

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL – UNIJUI**

**PAULO ROBERTO WINK**

**ESTUDO DAS CARACTERISTICAS DOS MODOS DE TRANFERENCIA  
METALICA POR SOLDAGEM MAG EM PROCESSOS INDUSTRIAIS  
ROBOTIZADOS**

**Panambi**

**2014**

**PAULO ROBERTO WINK**

**PROJETO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.**

Relatório de trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, ênfase em Soldagem a Arco, da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**Orientador: Gil Eduardo Guimarães**

**Panambi**

**2014**

**PAULO ROBERTO WINK**

**PROJETO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.**

Este Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Panambi, 11 de mês de 2014

Professor Gil Eduardo Guimarães

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais

**BANCA EXAMINADORA**

Professora Patrícia Caroline Pedrali

Mestre

## **RESUMO**

Hoje esta cada vez mais claro que a influencia das novas tecnologias de solda com arco voltaico, a principal delas é o uso de Arco Pulsado Curto.

Este modo de deposição está revolucionando a forma da soldagem de peças metálicas. Todas as empresas fornecedoras de fontes de solda estão cada vez mais voltadas à busca e o aprimoramento desta tecnologia, que está trazendo uma grande revolução na forma de soldar, dando mais rendimento e qualidade na soldagem.

**Palavras-chave:** SOLDAGEM A ARCO

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resumo de alguns dos principais marcos na história da soldagem .....	16
Figura 2: Principais processos de soldagem e técnicas conexas .....	17
Figura 3: Processo básico de soldagem MIG/MAG .....	18
Figura 4: Modos de transferência de acordo com (IIW).....	21
Figura 5: Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência.....	22
Figura 6: Transferência por Curto Circuito.....	24
Figura 7: Imagens obtidas a partir de filmagem de alta velocidade da transferência por .....	25
Figura 8: Transferência Globular .....	26
Figura 9: Transferência Globular .....	27
Figura 10: Transferência Spray .....	28
Figura 11: Formas de transferência goticular: (a) Projetada ("Projected spray"), (b).....	30
Figura 12: Transferência de metal com eletrodo de aço (1,6mm) e proteção de Ar-2%O <sub>2</sub> para (a) 240A (globular), (b) 300A (spray projetado), (c) 360A (spray com alongamento) e (d) 480A (início de spray rotacional).....	30
Figura 13: Representação esquemática da pulsação de corrente: I <sub>p</sub> - corrente de pico, I <sub>b</sub> .....	31
Figura 14: Representação esquemática da transferência pulsada.....	33
Figura 15: Modos de transferência de soldagem.....	34
Figura 16: Modos de transferência de soldagem.....	35
Figura 17: Formação da gota .....	35
Figura 18: QUIROX 350, Cloos .....	37
Figura 19: QUINTO 603, Cloos .....	38
Figura 20: Corpo de prova usado .....	38
Figura 21: Posição de solda PB .....	39
Figura 22: Resultados das análises.....	40
Figura 23: Corpo de prova 01 e 02.....	41

Figura 24: Corpo de prova 03 e 04 .....	41
Figura 25: Corpo de prova 05.....	42
Figura 26: Corpos de provas para macrografia .....	43
Figura 27: Amostras .....	44

## LISTA DE SIGLAS

GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active GasLiiw
CO <sup>2</sup>	Dióxido de Carbono
A	Amper
IIW	Instituto Internacional de Soldagem
T	Tempo
Ar	Argônio
He	Hélio
C/C	Curto Circuito
I/I	Corrente constante
U/I	Corrente constante, com pulso de tensão

## **ANEXO**

**Anexo 01: DIN EN ISO 15614-1**

**Anexo 02: DIN EN ISO 6947**

**Anexo 03: DIN EN ISO 25817**

**Anexo 04: EPS-174/2014**

**Anexo 05: RELATÓRIOS DAS AMOSTRAS**



## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>Objetivo</b> .....	<b>15</b>
Objetivo geral.....	15
Objetivos específicos .....	15
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
1.1 Histórico da solda .....	16
1.2 Soldagem por arco elétrico .....	18
1.3 MODOS DE TRANSFERENCIA DE METAL .....	20
1.3.1 Introdução .....	20
1.3.2 Transferência de Metal no Processo GMAW .....	22
1.3.2.1 Transferência por Curto Circuito .....	23
1.3.2.2 Transferência Globular.....	25
1.3.2.3 Transferência Spray.....	27
1.3.2.4 Transferência com Corrente Pulsada.....	31
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
<b>3 RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	<b>40</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>45</b>
<b>Anexo 01 – DIN EN ISO 15614-1</b> .....	<b>47</b>
<b>Anexo 02 – DIN EN ISO 6947</b> .....	<b>48</b>
<b>Anexo 03 – DIN EN ISO 25817</b> .....	<b>49</b>
<b>Anexo 04 – EPS-174/2014</b> .....	<b>50</b>
<b>Anexo 05 – RELATÓRIOS DAS AMOSTRAS</b> .....	<b>51</b>



## INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por redução de custo de peças soldadas e eliminação de operações, para aumentar a competitividade num mercado cada vez mais global, as empresa são forçadas a alcançar resultados cada vez mais rápidos.

Para isso as fornecedoras de fontes de solda estão desenvolvendo cada vez mais rápidos suas fontes de solda. Que hoje mais parecem com um computador do que uma fonte de solda.

Todos os fornecedores de fonte de solda estão convergindo em um mesmo ponto, todos estão desenvolvendo fontes de solda com arco pulsado, onde podemos trabalhar com arcos curtos, com esta condição podemos ter várias melhoras no produto desde redução de respingos de solda, melhora na condição de ter uma penetração na raiz melhor e um aporte de calor menor ocasionando uma menor deformação causada pelo aquecimento.

Para atender crescimento da indústria da linha Amarela (Maquinas de construção), as empresas fornecedoras de conjuntos para este segmento vêm também em um crescente aumento de demanda e necessidade de desenvolvimento de processos de soldagem para atender as demandas e a qualidade requerida deste segmento.

Para o atendimento de qualidade e produtividade vem se explorando os diversos tipos de deposição de solda Mag, como exemplo os processos Curto Circuito, Spray e pulsado.

Para que tenhamos um bom atendimento das novas demandas e aos requisitos de qualidade da solda a ser atendido, temos que explorar o máximo o processo de soldagem para minimizar o custo e ter uma boa produtividade, as empresas são forçadas a desenvolverem estes processos.

Hoje há uma grande variedade de tipos de modos de deposição, causando certa confusão, isso de acordo com um comunicado da Associação Brasileira de Soldagem.

## **OBJETIVO**

### **Objetivo geral**

O estudo tem a finalidade de definir quais os tipos de deposição de solda Mag, quais as principais características de cada tipo de solda, tendo como principal objetivo a característica macrográfica da penetração, da solda.

### **Objetivos específicos**

Para organizar adequadamente o trabalho, o objetivo geral será dividido nos tópicos a seguir:

- Avaliar visualmente o cordão de solda das diferentes amostras.
- Analisar a penetração do cordão de solda.
- Analisar as macrografias das juntas soldadas.

# 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 Histórico da solda

Segundo MACHADO (1996), o maior desenvolvimento na união de materiais ocorreu no final do século XIX, ganhando impulso nos últimos 60 anos. Abaixo, a Figura 01 ilustra alguns dos principais marcos na união de materiais.

