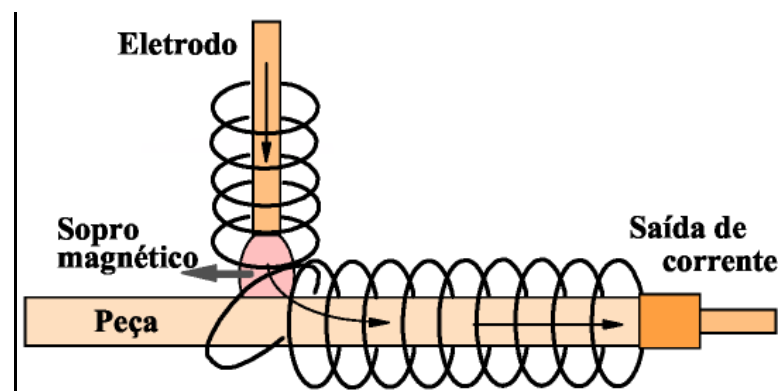


Figura 3.14 - Sopro magnético causado por mudança brusca na direção da corrente.

### 3.16 TRANSFERÊNCIA METÁLICA

O modo como a transferência ocorre, é muito importante na soldagem MIG/MAG, pois afeta muitas características do processo, como por exemplo: a quantidade de gases (principalmente Hidrogênio, Nitrogênio e Oxigênio) absorvido pelo metal fundido, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerado, (MODENESI, 2004, p. 89). Os principais fatores que influenciam no modo de transferência são:

- Intensidade e tipo de corrente;
- Comprimento do arco elétrico;
- Densidade da corrente;
- Composição do arame-eletrodo;
- Extensão livre do eletrodo;
- Gás de proteção;
- Características da fonte de energia.

Diversas formas de transferência de metal são observadas para os diferentes processos e condições operacionais. Diferentes terminologias, muitas vezes conflitantes, existem na literatura. Um sistema de classificação proposto pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW) e baseado em aspectos fenomenológicos da transferência de metal é apresentado na tabela 3.5 e na Figura 3.15.

Tabela 3.5 - Formas usuais de transferência de acordo com o (IIW).

Tipo de Transferência	Exemplo de Processo de Soldagem
1. Queda Livre (Free Flight Transfer):	
1.1. Globular (Globular)	
1.1.1. Globular (Drop)	MIG/MAG - baixa corrente
1.1.2. Repelida (Repelled)	MIG/MAG com proteção de CO <sub>2</sub>
1.2. Goticular ou Aerossol (Spray)	
1.2.1. Projetado (Projected)	MIG/MAG - corrente
1.2.2. Com Alongamento (Streaming)	MIG/MAG - corrente media
1.2.3. Rotacional (Rotating)	MIG/MAG - corrente elevada
1.3. Explosiva (Explosive)	SMAW (eletrodos revestidos)
2. Por Contato (Bridging Transfer)	
2.1. Curto Circuito (Short-circuiting)	MIG/MAG - arco "curto"
2.2. Continua (Without Interruption)	TIG com alimentação contínua
3. Protegida por Escória (Slag Protected Transfer):	
3.1. Guiada pela parede (Flux-Wall Guided)	SAW
3.2. Outros modos (Other modes)	SMAW, FCAW, ESW, etc

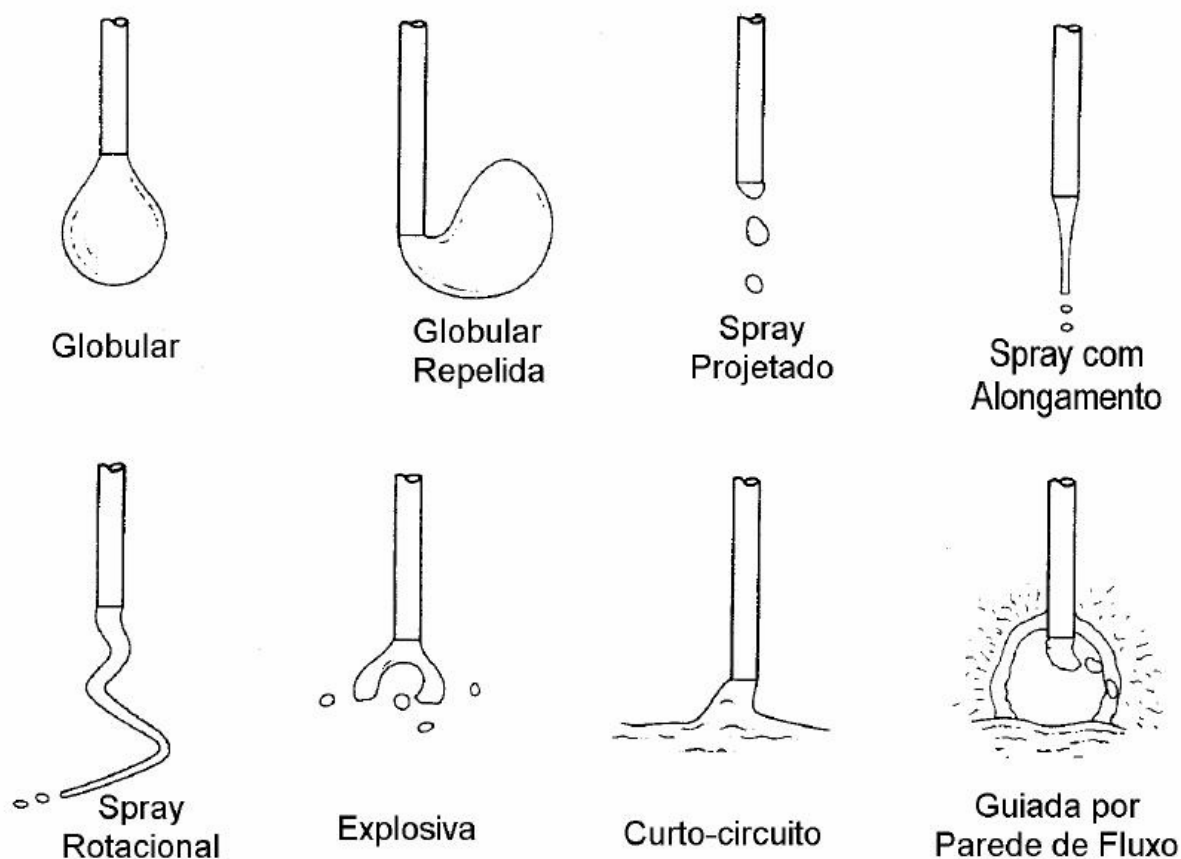


Figura 3.15 - Transferência de acordo com a classificação do IAW.

A seguir, as características principais da transferência de metal de adição no processo MIG/MAG serão discutidas em maior detalhe .

### 3.16.1 Teorias para a Transferência de Metal na Soldagem MIG/MAG

A teoria mais difundida para o estudo da transferência de metal a baseada no equilíbrio estático das forças atuando na ponta fundida do eletrodo (KIM, 1993, 283). As principais forças que podem atuar na ponta do eletrodo e contribuir para a transferência de metal são (figura 3.16).

- a gravidade ( $F_g$ ),
- a tensão superficial ( $F_\gamma$ ),
- a força eletromagnética ( $F_{em}$ ),
- a força de arraste pela passagem de gases ( $F_a$ ) e
- a força de reação a jatos de vapores ou ao jato de plasma ( $F_v$ ).

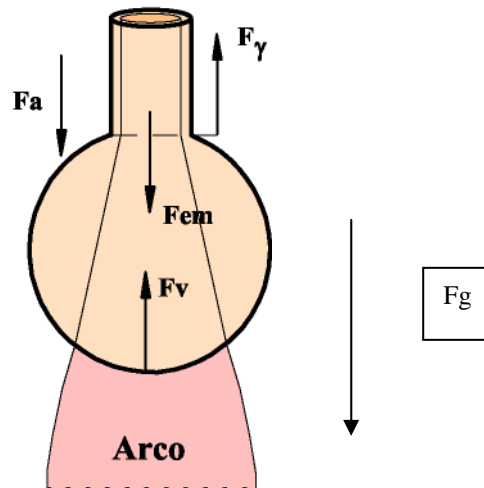


Figura 3.16 - Balanço de forças na ponta do eletrodo.  $F_g$  - força gravitacional,  $F_{em}$  - força eletromagnética,  $F_\gamma$  - força de tensão superficial,  $F_a$  - força de arraste e  $F_v$  - força de reação (KIM 1993, p. 283).

Considera-se que uma gota na ponta do eletrodo se destacará deste quando o balanço das forças atuando nesta passar a apresentar uma resultante que a afaste do eletrodo (KIM, 1993, p. 285). Por exemplo, no caso da figura 3.16, o destacamento da gota ocorrerá quando pela eq. 12:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad (12)$$

A transferência de metal no processo MIG/MAG apresenta inúmeras facetas. Classicamente, se considera três formas principais: (a) Transferência por Curto-Circuito, (b) Transferência Globular, (b) Transferência por "Spray", Aerossol ou Goticular. Formas derivadas destas são citadas na literatura, por exemplo, a transferência globular repulsiva e diferentes formas da transferência goticular (tabela 3.5). A figura 3.17 mostra, esquematicamente, os campos operacionais das formas principais de transferência na soldagem MIG/MAG com eletrodo positivo e um gás de proteção a base de argônio. (KIM, 1993, p. 287).

## MAPA DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

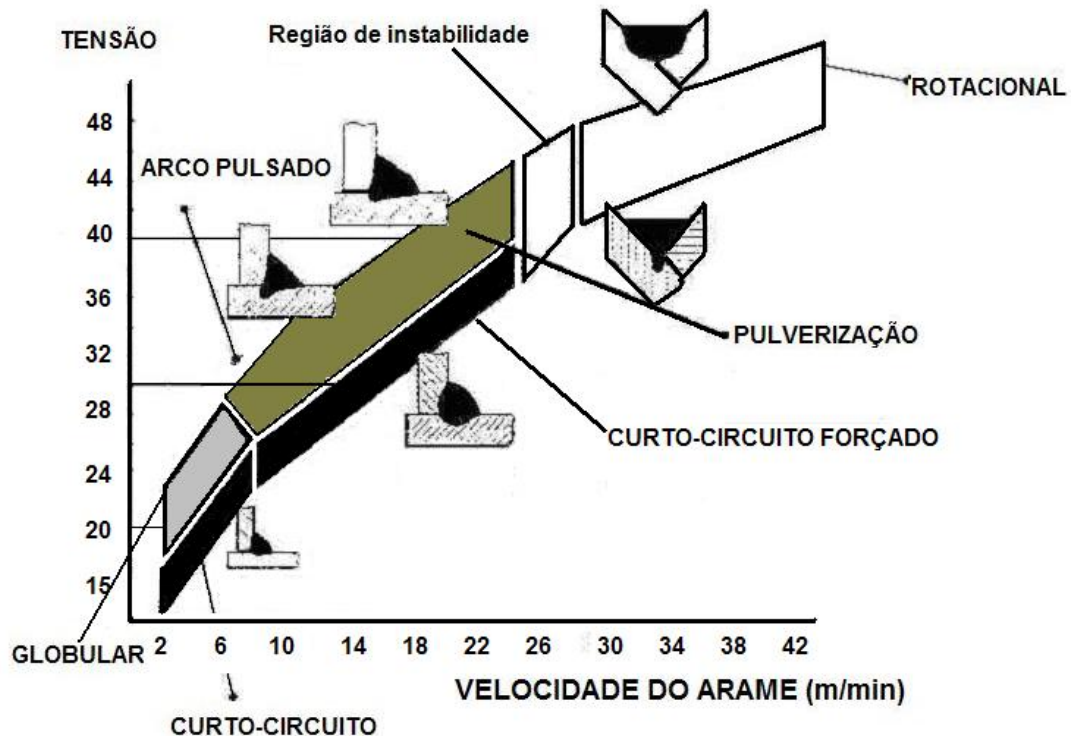


Figura 3.17. Mapa de transferência metálica para MAG (GMAW), válida para arame de aço de 1,2mm de diâmetro e gás de proteção Ar-8%CO<sub>2</sub> (KIM, 1993).

### 3.16.2 Identificação do Tipo de transferência

Para se ter a certeza do tipo de transferência metálica ocorrida em cada comprimento de arco pode-se fazer a filmagem em alta velocidade ou *shadowgrafia* como alguns trabalhos de Campos e Scotti (2002, p. 390), o que proporciona além da visualização do tipo de transferência metálica, a observação da interação entre os arcos elétricos, principalmente nas situações de arco médio e longo. Contudo neste trabalho uma técnica utilizada para avaliar o modo de transferência metálica quando não se tem a filmagem em alta velocidade é comparar os valores médios com os eficazes da corrente e da tensão. Quando eles têm valores bem próximos, pode-se supor uma transferência mista. E também se pode identificar por oscilogramas de corrente e tensão da transferência por curto-circuito como feito por Groetlaars e Scotti (2002, p. 385).

### 3.16.3 Transferência Globular

De acordo com Modenesi (2004, p. 123)

[...] a transferência globular é caracterizada pela formação, na ponta do eletrodo, de grandes gotas de metal líquido (diâmetro superior ao do eletrodo) que se transferem sob a ação da gravidade para poça de fusão com uma baixa frequência. Com um gás de proteção a base de argônio, esta forma de transferência é observada para corrente baixa e tensão (e comprimento de arco) elevada. Na soldagem com proteção a base de CO<sub>2</sub>, a transferência globular ocorre mesmo com valores elevados de corrente.

A transferência globular típica é similar a uma torneira gotejando. O metal líquido forma-se na ponta do arame e mantém-se preso a esta por ação da tensão superficial. Com o aumento do tamanho da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame e a sua transferência para a poça de fusão ocorre por ação da gravidade.

Na soldagem MIG/MAG com eletrodo negativo ou com proteção de CO<sub>2</sub>, a gota na ponta do eletrodo pode ser repelida do eletrodo para longe da poça de fusão. Esta forma de transferência é denominada de globular repulsiva e está associada com forças de reação pela geração de vapores ou do plasma em uma pequena região da gota (figura 3.18). Como a transferência globular depende da gravidade (não podendo, assim, ser utilizada fora da posição plana) e está associada com um arco instável e grande volume de respingos, o seu uso na soldagem MIG/MAG é limitado (MODENESI, 2004, p. 124). Oscilogramas típicos da transferência globular são mostrados na figura 3.19.

Quando o metal de adição possui materiais voláteis capazes de gerar grande quantidade de gases na gota ainda presa a ponta do eletrodo, esta pode explodir devido a formação de bolhas no seu interior. Neste caso (transferência explosiva), o material se transfere na forma de finas gotas, lançadas em diferentes direções.

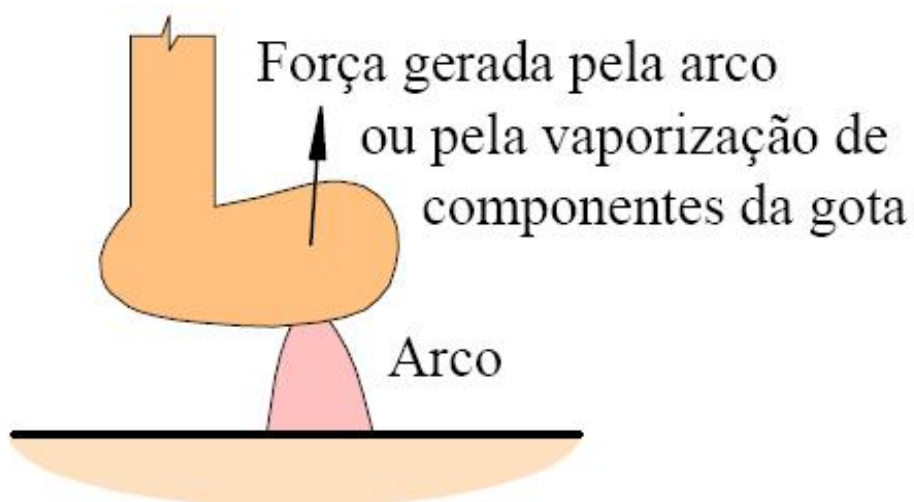


Figura. 3.18 – Transferência Globular repulsiva

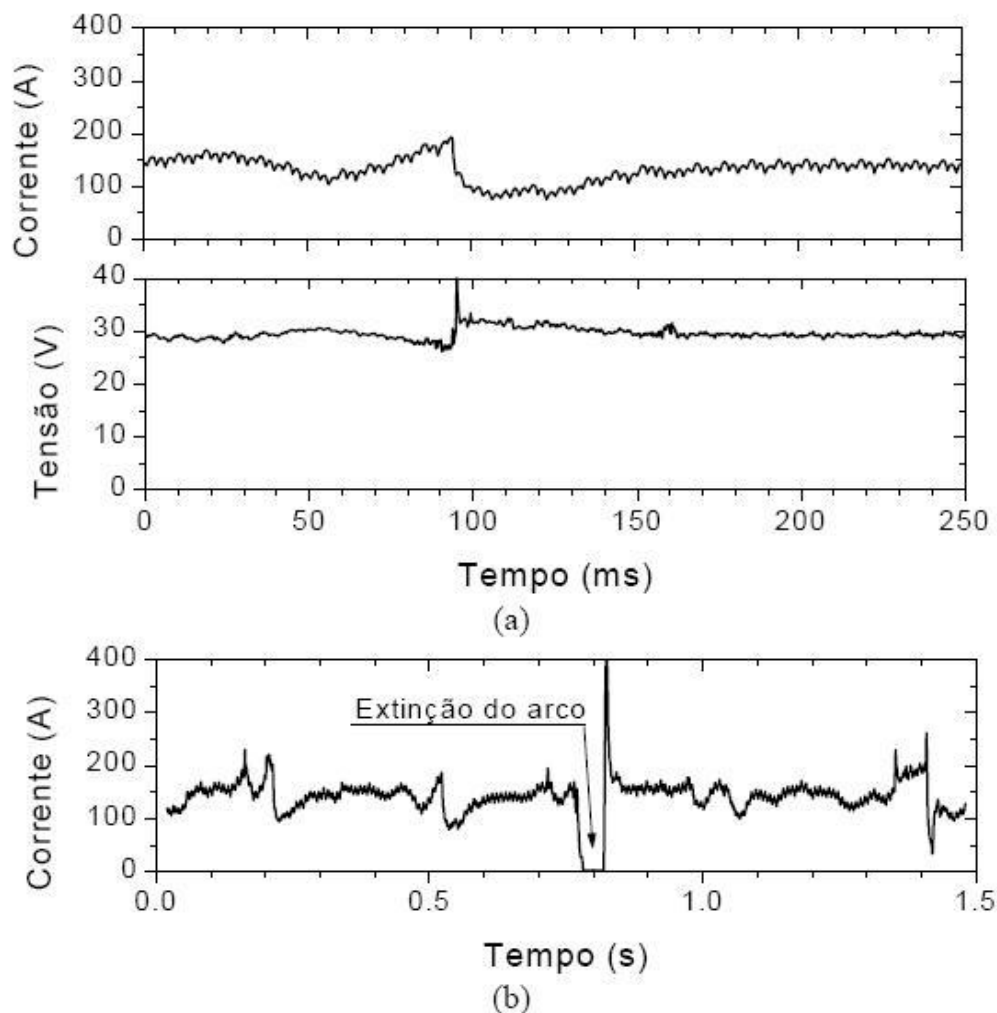


Figura 3.19 - Oscilograma de corrente de um processo com transferência globular em: (a) 250ms e (b) 1,5s. Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: CO<sub>2</sub> (MODENESI, 2004, p. 124).

### 3.16.4 Transferência Goticular (Pulverização, *Spray*)

Observa-se que, quando a mistura de proteção é rica em argônio e o eletrodo está ligado ao pólo positivo, o diâmetro das gotas transferidas se reduz com o aumento da corrente. Acima de certo nível de corrente (corrente de transição,  $I_c$ ), ocorre uma rápida redução do diâmetro das gotas ao mesmo tempo em que o arco, que antes cobria apenas a parte inferior da gota na ponta do eletrodo, passa a envolvê-la completamente. A transferência não é mais controlada pela força de gravidade, passando a ser dominada pela força magnética, e as gotas são lançadas para a poça de fusão independentemente da posição de soldagem. A transferência tende a ser muito estável com mínimas perturbações no arco e muito poucos respingos.

A necessidade de uma corrente relativamente alta dificulta ou inviabiliza a soldagem de chapas finas (pela facilidade de furar o metal base) ou a soldagem fora da posição plana (pela formação de uma poça de fusão grande e de difícil controle) com transferência goticular (também chamada em algumas referências de *Spray*). A corrente de transição depende de fatores como a composição, diâmetro e comprimento do eletrodo e o tipo de gás de proteção. A tabela 3.6 mostra valores da corrente de transição para aço carbono e alumínio para diferentes diâmetros de arame (MODENESI, 2004, p. 130).

Tabela 3.6 - Corrente de transição para arames de aço e alumínio com diferentes diâmetros

Diâmetro Do arame (mm)	Corrente de Transição (A)		
	Aço carbono (Ar+2%O <sub>2</sub> )	Aço Inoxidável (Ar+2%O <sub>2</sub> )	Alumínio (Ar)
0,8	160		90
1,0	185	170	100
1,2	220	225	120
1,6	275	285	170

A transferência goticular é característica da soldagem MIG/MAG com proteção rica em argônio e com o eletrodo positivo. Na soldagem dos aços, adições de CO<sub>2</sub> ao gás de proteção aumentam  $I_c$  até que, acima de cerca de 30% de CO<sub>2</sub>, esta forma de transferência não é mais observada. Adições de O<sub>2</sub> ao argônio reduzem  $I_c$  até cerca de 5% de O<sub>2</sub> quando, então,  $I_c$  passa a aumentar. Adições de nitrogênio e hélio também dificultam a transferência goticular. Para teores de até 75% de He, a transferência goticular ainda ocorre na soldagem de aço com misturas ternárias Ar-He-2%O<sub>2</sub>, não ocorrendo, contudo, para mistura He-2%O<sub>2</sub>. Oscilogramas típicos da transferência goticular no processo MIG/MAG são mostrados na figura 3.20 (MODENESI, 2004, p. 132).

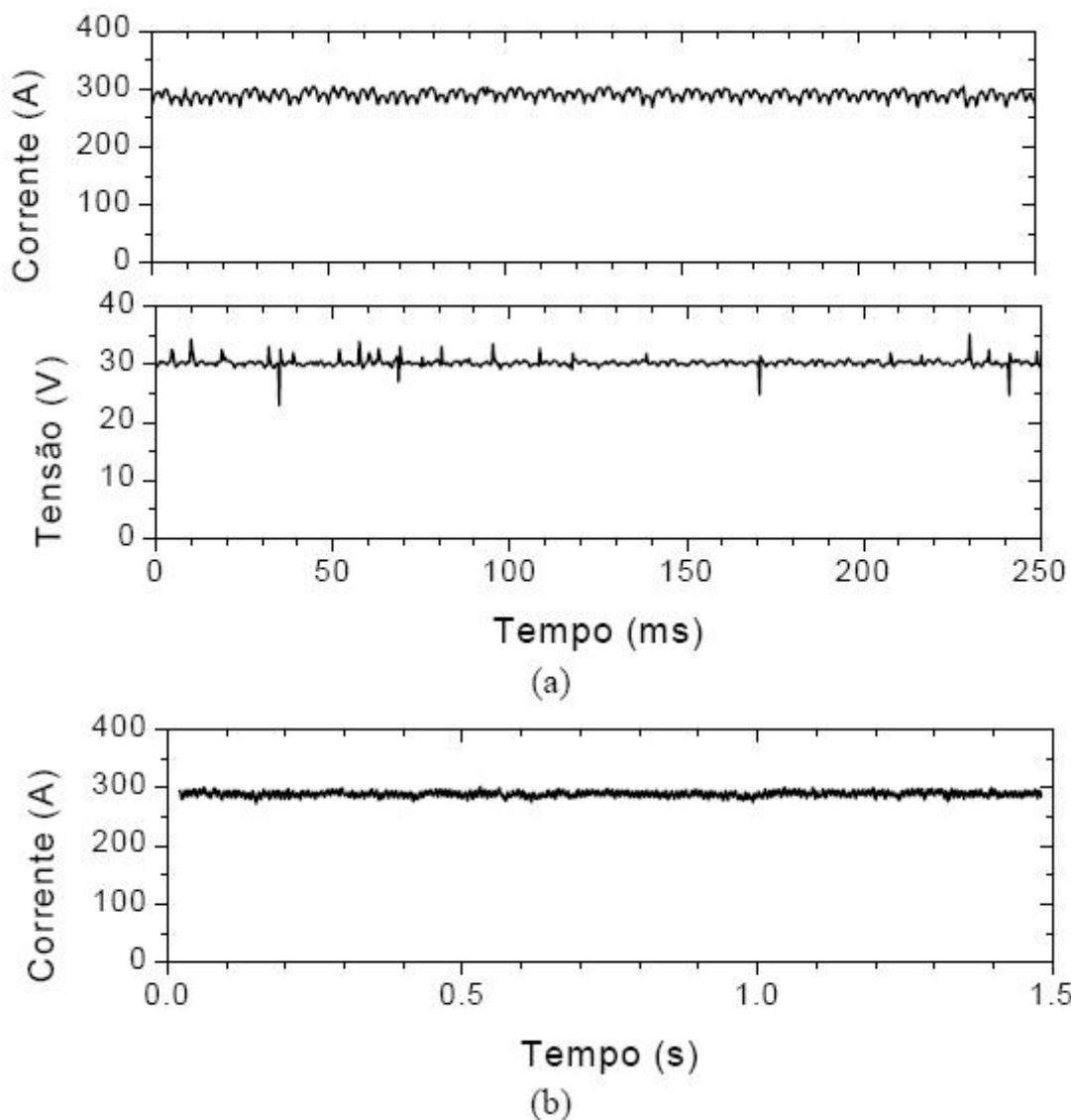


Figura 3.20 - Oscilograma de um processo com transferência gótica mostrado em: (a) 250ms e (b) 1,5s. ArarYe ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: Ar-25%CO<sub>2</sub>.

### 3.16.5 Transferência com Corrente Pulsada

A transferência gótica apresenta excelentes características operacionais. Contudo, devido a necessidade de correntes superiores a  $I_c$ , o uso desta forma de transferência fica, em geral, limitado a soldagem de juntas de maior espessura e na posição plana. Para outras condições, trabalha-se, usualmente, com a transferência por curto-circuito. Esta, contudo, tende a ser menos estável, gerar elevada quantidade de respingos, além de ser sensível a formação de defeitos de falta de fusão. Adicionalmente, para metais como o alumínio e o cobre, a transferência por

curtos-circuitos pode ser difícil de ser realizada devido a baixa resistividade elétrica destes materiais.

Segundo Needham (1965, p. 194) no início da década de 60, pesquisadores do *The Welding Institute* (TWI, Inglaterra) mostraram que é possível obter uma transferência do tipo goticular com o uso de uma corrente variável cujo valor médio era inferior a  $I_c$  mas que passava por picos (ou pulsos) acima de  $I_c$ . A figura 3.21 ilustra a corrente pulsada e mostra os parâmetros que a definem. Com base nestes, pode-se calcular a corrente média de soldagem como:

Equação (13)

$$I_M = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b}$$

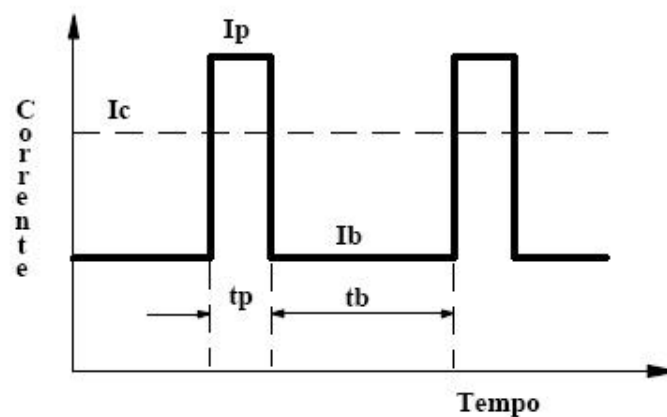


Figura 3.21 - Representação esquemática da pulsação de corrente:  $I_p$  - corrente de pico,  $I_b$  - corrente de base,  $t_p$  - tempo de pico e  $t_b$  - tempo de base.

### 3.16.6 Transferência por Curto-Circuito

A transferência por curto-circuito tem esse nome porque o metal de soldagem atua curto-circuitando (tocando) o metal de base muitas vezes por segundo. Quando o gatilho da tocha é pressionado, o arame é alimentado continuamente para a região da solda, curto circuitando com o metal de base.

Numa condição típica de soldagem, acontecem entre 90 e 150 curtos circuitos por segundo. O número de curtos circuitos dependerá de alguns fatores como inclinação da tocha, indutância, o tamanho do arame usado e velocidade de alimentação de arame (MODENESI, 2004, p. 135).

Na soldagem por curto-circuito a característica mais importante é a utilização das misturas de gases ativas CO<sub>2</sub> puro ou misturas com teor deste gás superior a 25% (GIMENES, 2005, p. 152).

Esse tipo de transferência ocorre para um comprimento do arco suficientemente curto (baixa tensão) que possibilita o contato com a poça de fusão do metal líquido na ponta do eletrodo antes que ocorra o seu destacamento. Esta forma de transferência é mais utilizada na soldagem com corrente baixa. Assim, a ponta do eletrodo, formada por uma gota de metal fundido, atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando um curto-circuito e a extinção do arco (GIMENES, 2005, p. 152 apud MIRANDA, 1999, p. 15).

Durante o curto-circuito, a corrente tende a se elevar rapidamente, causando uma maior fusão do eletrodo por efeito *joule* e, ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Eventualmente o curto é rompido (o que pode ocorrer de forma mais ou menos violenta com a vaporização de parte do material entre o eletrodo e a peça de fusão e a formação de respingos) e o arco é estabelecido (GIMENES, 2005, p. 152 apud MIRANDA, 1999, p. 15).

Quando ocorre o curto, a gota na extremidade saliente do arame se estrangula por capilaridade ocasionando alta densidade de corrente que irá destacar, finalmente, a gota dando origem a novo arco. Este tipo de transferência produz uma poça de fusão pequena e de rápido resfriamento, sendo por isto adequada para chapas finas, soldagem fora de posição e passes de raiz. Por outro lado, como o calor transferido para a poça de fusão é menor, ocorrerão menores problemas de distorções (MIRANDA, 1999, p. 27 apud UTTRACHI E MEYER, 1993, p. 48).

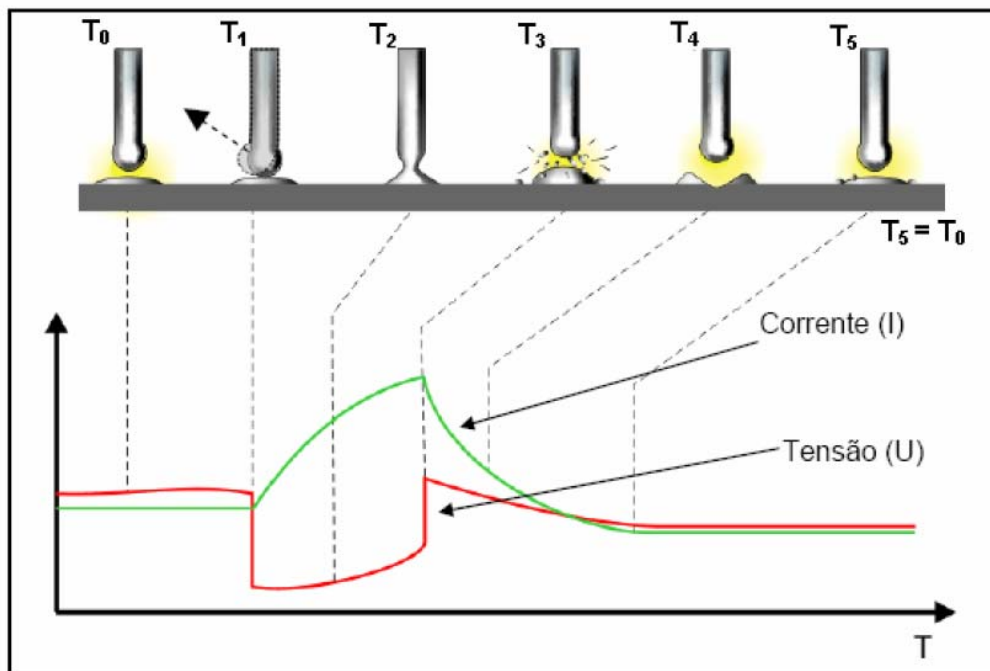


Figura 3.22. Transferência por curto-circuito (SILVA, 2005).

A figura 3.22 ilustra o processo descrito, juntamente com oscilogramas esquemáticos de corrente e tensão associados a este tipo de transferência. Nesta figura, o arco existe no período A-B, o curto circuito ocorre durante C e, no instante D, tem-se a reignição do arco.

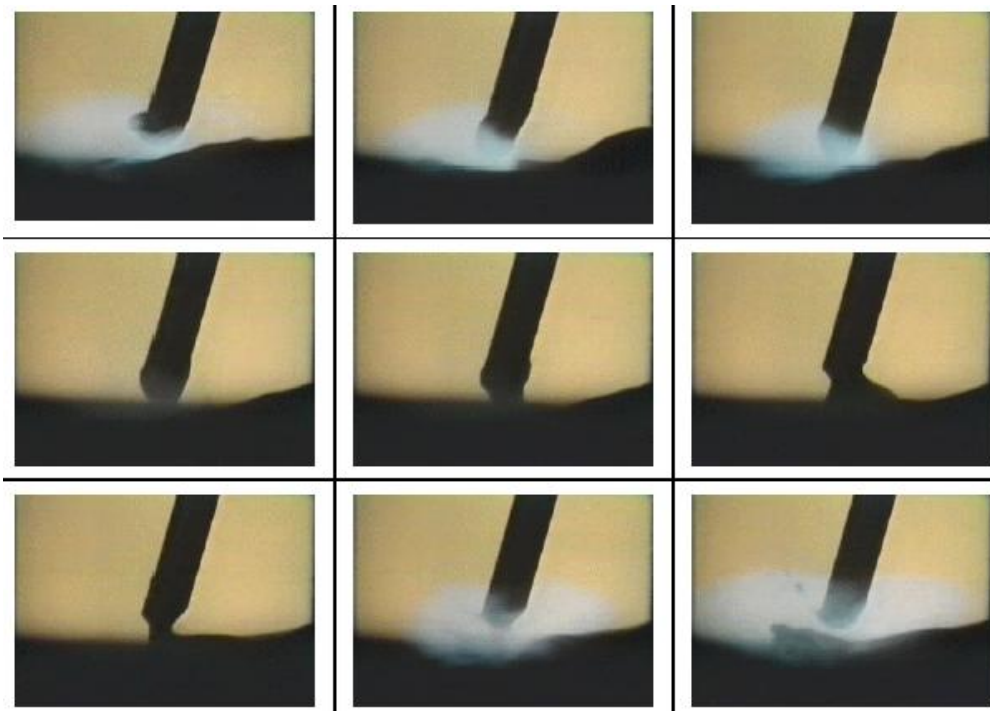
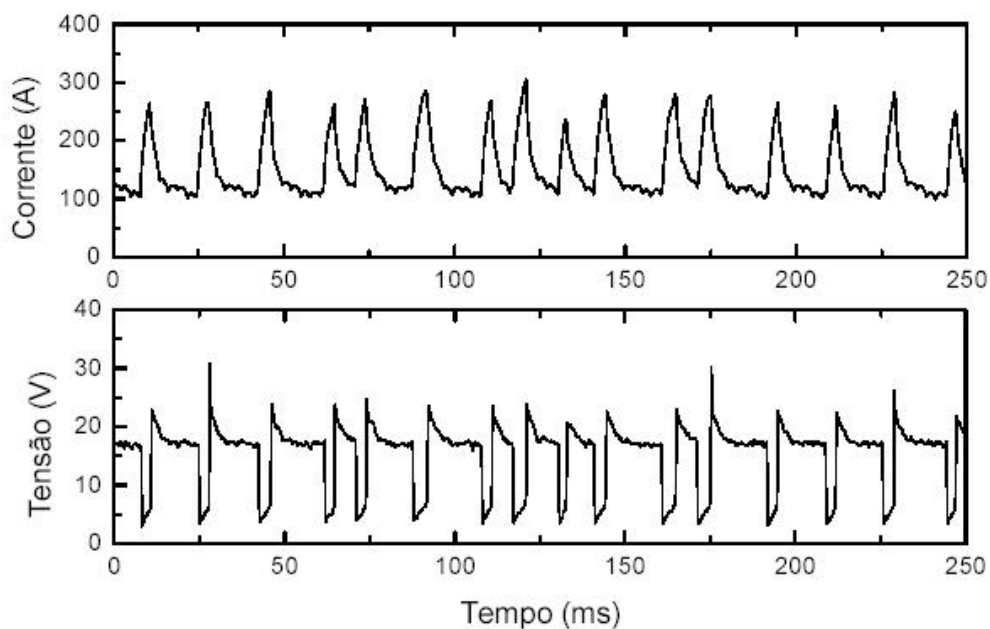


Figura 3.23 - Curto-circuito , imagens extraídas de uma filmagem de alta velocidade (MODENESI, 2004).