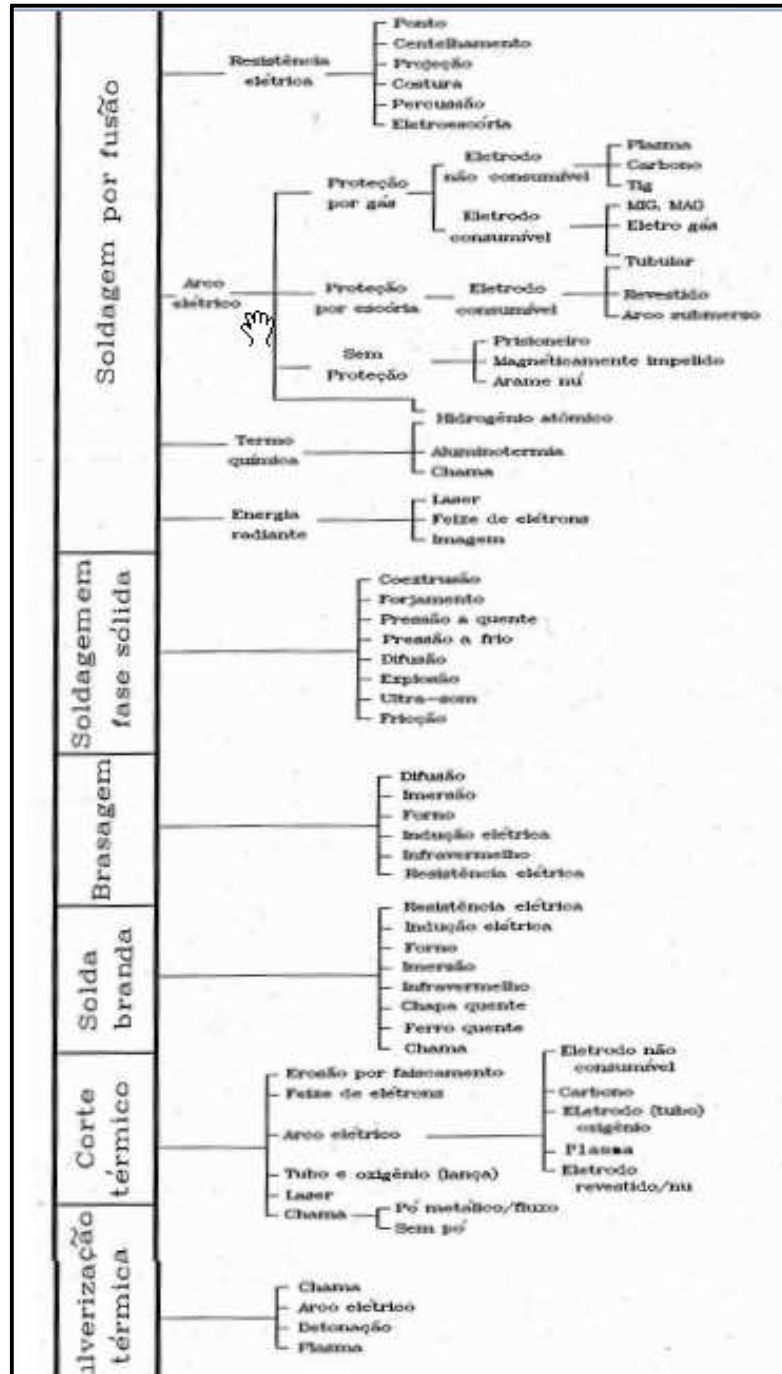
Figura 1: Resumo de alguns dos principais marcos na história da soldagem

NOME	ANO	PAÍS	DESCOBERTA
Alessandro Volta	1800	Itália	Princípios da bateria.
Humphry Davy	1801	Inglaterra	Descobriu gás acetileno, produziu arco elétrico entre dois eletrodos de carvão.
Auguste de Meritens	1881	França	Uniu chapas de chumbo para bateria com arco elétrico.
Elihu Thompson	1885	Inglaterra	Realizou solda por resistência elétrica.
Carl Von Linde	1898	Alemanha	Desenvolveu método de fabricação industrial do oxigênio.
E. Fouche/Ch. Picard	1901	França	1º maçarico oxiacetilênico para uso industrial.
Oscar Kjellberg	1910	Suécia	Obteve patente para eletrodos revestidos.
C. J. Holslag	1919	E.U.A.	Desenvolveu soldagem por corrente alternada.
P.O. Nobel	1920	E.U.A.	Desenvolveu a soldagem automática.
B.S. Robiniff et al.	1930	E.U.A.	Patentaram o processo por Arco Submerso.
R. Meredith/V.H. Pauleka	1941	E.U.A.	Desenvolveram a solda TIG.
A. Muller et al.	1948	E.U.A.	Desenvolveram a solda MIG.
Arthur A. Bernard	1954	E.U.A.	Desenvolveu o processo Eletrodo Tubular protegido por gás (Dualshield).
Robert M. Gage	1957	E.U.A.	Desenvolveu e patenteou o processo a Plasma.
W. Krieweth e K. Dohm	1961	Bélgica	Desenvolveram o processo Eletrogás.
	1962		Processos de difusão e explosão.
The Welding Institute	1965	Inglaterra	Desenvolvida soldagem por corrente pulsada.
	1966		Desenvolvida o processo de soldagem a Laser.
	1970		Iniciou-se o uso de circuitos integrados e componentes de estado sólido nas fontes de potência para soldagem.
	1980		Fontes com transistores de potência. Possível controlar por micro computadores os parâmetros. Expandiu-se o uso de robôs para soldagem.

Fonte: Adaptado de Soldagem e técnicas conexas: processos (MACHADO, 1996)

Os métodos de união materiais são variados, conforme Figura 02, devido às variadas demandas na área da soldagem pelas diversos setores industriais.

Figura 2: Principais processos de soldagem e técnicas conexas

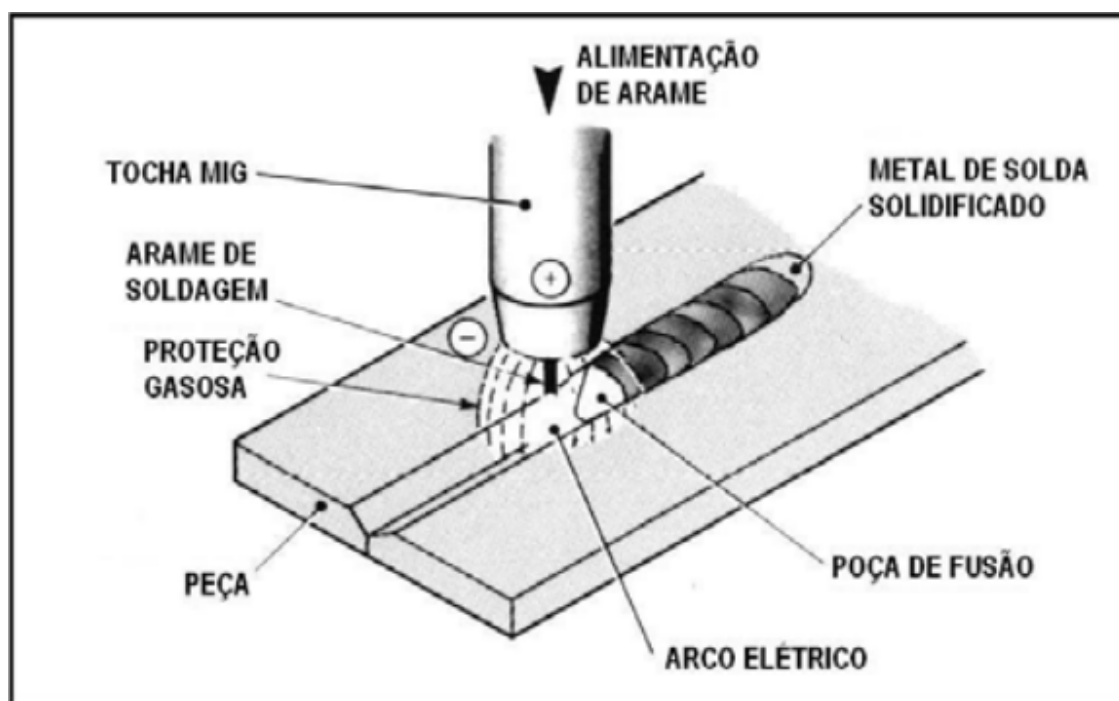


Fonte: Adaptado de Soldagem e técnicas conexas: processos (MACHADO, 1996)

## 1.2 Soldagem por arco elétrico

Segundo ESAB (2005), a soldagem por arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), também conhecida como solda MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas / MAG – Metal Active Gas), um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um comburente em forma de arame. O arame funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal da solda é protegido por uma atmosfera pelo gás de proteção inerte ou ativa. A figura 03 mostra esse processo e uma parte da tocha de soldagem.

Figura 3: Processo básico de soldagem MIG/MAG



Fonte: ESAB (2005)

O conceito básico de GMAW foi introduzido nos idos de 1920, e tornando comercialmente viável após 1948. Inicialmente foi empregado com um gás de proteção inerte na soldagem do alumínio. Conseqüentemente, o termo soldagem MIG foi inicialmente aplicado e ainda é uma referencia ao processo. Desenvolvimentos subsequentes acrescentaram atividades com baixas densidades de corrente e correntes contínuas pulsada, emprego em uma ampla gama de materiais, e o uso de



gases de proteção reativos ou ativos (particularmente o dióxido de carbono, CO<sup>2</sup>) e misturas de gases. Esse desenvolvimento posterior levou à aceitação formal do termo GMAW – Gas Metal Arc Welding para o processo, visto que tanto gases inertes quanto reativos são empregados. No entanto, quando se empregam gases reativos, é muito comum usar o termo soldagem MAG (MAG – Metal Active Gas).