A figura 3.23 mostra imagens extraídas de uma filmagem de alta velocidade e a figura 3.24 mostra um oscilograma típico desta forma de transferência.



- Oscilograma da transferência por curto circuitos para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O<sub>2</sub>.

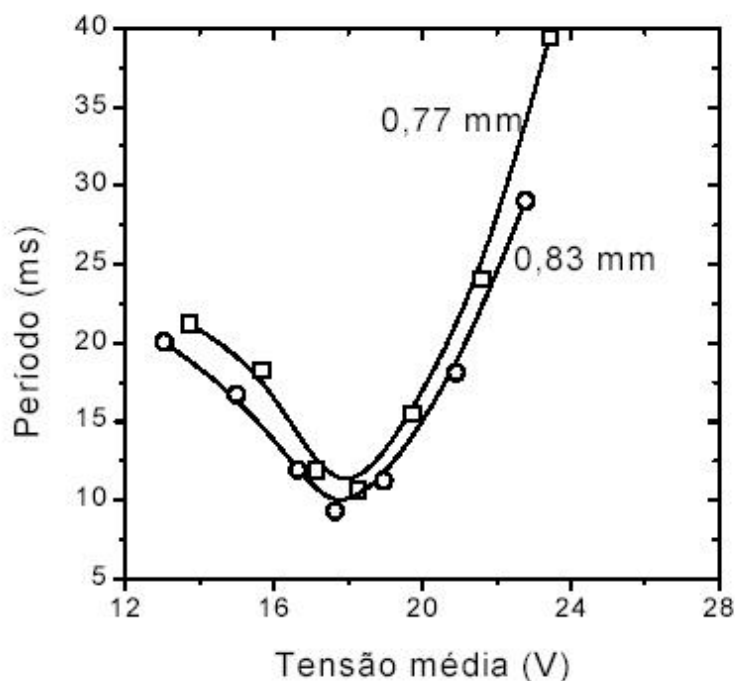
Figura 3.24. - Oscilograma típico da transferência por curto-circuito.

Para que o comprimento do arco se reduza, possibilitando a ocorrência do curto-circuito, a taxa de fusão no período de arco deve ser menor que a taxa de alimentação de arame, isto é, na equação 15:

$$w = w_c \cdot F_c + w_a \cdot (1 - F_c) = f \text{ sendo que: } w_c > w_a \quad (15)$$

Onde  $w$  e  $f$  são as taxas de fusão e alimentação respectivamente, os subscritos  $a$  e  $c$  referem-se, respectivamente, aos períodos de arco e curto-circuito e  $F_c$  é o fator de curto circuito, isto é, a fração de tempo em que o processo opera em curto-circuito.

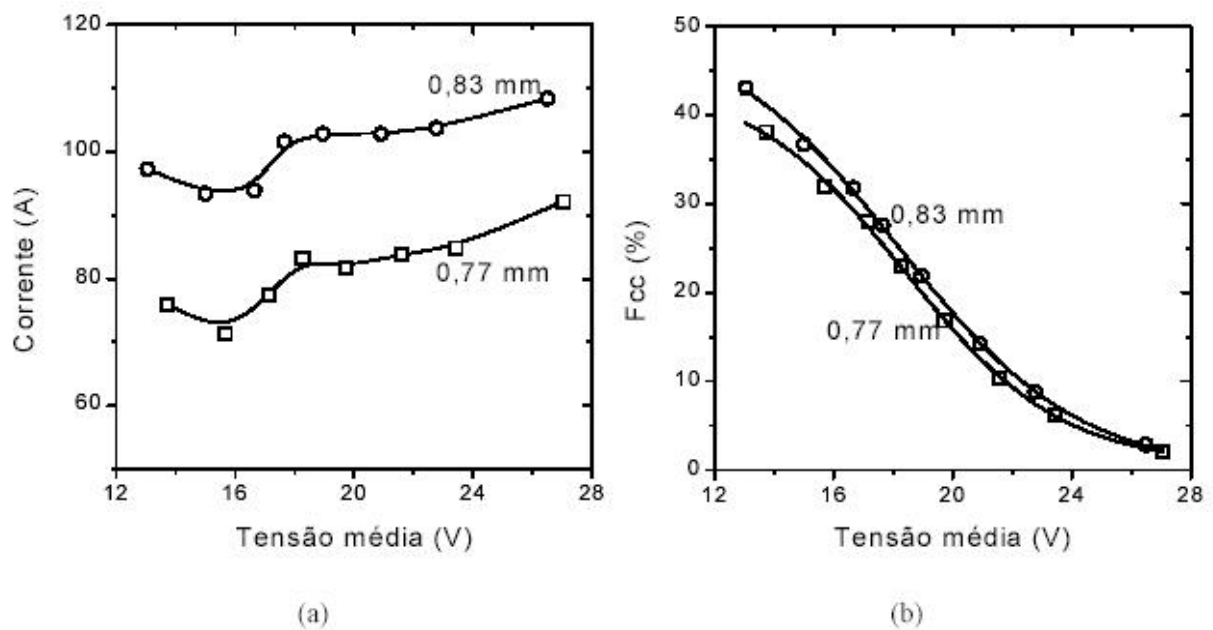
A ocorrência dos curtos tem certo caráter aleatório, podendo se observar, por exemplo, uma dispersão considerável nos valores do intervalo de tempo entre a ocorrência de dois curto-circuitos subseqüente (período de curto-circuito,  $T$ ), particularmente nas condições de operação mais instáveis. Apesar disto, a análise dos oscilogramas de corrente e tensão de soldagem é considerada como uma ferramenta viável para o estudo das condições operacionais com este tipo de transferência (MIRANDA, 1999; MODENESI, 2004; UTTRACHI E MEYER, 1993).



Variação do período de curto circuito com o tensão média de soldagem para arames de aço carbono (E70S6) de 0,77 e 0,83mm. Proteção:  $\text{CO}_2$ .

Figura 3.25 - Variação do período de curto circuito com a tensão de operação

A figura 3.25 mostra a variação do período de curto circuito com a tensão de operação para testes com arames de aço carbono com diâmetros ligeiramente diferentes. Observa-se a existência de um valor mínimo deste período para valores intermediários de tensão, o qual em geral corresponde, com as condições de melhor estabilidade e menor formação de respingos com esta forma de transferência (MODENESI, 2004, p. 138).



- (a) Variação da corrente média de soldagem e do (b) fator de curto circuito com o tensão. Arame AWS E70S6 de 0,77 e 0,83mm. Proteção: CO<sub>2</sub>.

Figura 3.26 - Variação da corrente média de soldagem e do fator de curto circuito

A figura 3.26 mostra a variação, para os resultados da figura 3.25, da corrente média de soldagem e do fator de curto-circuito (definido como a fração do tempo total de operação em que o arame permanece em curto,  $F_{cc} = t_c/T$ , sendo  $t_c$  a duração média de um curto-circuito). Este último parâmetro aumenta continuamente com uma redução da tensão de operação mostrando, como esperado, um peso maior dos curtos circuitos no processo quando a tensão (e, portanto, o comprimento do arco médio) é reduzida (MODENESI, 2004, p. 138; WANG ET AL, 1995, p. 374).

Durante um curto-circuito, a corrente de soldagem tende a aumentar rapidamente e a ruptura do contato líquido entre a poça de fusão e o eletrodo ao final do curto circuito pode ser violenta (ou mesmo, explosiva) com a vaporização de parte do material e a formação de respingos. Por outro lado, se, durante o curto

circuito, a corrente se elevar muito lentamente, o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte líquida e o processo ser interrompido com o arame superaquecido formando um emaranhado não fundido sobre o metal de base (“*bird’s nest*”) (MODENESI, 2004, p. 140).

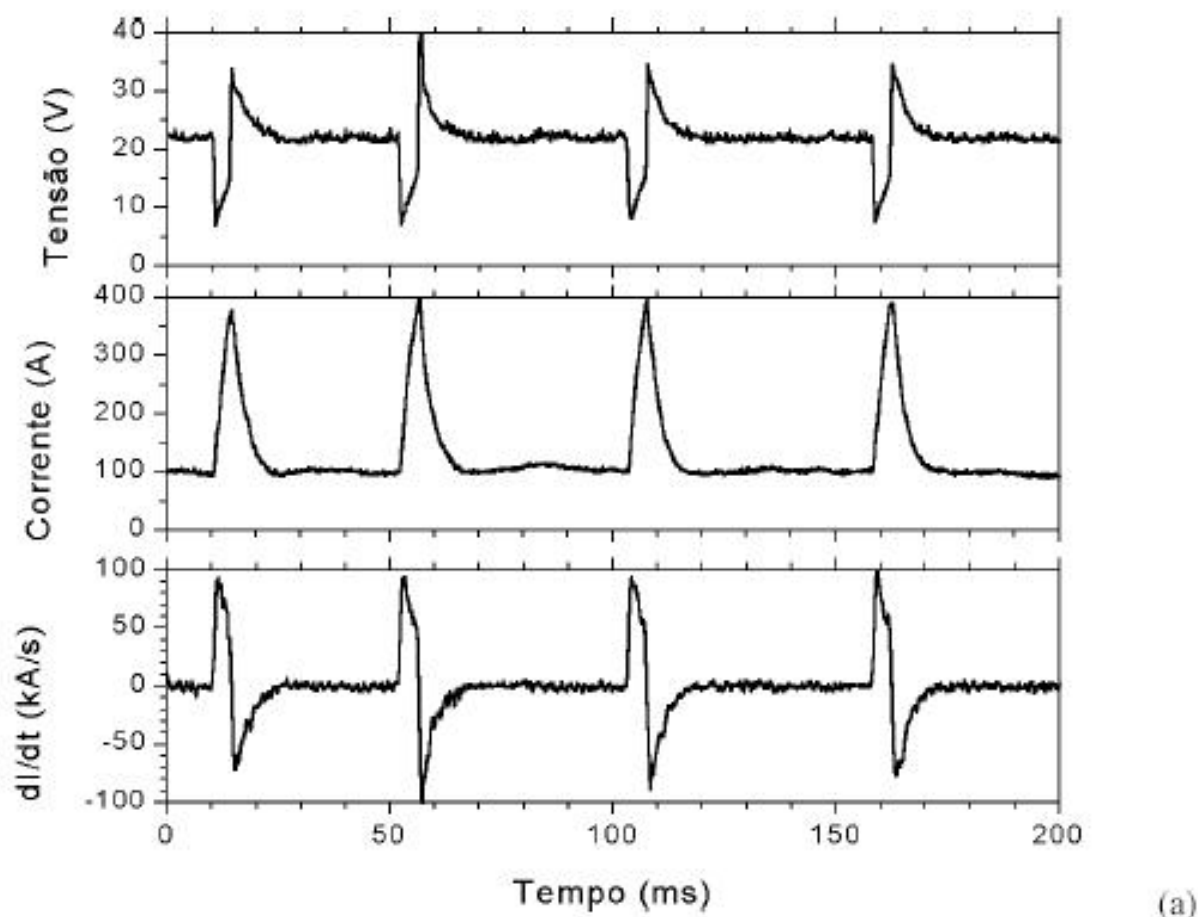
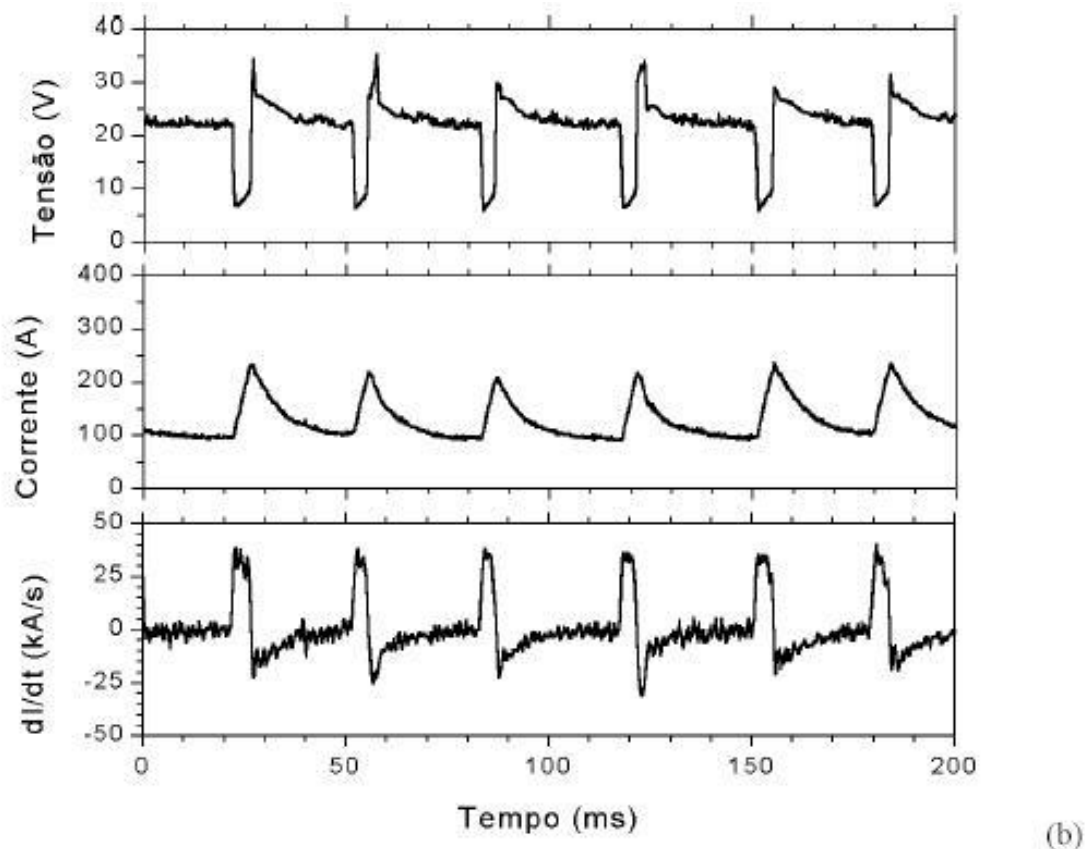


Figura 3.27A - Oscilograma soldagem curto circuito baixo nível de indutância (SILVA, 2005).

A figura 3.27A mostra oscilogramas de um teste de soldagem com transferência por curto-circuito realizado com um baixo nível de indutância, o que resultou em rápidas variações da corrente (indicadas na curva de taxa de variação da corrente,  $di/dt$ ) durante os curto-circuitos (SILVA, 2005, p. 128).



- Oscilogramas com (a) baixa e (b) alta indutância. Arame AWS E70S6, 1,2mm com alimentação de 4m/min. Gás: Ar-4%CO<sub>2</sub>.

Figura 3.27B – Oscilograma realizado mesmas condições com maior indutância

A figura 3.27B mostra oscilogramas de outro teste realizado com as mesmas condições de soldagem do teste anterior, mas com uma maior indutância. Pode-se observar o efeito deste parâmetro nas condições de soldagem, particularmente na frequência de transferência e nos valores máximos de corrente. Como, durante parte do processo, o arco está apagado, o calor transferido para a peça e, portanto, a capacidade de fusão da mesma é reduzida na soldagem por curto-circuitos. Isto pode levar à formação de defeitos de fusão (falta de fusão) na soldagem de peças de maior espessura. Por outro lado, este mesmo aspecto, torna a soldagem por curto-circuitos muito adequada para peças de pequena espessura. Esta é a forma de transferência de maior comumente utilizada na soldagem MIG/MAG de aços com mistura de proteção rica em CO<sub>2</sub> e com arames de pequeno diâmetro (0,8 a 1,2 mm) (MODENESI, 2004, p. 141; SILVA, 2005, p. 128).

### 3.16.7 Critérios de Estabilidade do Arco em Transferência por Curto-Circuito

A estabilidade do arco é responsável pela execução de soldas com boa qualidade.

Um arco estável depende das características do equipamento, das propriedades do eletrodo (física e química), da atmosfera ionizante e do material de base. Como estes fatores são influentes entre si, a estabilidade só será alcançada, com base no conhecimento das propriedades do arco. O ajuste das variáveis elétricas será baseado na ionização do gás, nas dimensões e tipo de metal de base e do eletrodo, na posição de soldagem, na qualidade exigida (MIRANDA, 1999, p. 30).

O modo de transferência metálica aumenta a complexidade da análise da estabilidade do arco. Na transferência por curto circuito as extinções do arco afetam a estabilidade, isto é, um arco estável possui uma transferência periódica e um tempo de apagamento o menor possível. Desta forma, em um menor período de curto-circuito e menor tempo de transferência, com a transferência de gotas menores em uma maior frequência, maior regularidade deve ser obtida. A Figura 3.28 ilustra uma caracterização de índices na transferência por curto-circuito.

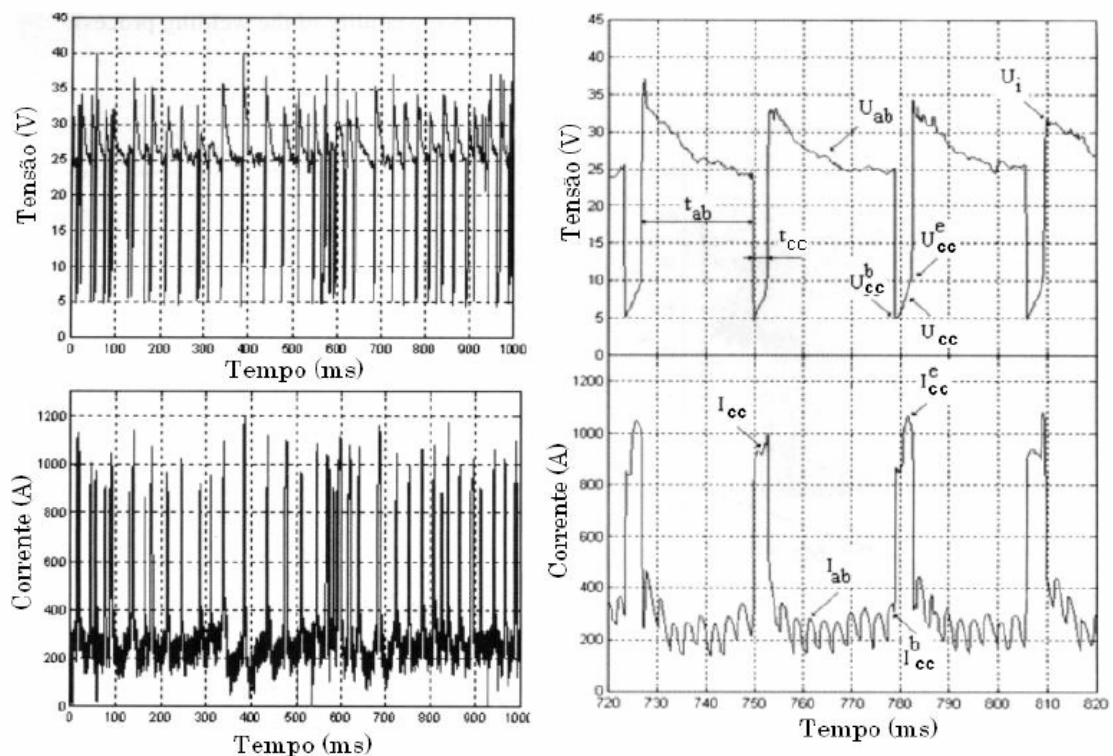


Figura 3.28 – Índices da transferência metálica por curto-circuito (Roca et al, 2005, p. 86).

Como se percebe, as características dinâmicas tensão e corrente do arco possuem vários índices que influenciam no modo de transferência por curto-circuito. Dentre estes se destacam:

- tensão de reignição do arco após o fim do curto-circuito ( $U_i$ );
- tensão do arco aberto ( $U_{ab}$ );
- tensão durante o curto circuito ( $U_{cc}$ );
- tensão quando inicia o curto ( $U_{b\ cc}$ );
- tensão quando termina o curto ( $U_{e\ cc}$ );
- tempo de duração do curto ( $t_{cc}$ );
- tempo que o arco permanece aberto ( $t_{ab}$ );
- período de transferência das gotas T ( $t_{ab} + t_{cc}$ );
- corrente do arco aberto ( $I_{ab}$ );
- corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ );
- corrente quando o curto é iniciado ( $I_{b\ cc}$ ) e
- corrente do final do curto ( $I_{e\ cc}$ ).

Vários critérios de estabilidade baseado na análise de alguns dos índices anteriormente descritos têm sido citados na literatura. Dutra e Baixo (1990, p. 33) ao analisarem a estabilidade do arco, em processo de soldagem MIG/MAG usaram como parâmetros característicos períodos de duração do curto-circuito, período de transferência e nível máximo do pico da corrente de curto, bem como os desvios padrão relativo a estes índices. O período de duração do curto-circuito explica a dispersão dos parâmetros não controlados da operação de soldagem em fontes moduladas em tensão constante. Irregularidades no período de curto influem diretamente no nível do pico da corrente de curto nos ciclos de transferência. Período mais prolongado faz com que a corrente atinja valores de picos mais elevados, aumentando os respingos.

Miranda (1999, p. 35), de acordo com a literatura, associa uma máxima estabilidade do arco aos menores períodos e menores tempos de curto. Adolfson et. al (1999, p. 69) acrescenta que condições ótimas de estabilidade correspondem a quatro características básicas, ou seja, uma máxima taxa de curto-circuitos; uma

mínima variação no período de curto; uma mínima taxa de massa transferida por curto-circuito associado a uma mínima perda de respingos.

Análises mais abrangentes de avaliação de regularidade dos parâmetros aplicados a estes índices têm sido comumente utilizadas por vários autores (Dutra e Baixo, 1990, p. 35; Wang et al, 1989, p. 370). Dentre estes, a utilização de valores médios, desvios padrão, valores máximos e mínimos observáveis, coeficiente de variação, histogramas entre outros permite avaliar a regularidade dos parâmetros selecionados no que se refere a uma dispersão dos mesmos.

Hermans e Den Ouden (1999, p. 139) registraram que uma máxima estabilidade do processo e conseqüentemente do arco é possível, quando o desvio padrão da freqüência de curto-circuito é mínimo. Na transferência por curto-circuito a oscilação da poça de fusão é acelerada com a reignição do arco e ruptura da ponte metálica no momento da transferência do metal líquido. A estabilidade ocorre quando a freqüência de curto-circuito e a freqüência de oscilação da poça fundida são iguais. Dutra e Baixo (1990, p. 36) acrescentam a esta estabilidade o mínimo desvio padrão relativo do tempo de curto circuito e nível de corrente de pico.

A análise dos histogramas dos picos de corrente, dos tempos entre as transferências e dos tempos de curto circuito, para avaliar a estabilidade do arco mostra que a tensão (para uma dada velocidade de alimentação do eletrodo e velocidade de soldagem) e a indutância são as variáveis críticas para estabelecer uma condição adequada de soldagem. Para tensões elevadas, a indutância deve ser ajustada em valores altos (taxa de crescimento da corrente lenta), e para tensões menores, a indutância deve ser baixa (Miranda, 1999, p. 35 apud Dutra, 1989, p. 36); com a elevação da tensão, a corrente média de soldagem acompanha esta elevação, resultando em um aumento da velocidade de fusão do eletrodo. A implicação direta deste aumento é o deslocamento da altura em que o eletrodo inicia seu período de arco, permitindo que a gota tenha mais tempo para crescer fazendo com que o período de curto seja prolongado e o pico da corrente de curto maior, provocando instabilidade no arco (maiores desvios no período de curto e corrente de pico).

Roca et al (2005, p. 90) estudaram a estabilidade do processo a arco com proteção gasosa (GMAW) e desenvolveu um método de análise estatística para o estudo da estabilidade da transferência metálica no modo curto-circuito do processo.

Este método, baseado na determinação das áreas dos diagramas tensão e corrente de soldagem, se mostrou eficaz para analisar a estabilidade da transferência metálica por curto-circuito. Foi verificado que velocidade de alimentação e a distância bico contato peça (DBCP) são os parâmetros que mais influenciam na estabilidade do processo. Observou-se que ao variar a velocidade, mantendo os outros parâmetros constantes, inclusive a DBCP, os coeficientes de variação (média/desvio padrão) do tempo de duração dos curtos-circuitos, do tempo de arco aberto, do tempo total de curtos-circuitos mostraram altos valores, resultando em um processo bastante instável, com gotas irregulares e muitos respingos. Mantendo constantes os valores da velocidade de alimentação e variando a DBCP, os coeficientes de variação citados acima, também sofreram variação, com altos valores. Avaliações estatísticas dos índices de curto-circuito se tornam uma opção interessante para avaliações de estabilidade do arco. Desta forma, menores valores de coeficiente de variação do tempo de duração do curto-circuito podem ser associados a transferências mais uniformes. Quando as gotas metálicas são transferidas uniformemente para a peça metálica, os oscilogramas da corrente e tensão de soldagem são regulares. (Roca et AL, 2005, p. 91)

Shinoda et al (1989, p. 524) também avaliaram a estabilidade do processo GMAW no modo de transferência por curto-circuito, utilizando coeficiente de variação de dados baseados no tempo do arco, tempo de duração dos curtos-circuitos, oscilogramas da tensão e corrente de soldagem, etc.

Wang et al (1995, p. 377) investigaram os sinais do arco, processando e caracterizando os modos de transferência metálica para o processo FCAW. Os resultados para os sinais do arco foram analisados pela técnica da transformada rápida de Fourier, mostrando que as flutuações tanto da tensão do arco ( $\Delta U$ ) como os espectros característicos da transformada de Fourier foram adequadas para distinguir os diferentes modos de transferência metálica.

### **3.16.8 Curto-Circuito Forçado**

Não existem muitos estudos, pesquisas e literaturas sobre curto-circuito forçado, o que se sabe é que na prática da indústria, para aumentar a produtividade, se faz a transferência do material fundido por curto-circuito ser elevada a altos níveis de corrente para aumentar a produtividade ou penetração da solda sendo classificado por isso como curto-circuito forçado.

Este modo de transferência alia as propriedades de alta produtividade do goticular, devido às altas correntes utilizadas, e o baixo aporte térmico característico do curto-circuito e que inviabilizam o goticular que apesar de sua estabilidade de arco prejudica o material devido ao alto aquecimento. Em compensação o problema

da instabilidade de arco que gera diversos problemas é intensificado devido a correntes maiores.

Mais especificamente o aumento da corrente provoca aumento da força impingida pelas gotas na poça de fusão, mas há uma clara dependência do tipo de transferência metálica. A força das gotas que impingem na poça aumenta a penetração dos cordões de solda, embora com efeito menos marcante que a corrente e o comprimento de arco (RODRIGUES E, 2002, p. 53).

No estudo de Kobayashy (2002, p. 19), o autor pesquisa o rendimento de deposição para o arame tubular no modo de transferência por curto-circuito fazendo uma relação do material depositado na peça com o material que deveria ter sido depositado se não houvesse perdas, tendo assim o rendimento real de deposição e a sua relação com a formação de respingos. Para o estudo do curto-circuito forçado são raros os estudos de rendimento e do comportamento desse processo e mesma técnica empregada por Kobayashy, também será utilizada.

Como a principal limitação do processo de soldagem por CCF é a sensibilidade à variação de parâmetros elétricos de operação de arco elétrico de soldagem, e que influenciam na qualidade, a aplicação de redes neurais na soldagem pode ajudar na identificação dos parâmetros que mais influenciam no processo.

Isso porque redes neurais podem estabelecer um critério para a avaliação da estabilidade do arco de solda no processo de solda através dos sinais recebidos durante a solda. O processo é dividido em duas fases: Análise correlacional, escolha dos sinais para se treinar a rede e configuração da rede neural estabelecendo uma configuração para a rede neural através de treinamento e validação (CRUZ G.F, 2006, p. 129).

Neste trabalho será usado o estudo da aplicação de redes neurais para a classificação da influência de parâmetros na estabilidade do Arco de Solda, (CRUZ G.F 2006, p. 135). Nesse estudo o autor utiliza uma parte dos dados do trabalho de Graduação de Dobignies (2003, p. 69), que se baseia na coleta de dados estatísticos de testes de solda por curto-circuito e que foram coletados da mesma forma que na dissertação presente.

Sendo assim, como a quantidade de resultados estatísticos obtidos neste trabalho é muito grande, a aplicação das redes neurais de Cruz (2006, p. 109) proporcionou a seleção dos parâmetros mais influentes durante a solda.

### 3.17 ORIGEM DOS RESPINGOS

Os respingos são provavelmente gerados, quando o tempo de curto-circuito ou tempo de arco é irregular. Um arco estável causa baixa taxa de salpicos e uma forma de onda regular enquanto que um arco instável causa uma alta taxa de salpicos. Essa taxa de salpicos pode ser controlada pela regulação da indutância (KANG, 2003, p. 246 apud MILLER, 1995, p. 198).

A transferência por curto-circuito é caracterizada através de contato regular entre o eletrodo e a poça de fusão. O crescimento da gota acontece no período de abertura do arco, considerando que, durante o período de contato, a transferência de metal do eletrodo para a poça acontece. Pode ser descrito o comportamento cíclico do processo em termos do tempo de circuito-curto, tempo de arco ou a frequência de curto-circuito. Como o arco não queima durante o período de curto-circuito a contribuição de calor é muito menor.

A qualidade de processo da solda por curto-circuito pode ser representada através da forma do cordão, seja pela largura do cordão e profundidade de penetração, ou através de taxa de respingos. Existem modelos para quantificar a qualidade do processo, mas não podem ser usados durante a soldagem (KANG, 2003, p. 247).

Como o curto-circuito tem características de modo de transferências de arco periódicas entre o arame de solda e poça de fusão, a gota de metal fundido cresce alimentada pelo eletrodo enquanto o arco for mantido, e é transferida para a poça de fusão, formas irregulares de onda durante a solda e a voltagem de arco, indicam variações dentro da gota fundida, dando idéia do tamanho e desequilíbrio entre várias forças do destacamento da gota. A probabilidade de respingo gerado, então, é significativamente maior quando o tempo curto-circuito, ou tempo de arco, é irregular. Com a taxa de respingo relacionada à regularidade do arco e do tempo de curto-circuito. Um arco estável conduz a uma baixa taxa de respingo e forma de onda regular enquanto um arco instável causa uma taxa de respingo alta (KANG, 2003, p. 247).

Podem ser distinguidas três causas da instabilidade (HERMANS, 1999; MODENESI, 2004; SCOTTI, 2002):

- Curto-circuitos com variações abruptas de corrente gerando contato do eletrodo com a poça de fusão em um período muito curto de tempo e sem nenhuma transferência de metal (curto-circuito incidental);

- Falha na reignição de arco;
- Variações na taxa de alimentação.

Além desses fatores muitos estudos ainda indicam problemas de instabilidade e respingos estão relacionados diretamente com a frequência de curto-circuito e a frequência de oscilação da poça de fusão. Mais especificamente, estes estudos indicam que a estabilidade de processo é máxima quando a frequência de curto-circuito igualar a frequência de oscilação da poça de fusão (HERMANS, 1999, p. 138). Sob estas condições, os contatos entre gotas e poça de fusão transferem estabilidade alta ao processo de solda.

Também para efeitos de estabilidade de arco, uma grande DBCP e um grande comprimento de arco ( $l_a$ ) podem gerar instabilidade no arco e, conseqüente, aumento na quantidade de respingos. De acordo com os autores Gimenes (2005, p. 78), Modenesi (2004, p. 91), Scotti (2002, p. 83), o comprimento do arco mostra ter alguma influência sobre a instabilidade do cordão, visto que para as mesmas condições de soldagem, há uma relação direta entre o comprimento do arco e o volume depositado por comprimento soldado, isto é, comprimentos de arcos maiores (tensões médias maiores) necessitaram de um maior volume depositado por comprimento soldado para que o cordão permaneça estável.

### **3.17.1 Efeito da Indutância na Estabilidade do Arco e Formação de respingos.**

A indutância é uma importante característica dinâmica do processo e deve ser ajustada adequadamente. Este parâmetro representa a propriedade que um circuito elétrico tem de diminuir a taxa pela qual a corrente aumenta (a corrente ao passar através de um núcleo indutivo, cria um campo magnético contrário à corrente de soldagem).

No processo por curto-circuito, a regularidade do processo de soldagem, bem como a formação de respingos, está fortemente relacionada à indutância de saída. O ajuste da indutância não evita a ocorrência de respingos, apenas contribui para achar o ponto de operação, onde os mesmos são minimizados.

Segundo Júnior (2002, p. 24) verificou que de acordo com a literatura e observações práticas, os respingos ocorrem freqüentemente nos momentos em que a gota toca a peça e durante a reignição do arco, Figura 3.29. Quando a gota está

na iminência de tocar a peça, a distribuição do arco sobre a gota pode fazer com que a força eletromagnética atue no sentido de empurrar a gota para cima, projetando-a para fora da região da poça metálica dependendo do valor da corrente. Também, a passagem de corrente pela pequena área inicial de contato, da gota com a peça, causa uma elevação pontual de temperatura e, conforme o valor da corrente pode ocorrer a evaporação de metal fundido, provocando micro explosões. Estes dois eventos são apontados por gerar os respingos de maior volume. Durante a reignição do arco são gerados os respingos finos, e os fatores abaixo relacionados são indicados como os principais causadores dos mesmos.

- Máxima densidade de corrente devido ao elevado valor da corrente e da pequena área da ponte formada entre o metal fundido do eletrodo e a peça. A elevada densidade da corrente provoca um superaquecimento do metal fundido e conseqüente explosão, que acaba expulsando parte do metal fundido em forma de respingos.
- Após a reabertura do arco com o rompimento da ponte metálica, grande pressão sobre a poça metálica é causada pela alta densidade de corrente passando por uma pequena região gasosa.
- Forças eletromagnéticas máximas são geradas devido ao elevado valor da corrente e da pequena área da ponte.
- Força de escoamento muito grande devido à gota estar toda em contato com a peça.

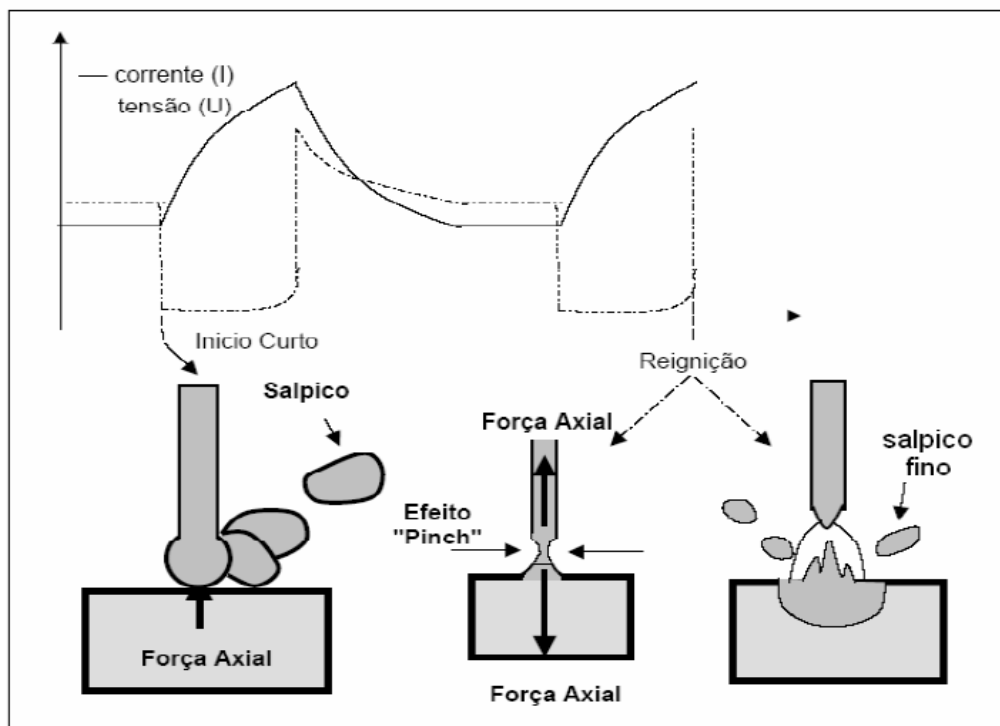


Figura 3.29 – Detalhe da transferência durante curto-circuito (Junior, 2002).