O processo de soldagem funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o arame no polo positivo. Essa configuração é conhecida como polaridade reversa. A polaridade direta é raramente utilizada por causa da transferência deficiente do metal fundido do arame de solda para a peça. São comumente empregadas correntes de soldagem de 50 A até mais que 600 A e tensões de soldagem de 15 V até 32 V. Um arco elétrico autocorrigido e estável é obtido com o uso de uma fonte de tensão constante e com um alimentador de arame de velocidade constante.

Melhorias contínuas tornaram o processo MIG/MAG aplicável à soldagem de todos os metais comercialmente importantes como os aços, o alumínio, aços inoxidáveis, cobre e vários outros. Materiais com espessura acima de 0,76 mm podem ser soldados praticamente em todas as posições.

É simples escolher equipamento, arame, gás de proteção e condições de soldagem capazes de produzir soldas de alta qualidade com baixo custo.

Vantagens:

O processo de soldagem MIG/MAG proporciona muitas vantagens na soldagem manual e automática dos metais para aplicações de alta e baixa produção. Suas vantagens combinadas quando comparado ao eletrodo revestido, arco submerso e TIG são:

- A soldagem pode ser executada em todas as posições;
- Não há necessidade de remoção de escória;
- Alta taxa de deposição do metal de solda;
- Tempo total de execução de soldas de cerca da metade do tempo se comparado ao eletrodo revestido;

- Altas velocidades de soldagem; menos distorção das peças;
- Largas aberturas preenchidas ou amanteigadas facilmente, tornando certos tipos de soldagem de reparo mais eficientes;
- Não há perdas de pontas como no eletrodo revestido.

### **1.3 MODOS DE TRANSFERENCIA DE METAL**

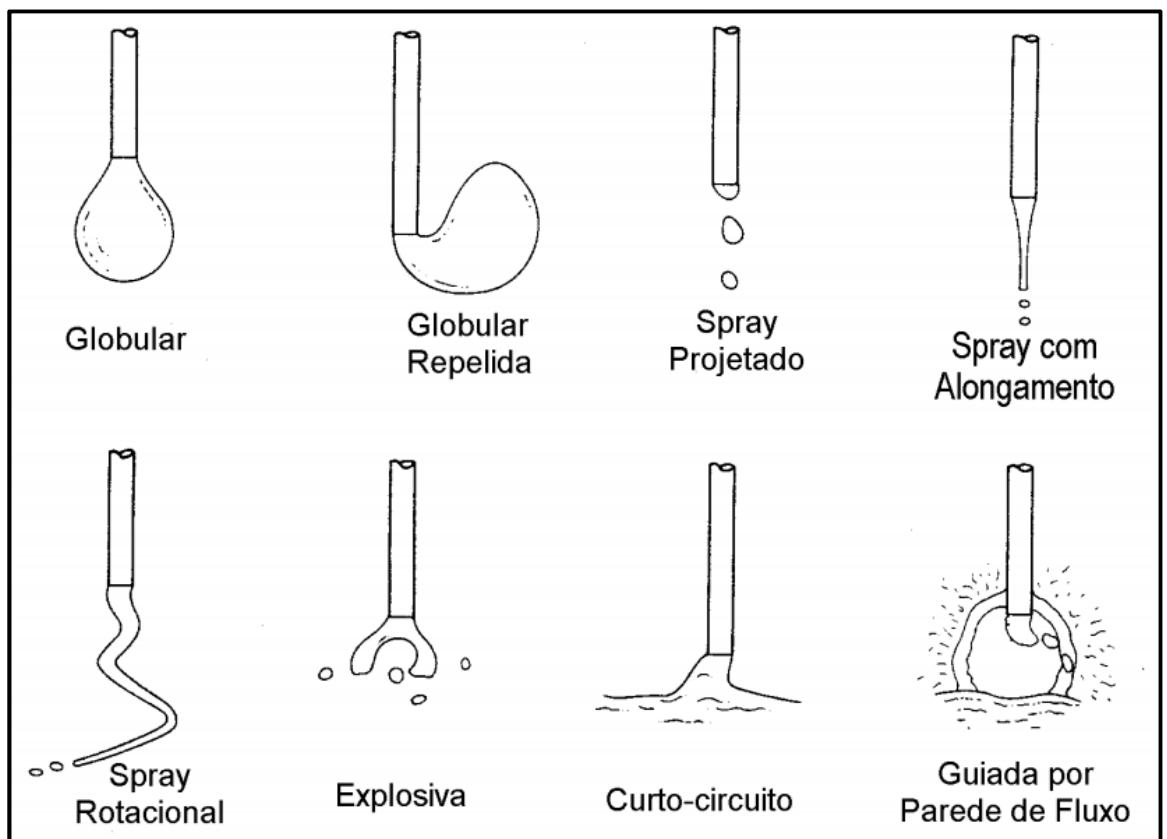
#### **1.3.1 Introdução**

A forma pela qual o metal fundido transfere-se da ponta da fonte de metal de adição (que, muitas vezes, é também o eletrodo) para a poça de fusão influencia diversos aspectos operacionais da soldagem, em particular, o nível de respingos e fumos, a capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, o formato do cordão e, enfim, a estabilidade e o desempenho operacional do processo. O estudo da transferência de metal tem sido um assunto de interesse desde que a soldagem a arco com eletrodo consumível foi introduzida. Assim, na década de 30, um grande tema de debate era se esta transferência ocorria na forma líquida ou como vapor. Na década de 40, uma primeira grande revisão sobre o assunto, ligada principalmente ao processo de soldagem com eletrodos revestidos, foi apresentada por Spraragen & Lengyel (1943). Com o desenvolvimento do processo GMAW, a maior parte das investigações passou a ser conduzida neste processo, parcialmente devido às suas ótimas características para a observação da transferência de metal (possibilidade de operar com um arco aberto, sem escórias e menor nível de fumos ou fumaças).

Diversas formas de transferência de metal podem ser observadas nos diferentes processos de soldagem. Assim, e como resultado do trabalho de vários autores em diferentes países, diversas terminologias, muitas vezes conflitantes, têm sido apresentadas na literatura. No Brasil, a situação é ainda um pouco mais confusa devido à diversidade de traduções existentes e à criação de novos termos por autores nacionais. Um sistema de classificação proposto pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW) e baseado em aspectos fenomenológicos da transferência de metal é apresentado na Figura 4.

O modo de transferência depende de diversos fatores como, por exemplo, os parâmetros elétricos do arco (tipo e valor da corrente, tensão e polaridade), o diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento energizado do eletrodo, pressão atmosférica, etc. Nas seções seguintes, as características principais da transferência de metal de adição no processo GMAW e em outros processos serão discutidas em maiores detalhes.

Figura 4: Modos de transferência de acordo com (IIW)



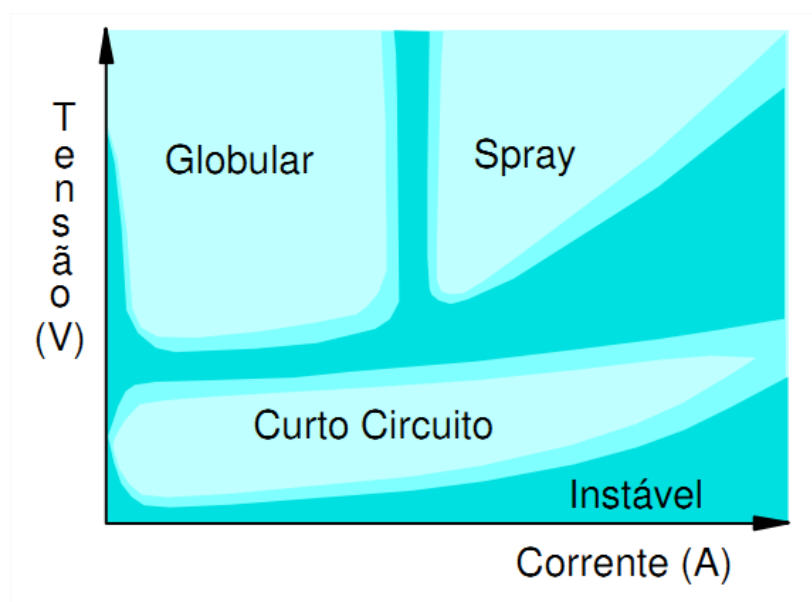
Fonte: Instituto Internacional de Soldagem (IIW)

### 1.3.2 Transferência de Metal no Processo GMAW

A transferência de metal no processo GMAW apresenta inúmeras facetas. Classicamente, contudo, se considera três formas principais, isto é: (a) Transferência por Curto Circuito, (b) Transferência Globular, (c) Transferência por "Spray" (Aerossol ou Gotícula). Formas de transferência derivadas destas são frequentemente citadas na literatura, por exemplo, a transferência globular repulsiva e diferentes formas da transferência spray.