A taxa de aumento da corrente durante a formação da ponte entre o eletrodo e o material a ser soldado na transferência por curto circuito, associada com o aumento das forças eletromagnéticas durante o curto, afeta o arco. A inclusão da indutância para diminuir a taxa de subida da corrente na primeira fase do curto é muito útil principalmente quando a soldagem é feita em diferentes posições, melhorando a estabilidade do arco (Miranda, 1999, p. 39).

A Figura 3.30 ilustra como o controle da taxa da corrente de pico (corrente de curto), usando a indutância pode afetar o processo no modo curto-circuito. Na baixa indutância a corrente sobe rapidamente (Figura 3.30-A), de forma abrupta fazendo com que ocorra uma fusão do eletrodo com o aparecimento de forças explosivas que podem gerar a formação de respingos. Quando a velocidade da corrente nesta condição é reduzida com o acréscimo da indutância (Figura 3.30-B) a corrente de curto sobe mais suavemente e as forças explosivas no eletrodo são minimizadas ou eliminadas.

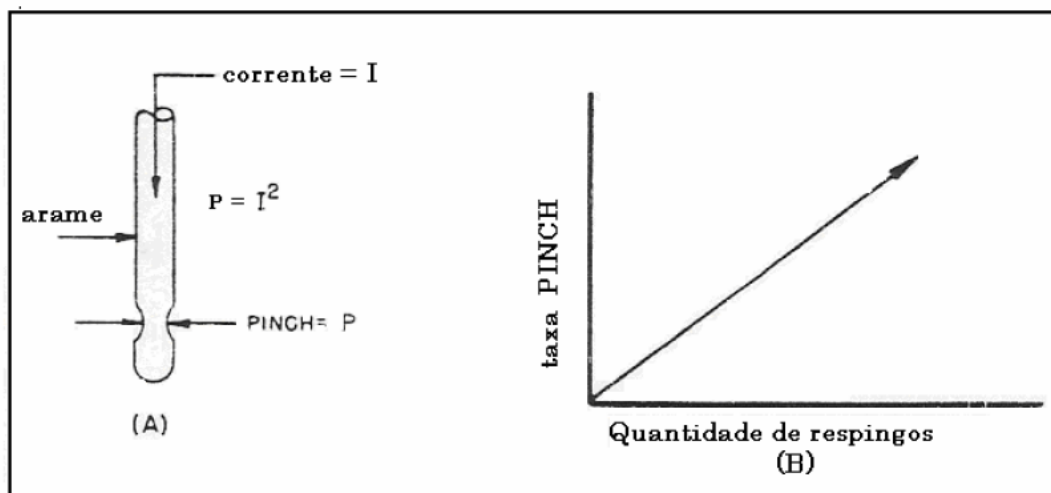


Figura 3.30 – Efeito da indutância na corrente de curto (Uttrachi e Meyer, 1993).

A indutância na fonte de potência controla a taxa de subida da corrente e conseqüentemente a taxa de aplicação da força “*pinch*” (compressão). Se a força “*pinch*” for aplicada com maior intensidade, os respingos irão aumentar (as gotas serão ejetadas violentamente para a poça de fusão). No modo curto circuito, um acréscimo na indutância irá diminuir o número de curtos metálicos transferidos por segundo e aumentar o tempo de arco. O tempo do arco apagado forma uma poça menos fluida (Uttrachi e Meyer, 1993, p. 49).

Miranda et al (1998, p. 55) afirmam ter a indutância um efeito muito significativo na transferência por curto-circuito, mas nenhum na transferência por spray. O aumento da indutância gera um aumento do tempo do arco, diminuindo a freqüência de curtos-circuitos. O estudo da indutância é ainda recente no Brasil e geralmente é associado à otimização da soldagem cuja transferência seja por curto-circuito, influenciando diretamente na formação de respingos e na estabilidade do arco. A variação da corrente representa duas conseqüências sobre a gota, independente do tipo de transferência metálica:

1. Alteração do calor gerado no arame devido ao efeito *joule*;
2. Modificação da força eletromagnética. Afetando diretamente o fenômeno de estrangulamento da gota (efeito “*pinch*”). Para a gota fluida formada na ponta do arame, essa força exerce influência relevante para o seu destacamento (para um dado diâmetro do arame, esse efeito é proporcional ao quadrado da corrente). A corrente máxima alcançada controla a intensidade do efeito “*pinch*”, enquanto a taxa

de variação da corrente afeta a cinética deste efeito (Miranda, 1998, p. 58). Em determinadas situações, tal como na transferência por curto-circuito, quanto maior for a cinética do efeito “*pinch*” maior será a instabilidade do arco e a quantidade de respingos gerados no curto-circuito.

A Figura 3.31 mostra de forma esquemática, de acordo com Utrachi e Meyer (1993, p. 50), a taxa “*pinch*” e o seu efeito nos respingos. Entretanto, resultados de trabalhos de Miranda et al (1998, p. 62) não indicaram uma relação linear crescente da taxa de respingos com o aumento da taxa “*pinch*” .

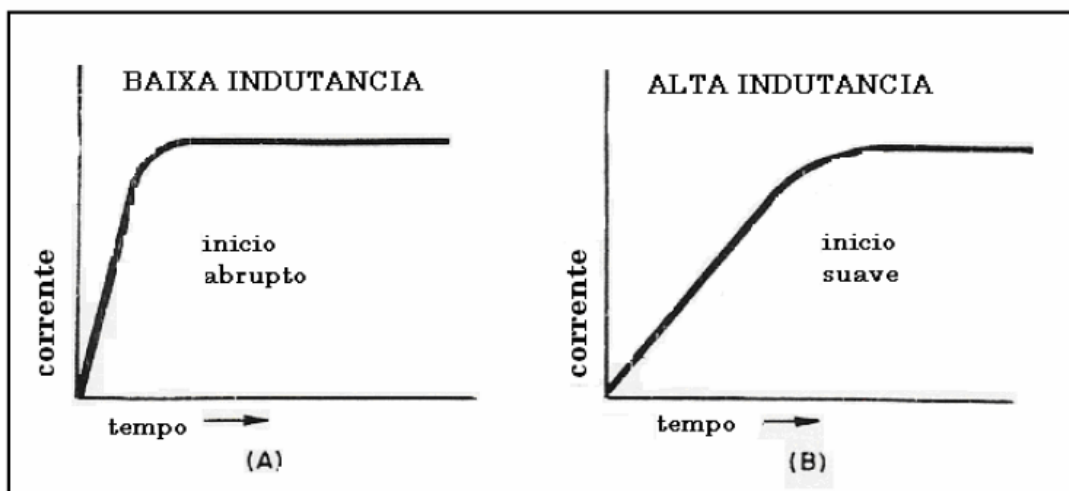


Figura 3.31 – Efeito “*pinch*” e sua influência na quantidade de respingos (Utrachi e Meyer, 1993).

Através dos ajustes de indutância e da característica estática da fonte, é possível obter as condições ótimas no MIG/MAG com transferência por curto circuito. Portanto, o efeito indutivo deve ser estudado mais detalhadamente para auxiliar na obtenção de um processo estável e econômico, soldas com boas propriedades e com boa aparência (UTTRACHI E MEYER, 1993, p. 51).

É essencial salientar ainda, a importância de outros fatores (além da indutância) na soldagem e o efeito dos mesmos sobre a influência da indutância na estabilidade do arco, no processo por curto-circuito. Como exemplo destes fatores, pode-se citar a tensão e a velocidade de alimentação do arame eletrodo (FORTES, 2004, p. 35 apud MIRANDA, 1999, p. 98).

## 4 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

### 4.1 CORPOS DE PROVA

Material de base, aço ABNT 1020, com espessura de 1/8" , comprimento de 160 mm e largura de 40 mm, Figura 4.1. Esta espessura do material foi escolhida para que se pudesse realizar testes com as altas velocidades de alimentação características do Curto-circuito forçado. Antes de proceder a soldagem, os corpos de prova foram limpos com escova de cerdas de aço inoxidável e, em seguida, com acetona, com o intuito de realizar uma descontaminação das mesmas. Para a pesagem dos corpos de prova uma balança de precisão Marte odelo AS 1000 e precisão de 0,01g .



Figura 4.1 – Corpos de prova

### 4.2 ELETRODOS

Arame AWS ER70S6, com 1 mm de diâmetro . Este arame foi utilizado por ser um arame largamente utilizado na indústria.

### 4.3 GÁS DE PROTEÇÃO

O gás utilizado foi uma mistura gasosa com 25% de CO<sub>2</sub> e com 75% de Argônio (Ar). A vazão de gás empregada foi de 15 L/min para os testes.

#### 4.4 FONTE DE SOLDAGEM

Para soldagem dos corpos de prova foi utilizada uma fonte convencional de marca ESAB modelo *SMASHWELD 316*, Figura 3.2.



Figura 4.2 - Fonte de soldagem

#### 4.5 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO DA TOCHA

As soldagens foram realizadas fixando-se a tocha em um equipamento “Tartilope V1”, que permite a regulagem da velocidade de soldagem, como se pode observar na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Sistema de movimentação e fixação da tocha

Os testes foram realizados mantendo-se a relação Velocidade de arame pela Velocidade de soldagem  $V_{ar}/V_s$  constante e igual a 0,33 m/cm, para que a quantidade de material depositada por unidade de comprimento fosse constante.

#### 4.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados será feita com um SAP-1. Para o sistema de aquisição de dados foi utilizado um sensor de corrente por efeito *Hall*. Este sensor faz a leitura da corrente e envia o sinal para a placa de aquisição.

As leituras de tensão, foram realizadas entre o bico de contato e a pega de trabalho. Os sinais de tensão lidos, eram enviados para a placa de aquisição.

A placa de aquisição era instalada em um computador onde foi instalado o programa "*Migmsdp.sap*" programa que gravava os dados e os transformava em Oscilogramas. Os dados gravados então eram tratados pelo programa estatístico chamado *Datsolte*.

#### 4.7 COLETA DE RESPINGOS

Os respingos gerados durante a solda foram recolhidos utilizando-se de um recipiente em chapa de aço inox de 250mm X 150mm X 110mm, onde dentro as peças foram soldadas, como se observa na Figura 4.4. Após a solda foi feita a limpeza com escova e feito o acondicionamento dos respingos em recipientes do tipo potes para posterior registro fotográfico. O objetivo era coletar a maior quantidade de respingos possíveis.



Figura 4.4 - Coletor de Respingos:

#### 4.8 MEDIDOR DO COMPRIMENTO DE ARAME (TRILHO)

Para medir o comprimento de arame depositado com precisão foi confeccionado um trilho de 5m por onde o arame passava do carretel até o cabeçote da máquina, Figura 4.5. Nesse trilho, o arame era marcado antes da solda, após o teste verificava-se o comprimento em que a marca do arame se deslocou em relação ao trilho. Com este dado podia-se calcular a quantidade de arame utilizado para o cordão de solda realizado.



Figura 4.5. Medidor do comprimento de arame (Trilho)

## **5 METODOLOGIA**

### **5.1 TESTES PRELIMINARES**

Considerando-se que objetiva-se estudar o curto-circuito no modo forçado, onde as velocidades de arame utilizadas já são suficientes para a obtenção do modo de transferência goticular, foram realizados testes preliminares com aquisição de dados de tensão corrente e oscilogramas para determinação da corrente de transição.

Primeiramente se identificou o ponto de transição entre o curto circuito e o goticular para o arame de 1 mm. A identificação se deu quando os oscilogramas e os dados de tensão e corrente indicaram características peculiares ao modo de transferência goticular, além do som e arco característico.

Após isso abaixou-se apenas a tensão, para migrar para o modo de transferência por curto-circuito forçado e variou-se a velocidade do arame em uma faixa que fosse possível trabalhar, do ponto de vista de aspecto de salpicos, geometria e qualidade do cordão de solda. Obteve-se uma faixa mínima de 10 a 11 m/min para o arame eletrodo utilizado. A partir desta informação, foram escolhidas, na faixa do curto-circuito forçado, 3 velocidades de arame [ $V_{AR}$ ] para serem testadas: 12, 16 e 20 m/min.

### **5.2 COMBINAÇÕES DE TESTES (PLANEJAMENTO)**

Os testes preliminares permitiram estabelecer as velocidades do arame a serem utilizadas 12, 16 e 20m/min. Foram ainda considerados nos testes de rendimento outras variáveis, a distância entre o bico de contato e a peça [DBCP] foi variada em 2 níveis – 8 e 12 mm, enquanto a indutância [INDUT] foi variada em 3 níveis – 0%, 40% e 80%, através do indicador do equipamento, este procedimento não garantia que as diferenças de indutância fossem eqüidistantes. As diferentes combinações testadas para determinação do rendimento são mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 : Combinações testadas

<b>Combinação</b>	<b>V<sub>AR</sub></b> <b>[m/min]</b>	<b>INDUT</b> <b>[%]</b>	<b>DBCP</b> <b>[mm]</b>
A	12	0	8
B	12	40	8
C	12	80	8
D	16	0	8
E	16	40	8
F	16	80	8
G	20	0	8
H	20	40	8
I	20	80	8
J	12	0	12
K	12	40	12
L	12	80	12
M	16	0	12
N	16	40	12
O	16	80	12
P	20	0	12
Q	20	40	12
R	20	80	12

A tocha se movimentou com velocidades obedecendo a relação Velocidade de alimentação do arame e Velocidade de Soldagem  $V_{AR}/V_s=0,33$  m/cm. A vazão do gás foi mantida constante em 15 l/min. As soldas foram realizadas em simples deposição com cordões de 150 mm de comprimento e na posição plana, com tocha posicionada perpendicularmente a direção transversal da chapa. As tensões também foram ajustadas para cada velocidade de alimentação utilizada e serão demonstradas junto com os resultados.

### 5.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliar o modo de transferência por curto-circuito forçado (CCF) serão usados os seguintes métodos e informações:

- Rendimento de deposição pelo peso do arame usado para a solda comparado ao peso de material depositado.
- Aquisição de dados de tensão, corrente e tempo através de sensores conectados nos cabos de passagem de energia e tratados estatisticamente.
- Gráficos de tensão e corrente.
- Coleta de respingos.
- Análise da comparação com o processo com arame tubular.

### 5.4 AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO

Para o cálculo do rendimento real de deposição foi necessário a pesagem de 1 metro de arame ER70S6 (massa linear) utilizado para cálculo da massa total. Antes e após a realização de cada solda, os corpos de prova foram pesados, obtendo-se o valor da massa inicial ( $M_i$ ), massa do corpo de prova antes da soldagem, e massa final ( $M_f$ ), massa do corpo de prova após a soldagem, e depois de uma limpeza para retirada de salpicos. Para cálculo do rendimento real será utilizada a equação 16. \* O consumo linear foi medido com a ajuda do Trilho de 5 metros Figura 4.5 criado para visualizar a movimentação do arame e medir o comprimento consumido a partir de um ponto determinado.

Optou-se por medir o comprimento de consumo de arame desta maneira porque os resultados fornecidos pelo sistema de aquisição apresenta erros que poderiam afetar consideravelmente os resultados finais

$$n_r = \frac{M_f - M_i}{m_e * c} * 100 \quad (16)$$

Equação 16.(nr – rendimento real de deposição; Mf – massa final do corpo em g; Mi – massa inicial do corpo em g ; me – massa linear do arame em g/m ; c – consumo linear em metros).

## **5.5 AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS E GRÁFICOS**

Durante os testes o sistema de aquisição coletou dados de tensão e corrente. Com estes dados o software de aquisição MIGMAG.SAP gerou os gráficos de oscilogramas e o programa DATSOLTE gerou os dados estatísticos dos testes que foram tratados e organizados pelo programa Excel.

## **5.6 AVALIAÇÃO DOS RESPINGOS**

Após cada ensaio realizado, os respingos foram coletados e fotografados por uma Lupa e com uma régua milimetrada como referência para se avaliar o tamanho dos respingos .

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 RESULTADOS DE RENDIMENTOS

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.1. Nota-se que o rendimento de deposição surpreendentemente ficou acima de 90% em todos os casos, mostrando que as perdas por respingo são limitadas a no máximo 10%. Estes resultados mostram-se semelhantes, em termos de rendimentos, aos de Kobayashy (2002), que obteve rendimentos entre 96 a 99 % para deposição de arames tubulares.

Tabela 6.1: Resultados de rendimentos obtidos dos ensaios executados.

Comb	VALORES REGULADOS			VALORES MONITORADOS		VALORES MEDIDOS				CALCULADOS
	V <sub>AR</sub> [m/min]	INDUT [%]	DBCP	Tensão [V]	Corrente [A]	Mi [gr]	Mf [gr]	C [m]	m <sub>e</sub> [gr/m]	η [%]
<b>A</b>	12	0	8	20,8	220	524,40	545,01	3,78	5,763	<b>94,7</b>
<b>B</b>	12	40	8	20,8	232	537,36	567,61	3,77	5,763	<b>93,3</b>
<b>C</b>	12	80	8	20,8	228	542,40	561,05	3,57	5,763	<b>90,7</b>
<b>D</b>	16	0	8	22,8	276	538,80	568,65	3,73	5,763	<b>92,4</b>
<b>E</b>	16	40	8	22,8	276	542,50	563,90	3,88	5,763	<b>95,6</b>
<b>F</b>	16	80	8	22,8	276	539,55	568,79	3,53	5,763	<b>94,6</b>
<b>G</b>	20	0	8	25,6	324	570,75	588,94	3,24	5,763	<b>97,5</b>
<b>H</b>	20	40	8	25,6	310	546,72	564,84	3,26	5,763	<b>97,6</b>
<b>I</b>	20	80	8	25,6	296	531,90	560,61	3,32	5,763	<b>97,8</b>
<b>J</b>	12	0	12	20,8	216	539,51	568,59	3,61	5,763	<b>91,8</b>
<b>K</b>	12	40	12	20,8	220	599,39	617,69	3,31	5,763	<b>96,0</b>
<b>L</b>	12	80	12	20,8	212	547,57	567,76	3,65	5,763	<b>96,0</b>
<b>M</b>	16	0	12	23,6	260	526,07	566,21	3,80	5,763	<b>92,0</b>
<b>N</b>	16	40	12	23,2	252	540,42	560,92	3,80	5,763	<b>93,7</b>
<b>O</b>	16	80	12	23,6	260	551,44	571,44	3,74	5,763	<b>92,8</b>
<b>P</b>	20	0	12	26,8	264	547,54	566,73	3,44	5,763	<b>96,9</b>
<b>Q</b>	20	40	12	26,8	276	534,89	563,21	3,30	5,763	<b>96,4</b>
<b>R</b>	20	80	12	26,4	280	565,90	564,45	3,35	5,763	<b>96,1</b>

A utilização de representações gráficas dos resultados da tabela 6.1 é mostrada na figuras de gráficos 6.1 à 6.7, de onde várias informações interessantes podem ser obtidas.

Tomou-se a preocupação de realizar os testes fazendo-se que a tensão acompanhasse o aumento da velocidade de alimentação de arame ( $V_{AR}$ ) de maneira que a estabilidade do arco fosse a melhor possível para cada configuração.

## 6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE RENDIMENTOS

Os gráficos das figuras 6.1 e 6.2 mostram a variação do rendimento de deposição em função da indutância para DBCP de 8 e 12 mm respectivamente, para as 3 velocidades do arame.

A primeira informação muito interessante é que os maiores rendimentos estão associados à maior  $V_{AR}$  de 20 m/min, para quaisquer valores de DBCP e da indutância. Este resultado pode ser considerado inesperado, pois normalmente associa-se maior formação de salpicos a altas correntes de soldagem, que aumenta com o aumento da  $V_{AR}$ . Poderá se verificar mais tarde que para as velocidades de 20 m/min um modo misto entre curto-circuito forçado e goticular foi alcançado, o que proporcionou os maiores rendimentos dos testes.

Para  $V_{AR}$  de 16 m/min, verifica-se que a indutância influi no rendimento de deposição, ao atingir o maior valor com 40% de indutância para ambos os DBCP.

Para  $V_{AR}$  de 12 m/min, nota-se que o comportamento varia em função do DBCP. Com DBCP de 8 mm verifica-se uma queda crescente de rendimento de deposição com o aumento da indutância, enquanto com DBCP de 12mm observa-se um aumento do rendimento com aumento da indutância. Neste caso fica evidente a influência tanto do DBCP quanto da indutância no rendimento de deposição. Isto também pode ser observado nas fotos dos respingos gerados.

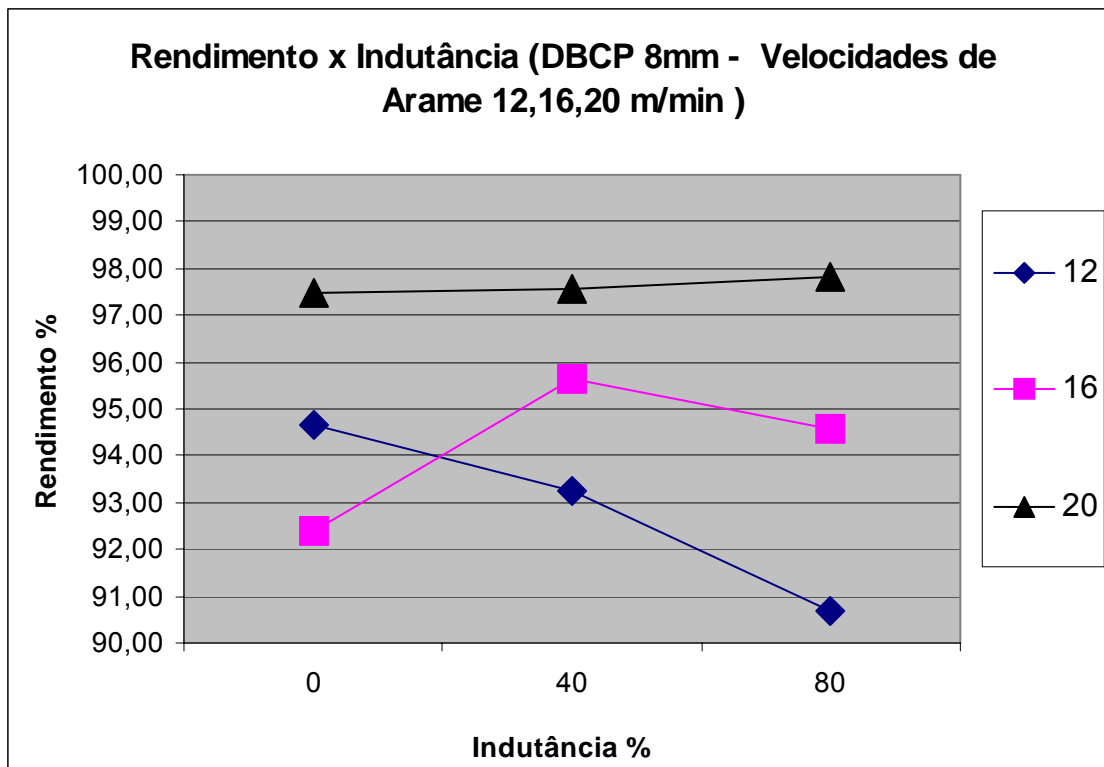


Figura 6.1 : Gráfico Rendimento de deposição versus Indutância para DBCP de 8mm.

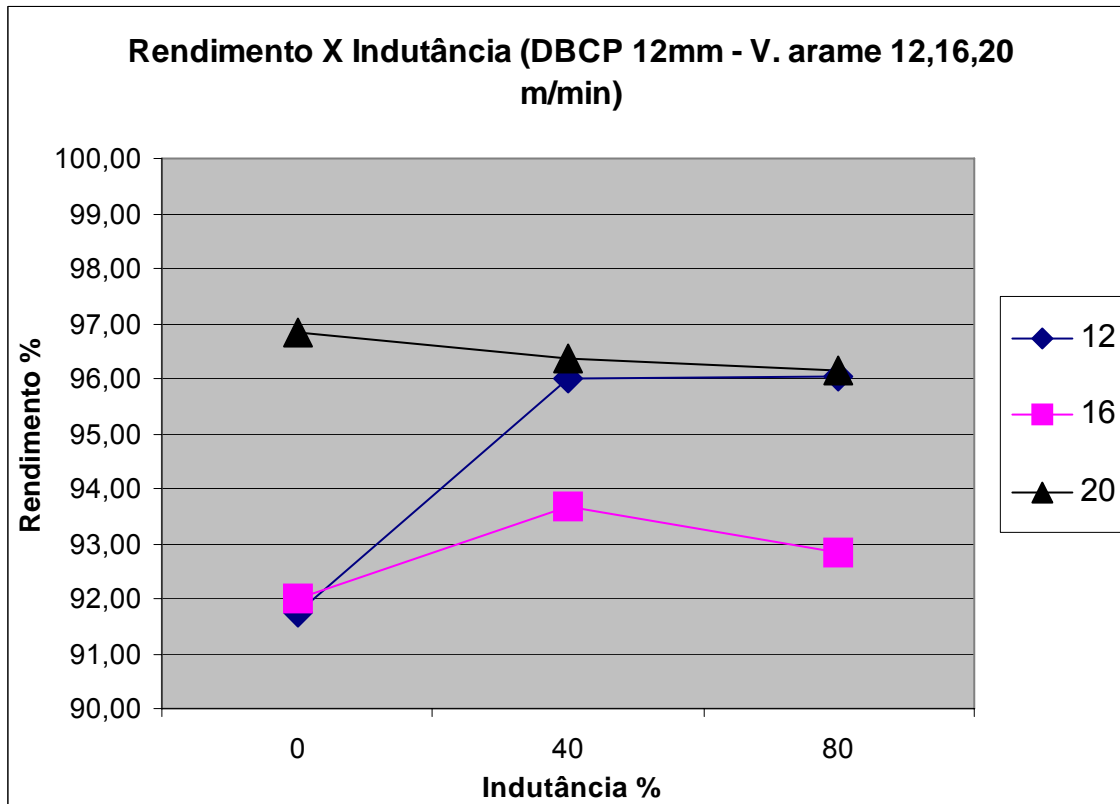


Figura 6.2 : Gráfico Rendimento de deposição versus Indutância para DBCP de 12mm.

Nos gráficos 6.3 e 6.4 é mostrados a variação dos rendimentos de deposição em função das velocidades do arame para DBCP de 8 e 12 mm respectivamente. Fica evidente que para a  $V_{AR}$  de 20 m/min não há qualquer influência da indutância, pois os rendimentos de deposição são praticamente os mesmos para qualquer nível de indutância. Nota-se também que a variação no DBCP também tem pouca influência, pois os rendimentos de deposição para diferentes DBCP são muito próximos.

Para  $V_{AR}$  de 16 m/min percebe-se certa influência da indutância sobre o rendimento de deposição, com maior sensibilidade para DBCP de 8mm. O maior rendimento de deposição alcançado com 40% de indutância para ambos os DBCP mostram a importância desta regulagem para a obtenção de maiores rendimentos.

Com  $V_{AR}$  de 12 m/min nota-se uma inversão de comportamento. Para uma DBCP de 8mm o rendimento cai com o aumento da indutância, enquanto que para DBCP 12mm o rendimento aumenta.

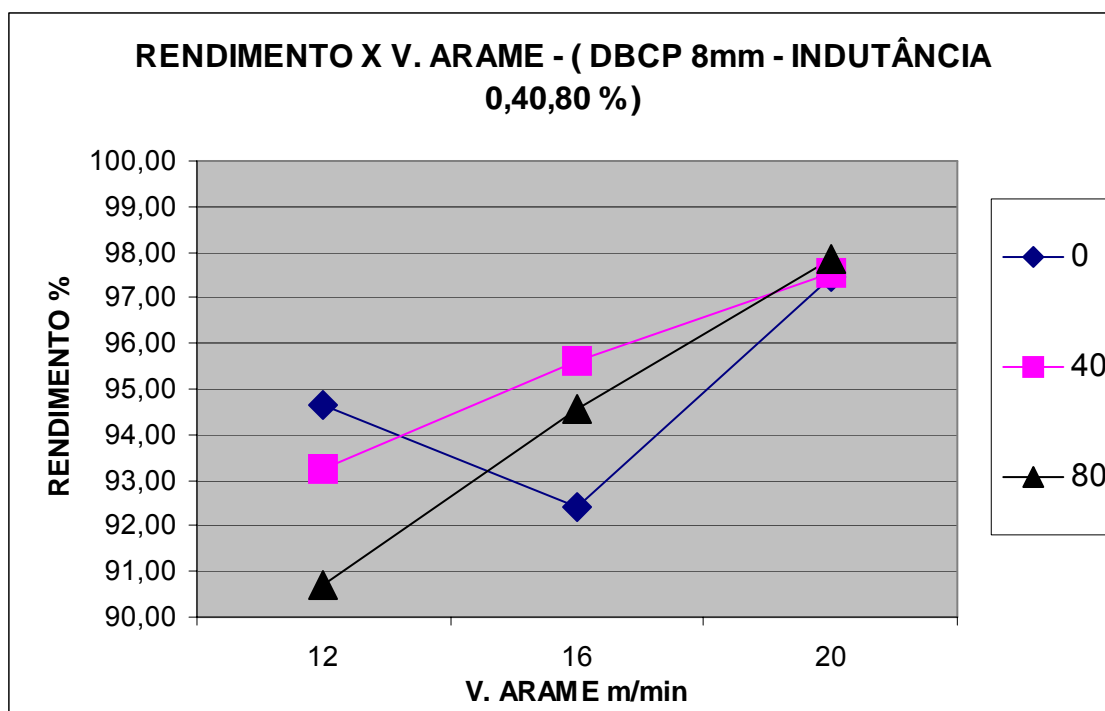


Figura 6.3 : Gráfico de Rendimento de deposição versus Velocidade do arame para DBCP de 8mm.

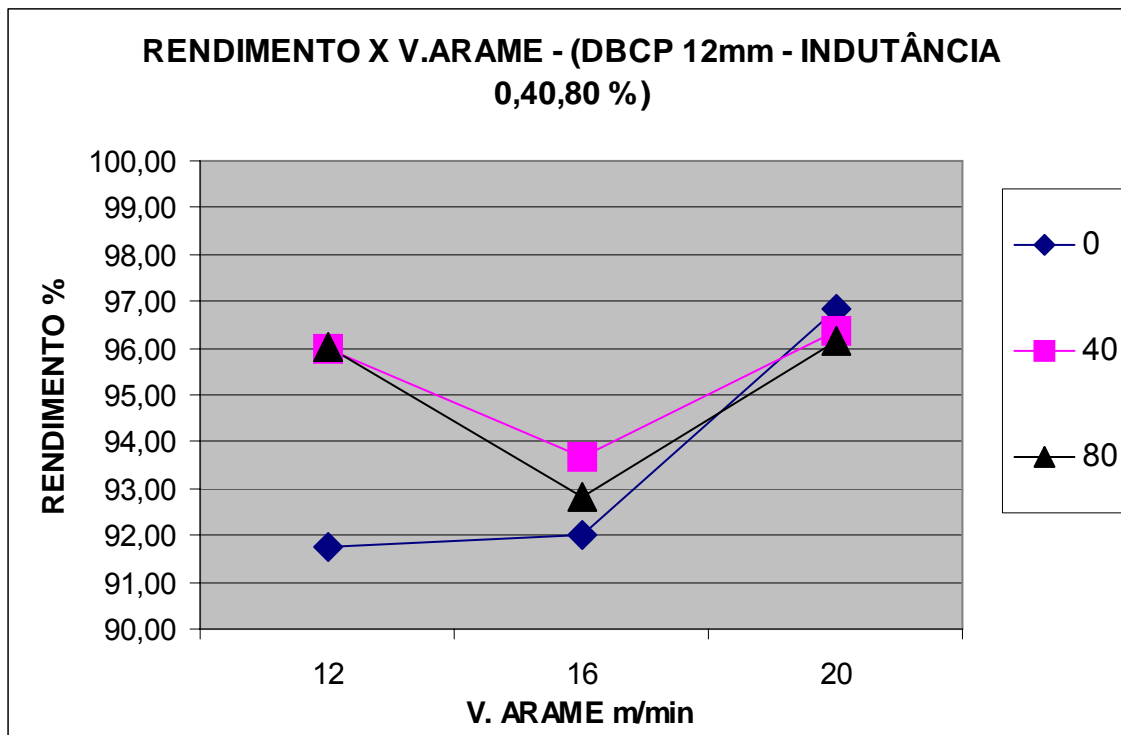


Figura 6.4 : Gráfico do Rendimento de deposição versus Velocidade do arame para DBCP de 12mm.

Os gráficos mostram o comportamento do rendimento para cada indutância em relação à DBCP, Gráficos 6.5, 6.6 e 6.7. Verifica-se ligeira tendência de queda de rendimento com o aumento da DBCP para as velocidades de 16 e 20 m/min e para todas as indutâncias. Para velocidade de alimentação de 12 m/min com indutância 0% o aumento da DBCP proporciona a queda de rendimento, visto na Gráfico 4.5, mas com o aumento da indutância 40%, no gráfico 4.6 e 80% gráfico da figura 6.7, o rendimento aumenta com o aumento da DBCP.

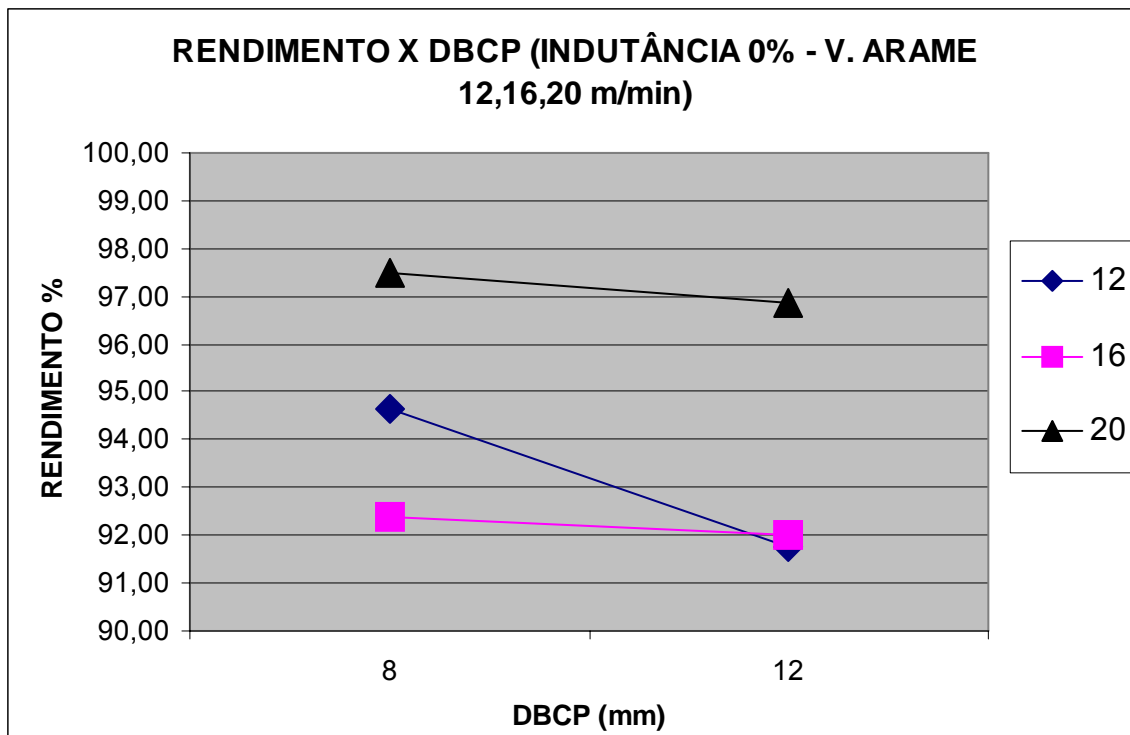


Figura 6.5 : Gráfico do Rendimento de deposição versus DBCP para Indutância 0%.

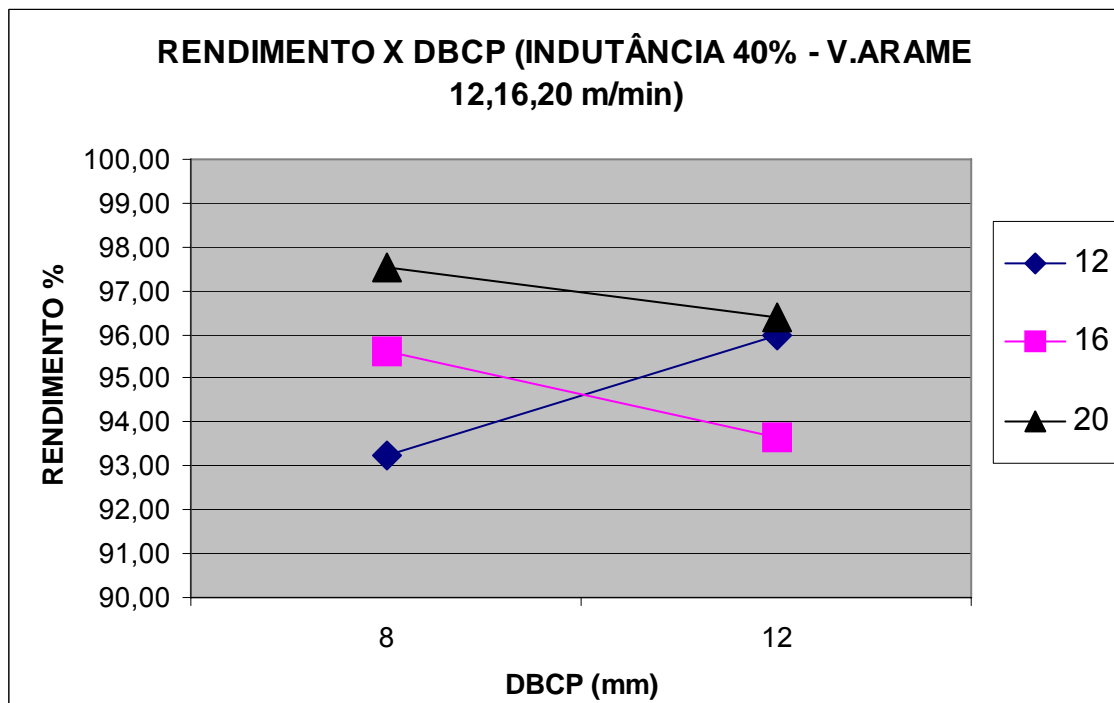


Figura 6.6 : Gráfico Rendimento de deposição versus DBCP para Indutância de 40%.

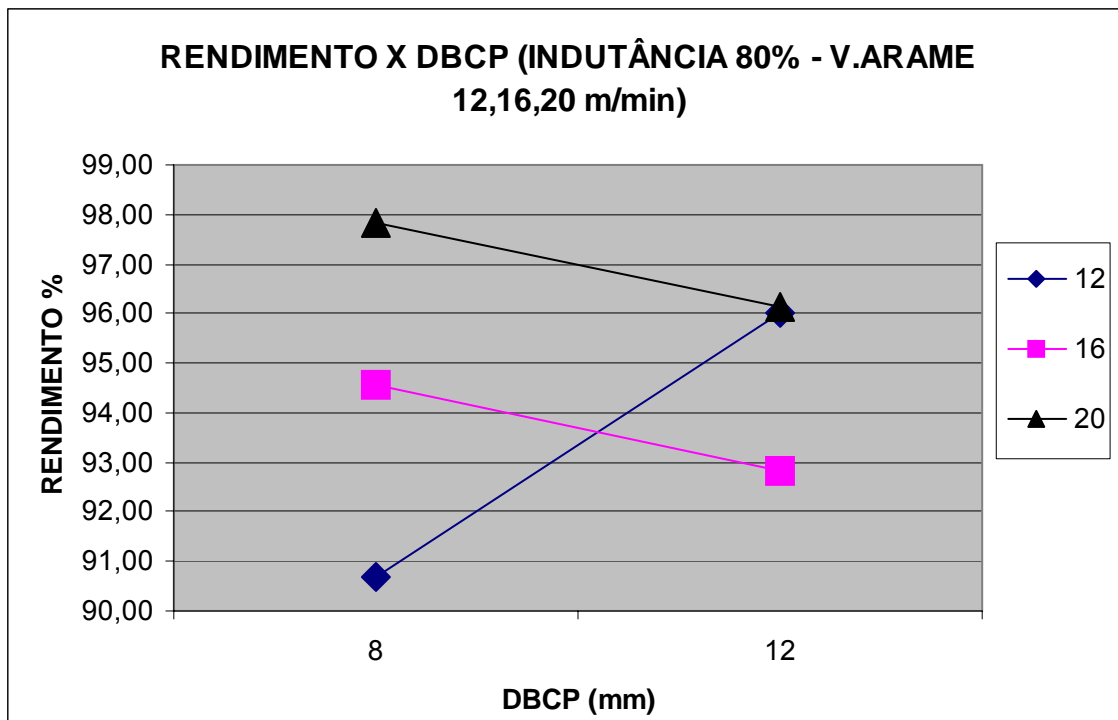


Figura 6.7 : Gráfico do Rendimento de deposição versus DBCP Indutância 80%.

Nota-se , gráficos 6.5, 6.6 e 6.7 que, para uma dada indutância, 7 casos de 9 apresentam queda de rendimento com aumento de DBCP. Apenas 2 casos Var=12 m/min para indutâncias de 40 e 80% apresentaram aumento de rendimento.

### 6.3 RESULTADOS DOS RESPINGOS E OSCIOGRAMAS

Os respingos dos testes realizados foram coletados de maneira parecida como foi feito por (KANG 2003), onde a solda era realizada dentro de um recipiente metálico fechado para coleta de respingos. Posteriormente foram realizadas fotos desses respingos por meio de um microscópio estereoscópio.

Os resultados dessas fotografias são mostrados nas tabelas seguintes (tabelas 6.2.1, 6.2.2 e 6.2.3). As fotos foram tiradas com uma régua milimetrada com o objetivo de ter uma referência para uma posterior avaliação de comparação entre do tamanho dos respingos de cada teste.

Junto com os resultados de respingos foram agrupados simultaneamente os resultados dos oscilogramas obtidos com a aquisição de dados Figuras 6.8 a 6.25. Nestes resultados agrupados pode-se visualizar oscilogramas de corrente e tensão e uma tabela com resultados estatísticos dos testes de A a R, onde:

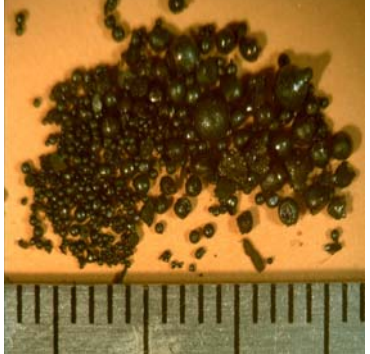
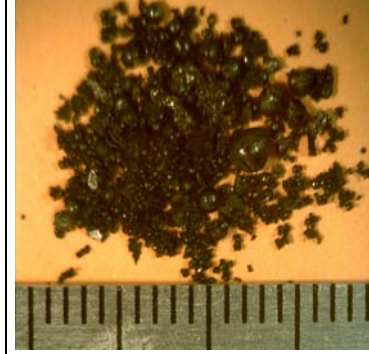

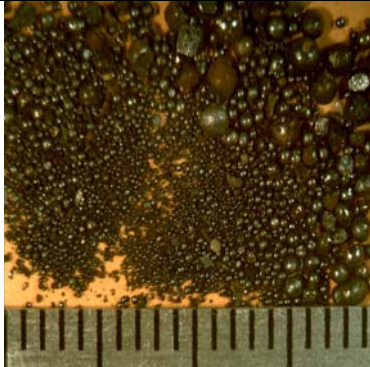

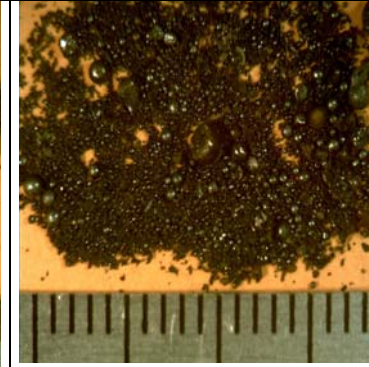
#### SIGLAS DAS TABELAS 6.2 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS TESTES DE A E R

Dlpm	: Desvio-padrão dos picos de corrente
dldtS	: $di/dt$ subida (corrente)
lpm	: corrente de pico média
Um	: Tensão média
Tmc	: Média dos períodos de curto-circuito
DPmc	: Desvio-padrão dos períodos de curto-circuito
VA	: Velocidade de alimentação do arame
COMB	: Combinação
IND	: Indutância
DPCP	: Distância bico de contato peça

#### 6.3.1 Apresentação dos Resultados dos Respingos e Oscilogramas

A próxima tabela exhibe imagens dos respingos coletados para os testes com velocidades de alimentação de 12 m/min

Tabela 6.2.1 - Imagens Dos Respingos Coletados e Seus Rendimentos Para Velocidade de alimentação de arame de 12m/min.

<p>A DBCP 8mm INDUTÂNCIA 0 V. ARAME 12 m/min RENDIMENTO 94,7%</p>	<p>B DBCP 8mm INDUTÂNCIA 40 % V. ARAME 12 m/min RENDIMENTO 93,3%</p>	<p>C DBCP 8mm INDUTÂNCIA 80% V. ARAME 12 m/min RENDIMENTO 90,7%</p>
		
<p>J DBCP 12mm INDUTÂNCIA 0% V. ARAME 12m/min RENDIMENTO 91,8%</p>	<p>K DBCP 12mm INDUTÂNCIA 40% V. ARAME 12m/min RENDIMENTO 96%</p>	<p>L DBCP 12mm INDUTÂNCIA 80% V. ARAME 12m/min RENDIMENTO 96%</p>
		

Em seguida podem-se visualizar os oscilogramas e dados das aquisições de sinais de corrente e tensão dos testes com velocidade de alimentação ( $V_a$ ) 12 m/min.

COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
A	57,9	137,1	489	20,2	2	0,9	12	0	8	94,7

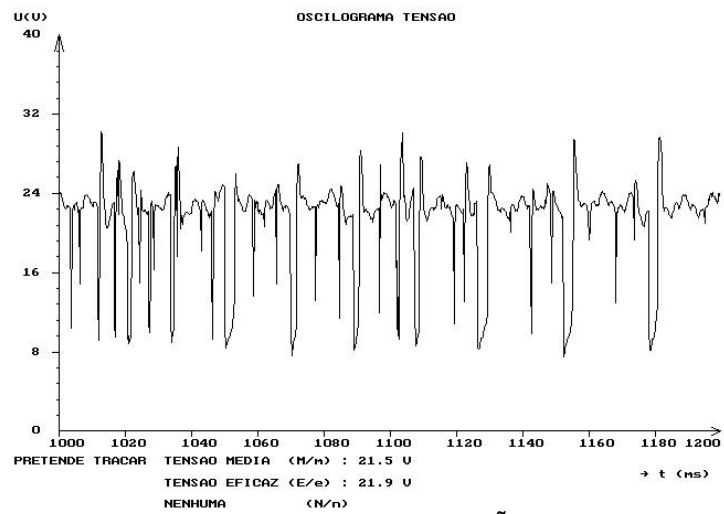
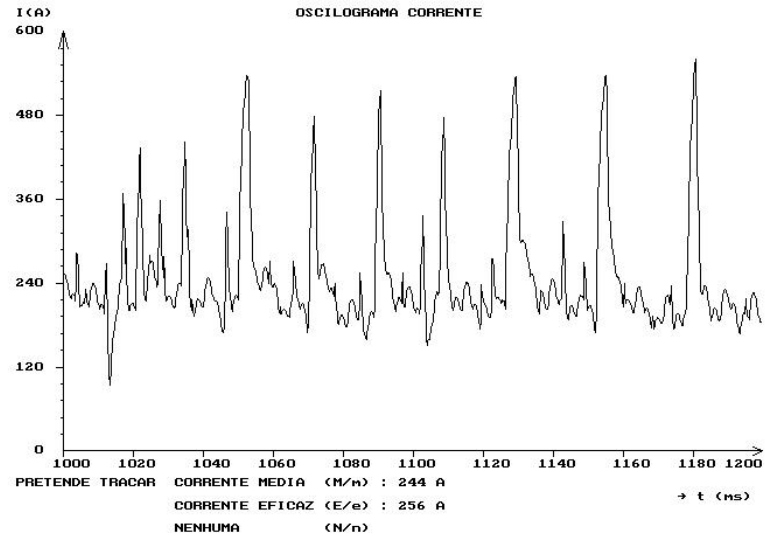
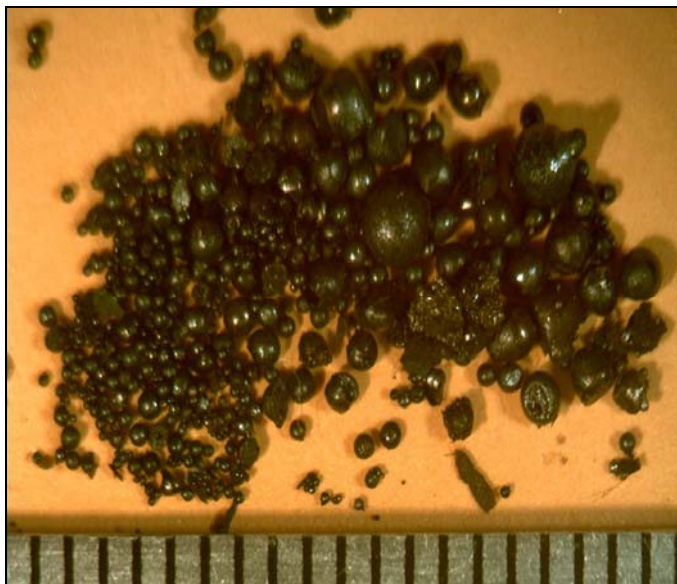
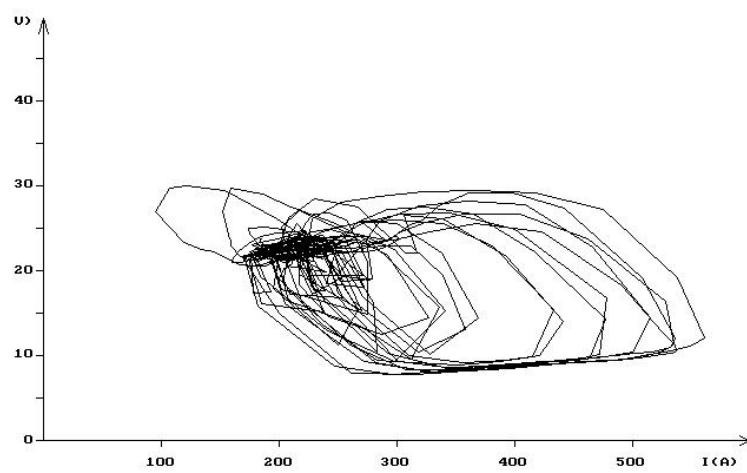


FIGURA 6.8 – COMBINAÇÃO A

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
B	100,1	84,6	444	19,2	3	1,9	12	40	8	93,3

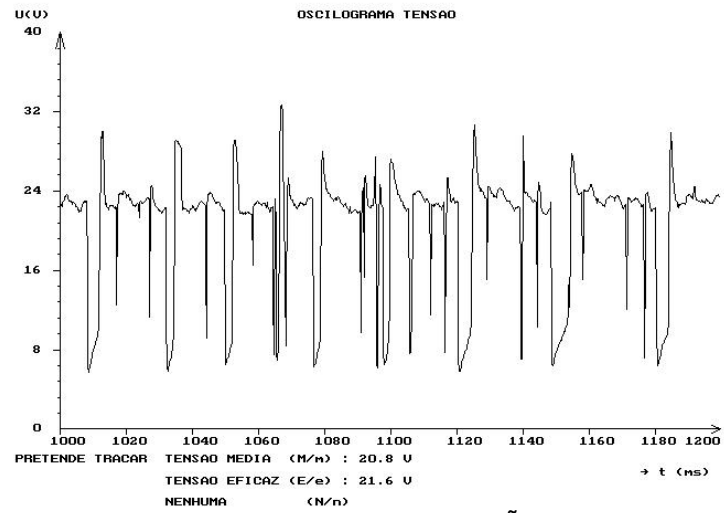
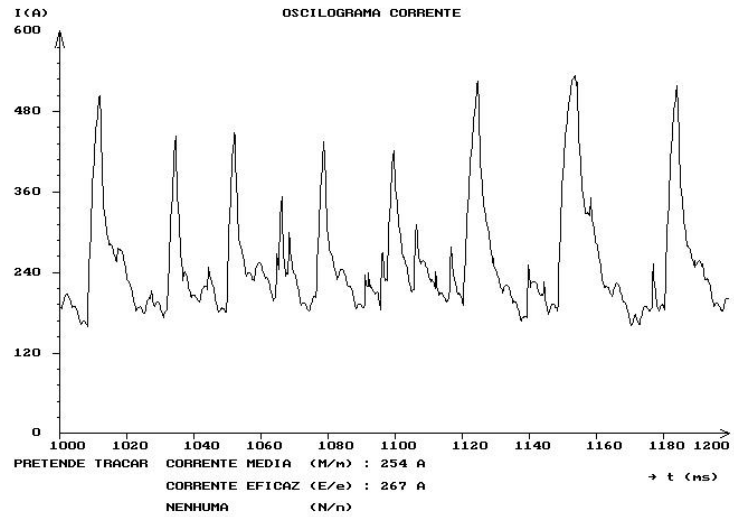
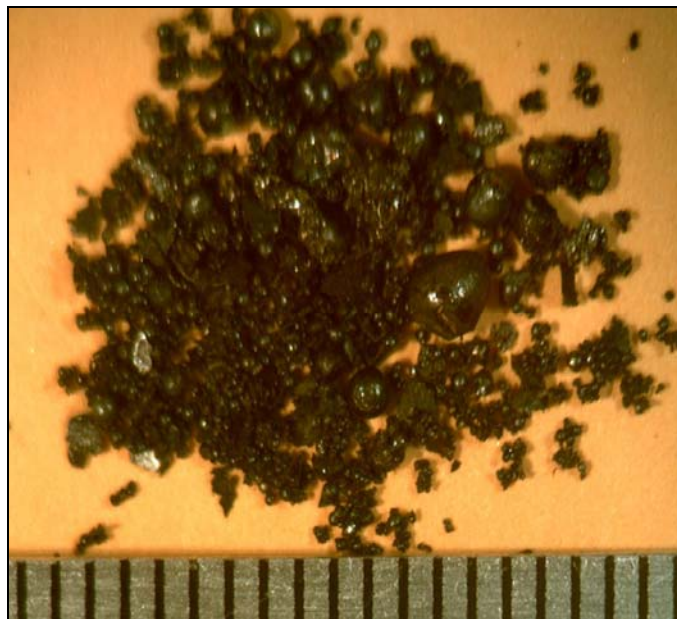
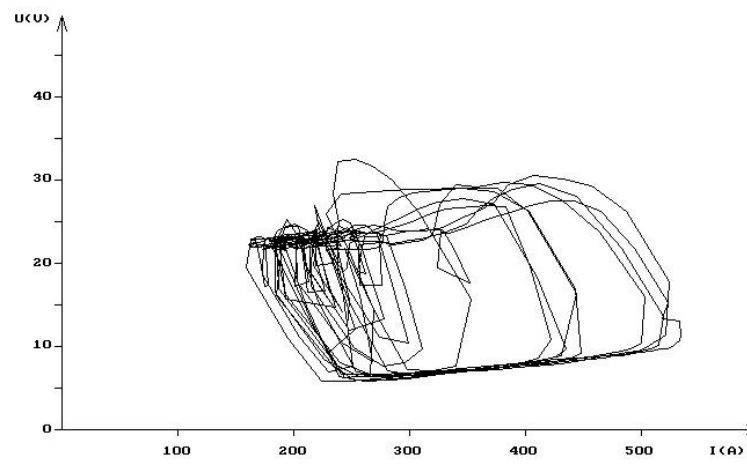


FIGURA 6.9 – COMBINAÇÃO B

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
C	84,6	86,9	427	19,1	2,6	1,5	12	80	8	90,7

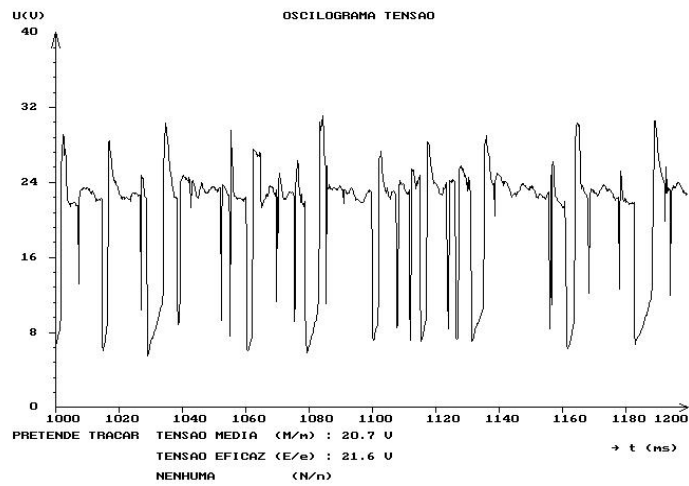
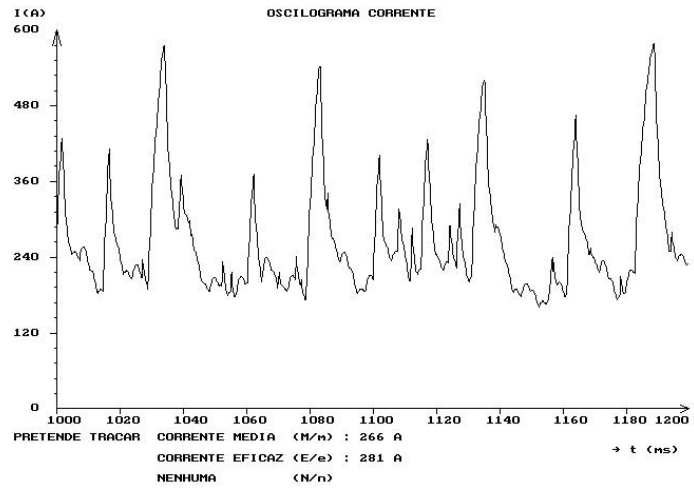
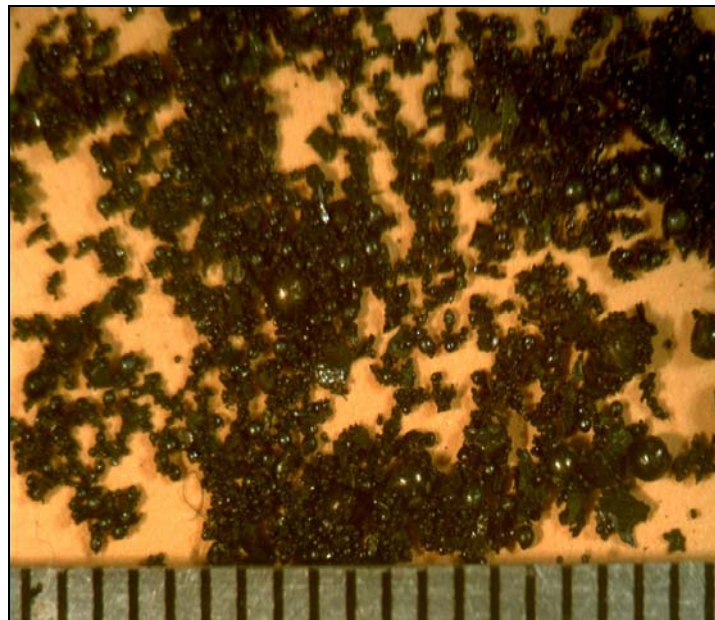
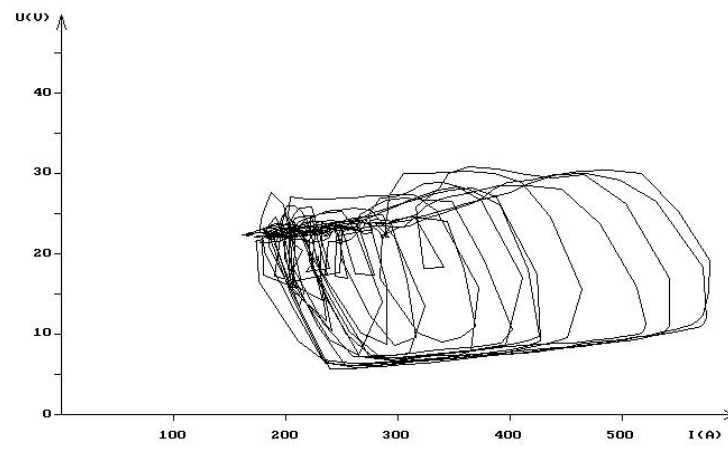


FIGURA 6.10 – COMBINAÇÃO C

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
J	41,1	158,1	419	20,7	1,4	0,4	12	0	12	91,8

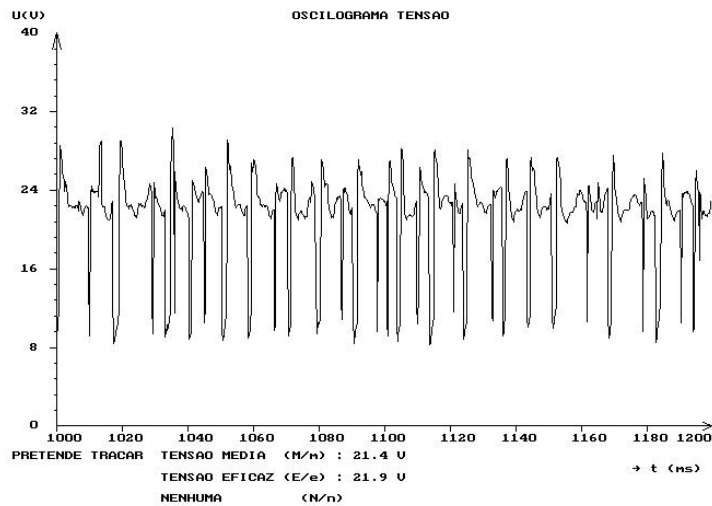
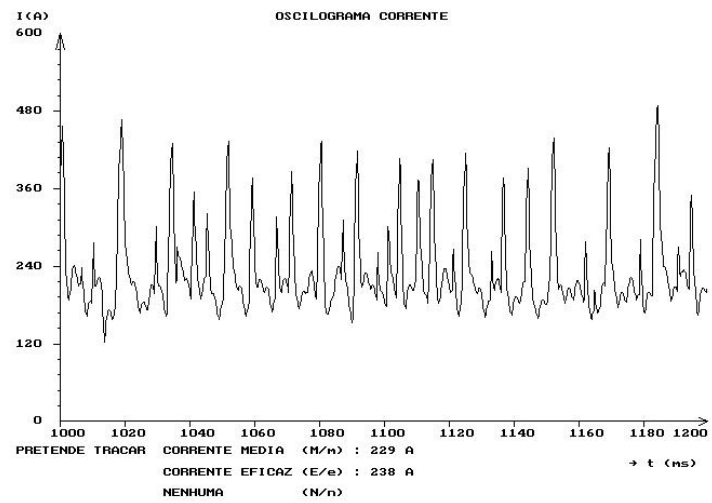
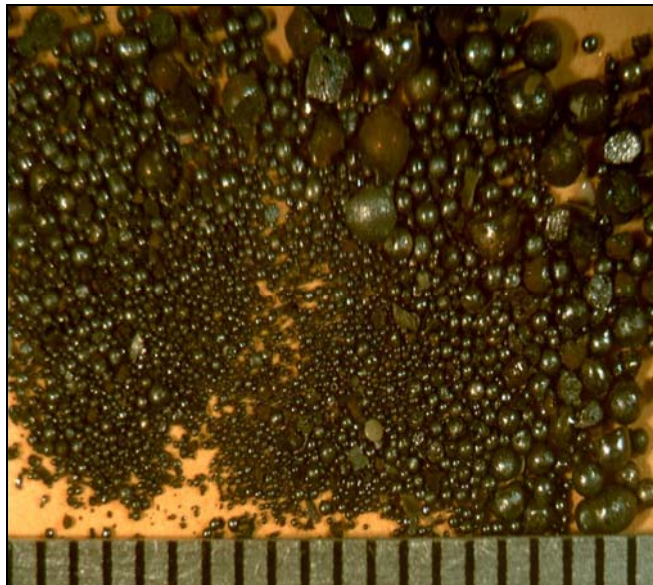
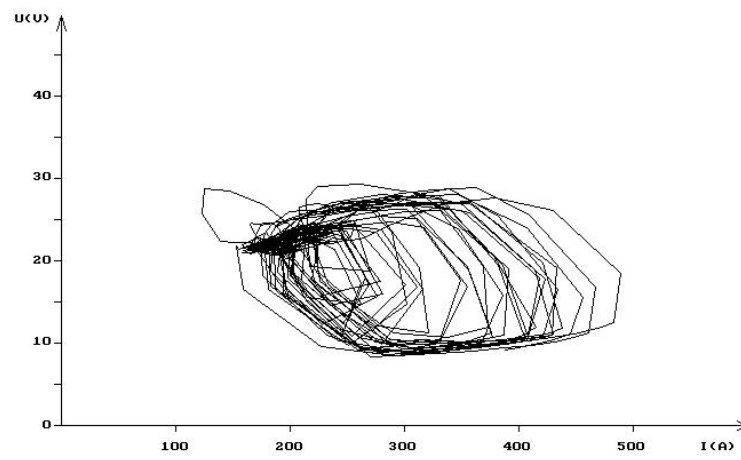


FIGURA 6.11 – COMBINAÇÃO J

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
K	43,6	92,2	369	20,3	1,7	0,6	12	40	12	96

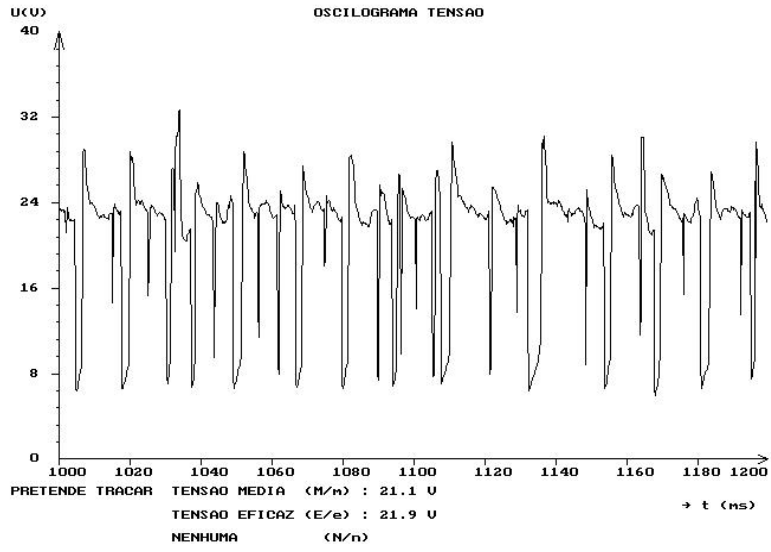
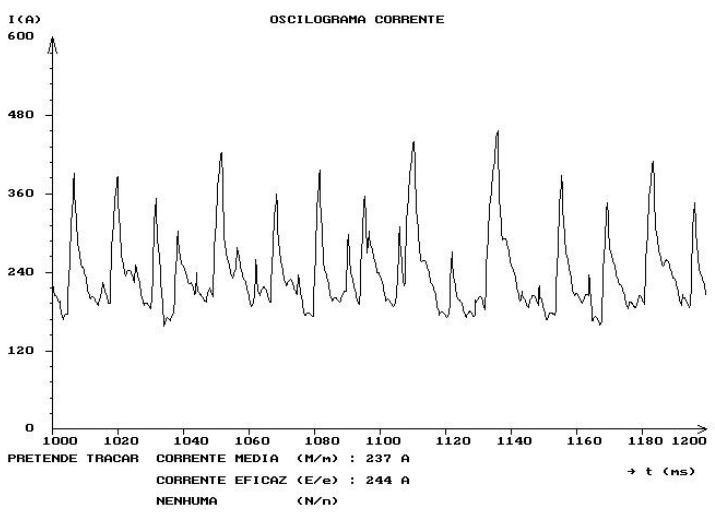
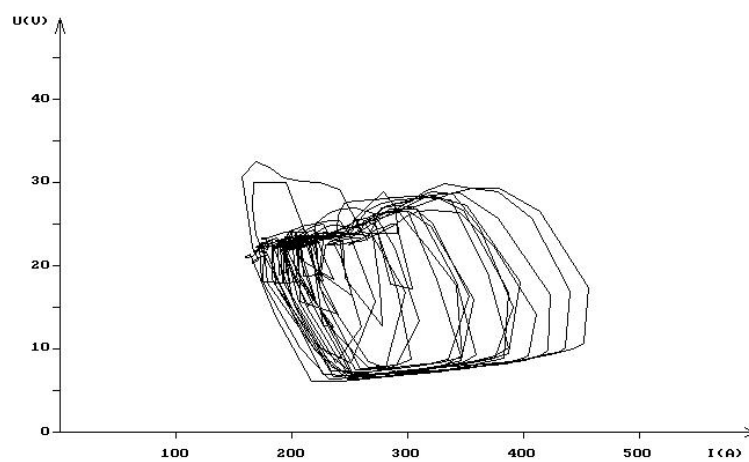


FIGURA 6.12 – COMBINAÇÃO K

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
L	50,3	90,8	380	20	2	0,8	12	80	12	96