A Figura 5 mostra, esquematicamente, os campos operacionais das formas principais de transferência em função da corrente e da tensão na soldagem GMAW com eletrodo positivo e um gás de proteção à base de argônio. Um diagrama análogo poderia ser construído considerando a velocidade de alimentação de arame e o comprimento de arco. Para misturas gasosas com baixo teor de argônio, a transferência por spray está, em geral, ausente, isto é, em um diagrama similar ao da figura 5, a região correspondente a esta forma de transferência seria dominada pela transferência globular.

Figura 5: Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático)



Fonte: Instituto Internacional de Soldagem (IIW)

### 1.3.2.1 *Transferência por Curto Circuito*

A transferência por curto circuito 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. 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 uma forma mais ou menos violenta com a vaporização de parte do material entre o eletrodo e a poça de fusão e a formação de respingos) e o arco é restabelecido. A Figura 6 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. A Figura 7 mostra imagens extraídas de uma filmagem de alta velocidade.

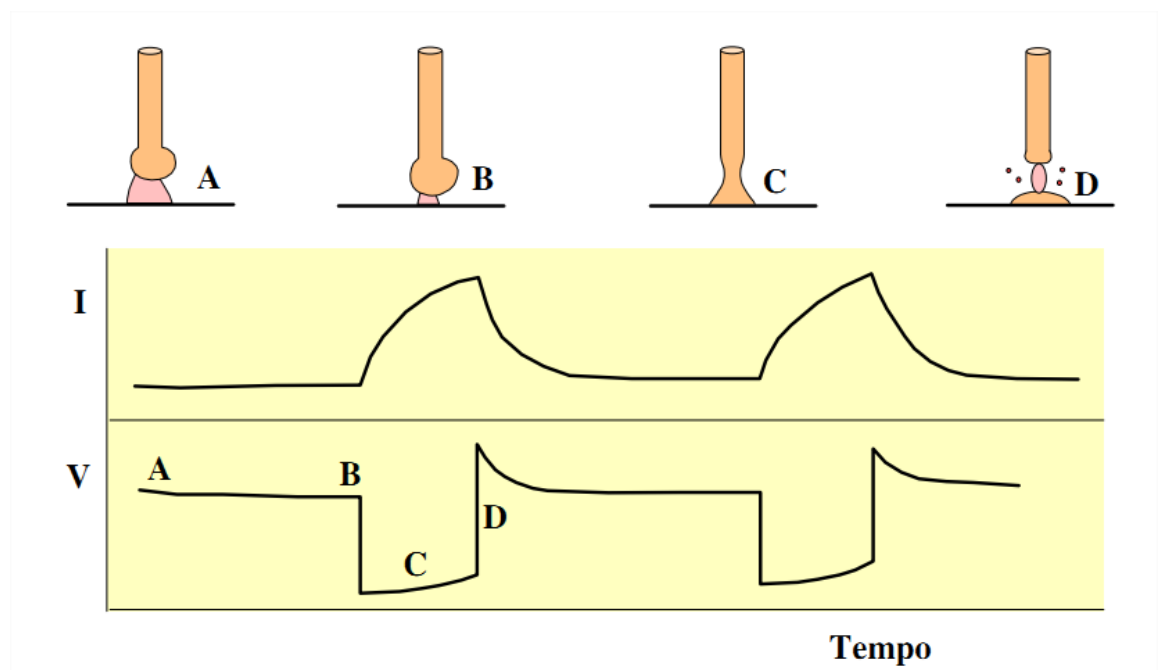
Em condições normais de operação com este tipo de transferência, entre cerca de 20 a 200 curtos podem ocorrer em um segundo. A ocorrência dos curtos tem certo caráter aleatório, podendo se observar, por exemplo, uma dispersão considerável nos valores do intervalo de tempo entre a ocorrência de dois curtos circuitos subsequentes (período de curto circuito,  $T$ ), particularmente nas condições de operação mais instáveis.

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 serem interrompido com o arame superaquecido formando um emaranhado não fundido sobre o metal de base (“Bird nest”). Máquinas para a soldagem GMAW possuem, em geral, um controle que permite ajustar a taxa de crescimento (ou redução) da corrente de soldagem e, assim, otimizar a sua variação durante o curto circuito. Em fontes convencionais, este controle envolve um circuito magnético variável sendo, portanto, conhecido como “indutância”.

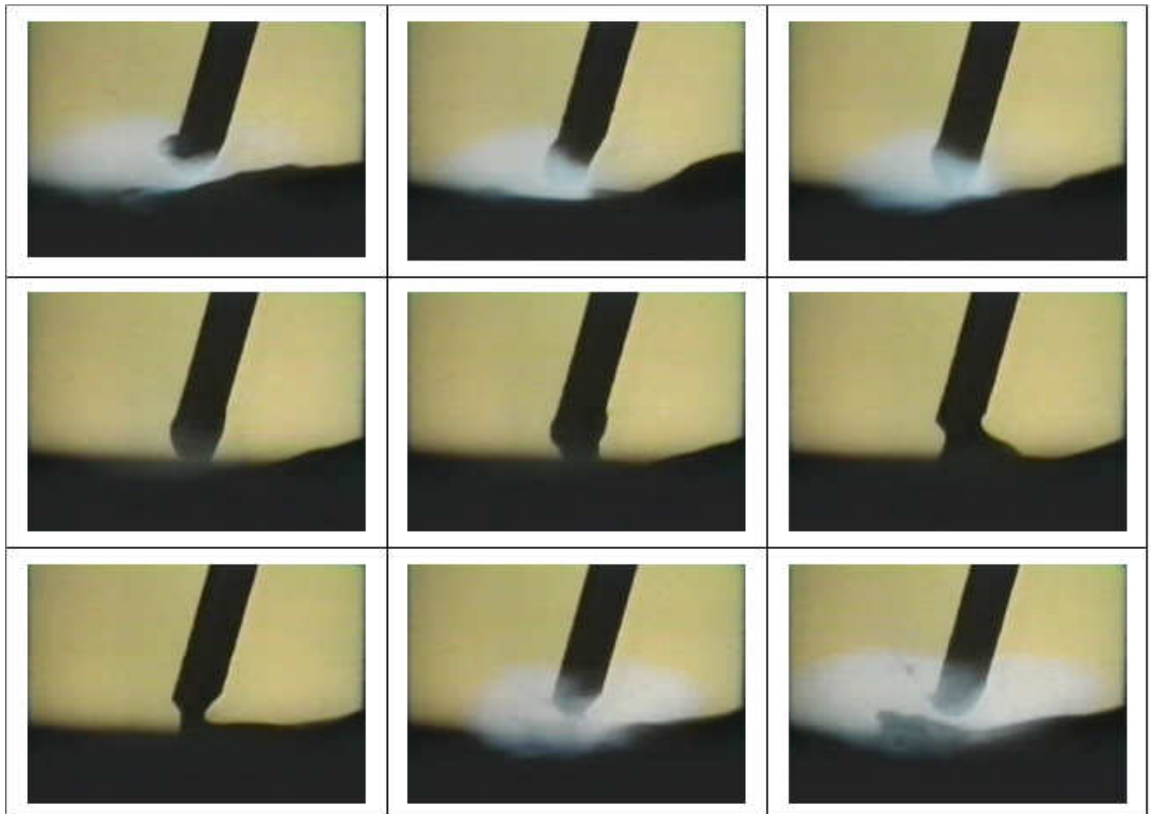
Como, durante parte do processo, o arco está apagado, o calor transferido para a peça e, portanto, a capacidade de fusão da mesma é reduzida na soldagem por curtos circuitos. Isto pode levar à formação de defeitos de fusão (falta de fusão) na soldagem de peças de maior espessura. Por outro lado, este mesmo aspecto torna a soldagem por curtos circuitos muito adequada para peças de pequena espessura. Esta é a forma de transferência mais comumente utilizada na soldagem GMAW de aços com mistura de proteção rica em CO<sub>2</sub> e com arames de pequeno diâmetro (0,8 a 1,2 mm).

Figura 6: Transferência por Curto Circuito



Fonte: ESAB (2005)

Figura 7: Imagens obtidas a partir de filmagem de alta velocidade da transferência por curto circuito.



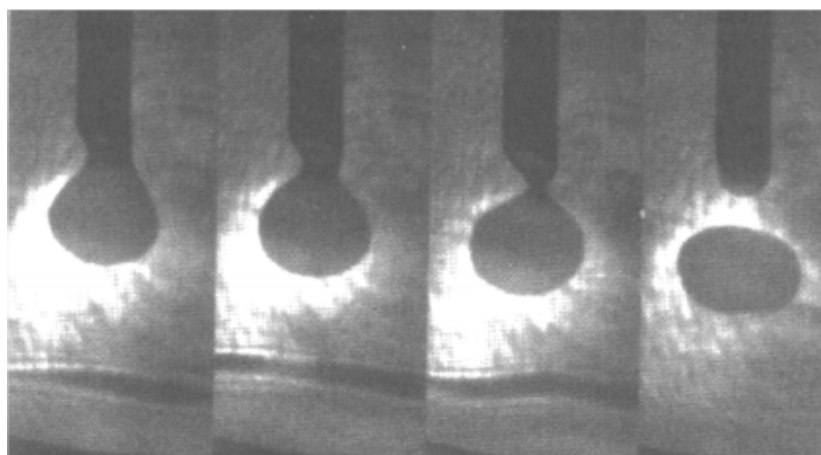
Fonte: ESAB (2005)

#### 1.3.2.2 *Transferência Globular*

A transferência globular é caracterizada pela formação de grandes gotas de metal líquido (diâmetro superior ao diâmetro do eletrodo) que se transferem para poça de fusão a uma baixa frequência ( $10^{-1}$  a  $10^0$  gotas/s). Para soldagem com um gás de proteção a base de argônio, esta forma de transferência é observada para correntes relativamente baixas e tensões (isto é, comprimento de arco) elevadas. Na soldagem de aço com gases a base de  $\text{CO}_2$ , a transferência globular ocorre mesmo com valores elevados de corrente.

Em uma primeira aproximação, a transferência globular típica é semelhante ao gotejamento de água em uma torneira parcialmente aberta. O metal líquido forma-se na ponta do arame pela fusão deste e mantém-se preso a este 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 gota de metal líquido se transfere para a poça de fusão por ação da gravidade Figura 8.

Figura 8: Transferência Globular



Fonte: ESAB (2005)

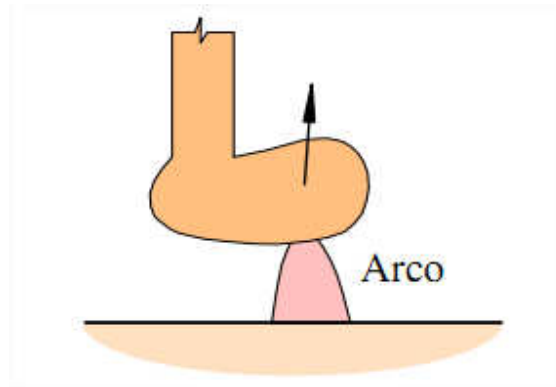
Na soldagem com eletrodo negativo e, algumas vezes, com proteção de  $\text{CO}_2$ , a gota na ponta do eletrodo pode ser defletida para fora do eixo do eletrodo ou, mesmo, ser repelida para longe da poça de fusão. Esta forma de transferência é denominada de transferência globular repulsiva e parece ser associada ao aparecimento de forças eletromagnéticas ou de reação devidas à geração de vapores ou plasma na gota, conforme Figura 9. Como esta forma de transferência depende da gravidade (isto é, não pode ser utilizada fora da posição plana) e como ela é, geralmente, associada com um arco instável e grande volume de respingos, a sua utilização na soldagem GMAW é limitada.

A tensão para testes de soldagem com diferentes níveis de corrente (em uma fonte de corrente constante) com um arame de aço carbono de 1,2mm e proteção de  $\text{Ar-4\%CO}_2$ . Nestes testes com níveis de corrente logo abaixo da corrente de transição para transferência spray, as oscilações mais fortes da tensão podem ser associadas,



em uma primeira tentativa, com a separação das gotas de metal líquido da ponta do eletrodo. Considerando esta relação, pode-se observar um aumento da frequência de transferência com o aumento da corrente de soldagem. Esta variação na frequência de transferência marca, para a soldagem com gases de proteção ricos em argônio, a mudança de um modo de transferência dominado pela gravidade (globular) para outro dominado por forças de origem magnética (transferência spray) que ocorre, para as condições da figura, para corrente um pouco acima de 200A.

Figura 9: Transferência Globular



Fonte: ESAB (2005)

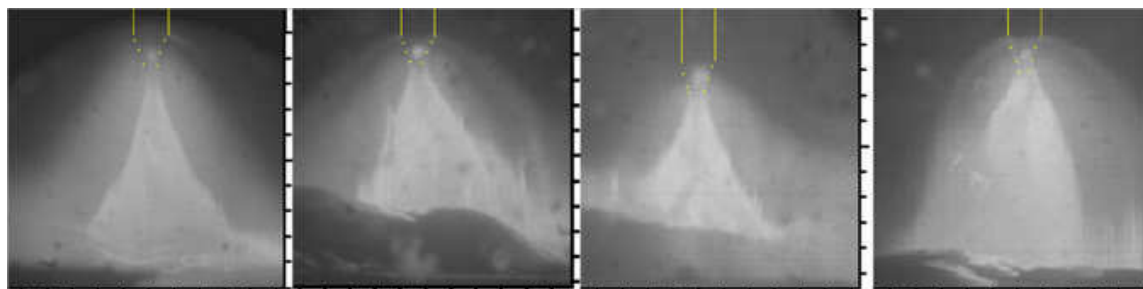
### 1.3.2.3 Transferência Spray

Na soldagem GMAW com proteção a base de argônio e eletrodo positivo, a medida que a corrente de soldagem aumenta, o diâmetro das gotas sendo transferidas se reduz lentamente até que, a um nível determinado da corrente (corrente de transição,  $I_c$ ), ocorre uma rápida redução do diâmetro das gotas e, portanto, um aumento da frequência de transferências conforme Figura 10, ao mesmo tempo em que o arco, antes confinado à porção inferior da gota ainda ligada ao arame, passa a envolvê-la completamente. Nestas condições, a transferência não é mais controlada pela gravidade e as gotas são transferidas em direção à poça de fusão independentemente da posição de soldagem. A transferência spray ocorre usualmente de forma muito estável, com mínimas perturbações do arco e poucos respingos. Acredita-se que a força principal responsável pela transferência goticular seja magnética, de origem similar à associada com o jato de plasma.

A corrente de transição depende de inúmeros fatores, particularmente, da composição do eletrodo, seu diâmetro e comprimento energizado e do tipo de gás de proteção.

Na soldagem GMAW, a transferência goticular ocorre basicamente com gases de proteção à base de argônio e com eletrodo positivo. Na soldagem dos aços, adições de  $\text{CO}_2$  ao gás de proteção tendem a aumentar  $I_c$  até que, para adições acima de cerca de 30% de  $\text{CO}_2$ , esta forma de transferência não é, em geral, observada. Adições de  $\text{O}_2$  ao argônio tendem a reduzir a  $I_c$  até cerca de 5% de  $\text{O}_2$  quando, então, essa passa a aumentar. Nitrogênio e hélio também dificultam a transferência goticular. Por exemplo, esta transferência foi observada na soldagem de aços carbono com misturas ternárias Ar-He-2% $\text{O}_2$  com até 75% de He, não ocorrendo para a mistura He-2% $\text{O}_2$  sem argônio (Modenesi, 1990).