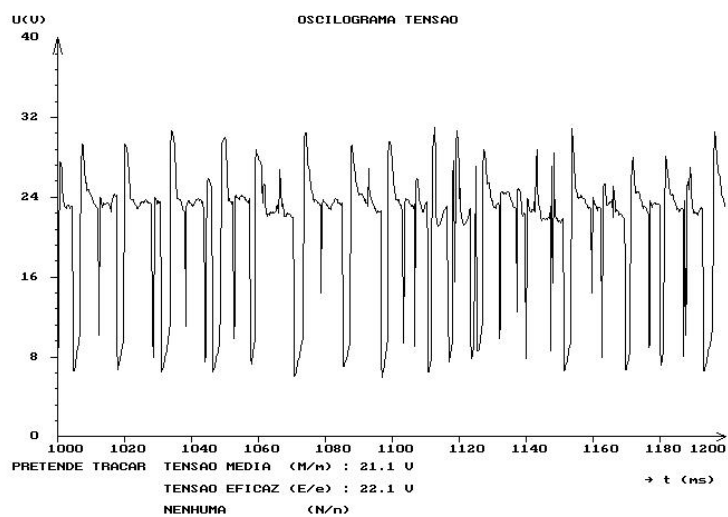
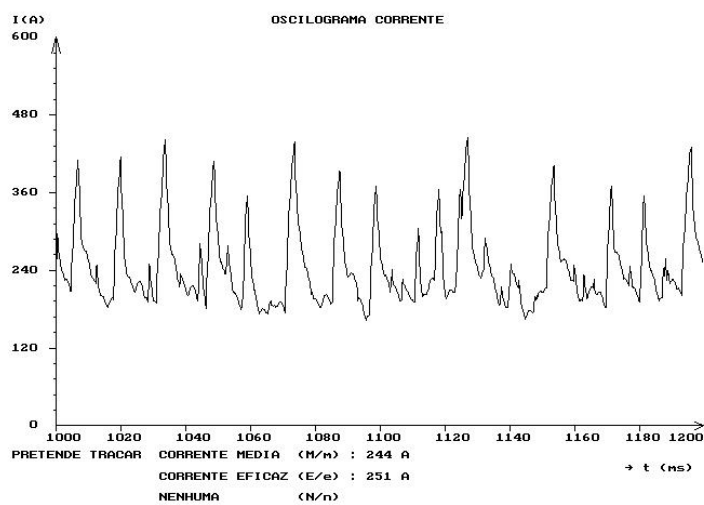
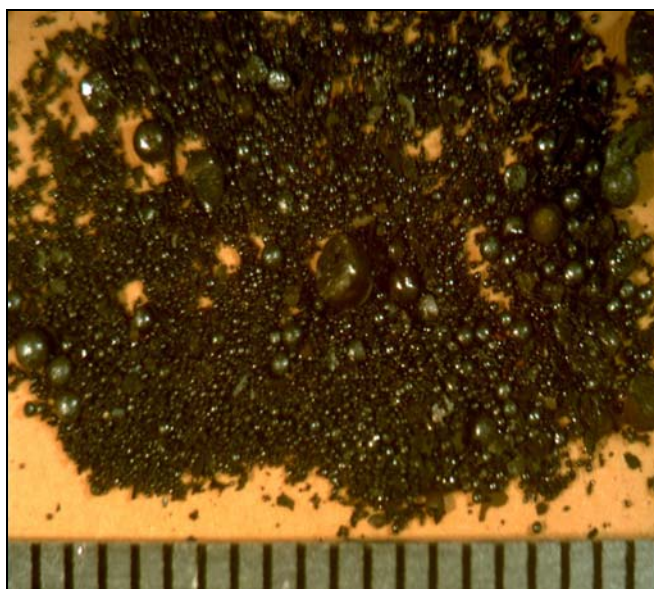
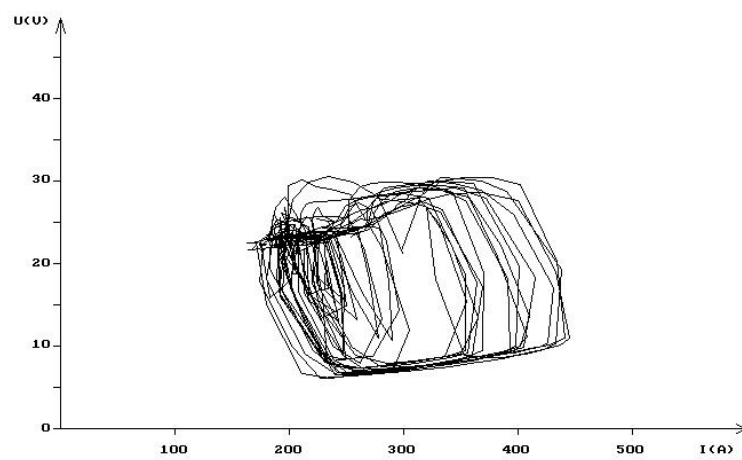


FIGURA 6.13 – COMBINAÇÃO L

## TENSÃO X CORRENTE



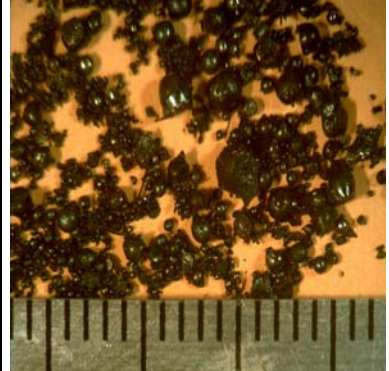
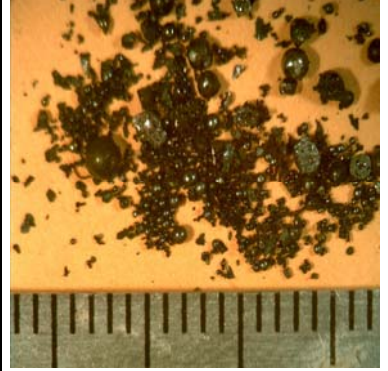
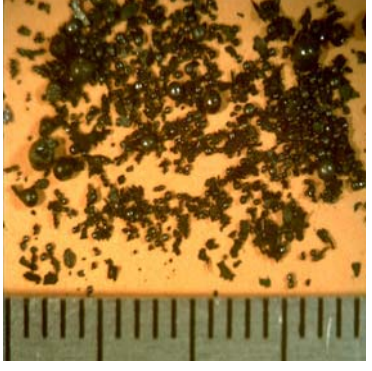
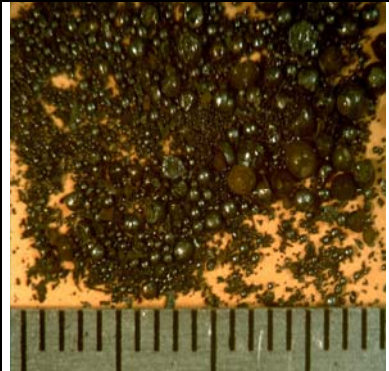
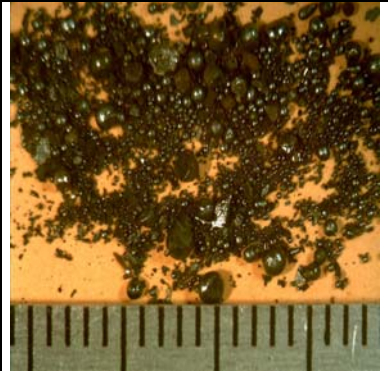
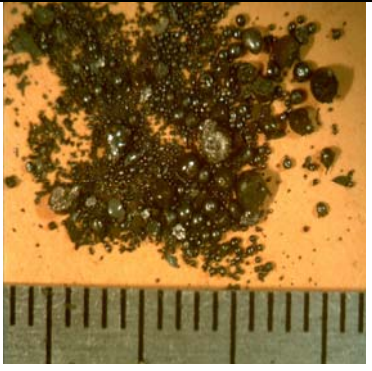
Nota-se nas fotos da tabela 6.2.1 e nos oscilogramas dos resultados agrupados (figuras 6.8 a 6.13) que, com velocidade de 12 m/min pode-se ligeiramente perceber, pela quantidade de respingos, que o rendimento cai com o aumento da indutância para DBCP de 8mm e sobe para DBCP de 12mm.

Com DBCP 8mm (amostras A, B, C), nota-se que com 0% de indutância obteve-se um médio rendimento, 94,7%, um tamanho de respingo relativamente grande, os maiores de todas as séries de testes e oscilogramas que indicam uma transferência instável. Passando para uma indutância de 40% o rendimento diminuiu para 93,3% e o tamanho dos respingos também diminuiu, os oscilogramas indicam variações de subida de picos de corrente mais suave e a corrente de pico média subiu cerca de 10A. Com a indutância de 80% o rendimento cai para 90,7%, o tamanho dos respingos é ainda menor, o oscilograma demonstra diferentes alturas de pico de corrente e a corrente de pico média sobe 12A.

Com DBCP 12mm (amostras J, K, L), nota-se que com 0% de indutância obteve-se um baixo rendimento de 91,8%, muitos respingos coletados, tamanhos de respingos pequenos na grande maioria, médios e alguns poucos grandes, os maiores de todas as séries de testes, oscilogramas que indicam uma transferência instável. Passando para uma indutância de 40% o rendimento sobe para 96% e o tamanho dos respingos diminuiu bastante, podendo ser classificados como bem pequenos em toda a maioria coletada, os oscilogramas indicam variações de subida de picos de corrente mais suave e a corrente de pico média subiu cerca de 8A. Com a indutância de 80% o rendimento continua com 96%, o tamanho dos respingos é pequeno mas com a presença de alguns respingos médios, os oscilogramas praticamente não variam, a corrente de pico média sobe 7A.

A tabela 6.2.2 exibe imagens dos respingos coletados para os testes com velocidades de alimentação de 16 m/min

Tabela 6.2.2 - Imagens Dos Respingos Coletados e Seus Rendimentos Para Velocidade de alimentação de arame de 16m/min.

<p>D DBCP 8mm INDUTÂNCIA 0 V. ARAME 16 m/min RENDIMENTO 92,4%</p>	<p>E DBCP 8mm INDUTÂNCIA 40% V. ARAME 16 m/min RENDIMENTO 95,6%</p>	<p>F DBCP 8mm INDUTÂNCIA 80% V. ARAME 16 m/min RENDIMENTO 94,6%</p>
		
<p>M DBCP 12mm INDUTÂNCIA 0% V. ARAME 16m/min RENDIMENTO 92%</p>	<p>N DBCP 12mm INDUTÂNCIA 40% V. ARAME 16m/min RENDIMENTO 93,7%</p>	<p>O DBCP 12mm INDUTÂNCIA 80% V. ARAME 16 m/min RENDIMENTO 92,8%</p>
		

Em seguida pode-se visualizar os oscilogramas e dados das aquisições de sinais de corrente e tensão dos testes com velocidade de alimentação ( $V_a$ ) 16m/min.

COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
D	57,9	155,6	499	22	1,5	0,6	16	0	8	92,4

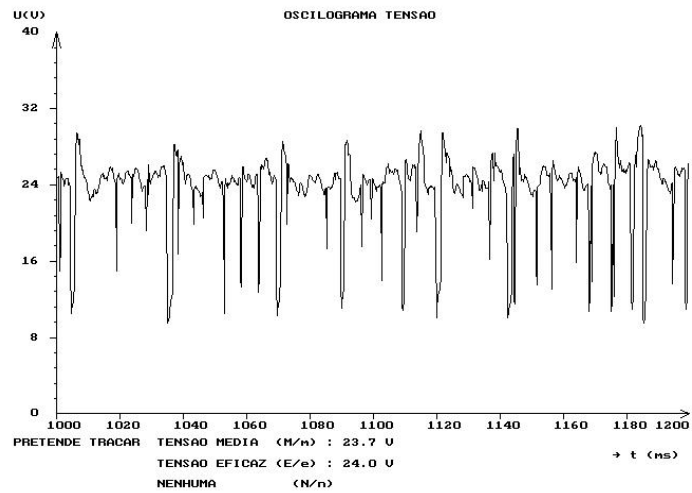
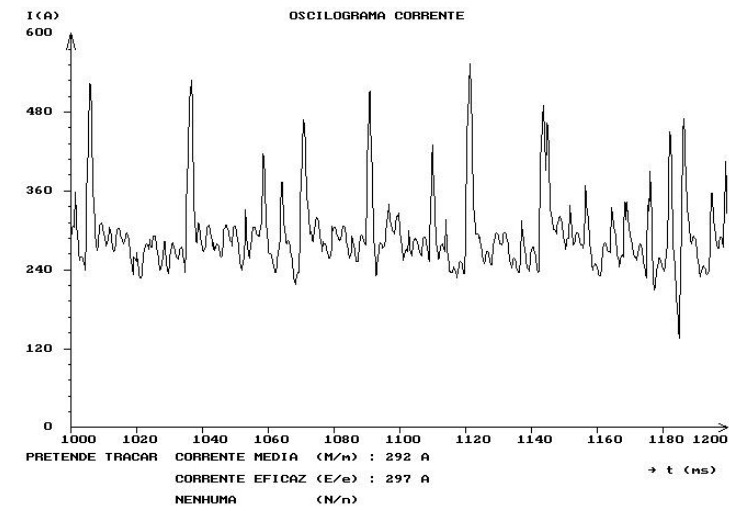
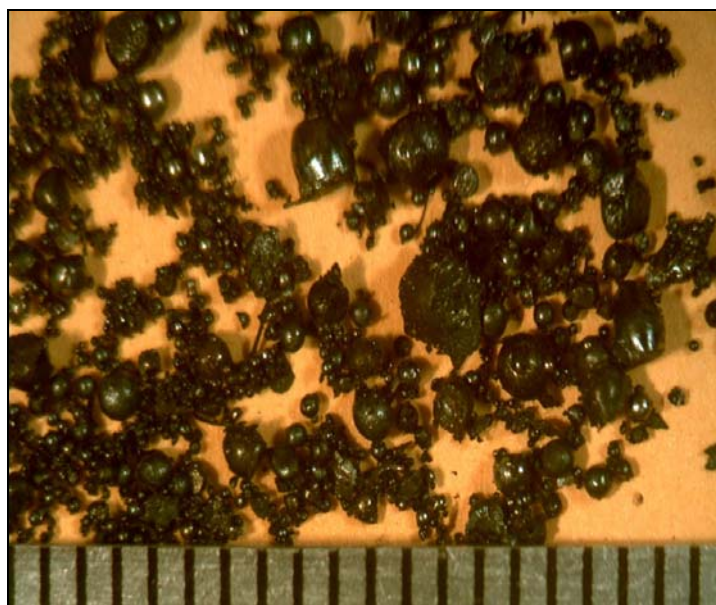
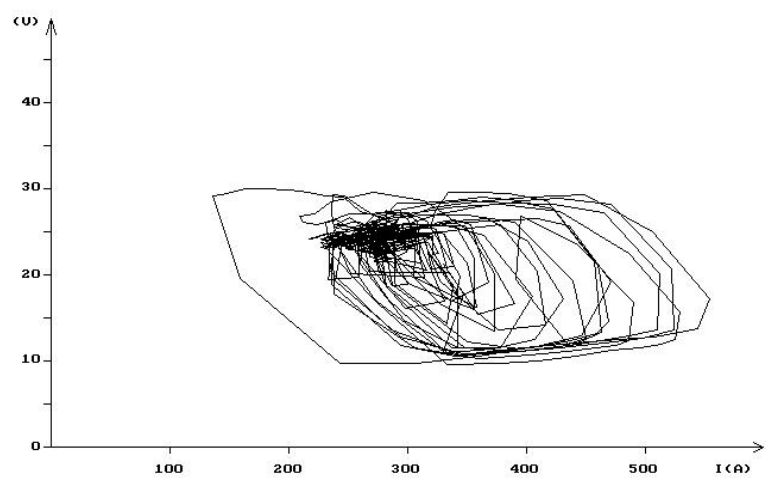


FIGURA 6.14 – COMBINAÇÃO D

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
E	58,9	101,8	436	21,4	1,5	0,8	16	40	8	95,6

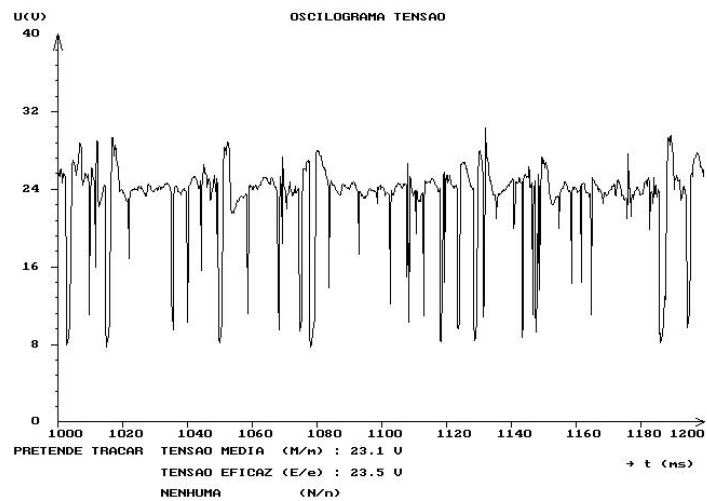
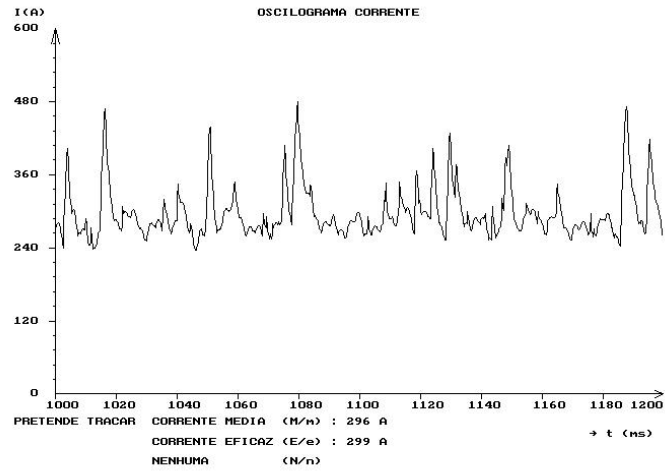
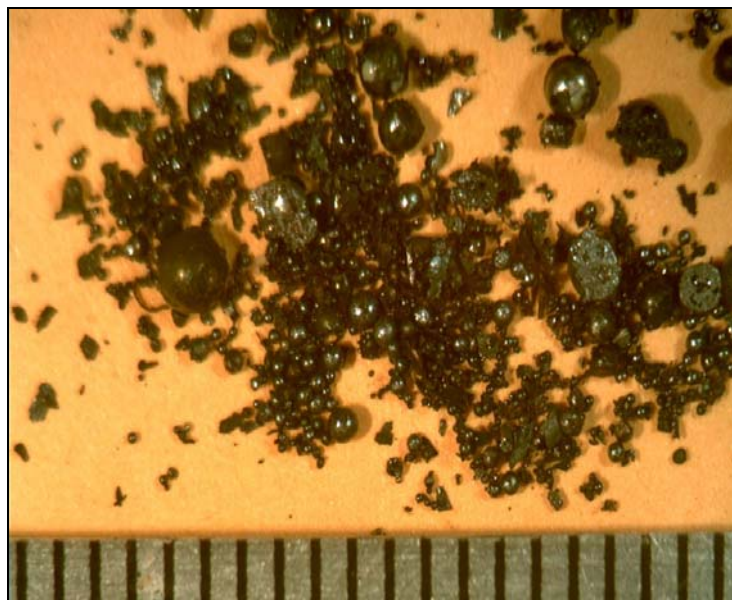
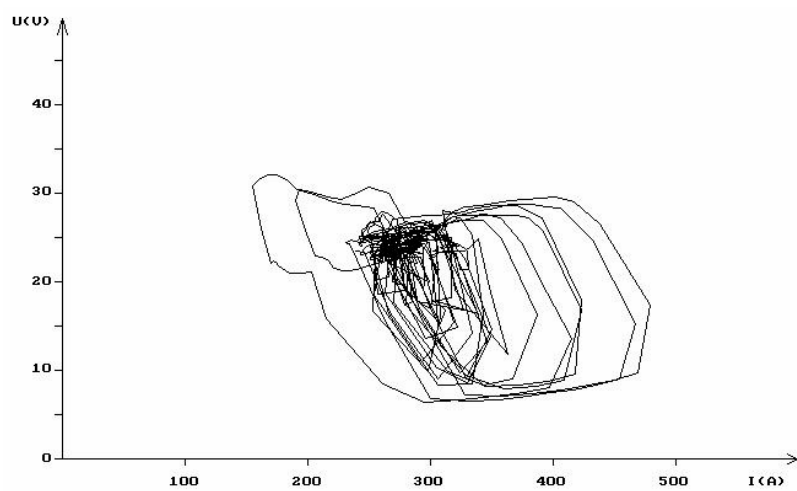


FIGURA 6.15 – COMBINAÇÃO E

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
F	63,1	101,3	430	22,3	1,6	0,9	16	80	8	94,6

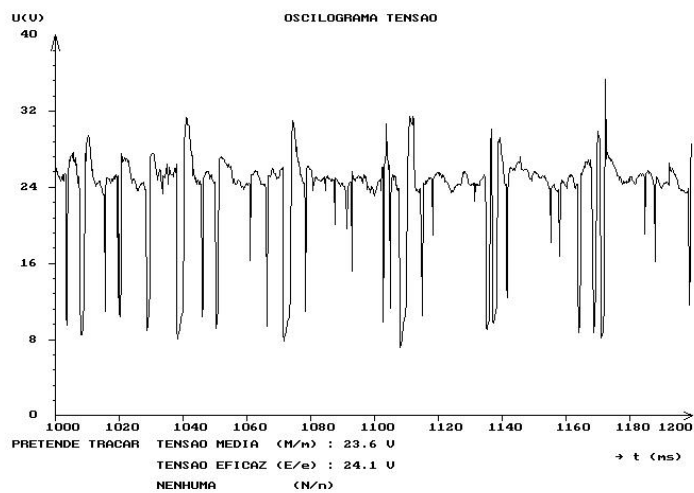
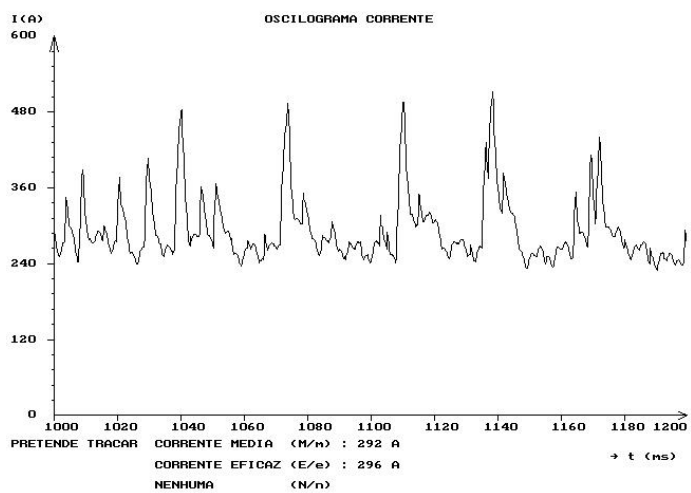
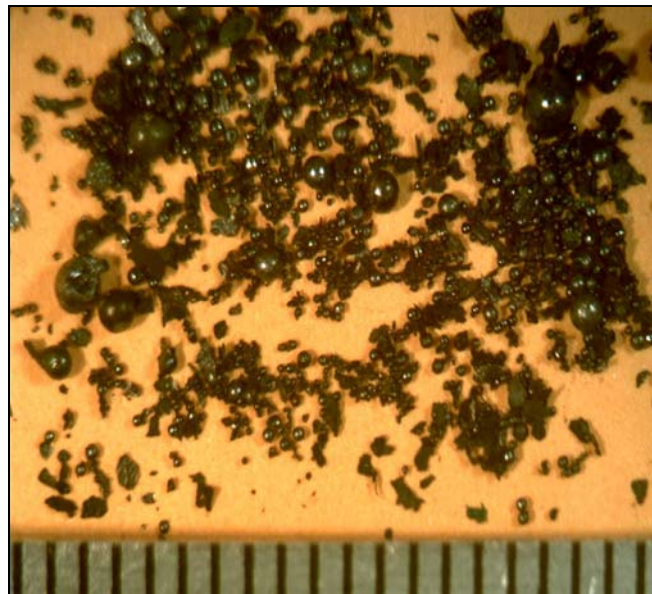
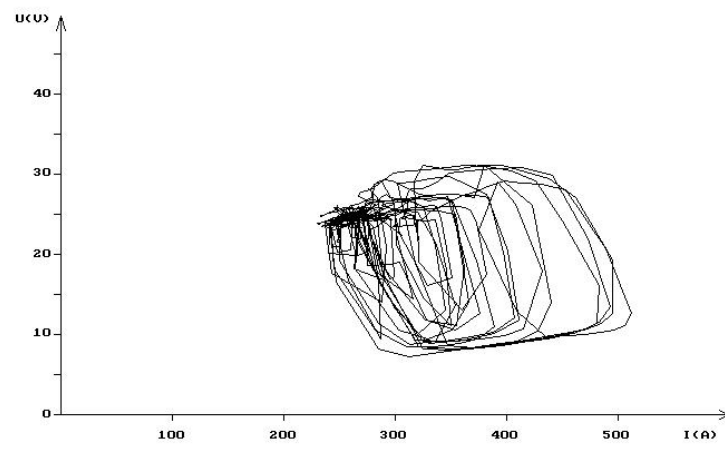


FIGURA 6.16 – COMBINAÇÃO F

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	DIpm	dIdtS	Ipm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
M	51,4	164,3	475	22,3	1,3	0,5	16	0	12	92

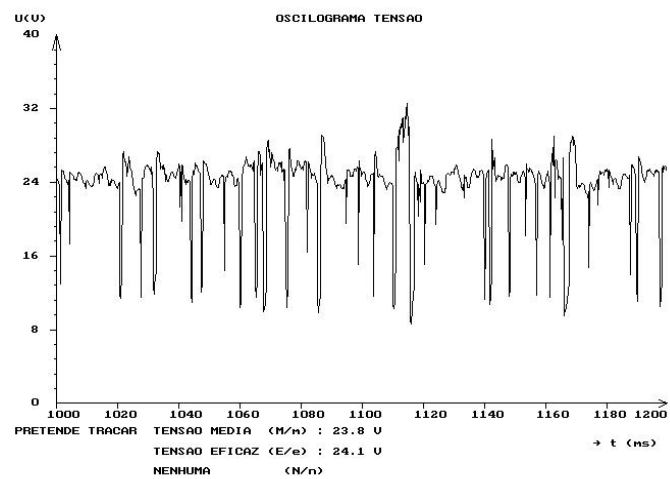
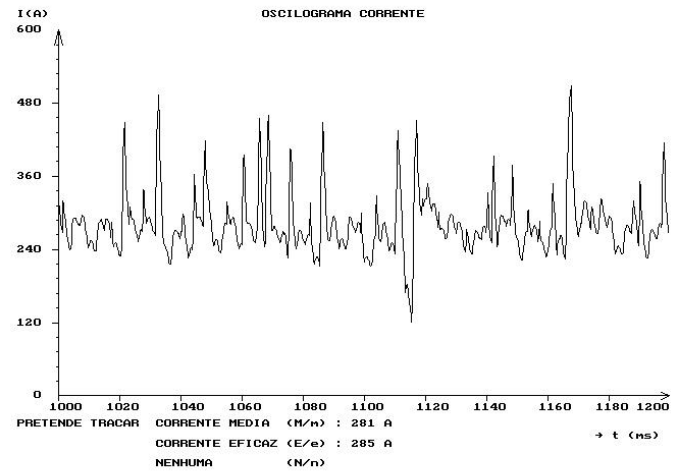
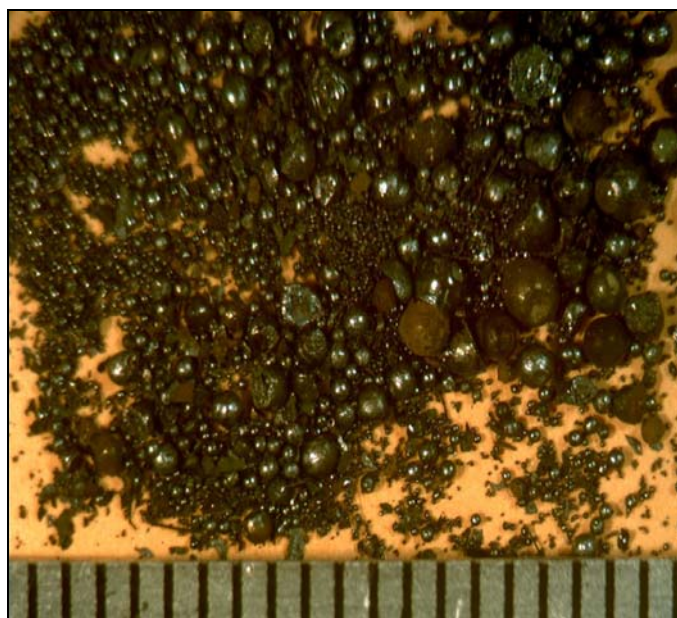
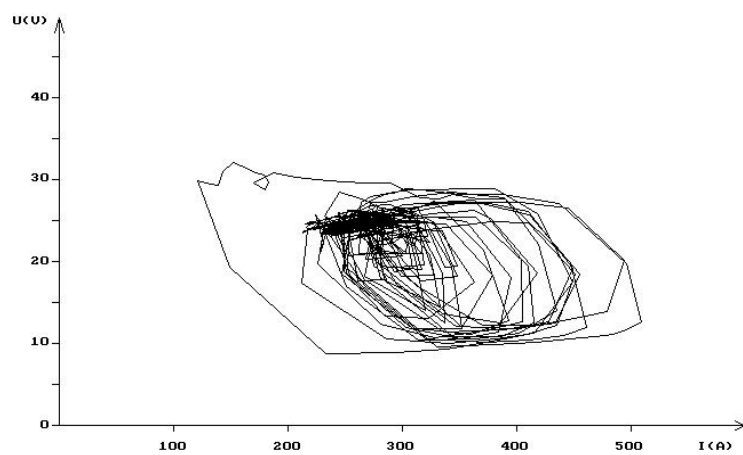


FIGURA 6.17 – COMBINAÇÃO M

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
N	56,2	98,3	421	22,5	1,6	0,7	16	40	12	93,7

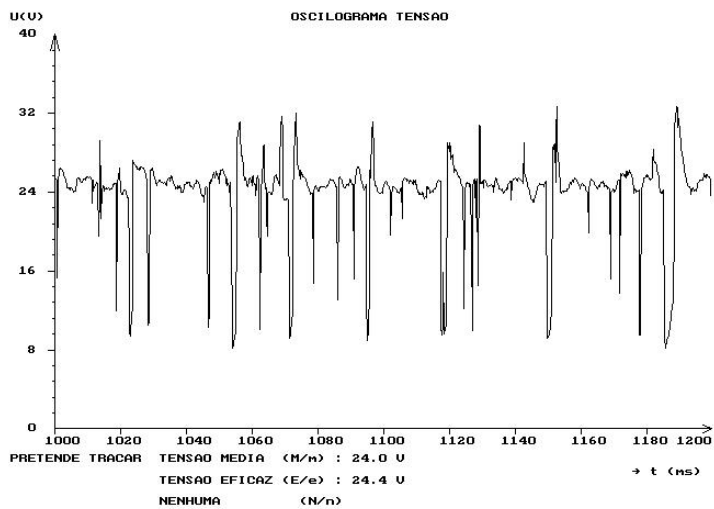
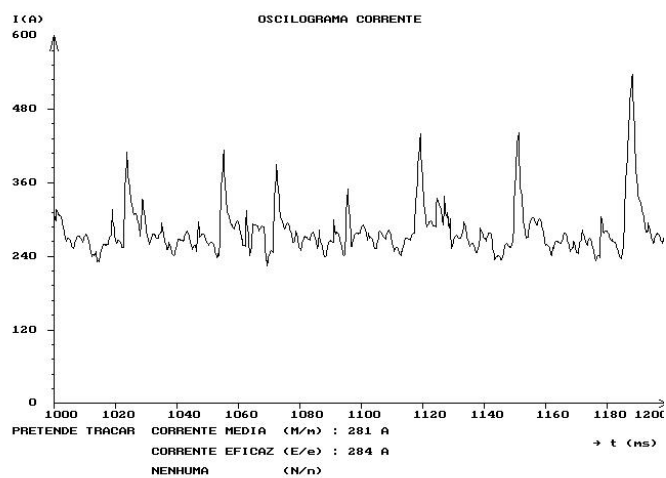
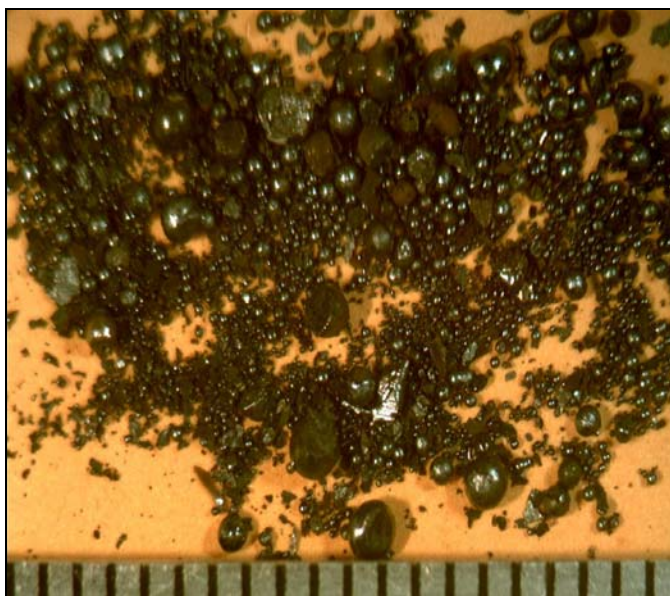
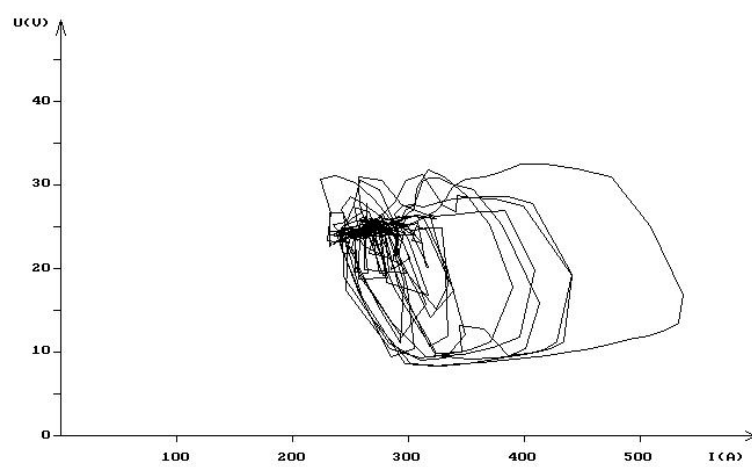


FIGURA 6.18 – COMBINAÇÃO N

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
O	59,5	100,3	429	21,9	1,6	0,8	16	80	12	92,8

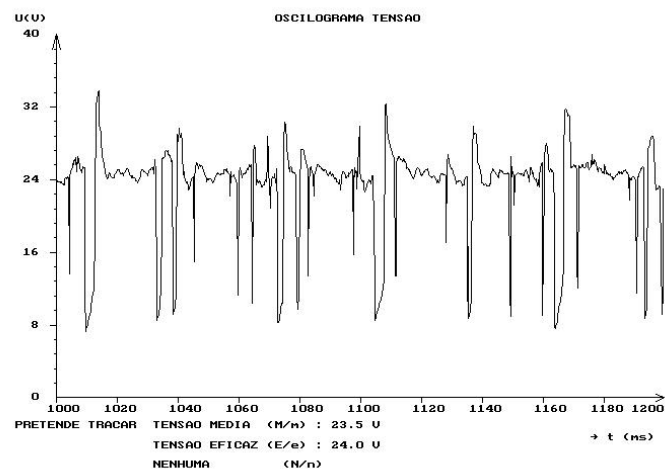
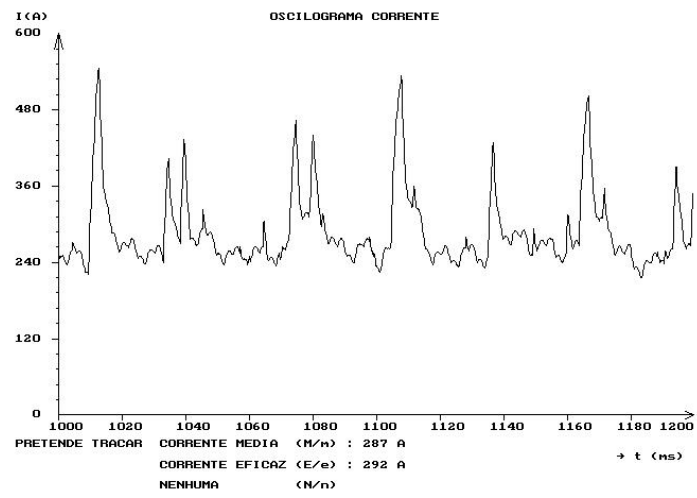
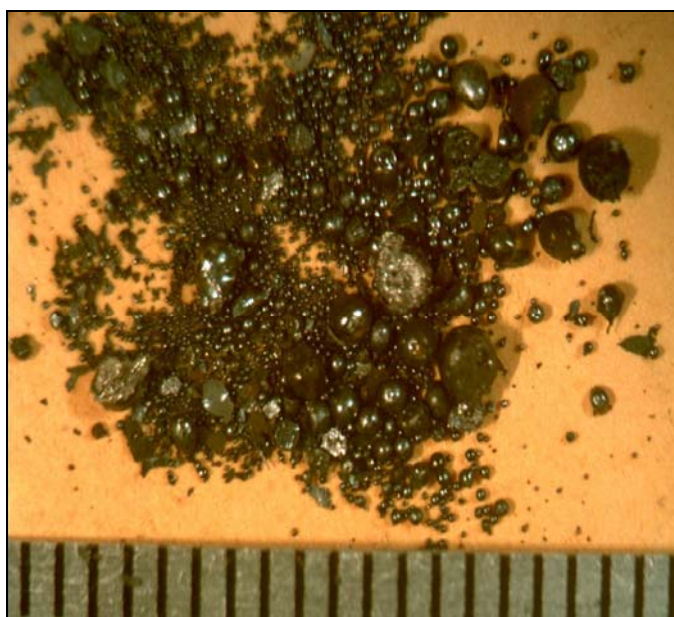
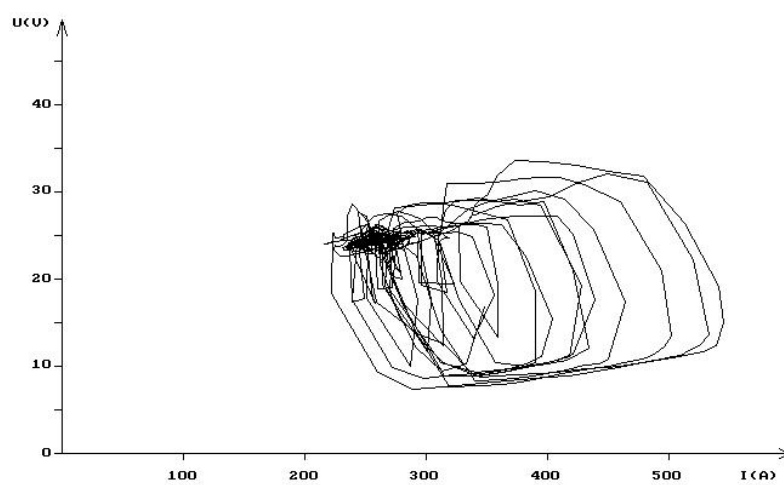


FIGURA 6.19 – COMBINAÇÃO O

## TENSÃO X CORRENTE

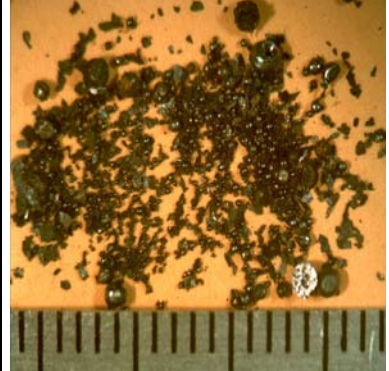
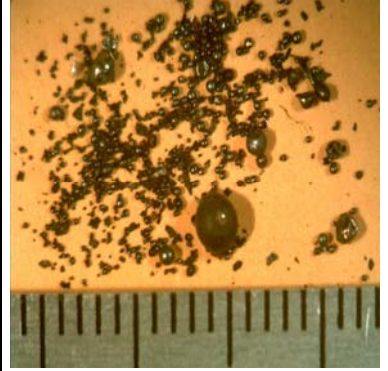
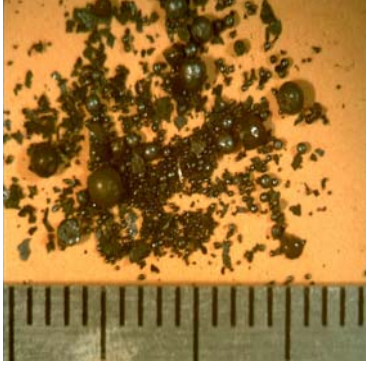

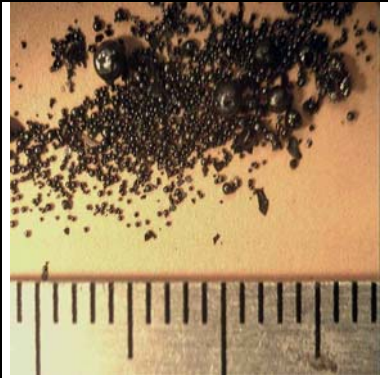
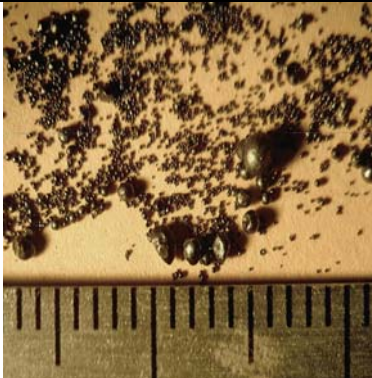


Para a velocidade de 16m/min o rendimento maior fica para a indutância de 40% , isso se nota pela quantidade de respingos nas fotos da tabela 6.2.2, principalmente para DBCP 8mm. Com DBCP 8mm (amostras D, E, F) nota-se que com 0% de indutância obteve-se um baixo rendimento de 92,4%, tamanhos de respingos relativamente grandes misturados com respingos pequenos, os oscilogramas indicam uma transferência instável. Passando para uma indutância de 40% o rendimento, dessa vez, aumenta para 95,6%, respingos relativamente grandes mas em menor quantidade misturados com respingos pequenos, os oscilogramas indicam variações de subida de picos de correntes mais suaves e alturas de picos menores, a corrente de pico média subiu 4A. Com a indutância de 80% o rendimento cai para 94,6%, o tamanho dos respingos parece um pouco menores, os oscilogramas não apresentam variações e a corrente de pico média cai 4A.

Passando para DBCP 12mm (amostras M, N, O) nota-se que com 0% de indutância obteve-se um baixo rendimento de 92% , alguns respingos grandes misturados com respingos na grande maioria médios e pequenos, os oscilogramas indicam uma transferência instável. Com uma indutância de 40% o rendimento dessa vez aumenta para 93,7%, respingos relativamente grandes mas em menor quantidade e misturados com respingos na grande maioria médios e pequenos, os oscilogramas indicam variações de subida de picos de correntes mais suaves e menores, a corrente continuou a mesma. Enfim com a indutância de 80% o rendimento cai para 92,8%, o tamanho dos respingos na maioria são pequenos e médios com a presença de poucos respingos grandes, os oscilogramas apresentam picos de corrente maiores e diferentes entre si, a média de corrente sobe 6A.

A tabela 6.2.3 exibe imagens dos respingos coletados para os testes com velocidades de alimentação de 20 m/min

Tabela 6.2.3 - Imagens Dos Respingos Coletados e Seus Rendimentos Para Velocidade de alimentação de arame de 20m/min.

<p>G DBCP 8mm INDUTÂNCIA 0% V. ARAME 20 m/min RENDIMENTO 97,5%</p>	<p>H DBCP 8mm INDUTÂNCIA 40% V. ARAME 20 m/min RENDIMENTO 97,5%</p>	<p>I DBCP 8mm INDUTÂNCIA 80% V. ARAME 20 m/min RENDIMENTO 97,6%</p>
		
<p>P DBCP 12mm INDUTÂNCIA 0% V. ARAME 20 m/min RENDIMENTO 96,9%</p>	<p>Q DBCP 12mm INDUTÂNCIA 40% V. ARAME 20 m/min RENDIMENTO 96,4%</p>	<p>R DBCP 12mm INDUTÂNCIA 80% V. ARAME 20 m/min RENDIMENTO 96,1%</p>
		

Nas seguintes figuras (6.20 a 6.25) pode-se visualizar os oscilogramas e dados das aquisições de sinais de corrente e tensão dos testes com velocidade de alimentação ( $V_a$ ) 20m/min.

COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
G	64,8	179,4	502	23,7	1,1	0,4	20	0	8	97,5

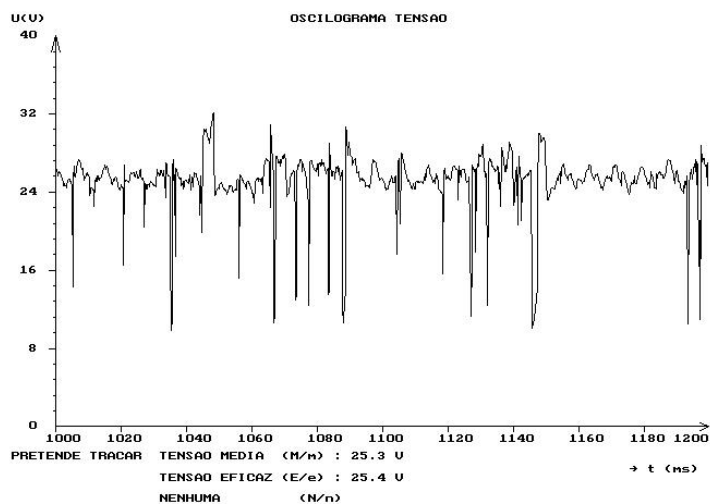
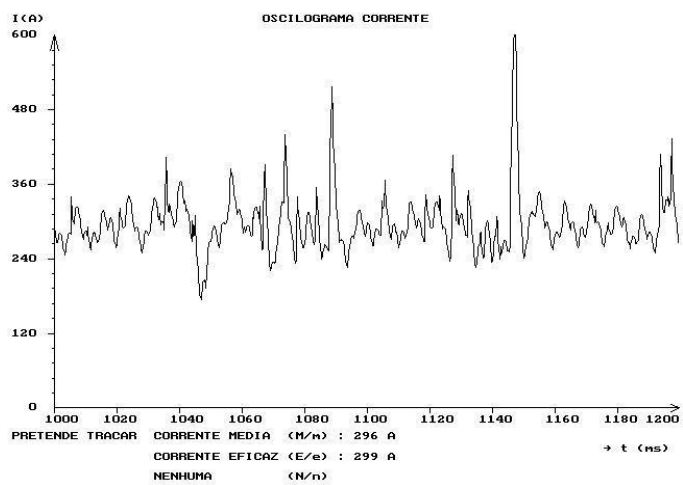
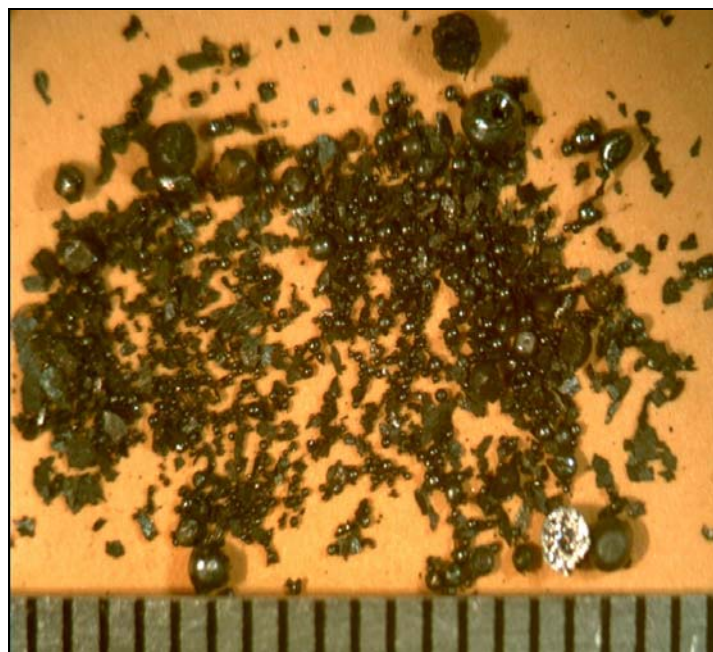
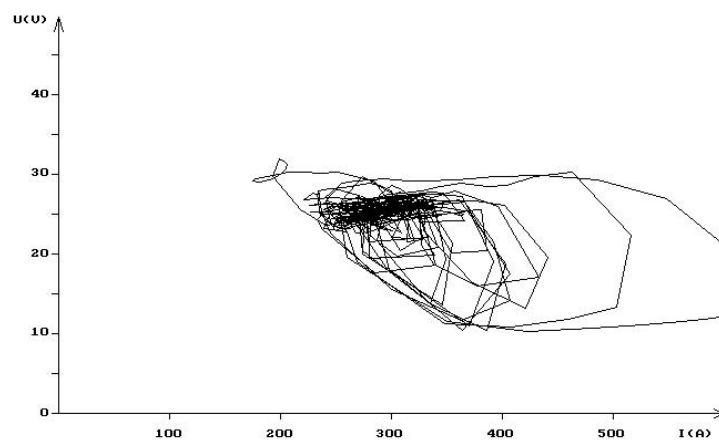


FIGURA 6.20 – COMBINAÇÃO G

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	DIpm	dIdtS	Ipm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
H	51	114,5	431	23,7	1,3	0,6	20	40	8	97,6

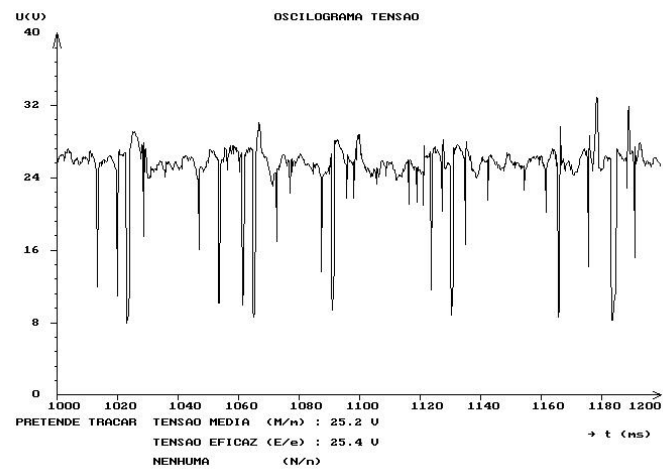
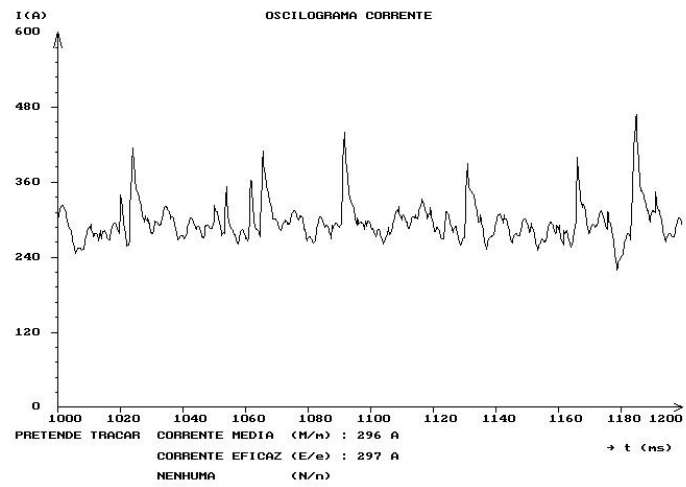
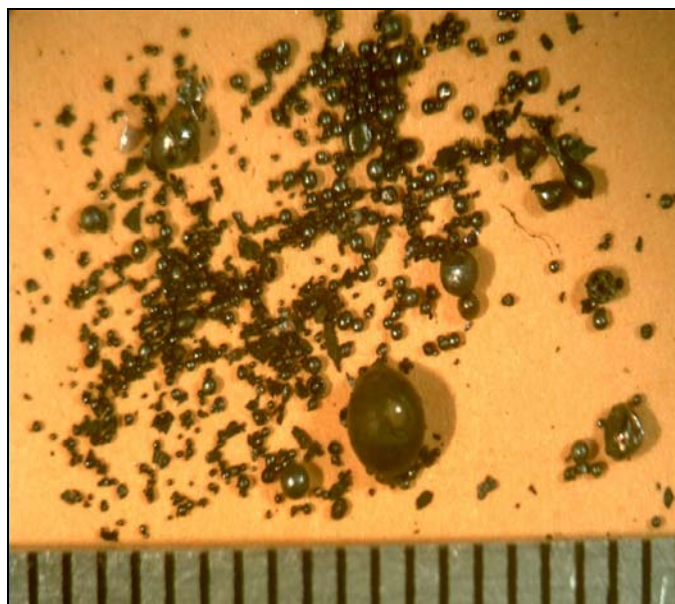
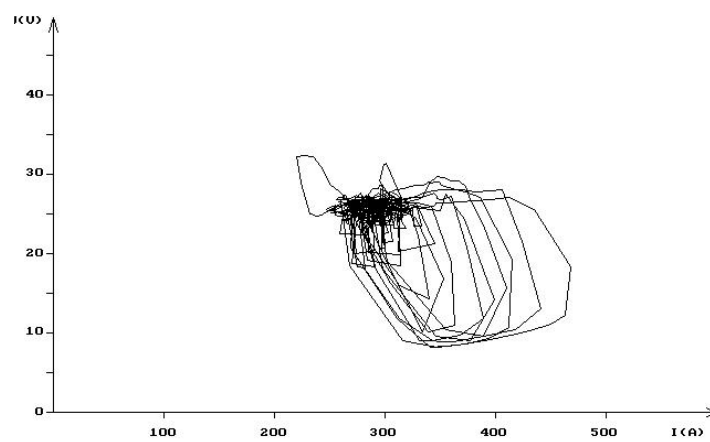


FIGURA 6.21 – COMBINAÇÃO H

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
I	61,9	120,6	439	23,7	1,4	0,7	20	80	8	97,8

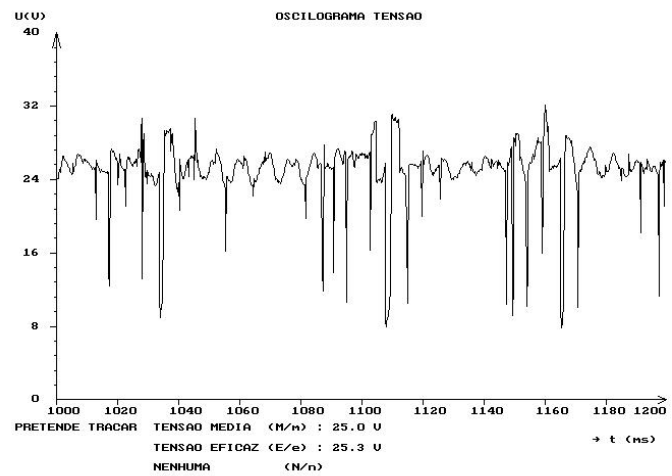
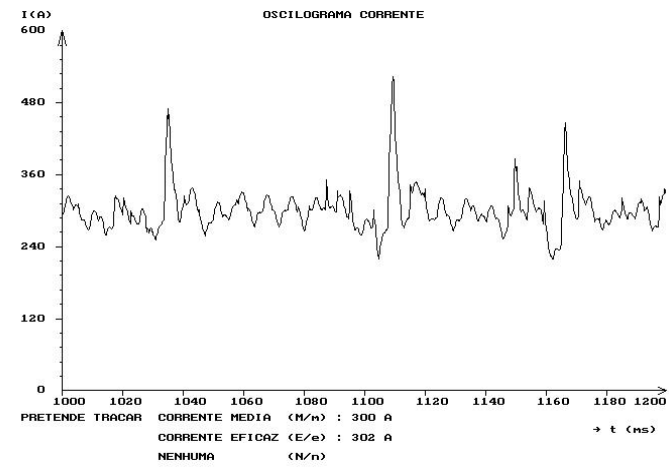
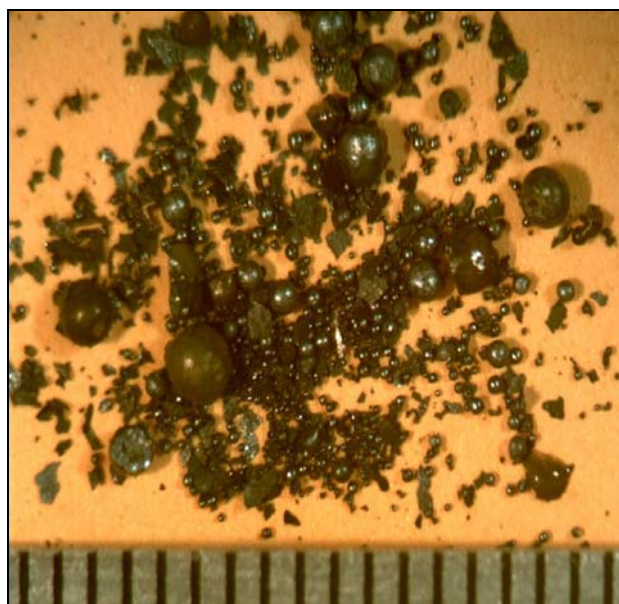
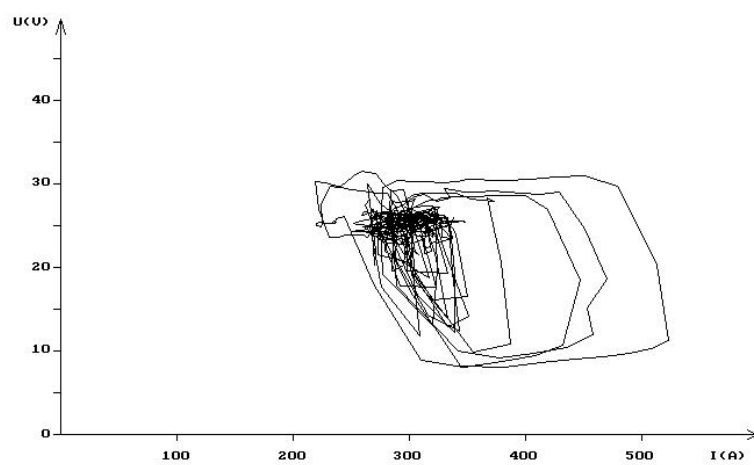


FIGURA 6.22 – COMBINAÇÃO I

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
P	40,5	162,1	464	26	1,1	0,5	20	0	12	96,9

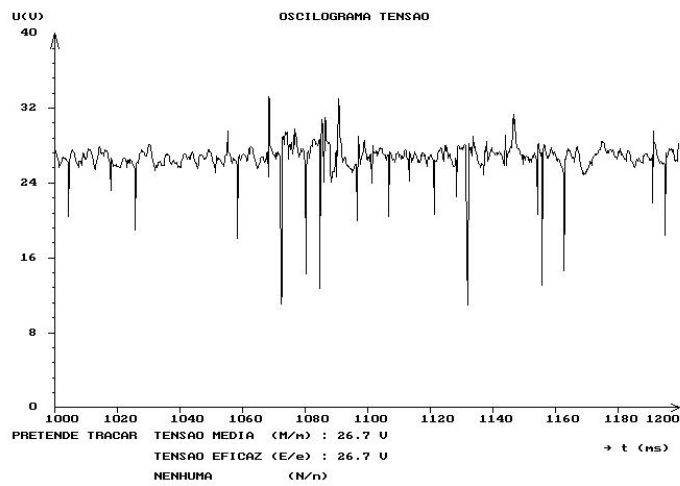
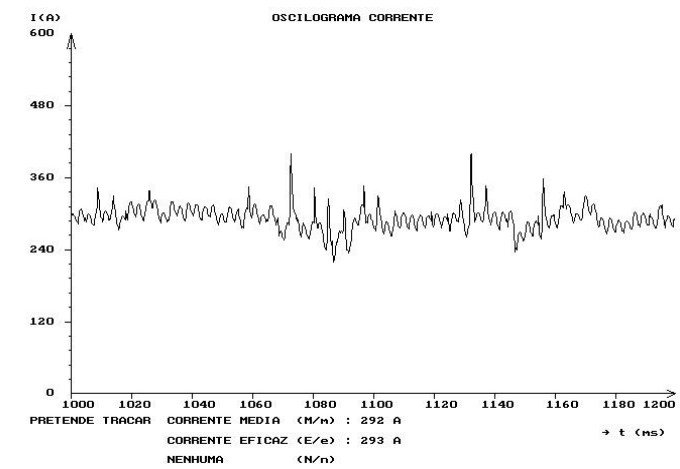
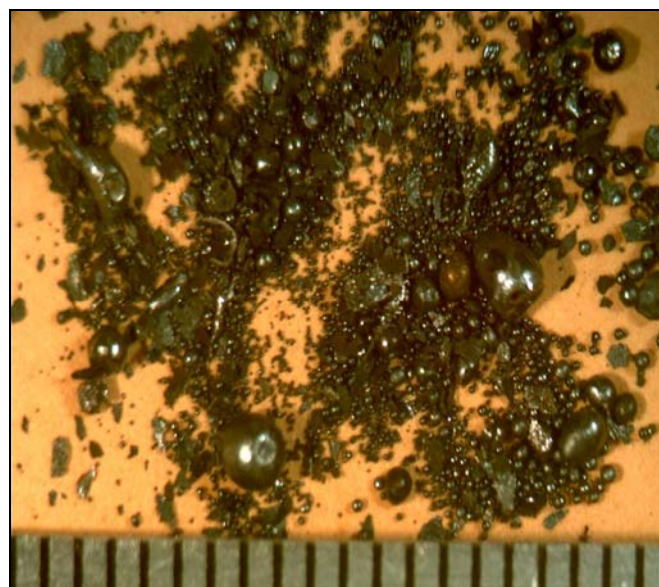
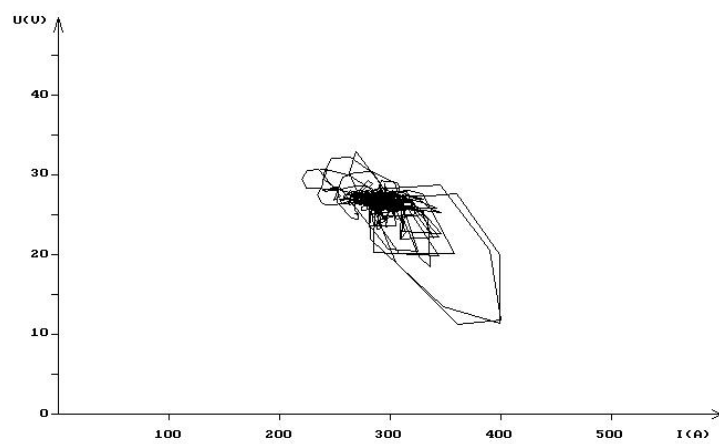


FIGURA 6.23 – COMBINAÇÃO P

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
Q	28,4	10,5	397	24,8	0,9	0,1	20	40	12	96,4

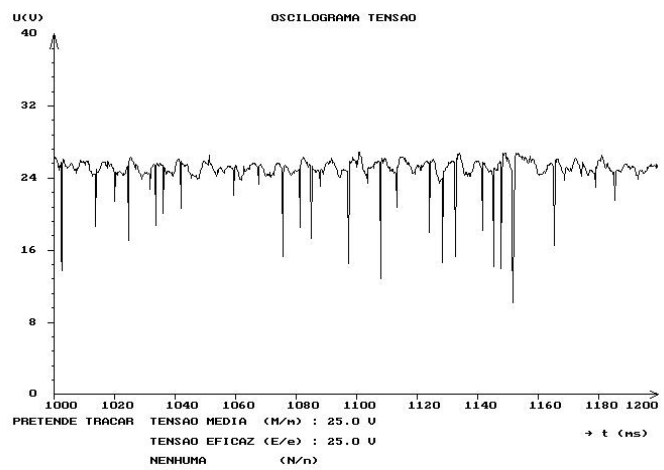
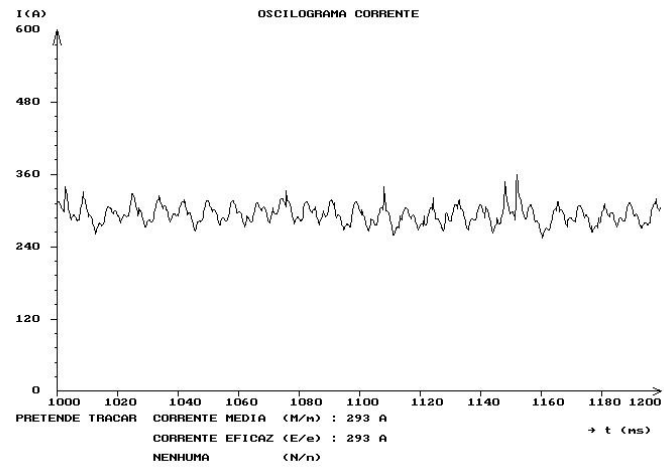
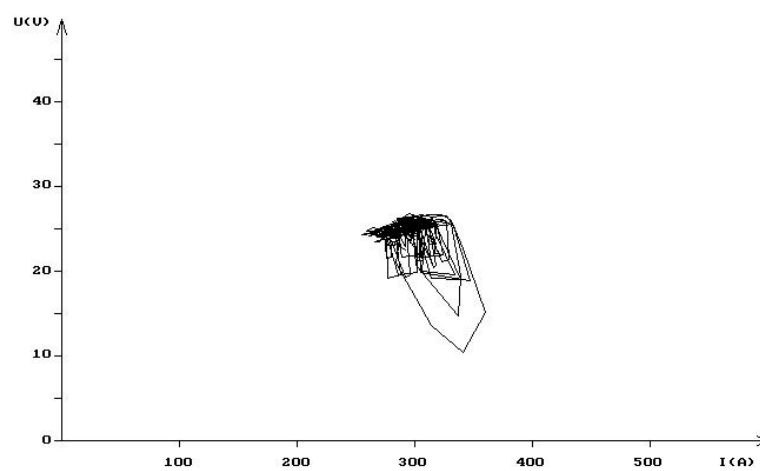


FIGURA 6.24 – COMBINAÇÃO Q

## TENSÃO X CORRENTE



COMB	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	VA	IND	DBCP	REND[%]
R	52,8	109,3	417	23,4	1,3	0,6	20	80	12	96,1

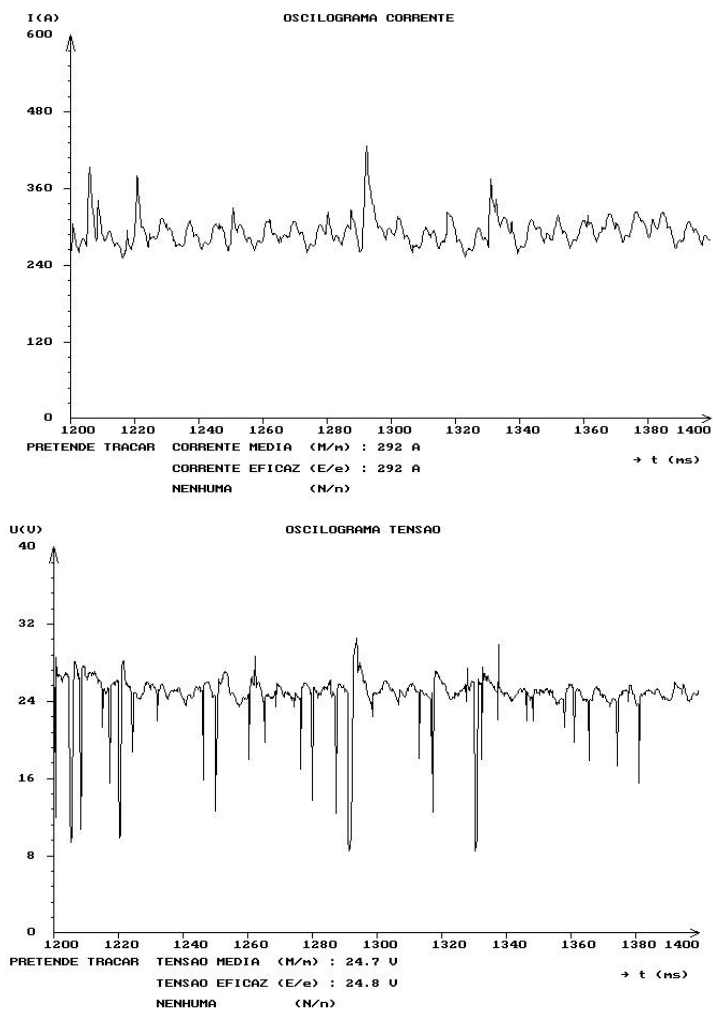
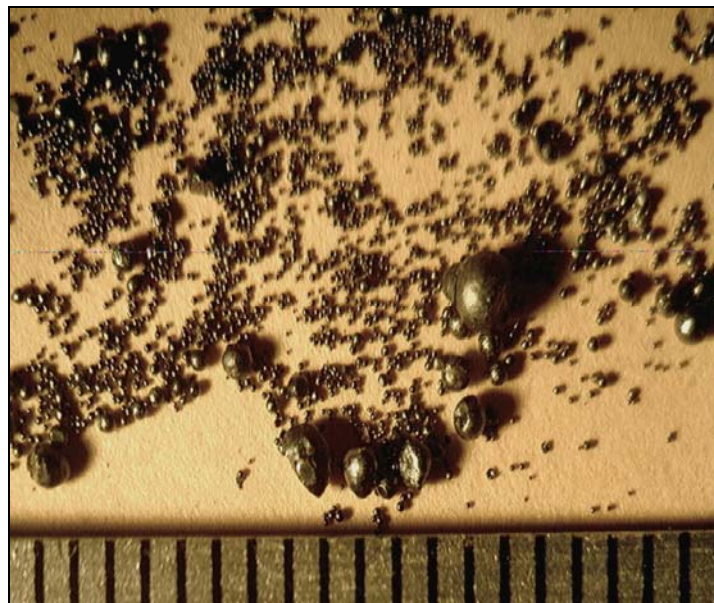
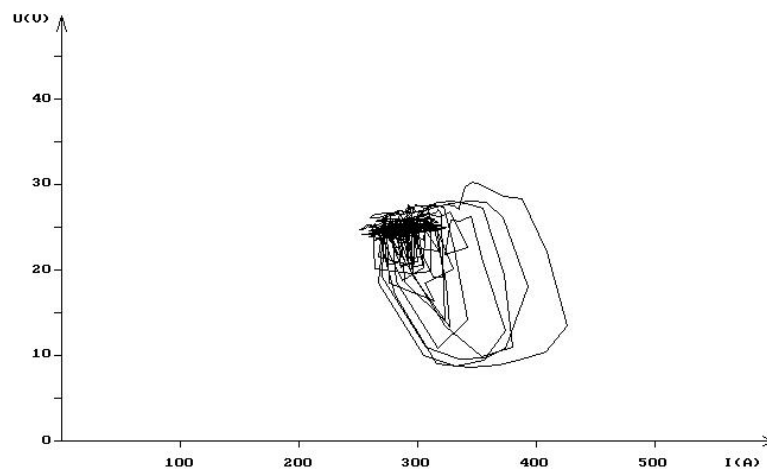


FIGURA 6.25 – COMBINAÇÃO R

## TENSÃO X CORRENTE



Para a VA de 20m/min na tabela 6.2.3, DBCP 8mm (amostras G, H, I) nota-se que com 0% de indutância obteve-se um alto rendimento de 97,5%, existe menor quantidade de respingos e também há tamanhos de respingos relativamente grandes misturados com respingos pequenos, os oscilogramas indicam uma transferência mais estável quase atingindo o modo por transferência goticular. Passando para uma indutância de 40% o rendimento continuam com 97,6%, respingos pequenos predominam, os oscilogramas indicam variações de subida de picos de correntes mais suaves e menores e a corrente de pico média se manteve. Com a indutância de 80% o rendimento quase não muda, passa para 97,8%, o tamanho dos respingos parecem como antes, com predomínio de respingos

pequenos, o oscilograma não apresenta grandes variações e a corrente de pico média sobe 4A.

Para DBCP 12mm (amostras P, Q, R) nota-se que com 0% de indutância obteve-se um alto rendimento de 96,9%, existe menor quantidade de respingos e também há tamanhos de respingos relativamente grandes misturados com respingos médios e pequenos na maioria, os oscilogramas indicam uma transferência mais estável quase atingindo o modo por transferência por spray. Passando para uma indutância de 40% o rendimento passa para 96,4%, respingos pequenos predominam quase totalmente, os oscilogramas indicam variações de subida de picos de correntes mais suaves e menores e a corrente de pico média se manteve. Com a indutância de 80% o rendimento não muda muito, passa para 96,1%, o tamanho dos respingos parecem como antes, com predomínio de respingos pequenos, o oscilogramas não apresentam grandes variações e a corrente de pico média continua praticamente a mesma.