Figura 10: Transferência Spray



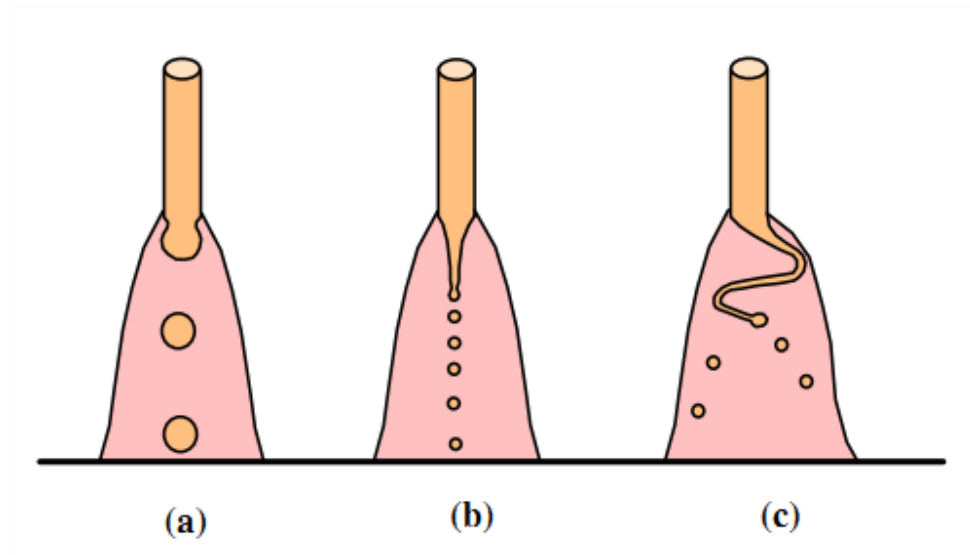
Fonte: FRONIUS

Na soldagem GMAW, a transferência goticular ocorre basicamente com gases de proteção à base de argônio e com eletrodo positivo. Na soldagem dos aços, adições de  $\text{CO}_2$  ao gás de proteção tendem a aumentar  $I_c$  até que, para adições acima de cerca de 30% de  $\text{CO}_2$ , esta forma de transferência não é, em geral, observada. Adições de  $\text{O}_2$  ao argônio tendem a reduzir a  $I_c$  até cerca de 5% de  $\text{O}_2$  quando, então, essa passa a aumentar. Nitrogênio e hélio também dificultam a transferência goticular. Por exemplo, esta transferência foi observada na soldagem de aços carbono com misturas ternárias Ar-He-2% $\text{O}_2$  com até 75% de He, não ocorrendo para a mistura He-2% $\text{O}_2$  sem argônio (Modenesi, 1990).

Diferentes formas de transferência goticular podem ocorrer a medida que a corrente de soldagem é aumentada. Para correntes pouco superiores a  $I_c$ , o diâmetro das gotas de metal de adição é similar ao diâmetro do eletrodo e a transferência ocorre com um pequeno empescoçamento do arame. Estas condições correspondem à transferência goticular projetada ("projected spray") (Figura 11a), a qual é associada com condições de estabilidade ótima do arco e baixo nível de respingos e de fumos. Para corrente superiores, forma-se um filamento líquido na ponta do eletrodo (Figura 11b), na extremidade do qual são formadas finas gotas que são transferidas axialmente para a peça. O filamento líquido pode se tornar longo o suficiente para tocar a poça de fusão causando curto circuitos ocasionais e perturbando a estabilidade do processo. Esta é a transferência goticular com alongamento ("streaming spray").

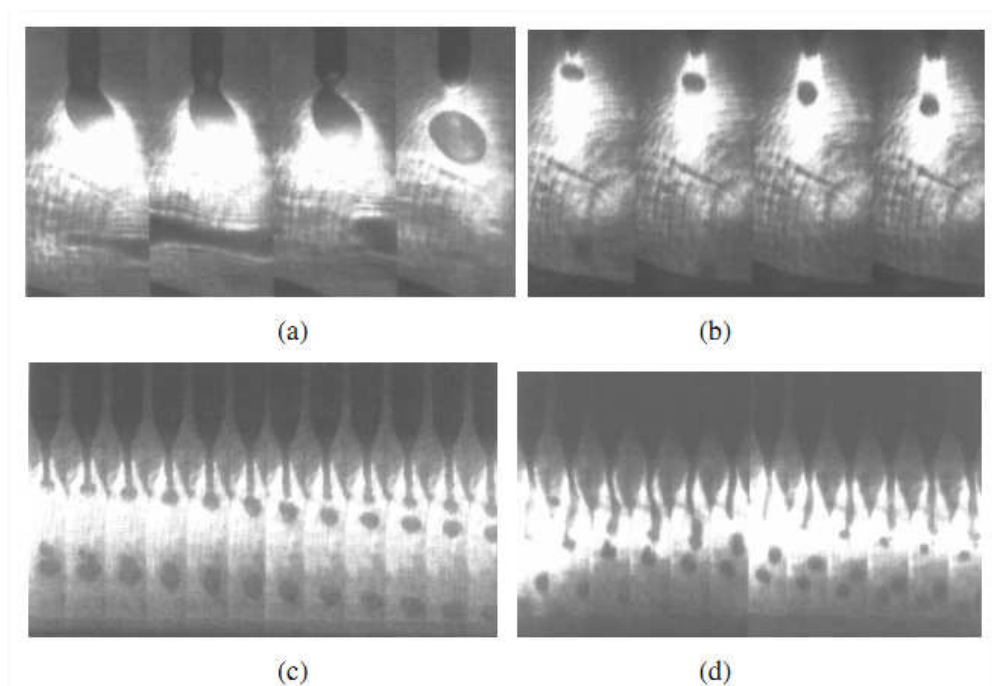
Para correntes mais elevadas ainda, uma nova transição ocorre com o aparecimento de uma instabilidade no filamento líquido que passa a girar (transferência goticular rotacional, Figura 11c). Nestas condições, a transferência não é mais axial. A transição para transferência rotacional depende mais fortemente do comprimento do eletrodo do que  $I_c$  tendendo a se aproximar desta quando este comprimento é aumentado. Devido à existência de um longo filamento líquido no interior do arco, acredita-se que o nível de fumos e a temperatura das gotas de metal de adição aumentem nestas duas últimas formas de transferência goticular. A Figura 12 mostra imagens obtidas da filmagem de alta velocidade da transferência de metal para diferentes níveis de corrente usando uma fonte de corrente constante. As transições citadas acima são usualmente observadas na soldagem com arames de aço e podem não ser observadas para outros materiais.

Figura 11: Formas de transferência goticular: (a) Projetada ("Projected spray"), (b) com alongamento ("Streaming spray") e (c) rotacional ("Rotational spray")



Fonte: Fronius

Figura 12: Transferência de metal com eletrodo de aço (1,6mm) e proteção de Ar-2%O<sub>2</sub> para (a) 240A (globular), (b) 300A (spray projetado), (c) 360A (spray com alongamento) e (d) 480A (início de spray rotacional)



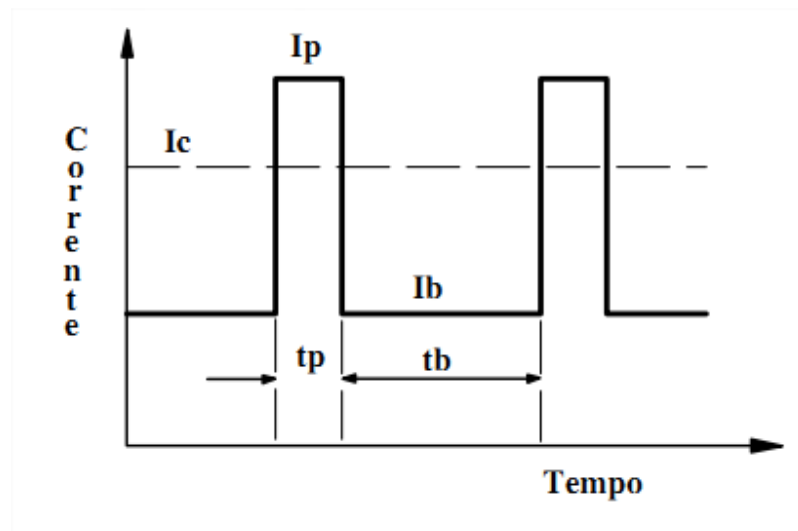
Fonte: (Jones et al., 1998)

### 1.3.2.4 Transferência com Corrente Pulsada

A transferência spray, particularmente a transferência spray projetado, apresenta excelentes características operacionais em termos de sua estabilidade e independência da posição de soldagem. Adicionalmente, para metais como o alumínio e o cobre, não se pode utilizar a transferência por curtos circuitos para a soldagem fora da posição plana em função da muito baixa resistividade destes materiais. Contudo, a transferência spray tem sua utilização limitada a correntes superiores a  $I_c$  o que, particularmente nos aços, impede a soldagem de chapas finas ou aplicações fora da posição plana com esta forma de transferência.

No início da década de 60, pesquisadores do The Welding Institute (Inglaterra) obtiveram uma transferência do tipo spray através da utilização de uma corrente cujo valor médio era inferior a  $I_c$ , mas que passava por picos acima de  $I_c$  (Needham, 1965). A Figura 13 mostra as variações de corrente durante a soldagem GMAW pulsada e a terminologia usualmente usada para descrever esta forma de corrente.

Figura 13: 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



Fonte: Fronius

Frequentemente utilizam-se, na soldagem com corrente pulsada, valores baixos de  $I_b$ , apenas suficientes para manter um arco estável. Nestas condições, estudos diversos indicam que a corrente e o tempo de pico são os parâmetros mais relevantes para determinar a forma de transferência de metal (Figura 14). Para um dado valor de  $I_p$  (superior a  $I_c$ ), se o tempo de pico for muito curto, a duração do pulso de corrente será insuficiente para iniciar o destacamento do metal fundido na ponta do eletrodo. Assim, este só ocorrerá após vários períodos de pico e de uma forma independente destes. A transferência de metal será, assim, do tipo globular.