Por fim observa-se que para todas as séries, que o tamanho dos respingos é influenciado sob efeito da indutância. Toma-se como exemplo a mostra K, para a série de configuração DBCP=12mm e VA=12m/min os respingos gerados são menores para uma indutância de 40% o que pode ser muito positivo quando se trata de um posterior trabalho de remoção de respingos, tema de alguns estudos, como de (KANG 2005).

Claramente se vê que a quantidade de respingos coletados é menor para a velocidade do arame de 20m/min e conseqüentemente o rendimento é maior para essa velocidade.

Com relação a DBCP para as VA de 16 e 20 m/min os rendimentos são maiores para DBCP de 8mm. Para VA de 12m/min essa situação se difere. Com indutância de 0% o rendimento foi maior para DBCP de 8 mm, mas para indutâncias de 40 % e 80 % o rendimento torna-se bem maior para DBCP de 12mm, passando de uma faixa de 92 % para 96 % com DBCP maior sob efeito de indutância. Principalmente para as VA de 12 e 16 m/min o tamanho dos respingos foram maiores para DBCP de 8mm. Para a VA de 20m/min esse efeito não foi percebido com evidência.

## 6.4 RESULTADOS ESTATÍSTICOS

De acordo com o estudo de “Aplicação De Redes Neurais Para Classificação De Estabilidade do Arco De Solda” (CRUZ, 2007, p. 29), cujo qual foi baseado no mesmo programa estatístico de tratamento usado neste trabalho, o programa MIGMAG.SAP, foram escolhidos os resultados estatísticos de aquisição de tensão e corrente dos testes com as melhores influências sobre a estabilidade do arco, indicadas na seguinte tabela 6.3.

Tabela 6.3 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS TESTES.

COMB	VA	IND	DBCP	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	Dipm/lpm	REND[%]
A	12	0	8	57,9	137,1	489	20,2	2	0,9	0,1184	94,7
B	12	40	8	100,1	84,6	444	19,2	3	1,9	0,2255	93,3
C	12	80	8	84,6	86,9	427	19,1	2,6	1,5	0,1981	90,7
D	16	0	8	57,9	155,6	499	22	1,5	0,6	0,116	92,4
E	16	40	8	58,9	101,8	436	21,4	1,5	0,8	0,1351	95,6
F	16	80	8	63,1	101,3	430	22,3	1,6	0,9	0,1467	94,6
G	20	0	8	64,8	179,4	502	23,7	1,1	0,4	0,1291	97,5
H	20	40	8	51	114,5	431	23,7	1,3	0,6	0,1183	97,6
I	20	80	8	61,9	120,6	439	23,7	1,4	0,7	0,141	97,8
J	12	0	12	41,1	158,1	419	20,7	1,4	0,4	0,0981	91,8
K	12	40	12	43,6	92,2	369	20,3	1,7	0,6	0,1182	96
L	12	80	12	50,3	90,8	380	20	2	0,8	0,1324	96
M	16	0	12	51,4	164,3	475	22,3	1,3	0,5	0,1082	92
N	16	40	12	56,2	98,3	421	22,5	1,6	0,7	0,1335	93,7
O	16	80	12	59,5	100,3	429	21,9	1,6	0,8	0,1387	92,8
P	20	0	12	40,5	162,1	464	26	1,1	0,5	0,0873	96,9
Q	20	40	12	28,4	10,5	397	24,8	0,9	0,1	0,0715	96,4
R	20	80	12	52,8	109,3	417	23,4	1,3	0,6	0,1266	96,1

Dlpm : Desvio-padrão dos picos de corrente  
 dldtS : dl/dt subida (corrente)  
 lpm : corrente de pico média  
 Um : Tensão média  
 Tmc : Média dos períodos de curto-circuito  
 DPmc : Desvio-padrão dos períodos de curto-circuito  
 VA : Velocidade de alimentação do arame  
 COMB : Combinação  
 IND : Indutância  
 DPCP : Distância bico de contato peça

Para buscar uma correlação estatística das variáveis que mais influenciam na estabilidade conforme o estudo de CRUZ (2006) dividiu-se a mesma tabela 5.2 por velocidade de alimentação e DBCP gerando as tabelas 6.4 e 6.5.

Tabela 6.4. Classificação da tabela estatística para mesma (VA) velocidade de alimentação de arame e DBCP 8mm.

COMB	VA	IND	DBCP	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	REND[%]
A	12	0	8	57,9	137,1	489	20,2	2	0,9	94,7
B	12	40	8	100,1	84,6	444	19,2	3	1,9	93,3
C	12	80	8	84,6	86,9	427	19,1	2,6	1,5	90,7
D	16	0	8	57,9	155,6	499	22	1,5	0,6	92,4
E	16	40	8	58,9	101,8	436	21,4	1,5	0,8	95,6
F	16	80	8	63,1	101,3	430	22,3	1,6	0,9	94,6
G	20	0	8	64,8	179,4	502	23,7	1,1	0,4	97,5
H	20	40	8	51	114,5	431	23,7	1,3	0,6	97,6
I	20	80	8	61,9	120,6	439	23,7	1,4	0,7	97,8

Tabela 6.5. Classificação da tabela estatística para mesma (VA) velocidade de alimentação de arame e dbcp 12mm.

COMB	VA	IND	DBCP	Dlpm	dldtS	lpm	Um	Tmc	DPmc	REND[%]
J	12	0	12	41,1	158,1	419	20,7	1,4	0,4	91,8
K	12	40	12	43,6	92,2	369	20,3	1,7	0,6	96
L	12	80	12	50,3	90,8	380	20	2	0,8	96
M	16	0	12	51,4	164,3	475	22,3	1,3	0,5	92
N	16	40	12	56,2	98,3	421	22,5	1,6	0,7	93,7
O	16	80	12	59,5	100,3	429	21,9	1,6	0,8	92,8
P	20	0	12	40,5	162,1	464	26	1,1	0,5	96,9
Q	20	40	12	28,4	10,5	397	24,8	0,9	0,1	96,4
R	20	80	12	52,8	109,3	417	23,4	1,3	0,6	96,1

Nas tabelas 6.4 e 6.5 tenta-se observar o comportamento estatístico para testes separados por DBCP e a velocidade do arame VA variando-se indutâncias.

## 6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS

### 6.5.1 Efeito da Variação da Velocidade do Arame

Verificou-se que o aumento da velocidade de alimentação do arame aumenta a quantidade de curto circuitos e com isso aumenta a quantidade de respingos. Isto é constatado pelos oscilogramas obtidos nas amostras das figuras do item 6.3.1, que visualmente mostram uma maior quantidade de curto-circuitos para velocidades de alimentação mais altas e pelos dados estatísticos obtidos nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5, que revelam diminuição das médias de períodos de curto-circuito ( $T_{mc}$ ) quando se aumenta a velocidade de alimentação do arame. Porém, os rendimentos calculados e as imagens de coleta de respingos revelam que bons rendimentos podem ser alcançados com altas velocidades usando a indutância.

Os dados estatísticos da tabela 6.4 e 6.5 revelam que se podem obter rendimentos com velocidades de 12 m/min melhores que rendimentos obtidos com velocidades de 16 m/min com regulagens de indutância, dependendo da DBCP. Contudo, os resultados também mostram que se podem obter bons resultados de rendimento com a VA de 16 m/min variando a indutância, dependendo da DBCP.

Um exemplo muito interessante é observado nos testes D e E, ver figuras 6.14 e 6.15. Nesses testes pode-se ver que o rendimento do teste D com VA de 16 m/min é um dos piores (92,4%) para DBCP 8mm, mas quando no teste E se usa uma indutância de 40% com DBCP de 8mm o rendimento sobe para 95,6 %, sendo o melhor rendimento entre os testes depois dos testes com velocidade de 20m/min, que são os testes com rendimentos mais elevados, provavelmente devido a transição para o modo de transferência goticular como se pode observar nos oscilogramas do item 6.3.1 para as velocidades de 20 m/min. Nos conjuntos de resultados dos testes D e E nas figuras 6.14 e 6.15, com oscilogramas, imagens de respingos e dados estatísticos, pode-se observar o efeito da indutância na estabilidade do arco, rendimento e tamanho dos respingos.

No teste D e E os conjuntos agrupados revelam os dados estatísticos acusando principalmente que o DiDts (derivada de subida de corrente) cai de 155,6 no teste D para 101,8 no teste A e que a corrente de pico média cai de 499 para 439. Para o teste D o oscilograma apresenta maiores picos de correntes. Para o teste E as subidas de corrente são mais acentuadas e os picos de corrente são

menores. Observa-se, nas imagens dos respingos dos testes D e E que a quantidade de respingos e o tamanho dos mesmos diminuem com o uso da indutância de 40% para a velocidade de 16m/min, levando a conclusão de que esta é uma excelente configuração para ser aplicada na prática. Resultados esperados, pois a indutância trabalha suavizando o efeito de subida de corrente e estabilizando melhor o arco.

Com velocidade de 12 m/min pode-se ligeiramente perceber, pela quantidade de respingos, que o rendimento cai com o aumento da indutância para DBCP de 8mm, mas o tamanho dos respingos também diminui com o aumento da indutância, só que são em maiores quantidades. Todavia o rendimento aumenta com o aumento da indutância para a velocidade citada com DBCP de 12mm.

Destaca-se que, para a Va de 12 m/min, com o aumento da indutância o rendimento cai para DBCP de 8mm e sobe para a DBCP de 12 mm, sendo que, para esse fenômeno não se obteve uma relação com algum resultado obtido.

Uma possível explicação seria o fato da corrente menor, com picos de correntes mais uniformes, para DBCP maior, fazendo a indutância atuar proporcionando um aumento de rendimento, pois atua apenas amenizando o efeito de subida brusca de corrente.

Quando a DBCP é menor, a corrente é mais alta, com picos de corrente com maiores diferenças, e com uma frequência de curto-circuitos menor. Também existe a hipótese da indutância atuar uniformizando os picos maiores com os menores transformando pequenos picos de corrente em respingos e diminuindo os respingos maiores fazendo assim com que o rendimento diminua.

Para a velocidade de 16m/min esta constatação se ameniza devido ao aumento da taxa de alimentação influenciar mais. Para Va de 16 m/min o rendimento maior fica para a indutância de 40% , isso se nota pela quantidade de respingos nas fotos, principalmente para DBCP 8mm.

Com relação à DBCP para as VA de 16 e 20 m/min os rendimentos são maiores para DBCP de 8mm . Com VA de 12m/min essa situação se difere. Com indutância de 0% o rendimento foi maior para DBCP de 8 mm, mas para indutâncias de 40 % e 80 % o rendimento torna-se bem maior para DBCP de 12mm, passando de uma faixa de 92 % para 96 % com DBCP maior sob efeito de indutância.

Principalmente para as VA de 12 e 16 m/min o tamanho dos respingos foram maiores para DBCP de 8mm. Para a VA de 20m/min esse efeito não foi percebido

com evidência pois nota-se nos oscilogramas uma transição para um modo de transferência por spray onde outros conceitos governam o sistema.

Nas imagens de respingos das tabelas 6.2.1 e 6.2.2 e 6.2.3 nota-se também que os respingos gerados pelos testes realizados com DBCP de 12mm são menores e mais uniformes. Tomam-se como exemplo os testes B e K. Seus oscilogramas, vistos nos resultados agrupados do item 6.3.1 nas figuras 6.9 e 6.12 revelam um processo mais estável para a DBCP de 12mm, observado na uniformidade do gráfico tensão x corrente e com menores picos de corrente observados no oscilograma de corrente.

Normalmente se tem a idéia de que a aproximação da tocha, diminuindo a DBCP, pode estabilizar mais o arco e diminuir respingos, aumentando o rendimento. Mas os testes, os dados estatísticos e as imagens de respingos apresentam resultados interessantes.

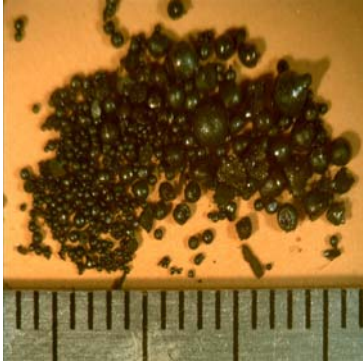
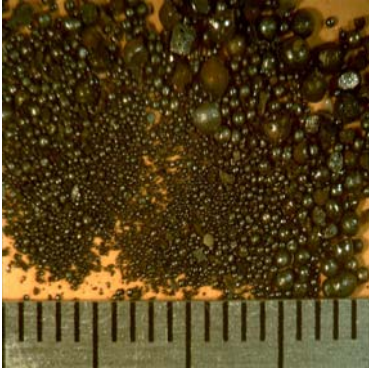
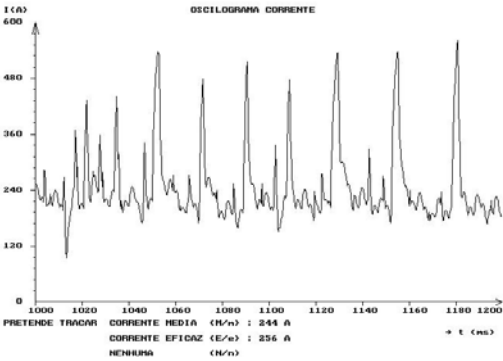
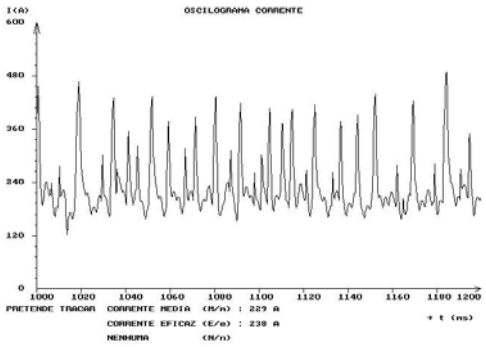
De acordo com os testes o processo com DBCP de 12mm é mais estável. No exemplo de testes A e J os índices de estabilidade de desvio de período de curto-circuito  $D_{pmc}$ , e desvio de pico de corrente  $D_{ipm}$  são menores para DBCP de 12mm e os respingos também.

Para tentar explicar isso se isolou apenas os dados estatísticos, fotos e oscilogramas dos dois testes. A tabela 6.6 indica um  $D_{pmc}$  de 0,9 e  $D_{ipm}$  de 57,9 para o teste A e para o teste J um  $D_{pmc}$  de 0,4 e  $D_{ipm}$  de 41,1.

Tabela 6.6 - COMPARAÇÃO DOS TESTES A E J

COMBVA	IND	DBCP	Dipm	dldtS	Ip <sub>m</sub>	U <sub>m</sub>	T <sub>mc</sub>	DP <sub>mc</sub>	REND[%]	
A	12	0	8	57,9	137,1	489	20,2	2	0,9	94,7
J	12	0	12	41,1	158,1	419	20,7	1,4	0,4	91,8

<p>A</p> <p>DBCP 8mm</p> <p>INDUTÂNCIA 0 %</p> <p>V. ARAME 12 m/min</p> <p>RENDIMENTO 94,7%</p> 	<p>J</p> <p>DBCP 12mm</p> <p>INDUTÂNCIA 0%</p> <p>V. ARAME 12m/min</p> <p>RENDIMENTO 91,8%</p> 
	

Com esta comparação podemos observar que, apenas com a mudança de DBCP o desvio de picos de corrente média (Dipm) e corrente de pico média (Ip<sub>m</sub>) caíram. Isto possivelmente porque o aumento da DBCP proporcionou uma diminuição e uniformização dos picos de corrente. Vendo o oscilograma do teste A se observa picos de corrente desuniformes e maiores, que causam respingos maiores mas em menor quantidade. No oscilograma do teste J é observado picos de corrente mais uniformes, mas em maiores quantidades, gerando mais respingos menores.

Neste caso a diminuição da corrente de pico média causada pelo efeito Joule ou o aumento da frequência de curto-circuitos devido ao aumento da DBCP, vista pela diminuição dos períodos de curto-circuito (T<sub>mc</sub>) pode ser a explicação

mais coerente para este fenômeno. Também pode-se levar a crer que o aumento da DBCP promoveu o aumento dos pequenos picos de corrente transformando-os em respingos e diminuiu os grandes picos de corrente uniformizando-os.

Isso mostra que o teste J com DBCP de 12mm, apesar de apresentar um rendimento menor do que o teste A com DBCP de 8mm, apresenta uma estabilidade melhor, com menores tamanhos de respingos. Pode-se ver isso nas fotos de respingos dos testes A e J (Tabela 5.6) onde os respingos são nitidamente em menor quantidade para DBCP de 8mm ,porém, o tamanho dos respingos é bem menor pra DBCP de 12mm.

Contudo, temos os testes F e O, mostrados nas figuras 6.16 e 6.19, realizados com a mesma velocidade de 16 m/min e indutância de 80 %, mas com 8 e 12 mm de DBCP. O teste F mostrou um rendimento de 94,6 % enquanto o teste O mostrou 92,8 %. Os resultados estatísticos obtidos entre os dois testes são muito semelhantes, o que pode indicar que a melhora do rendimento se deva a DBCP. Nota-se que os respingos gerados pelo teste O são ligeiramente menores, só que em maiores quantidades.

Esta constatação de respingos menores para maiores DBCP, nestes testes, parece que independe da indutância e também vale para todas as velocidades. Isto leva a crer que no momento de escolher a DBCP para as velocidades de 12 e 16 m/min, apesar do rendimento ser maior para DBCP de 8mm, é melhor se optar por uma DBCP de 12mm para se obter respingos menores e mais fáceis de remover.

O tamanho dos respingos menores para DBCP maiores provavelmente se deve a diminuição da corrente causada pelo aumento do efeito Joule, causando menores picos de corrente, constatado nos dados estatísticos, oscilogramas e imagens de coleta de respingos. O aumento da frequência também foi observado quando se aumenta a DBCP, pois os períodos de curto-circuito sempre diminuem.

### **6.5.2 Efeito da Variação da Distância Bico de Contato Peça (DBCP)**

Nos dados estatísticos obtidos na tabela 6.3 nota-se que a corrente sempre sofre um decréscimo quando a DBCP aumenta. Como no caso do teste A e o teste J, onde o mesmo teste é realizado mas variando-se a DBCP de 8mm para 12mm e a corrente cai de 489A para 419A.

Este efeito de diminuição de corrente com o aumento de DBCP é esperado pois de acordo com o efeito Joule, o aquecimento resistivo de passagem de energia pelo material aumenta pelo aumento de DBCP, pois faz com que a energia de corrente usada para fusão do material seja menor. Este fenômeno ocorre para todos os testes em que os mesmos parâmetros são usados e aumenta-se apenas a DBCP.

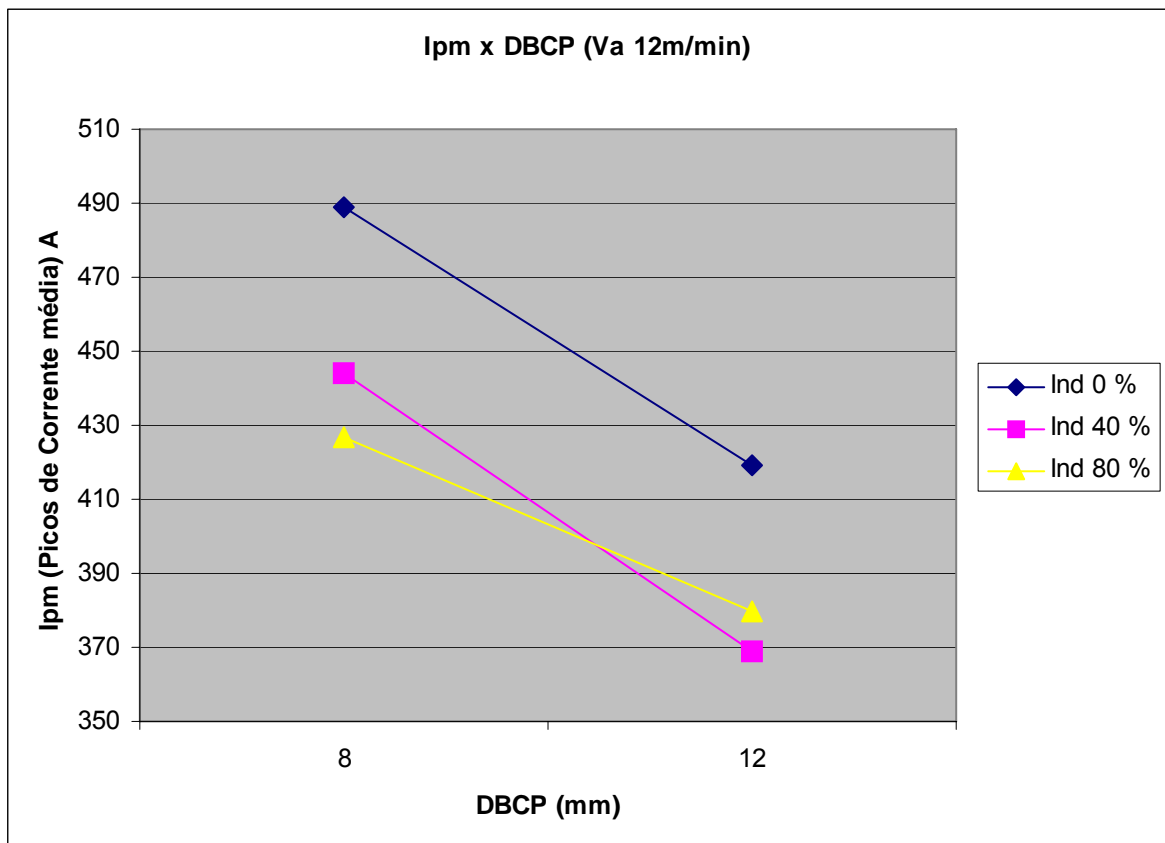


Figura 6.26. Gráfico de Ipm x DBCP Va 12m/min

Transformando-se os dados estatísticos da tabela 6.3 em gráficos comprova-se o efeito Joule em todos os testes com Va de 12, 16, e 20 m/min.

A figura 65.26 (Gráfico Ipm x DbcP Va=12m/min) mostra o efeito que o aumento da DBCP sob a corrente de pico média, fazendo com que a média de picos de corrente (Ipm) caia em até 70 A na Ipm apenas com a mudança de DBCP, no caso da Va 12 m/min com Indutância 0%, a aplicação de indutância também gera efeitos significativos fazendo a Ipm cair cerca de 20 A quando aplicada.

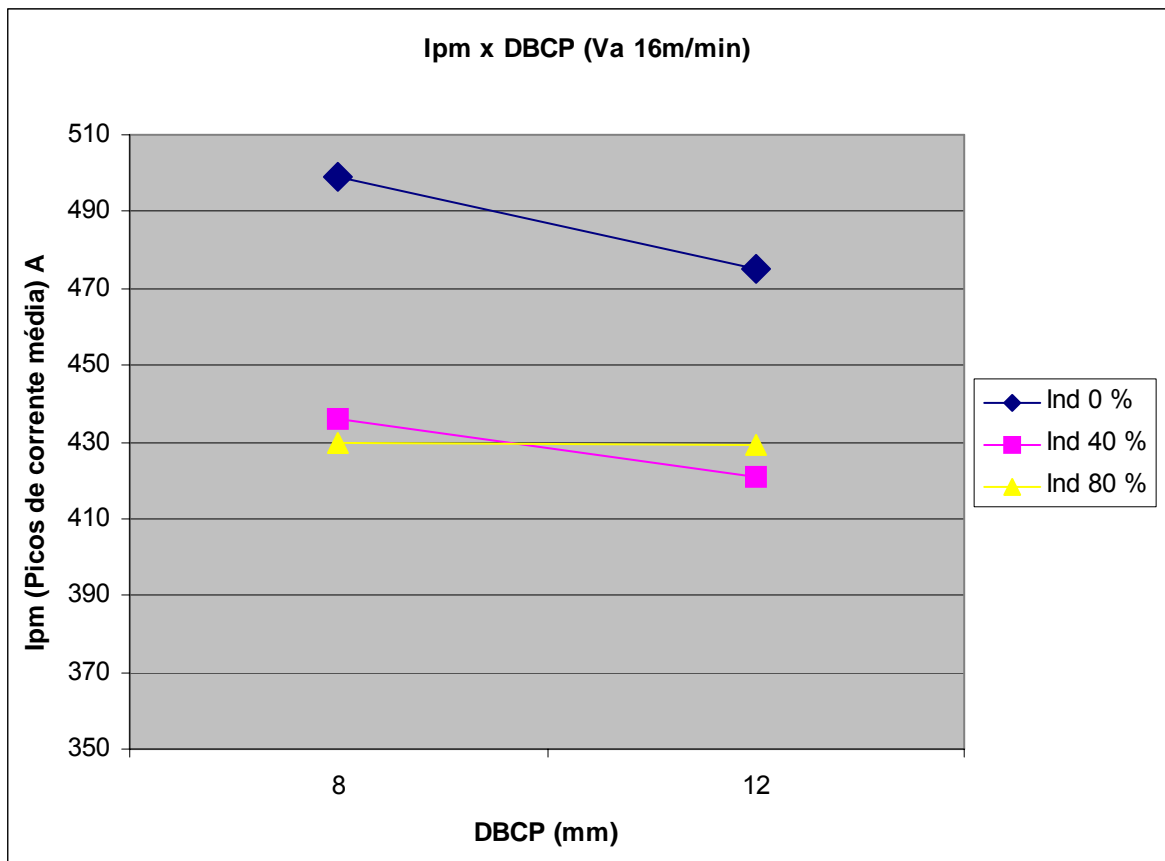


Figura 6.27. Gráfico Ipm x DbcP (Va=16m/min)

Na figura 6.27 gráfico Ipm x DbcP (Va=16m/min) a diminuição de picos de corrente média devido ao efeito Joule já se mostra menor, mostrando que para esta velocidade a DBCP surte um menor efeito e que a indutância influencia muito na Ipm fazendo a corrente cair cerca de 70 A de corrente de pico média quando se aplica a indutância.

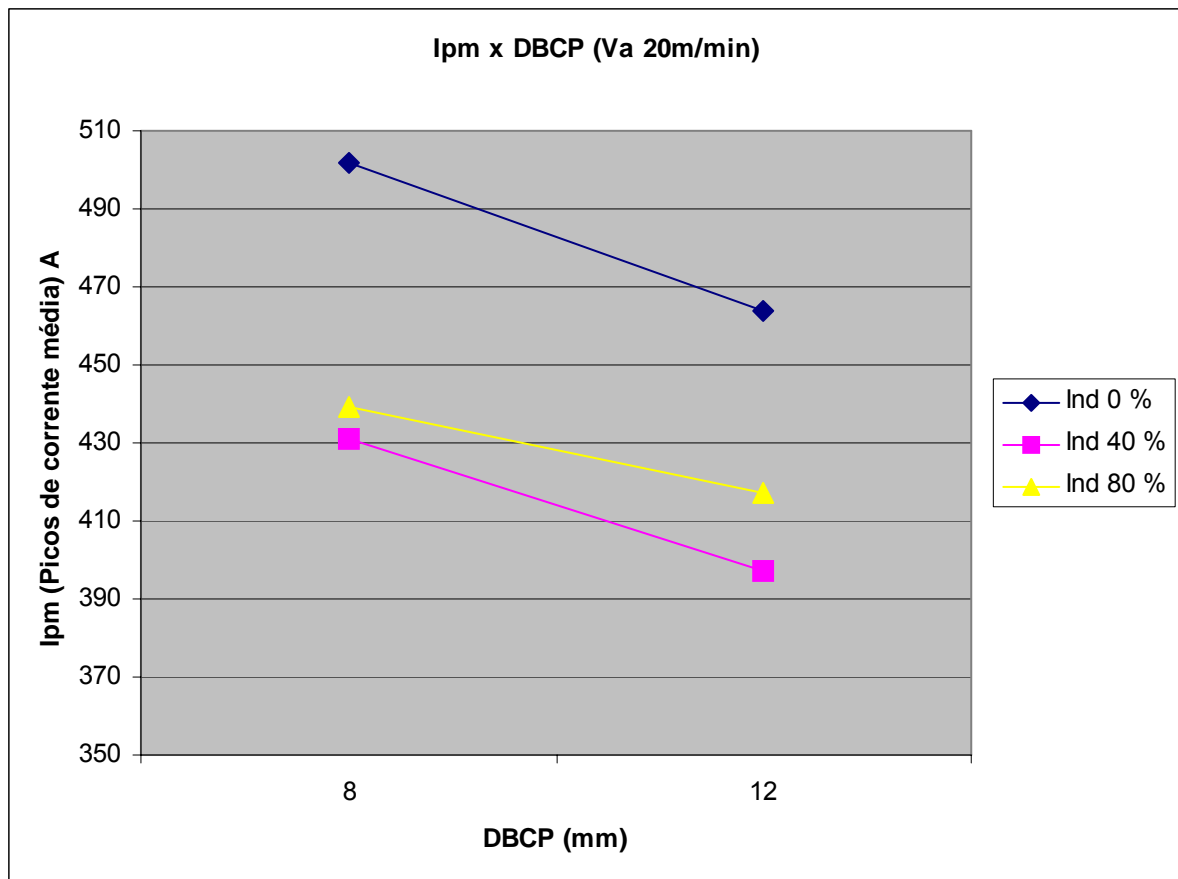


Figura 6.28. Gráfico Ipm x DbcP Va=20m/min

O caso dos testes da figura 6.28 Ipm x DbcP para Va de 20 m/min a diminuição de picos de corrente média devido ao efeito Joule já mostra-se menor, mostrando que para esta velocidade a DBCP surte um menor efeito e que a indutância influencia muito na Ipm fazendo a corrente cair cerca de 60 A de corrente de pico média quando se aplica a indutância.

A constatação de que a corrente de pico média (Ipm) cai quando, se aumenta a distância bico de contato peça (DBCP), pode ser uma possível explicação da diminuição do tamanho dos respingos verificados nas fotos obtidas no item 6.3.1, figuras 6.8 à 6.25.

### 6.5.3 Efeito Da Variação Indutância

A influência da indutância é observada pela diferença entre as quantidades, formas dos respingos tabelas 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3 e no resultado dos oscilogramas e dados estatísticos agrupados no item 6.3.1. Nota-se nitidamente, em todos os testes, que a indutância quando aplicada, proporcionou uma uniformidade no tamanho dos

respingos gerados, ver por exemplo na seqüência de testes J, K e L na próxima tabela 6.7, onde existe uma variação grande de tamanho de respingos no teste J com 0% de indutância e para os testes K com 40% e L, com 80% de indutância os respingos são mais uniformes.

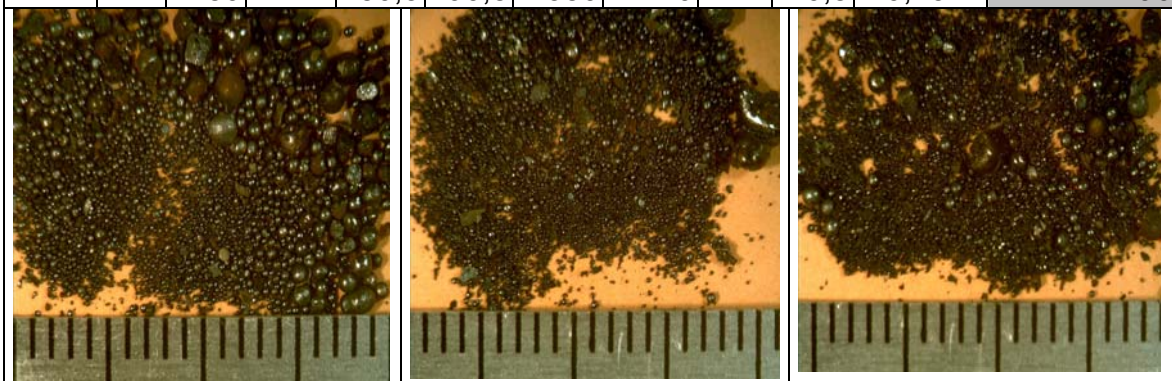
Nota-se que o número de curto circuitos diminui cada vez que se aplica a indutância, por isso os períodos de curto-circuito  $T_{mc}$  sobem. Vendo-se a tabela 6.7, os resultados estatísticos descrevem essa constatação, indicando valores de médias de pico de corrente  $I_{pm}$  caindo sempre que se usa a indutância e aumentando os valores de médias de períodos de curto-circuito ( $T_{mc}$ ).

Isto é esperado, pois a adição da indutância causa um acréscimo no tempo da transferência de curto-circuito e no tempo de abertura de arco, resultando em menos curtos circuitos por segundo, diminuindo as médias de pico de corrente  $I_{pm}$  e aumentando as médias de períodos de curto-circuito.

Voltando ao exemplo J, K e L vê-se que a  $I_{pm}$  cai de 419 para 369 e 380 A e a  $T_{mc}$  sobe de 1.4 para 1.7 e 2.0 respectivamente quando se usa a indutância, este fenômeno é observado praticamente em todos os testes quando se aplica a indutância.

Tabela 6.7 – Comparação entre os testes J, K, L.

COMB	VA	IND	DBCP	$D_{ipm}$	$d_{ldtS}$	$I_{pm}$	$U_m$	$T_{mc}$	$DP_{mc}$	$D_{ipm}/I_{pm}$	REND[%]
J	12	0	12	41,1	158,1	419	20,7	1,4	0,4	0,0981	91,8
K	12	40	12	43,6	92,2	369	20,3	1,7	0,6	0,1182	96
L	12	80	12	50,3	90,8	380	20	2	0,8	0,1324	96



Também se pode notar que esses respingos são menores do que os respingos gerados quando o teste é realizado sob ausência de indutância, conforme mostrado na tabela. Isto é uma informação importante do ponto de vista do

retrabalho, pois dependendo do tamanho, os respingos podem ser mais fáceis de posterior remoção.

A uniformidade e diminuição dos respingos, com o uso da indutância, podem ser explicadas pelo efeito que a indutância provoca nas variações da subida de corrente. A indutância minimiza os efeitos de instabilidade, evitando que a transferência ocorra de forma explosiva uniformizando os picos de corrente. Isto pode ser observado nos oscilogramas obtidos nos testes realizados e mostrados nas figuras 6.8 à 6.25. Nota-se que a inclinação da subida de corrente ocorre de forma menos brusca quando a indutância é aplicada, ver como exemplo gráficos dos testes A e B figuras 6.8 e 6.9. Nos resultados estatísticos dos testes isto é percebido pela variação da subida da corrente (dl/dts), que decresce sempre que a indutância é utilizada, fazendo com que os oscilogramas apresentem subidas de corrente mais suaves dando maior estabilidade ao arco.

## **6.6 Gráficos complementares dos Dados Estatísticos**

Com os dados estatísticos foram confeccionados gráficos para visualização do comportamento dos resultados. Os gráficos trazem a relação entre cada variável estatística combinada com a DBCP (distância bico contato peça),  $V_a$  (Velocidade do arame), indutâncias e rendimentos obtidos.