Para tempos muito longos, várias gotas de metal podem se destacar em um único período de pico e a transferência será do tipo "spray". Neste caso, contudo, o tipo de transferência irá mudar durante o período de pico, passando de uma transferência tipo spray projetado, para a primeira gota destacada durante um período de pico, para spray com alongamento nas demais gotas.

Apesar de suas características operacionais extremamente interessantes, a soldagem GMAW com corrente pulsada não teve inicialmente um grande sucesso devido à necessidade de se controlar parâmetros adicionais em um processo bastante sensível à variação dos parâmetros operacionais. Na década de 80, com o desenvolvimento e maior aceitação de máquinas de soldagem com controle eletrônico, houve um ressurgimento do interesse por esta forma de transferência na soldagem GMAW, particularmente associada com novas técnicas de controle (soldagem sinérgica, por exemplo).

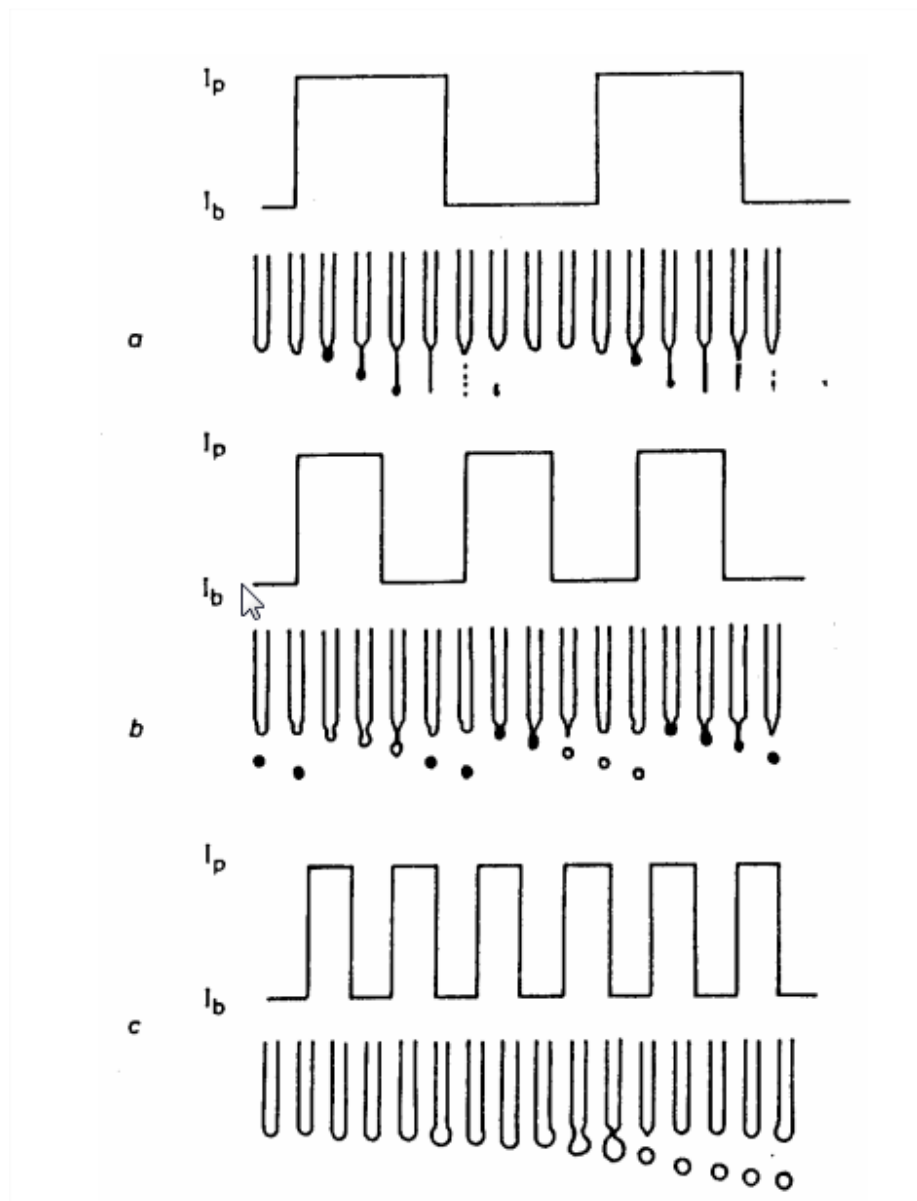
Atualmente esta se alastrando cada vez mais o seu uso, depois das empresas fornecedoras de fontes de solda incorporaram vários controles eletrônicos em suas fontes. O desenvolvimento dentro modo de deposição é muito grande, pois resolveram muitas questões, com isso a soldagem GMAW com corrente pulsado atinge quase todas as faixas de modos de transferência conforme Figura 15.

A maior vantagem no uso da soldagem GMAW com corrente pulsada, o baixo índice de respingos, isso pela característica do próprio arco, outra grande vantagem é

uma redução do aporte térmico, isso melhora muito na deformação de peças de grandes dimensões.

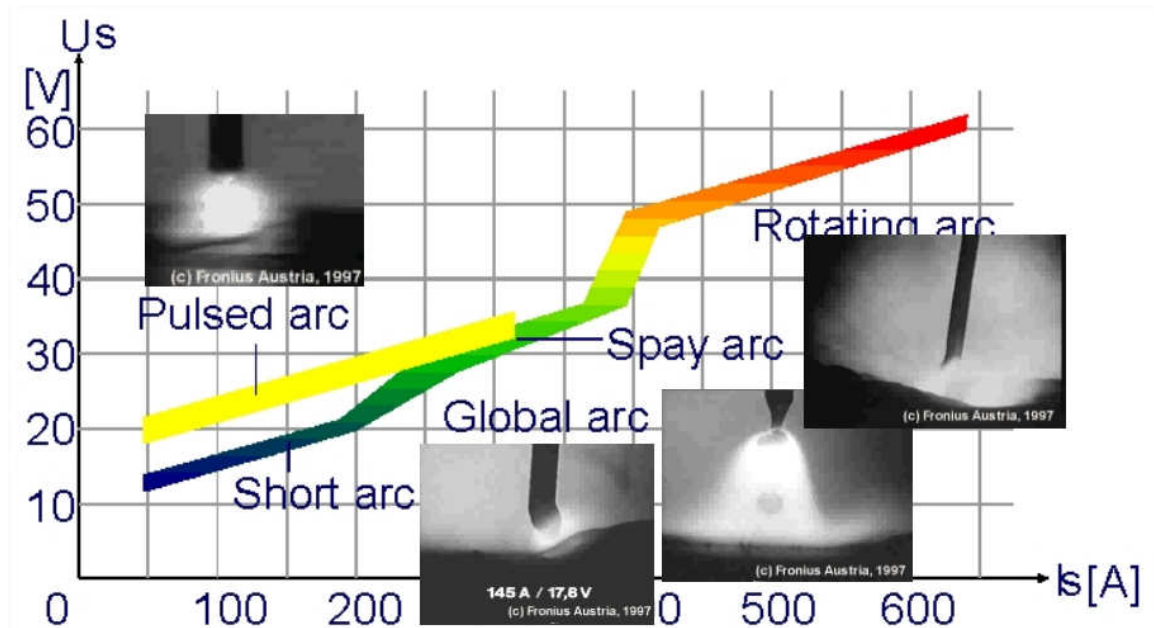
As novas fontes com microprocessadores computadorizados são possíveis trabalhar com corrente constante "I" ou tensão constante "U". Isso nos dá uma garantia de uma penetração constante.

Figura 14: Representação esquemática da transferência pulsada



Fonte: (Maruo & Hirata, 1984).

Figura 15: Modos de transferência de soldagem



Fonte: Fronius

Como a corrente constante "I" causa alguns problemas em equipamentos de solda robotizada, pois todos os robôs usam seguidor de junta e necessita de arcos com tensão constante "U". Pois os seguidores seguem um diferencial de corrente, ou seja, a corrente não pode ser constante, senão os seguidores não conseguem fazer a leitura. O grande problema causado com os modos de soldagem com tensão constante tem alguns problemas de estabilidade de arco e outro é a posse de fusão é muito líquida, carretando problemas de solda fria e deslocada quando soldada em posição PB.