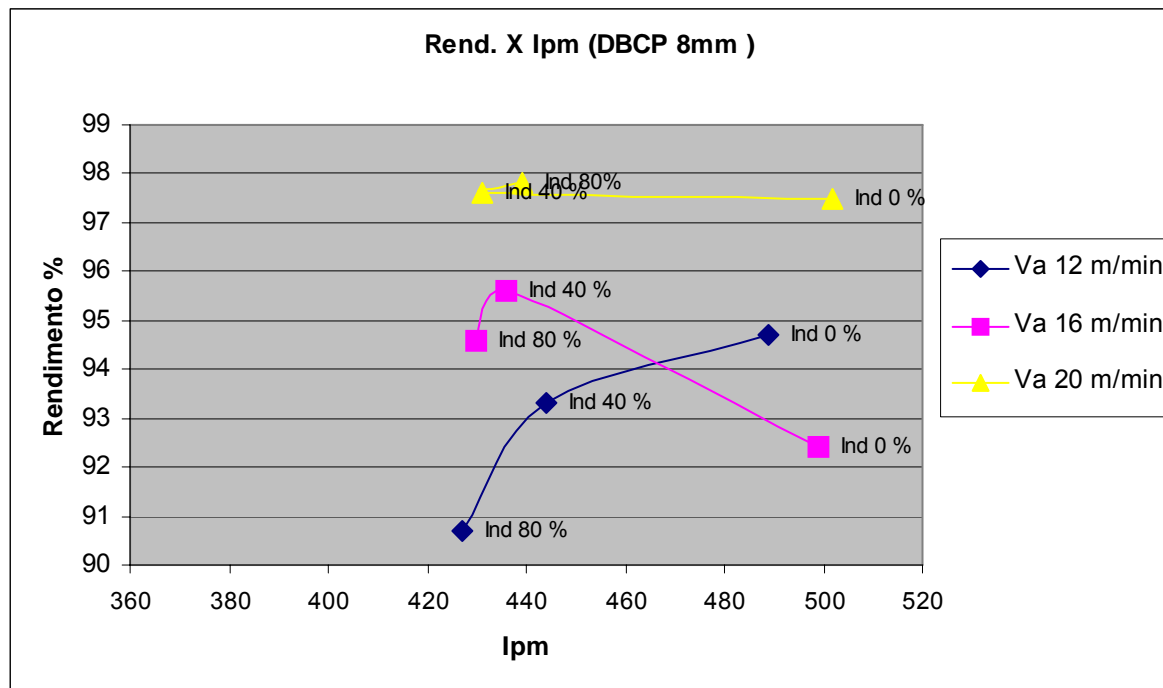


Figura 6.29. Gráfico Rend X Ipm (DBCP 8mm)

Na figura 6.29 no gráfico Rend X Ipm (DBCP 8mm) pode-se observar melhor que, para a velocidade Va 12 m/min o processo sofre grandes variações devido a indutância, fazendo com que rendimento e a corrente de pico média caiam quando aumentada a indutância, o que não era de se esperar era que o rendimento aumentasse quando Ipm também aumenta. Já para a velocidade de 16 m/min o aumento da indutância aumenta o rendimento, e a Ipm decresce. Para a Va de 20 m/min não há significativas variações de rendimento mas a Ipm também cai nas mesmas proporções. Torna-se claro no gráfico a influência da indutância para as velocidades de 12 e 16 m/min e que o rendimento alcançado para a Va 20 m/min é devido a alta velocidade porque as ondas de corrente para esta velocidade têm a amplitude muito baixa fazendo com que o efeito da indutância para esta velocidade seja menor no rendimento.

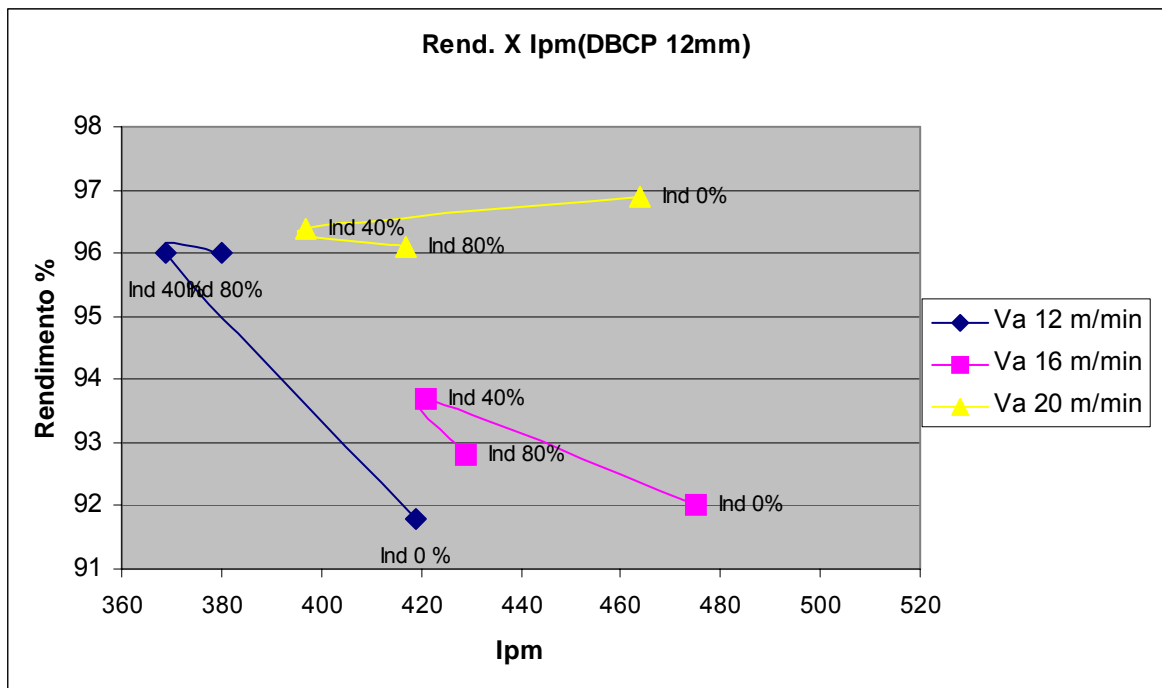


Figura 6.30. Gráfico Rend X Ipm (DBCP 12mm)

Na figura 6.30 mostra-se o gráfico Rend. X Ipm (DBCP 12mm). Desta vez, para Va de 12 m/min, não se repete o comportamento do gráfico da Figura 5.29, mostrando que para esta velocidade a diferença do aumento da DBCP pode provocar efeitos significativos nos resultados. É interessante também observar que para a Va de 12 m/min rendimentos semelhantes à Va de 20m/min são obtidos quando se aplica a indutância, tanto que sem a indutância a diferença entre o rendimento das duas velocidades é gritante. Para a velocidade de 16 m/min fica para a indutância de 40% o melhor resultado de rendimento. Para todas as velocidades o uso da indutância implica num decréscimo da corrente de pico média Ipm.

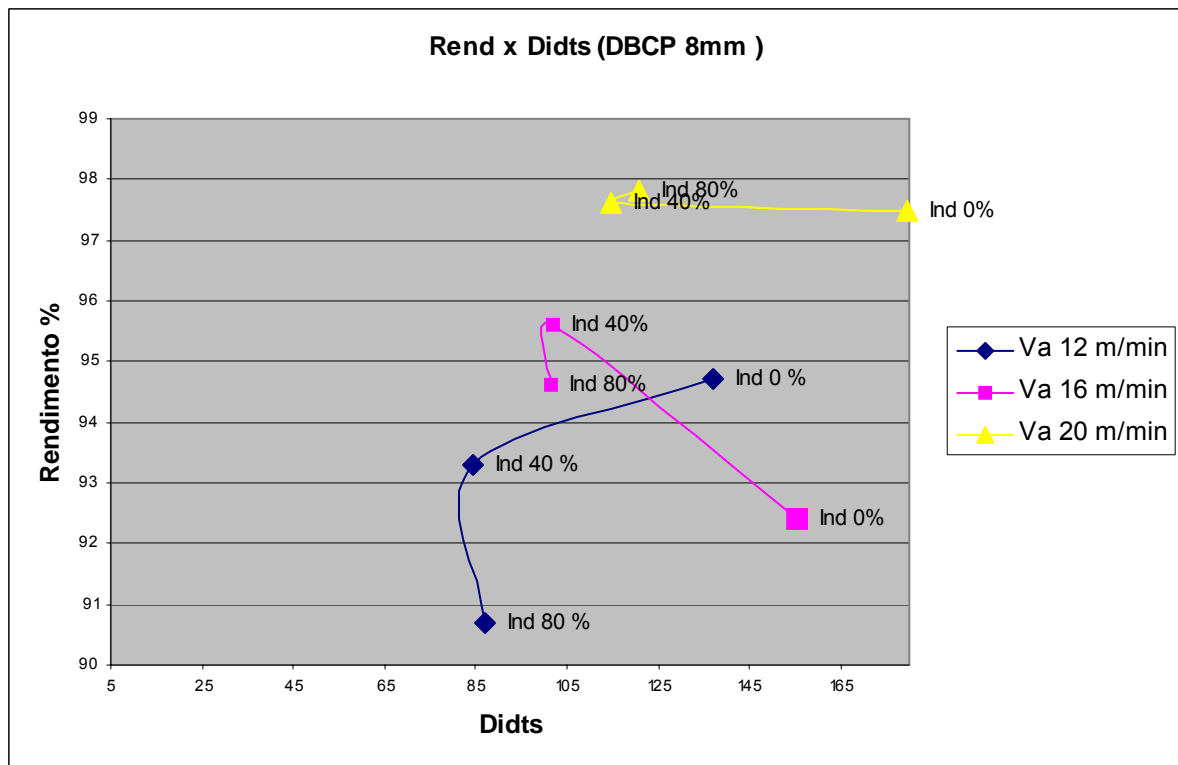


Figura 6.31. Gráfico Rend X DiDts (DBCP 8mm)

Para a figura 6.31, gráfico de Rend. X DiDts (DBCP 8mm), pode-se verificar o efeito da indutância e da velocidade de alimentação na variação da DiDts (tempo de subida de corrente). Nota-se que com o aumento da velocidade de alimentação a variável DiDts também aumenta.

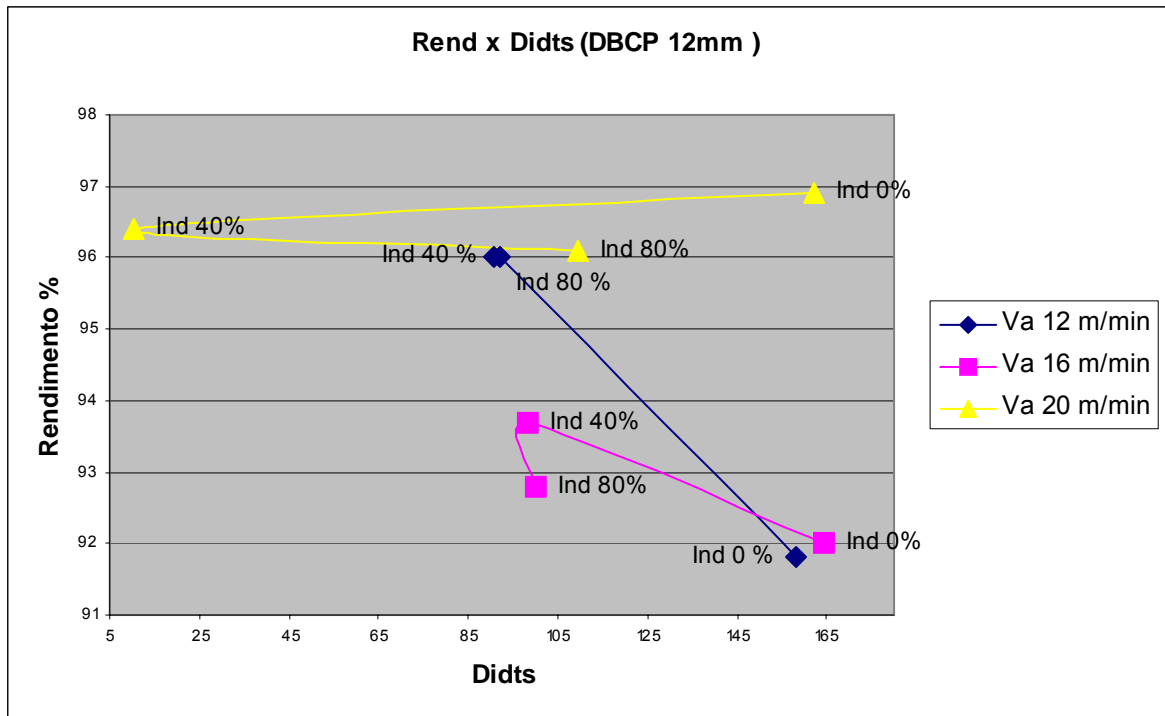


Figura 6.32. Gráfico Rend X DIDts (DBCP 12mm)

Para a figura 6.32 no gráfico de Rend. X DiDts (DBCP 12mm) o destaque é a variação da DIDt para a Va de 20 m/min, que cai bruscamente para indutância de 40%. Pode-se verificar efeitos semelhantes da indutância na variação da DiDts (tempo de subida de corrente) para as Va's de 12 e 16 m/min com a DIDts caindo com o aumento da indutância.

Percebe-se que vendo os gráficos de Didts que o comportamento de Ind=40% e 80% não se diferem muito pois do ponto de vista físico a partir de certa Didts pouco é afetada a transferência, a exceção é o resultado obtido para 40 %, com DBCP 12m Figura 6.32, onde o ponto foge excessivamente da curva com um Didts muito baixo, que provavelmente se deve a algum erro na coleta de dados.

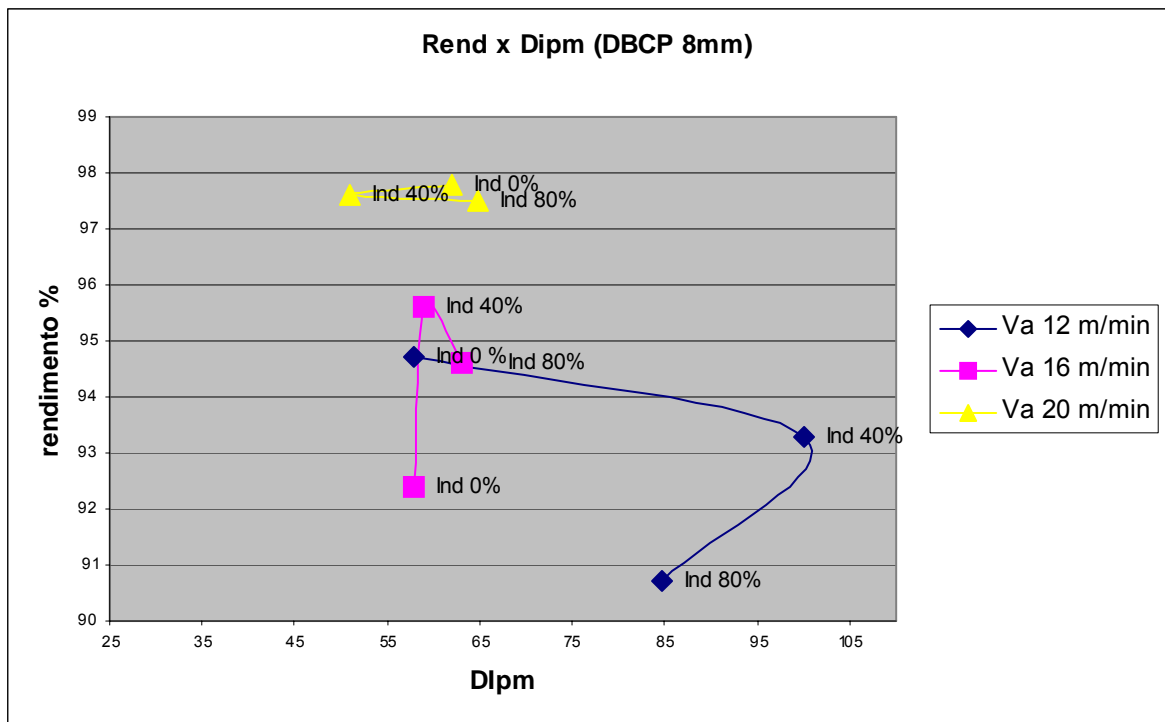


Figura 6.33. Gráfico Rend X Dipm (DBCP 8mm)

Para a figura 6.33, gráfico do Rend. X Dipm (DBCP de 8mm), observa-se que grandes variações de Dipm só ocorrem para a velocidade de 12 m/min. Mais uma comprovação da forte influência que a a indutância de 40% tem na Va 16 m/min.

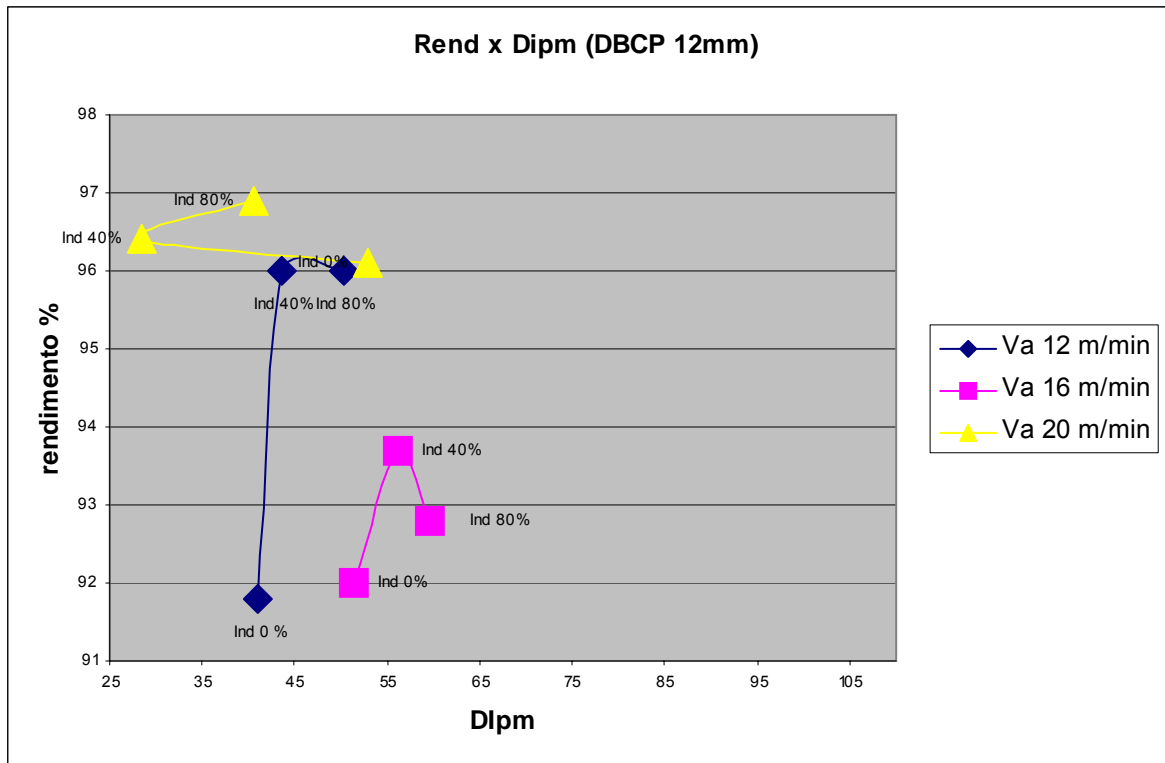


Figura 6.34. Gráfico Rend X Dipm (DBCP 12mm)

Observa-se na figura 6.34 o gráfico do Desvio padrão dos picos de corrente (Dipm), Gráfico Rend. X Dipm (DBCP 12mm). Nota-se que existe poucas variações de Dipm para todas as velocidades de alimentação, mas que os Dipm decrescem quando se aumenta a velocidade de alimentação de arame.

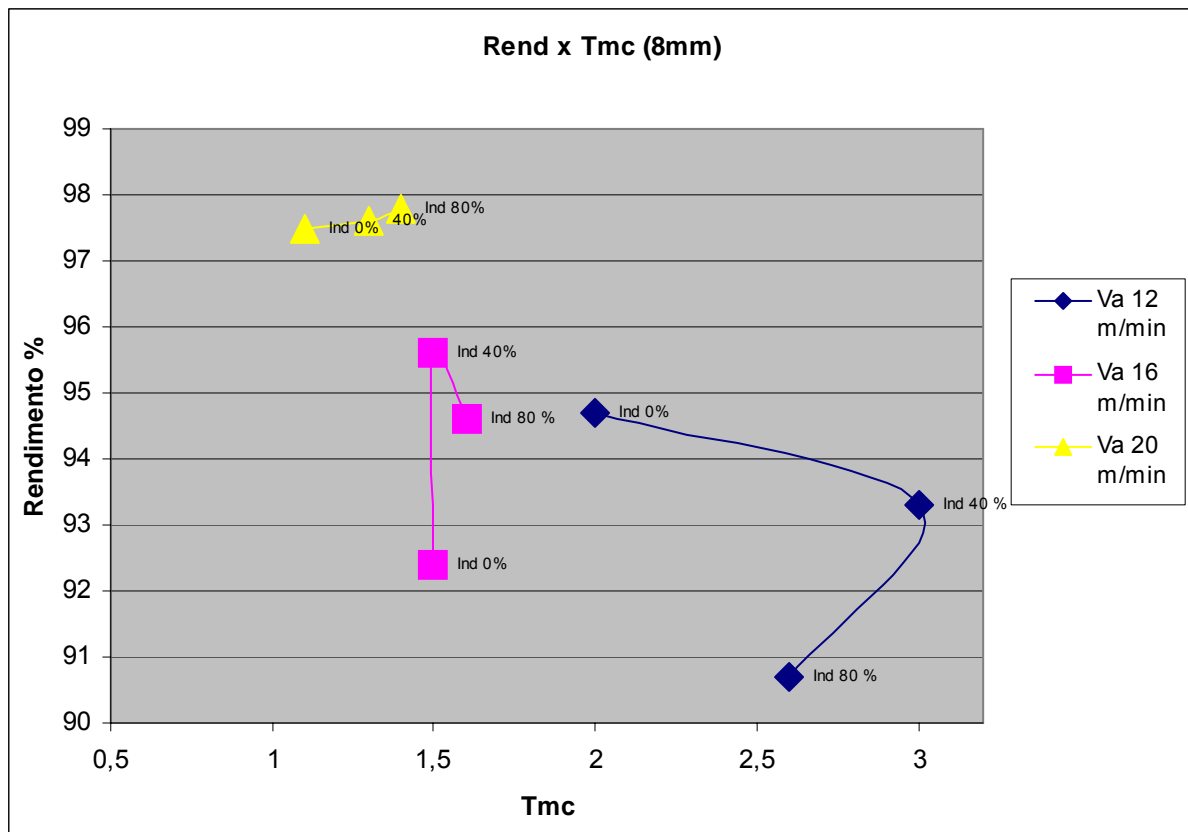


Figura 6.35. Gráfico Rend X Tmc (DBCP 8mm)

Quanto aos períodos de curto circuito Tmc na figura 6.35, mostrando o gráfico Rend X Tmc (8mm), as maiores variações de Tmc ficam para a Va 12 m/min, com o maior valor para indutância de 40%. Para a Va de 16m/min não existe grandes variações de Tmc e para a Va de 20 m/min a variação de Tmc também se mostra bem modesta. Nota-se que ao aumentar a Va as faixas de Tmc também caem, pois com o aumento da velocidade mais curto-circuitos são gerados, porém com intervalos de períodos menores.

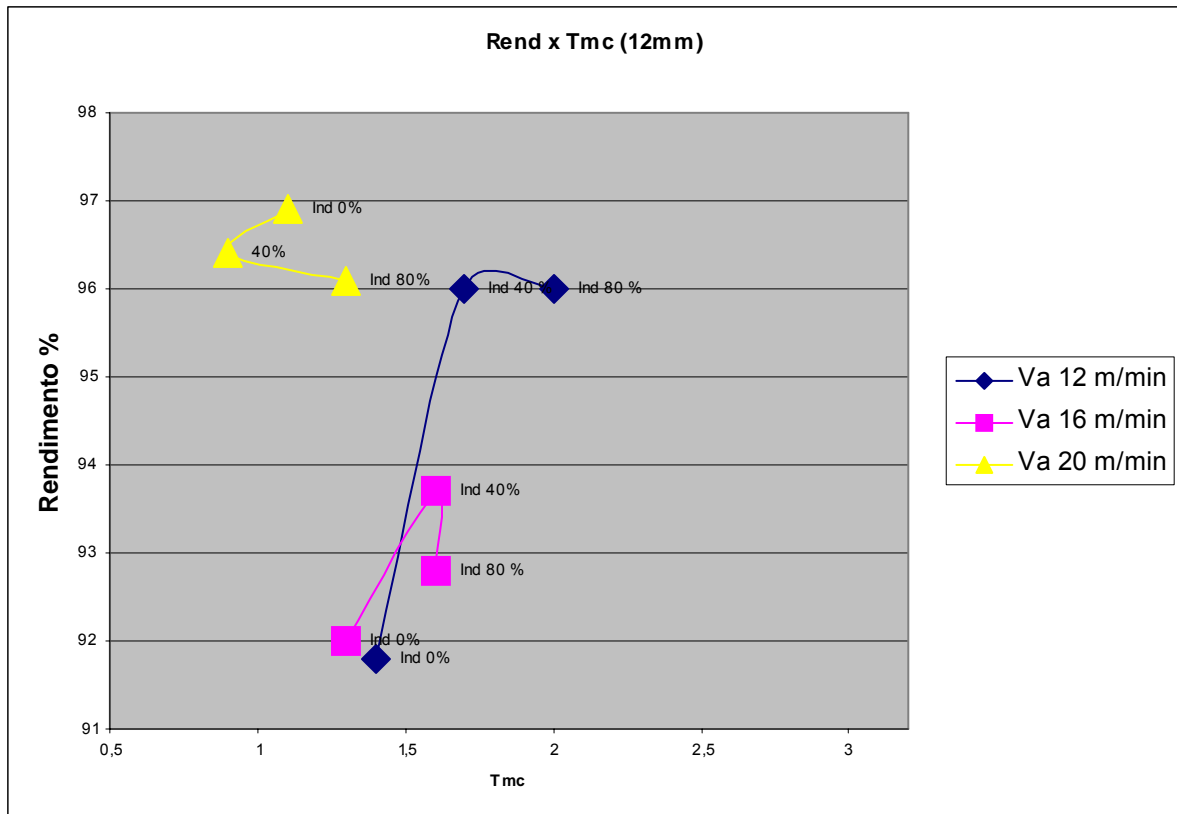


Figura 6.36. Gráfico Rend X Tmc (DBCP 12mm)

Finalmente, para os períodos de curto circuito Tmc na figura 6.36, que mostra o gráfico de Rend X Tmc (12mm), as maiores variações de Tmc também ficam para a Va 12 m/min, com o maior valor para indutância de 80%. Para a Va de 16m/min não existe grandes variações de Tmc, mas estão com valores próximos da velocidade de Va 12 m/min. Para a Va de 20 m/min a variação de Tmc também se mostra bem modesta. Nota-se que ao aumentar a Va as faixas de Tmc também caem.

Após a análise desses resultados estatísticos não se observou nenhuma correlação direta ou inversa com os rendimentos obtidos.

## 7 CONCLUSÃO

O rendimento para o processo em curto-circuito forçado (CCF) varia entre 90% e 97%. Sendo assim, ao contrário do que se pensava, o modo de transferência por curto circuito forçado pode apresentar bons rendimentos mas não foi possível estabelecer um critério para obter uma relação entre rendimento e estabilidade de arco.

Os rendimentos obtidos foram afetados pela velocidade de alimentação do arame (VA), indutância e distância bico contado peça (DBCP), principalmente pela velocidade de alimentação de arame de 12 e 16 m/min.

Para a velocidade de arame de 12 m/min a indutância e a DBCP apresentam influências significativas no rendimento de deposição. Para VA de 16 e 20 m/min os rendimentos caem com o aumento da DBCP mesmo com a influência da indutância, com exceção para a velocidade de 12 m/min onde o rendimento aumenta com o aumento DBCP sob a influência da indutância.

Notam-se rendimentos maiores com indutância de 40% para a velocidade de 16 m/min.

Para a velocidade de 20 m/min o rendimento foi pouco afetado pela DBCP e indutância devido ao processo de transferência se aproximar do goticular de acordo com os gráficos e coleta de dados, por isso, as maiores rendimentos de deposição foram obtidos com a velocidade do arame de 20 m/min, independente da indutância ou do DBCP utilizados.

A aplicação de indutância e o aumento da DBCP diminuem o tamanho dos respingos. Para quem solda, o tamanho do respingo influencia atrapalhando no momento da solda o soldador, podendo ser mais ou menos difícil de retirar posteriormente, pois grudam em volta do material de base. Isto leva a crer que mais importante que buscar um bom rendimento é obter o controle dos tamanhos de respingos, mesmo que em maiores quantidades, ainda porque as diferenças de rendimento não chegam a ser muito significantes neste processo.

## 7.1 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

1. Medir a indutância da fonte (pedir uma resistência emprestada ou construir um banco de resistência).
2. Quantificar e qualificar por granulometria os respingos gerados.
3. Estudar qual o tamanho de respingo seria melhor.
4. Criar uma metodologia para avaliar a relação de diâmetro de respingo versus aderência dos respingos na chapa e diâmetro de respingos versus facilidade de destacamento do respingo.
5. Garantir que ao variar os fatores de entrada o comprimento de arco seja o mesmo fazendo , por exemplo, comprimento de arco é aquele quando para uma dada regulagem, ao se aumentar a tensão não se note no oscilograma que a frequência de transferência foi a mesma para uma dada velocidade de alimentação
6. Estudar esta influência para uma mesma corrente média, mesmo as custas da velocidade de alimentação mudar e corrigir com a velocidade de soldagem para se dar o mesmo volume de fusão.
7. Verificar a influência do ângulo de ataque da tocha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJO, G.; CLAEISSON, I. “**On-line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding**”. *Welding Journal*, February: 1999.
- ALLUM C.J., QUINTINO, M.L. **Pulse MIG/MAG, Interactions and Process Parameters - Parts 1 E 2**, *Weld & Metal. Fab*, 52(3) E (4), 1984.
- AWS WELDING HANDBOOK EIGHT EDITION - Volume 2 -*Welding Process*
- AWS, WELDING HANDBOOK – **Welding Processes**. 8th Ed., Miami – Usa. *American Welding Society*, V. 2, 1991, P.955. 26 Cm.
- CAMPOS F.M . MARIO, Lima Eduardo. **Determinação da Relação Entre Parâmetros de Soldagem e Aspectos do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade**: Cobef: 2002
- CARRY H.B. **Modern Welding Tecnology**. 3 ed. *Regents Pretence-Hall*, 1994.
- CRAIG E. **Gas Metal Arc and Flux Cored Welding**. Chicago, 1991.
- CRUZ G.F. **Aplicação de Redes Neurais para Classificação da Estabilidade do Arco de Solda**. Monografia do Programa De Matemática Industrial UFP. Dezembro: 2006.
- DOBIGNIES A. A. **Estudo de Molhabilidade, Diluição e Corrosão em Cordões de Simples Deposição Sobre Chapas Galvanizadas por Solda Brasagem (Mig-Brazing)**, Trabalho de Graduação do Curso de Engenharia Mecânica da UFPR. Dezembro 2003.
- DUTRA, J.C.; BAIXO, C.E.I. “**O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG**”. *Revista Soldagem e Materiais*, nº 21, Jan./Mar. 1990.
- FERRARESI V.A.; MIRANDA H. C. **Estudo da Influência da Indutância na Soldagem Mag na Posição Sobrecabeça**.. XXV Encontro Nacional de Teconlogia da Soldagem Belo Horizonte MG. Setembro 1999.
- FORTES, C. “**Arames Tubulares**”. Apostila ESAB S/A, Contagem: 2004.
- GIMENES JR. LUIZ; JOSÉ PINTO RAMALHO – **Conceitos De Soldagem Mig/Mag**. Disponível em Site Infosolda. [www.infosolda.Com.br/download/61dpe.Pdf](http://www.infosolda.Com.br/download/61dpe.Pdf) - 2005
- HARWIG D. D., J. E. DIERKSHEIDE, D. YAPP, AND S. BLACKMAN. **Arc Behavior And Melting**. *In The Vp-Gmaw Proces*.,. *Welding Journal*: 2006.
- HERMANS J.M.; OUDEN G.DEN. **Process Behavior And Stability In Short Circuit Gas Metal Arc Welding**. *Welding Research Supplement*, April: 1999.

IBQN - **Processos De Soldagem** - Apostila do Curso de Formação de JOAQUIM, R. Processo De Soldagem por Arame Tubular – www.infosolda.com.br Rio de Janeiro 2003.

JÚNIOR, R., G. “**Novos Métodos de Controle na Soldagem MIG/MAG**”. Tese de Doutorado; UFSC, Setembro, Florianópolis: 2002.

KANG, M.J.; KIM, Y.;AHN, S.; RHEE, S. **Spatter Rate Estimation** In *The Short-Circuit Transfer Region Of MIG/MAG. Welding Journal, September: 2003.*

KANG, S.K.; NA S.J. **A Mechanism Of Spatter Production From The Viewpoint Of Integral Of Specific Current Action.** *Welding Journal, P. 188-196, December, 2005*

KIM, Y.S & EAGAR , T. W 1993A – **Analisis Of Metal Transfer In Gas Metal Arcwelding.** *Welding Journal , 72(7), July.*

KOBAYASHI YUKIO, ANASTACIO A CSA , N C. **Estudo da Influência da Corrente de Curto Circuito , Através da Indutância, Sobre as Características Geométricas e Rendimento Real de Deposição.** Unesp-Campus de Bauru, Cobef: 2002.

MARQUES, P. V. **Tecnologia da Soldagem.** 1 ed. Universidade Federal de Minas Gerais: 1991

MIG/MAG Welding, Svetsaren, vol. 58, nº 2, 2003

MILLER ELETRIC MFG. CO. GMAW-P. **Pulsed Spray transfer.** 1995.

MIRANDA, H.C.; MOTA C.A.M.; FARIAS J.P. **Efeito Indutivo na Soldagem com Arame Tubular Autoprottegido.** 1998.11 f. XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. XI Congresso Latino-Americano. V Íbero-Americano de Soldagem. Fortaleza.Ceará.

MIRANDA, H.C., (1999), “**Influencia da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobre-Cabeça**”. Dissertação de Mestrado; UFU; Uberlândia, Fevereiro.

MODENESI PAULO J. - **Introdução à Física do Arco Elétrico e Sua Aplicação Na Soldagem de Metais.** Belo Horizonte – MG, Setembro De 2004.

MODENESI P. JOSÉ; COSTA C. MARIA – **Influência de Alguns Parâmetros Operacionais Na Instabilidade De Arco Do Processo Mig** – Cobef 2002.

NEEDHAM – **Pulsed Controlled Consumable Electrode.** *Welding Arc, British: 1995.*

PONOMAREV V.; MIRANDA H.C.; **Novas Possibilidades para a Soldagem Mag com CO2 através da Combinação dos Modos de Transferência Metálica por Curto-Circuito e Goticular.** XXVI . Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem Curitiba PR, Setembro: 2000.

ROCA, A.S.; FALS, H.C.; FERNANDEZ, J.B.; ADÁN, F.S., (2005), "**Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode**". Revista Soldagem e Inspeção, vol. 10, nº 2, Abr./Jun.

SCOTTI, A. SILVA, CÉSAR; FERRARESI VALTAIR; **A Quality and cost Approach for Welding Process Selection**. *J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, Vol. XXII, nº 3, 2000.

SCOTTI A.; **Caracterização de Fontes como meio de Transportabilidade de Procedimentos De Soldagem**. 1º Cobef – Curitiba – Pr Abril 2001

SCOTTI A.; GROETLAARS P.J.; **Influência do Comprimento do Arco Sobre a Transferência Metálica no Processo Mig/Mag duplo Arame com Potencial Único**. Cobef 2002.

SCOTTI A.; RODRIGUES, E. CARLOS – **Efeito da Força das Gotas Em Transferência na Penetração de Soldas Mig/Mag em Aço Carbono: Uma Investigação Experimental** – Congresso Brasileiro De Engenharia de Fabricação – Cobef: 2002.

SCOTTI A.; RODRIGUES LIMA – **Cinemática da Gota no Processo Mag com Aço Carbono: Efeito da Corrente e Comprimento de Arco**. Cobef 2002.

SHINODA, T.; KANEDA, H.; TAKEUCHI, Y. "**An Evaluation of Short Circuiting Arc Phenomena in GMA Welding**". *Welding & Metal Fabrication*, December. 1989.

SILVA, R. H. G. "**Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por curto circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**". Dissertação de Mestrado, UFSC, Fevereiro, Santa Catarina: 2006, 128 p.

SMASHWELD. **Conjunto Semi-Automático Para Soldagem Mig/Mag** - Manual de Instruções. Supervisores Técnicos Independentes - Abril 1987

SUBRAMANIAM S., D. R. WHITE, J.E. JONES AND D. W. LYONS – **Experimental Approach To Selection of Pulsing Parameters** In *Pulsed MIG/MAG*. *Welding Journal* 1999 166-S, 172-S.

UTTRACHI G.D.; MEYER, D.W.. "**The Basic of Semiautomatic Welding**". *Welding Journal*, August, 1993.

WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E.. "**Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization**". *Welding Journal*, November, 1995.