Existem varias formas de obtermos curvas de soldagem pulsada, isso é feito com máquinas de solda cada vez mais sofisticadas e usando para isso placas micro processadas, ou seja, as fontes são verdadeiros computadores.

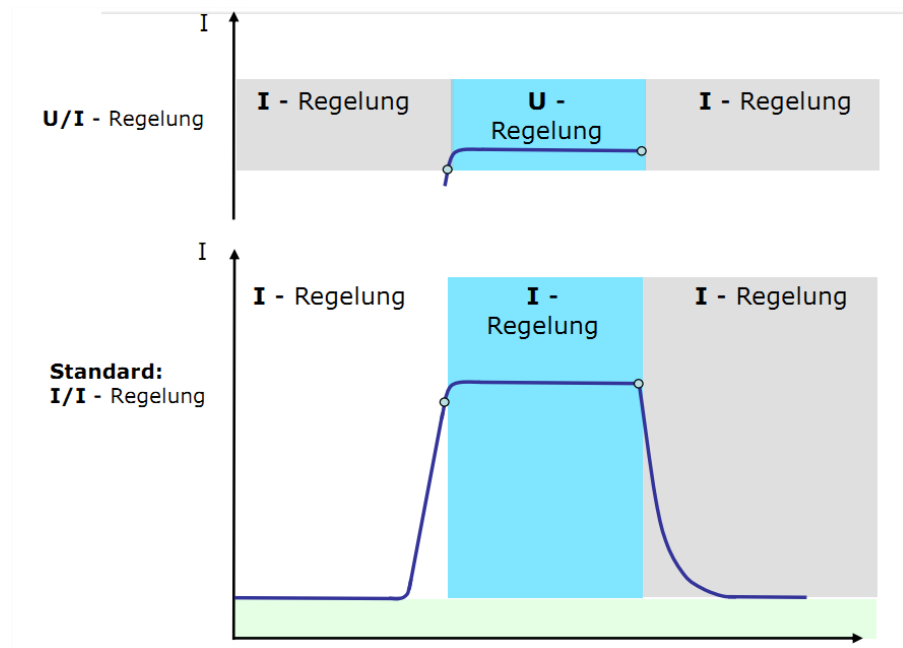
Normalmente temos fontes com Corrente Constante "U/U" ou com Tensão Constante "I/I", ou seja, "U/U" é a amperagem constante e o "I/I" é a voltagem constante. No mercado o mais comum é encontrar este tipo de configuração. Más a empresa Cloos fez algo diferente é um mistura das duas curvas onde temos uma fonte



onde temos a Corrente Constante e no pico do pulso temos a Tensão Constante e isso forma, portanto a curva “U/I”, conforme Figura 16. Desta forma se alcança um significativo avanço em termos de uma boa soldabilidade e manter os seguidores de junta dos equipamentos robotizados com leituras bem precisas.

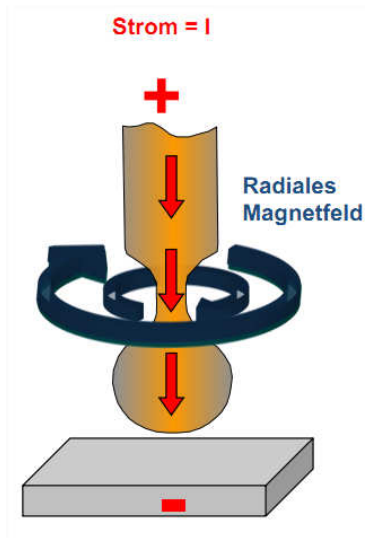
A curva da figura 16 demonstra uma curva usando “I/I” onde o pulso maior é onde se destaca a gota e logo após o pulso cai, a Figura 17 mostra como ocorre este destacamento. Para melhorar as curvas, foi criada uma curva chamada “I/U” conforme Figura 16 mostra que no pico da corrente foi trocado de corrente para tensão e a gota se destaca melhor e tem uma estabilidade maior e não tem problema com seguidores de junta.

Figura 16: Modos de transferência de soldagem



Fonte: Cloos

Figura 17: Formação da gota

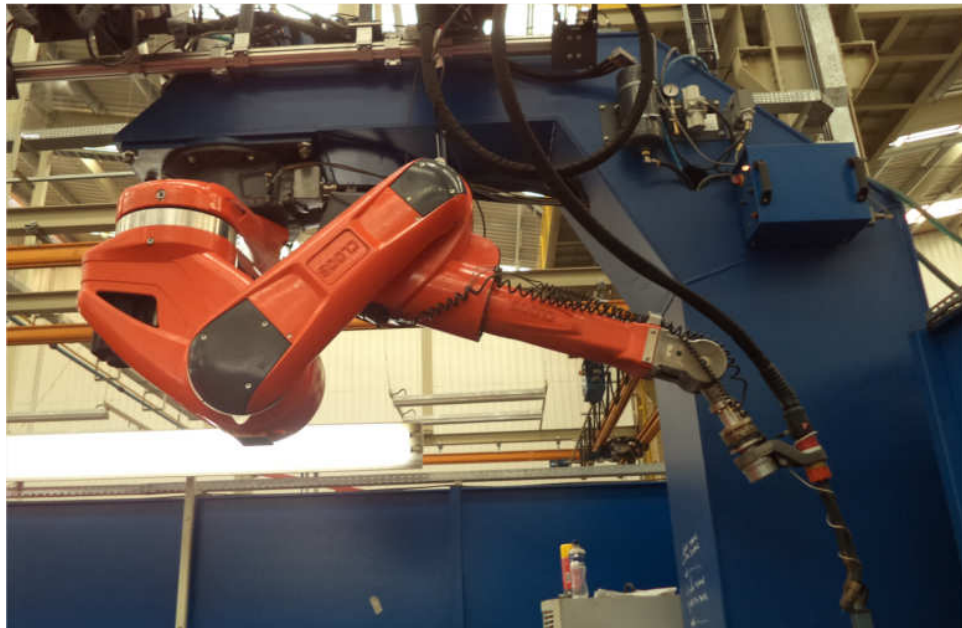


Fonte: Cloos

## 2 METODOLOGIA

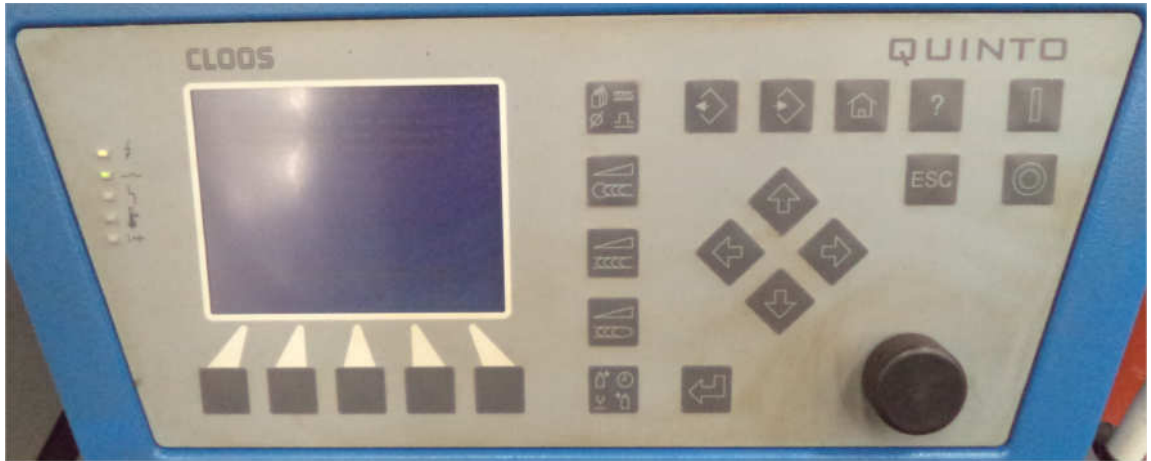
O presente estudo caracteriza-se como pesquisa dos métodos de deposição de solda Mag. Relativamente aos objetivos da pesquisa trata-se de um estudo exploratório das formas de deposição de solda Mag, o qual visa buscar maiores informações sobre o assunto, facilitando a delimitação da análise e implementação dos objetos. Para o desenvolvimento da presente pesquisa, usarei artigos Técnicos da empresa como Cloos e a empresa Fronius. Será feito testes práticos com soldas em robôs de solda da empresa Cloos e modelo QUIROX 350, conforme Figura 18. A fonte de solda Sinérgicas Pulsadas também da Cloos, modelo QUINTO 603, conforme Figura 19. Usaremos equipamentos de Micrografia para verificar a penetração dos corpos de prova.

Figura 18: QUIROX 350, Cloos



Fonte: Bruning

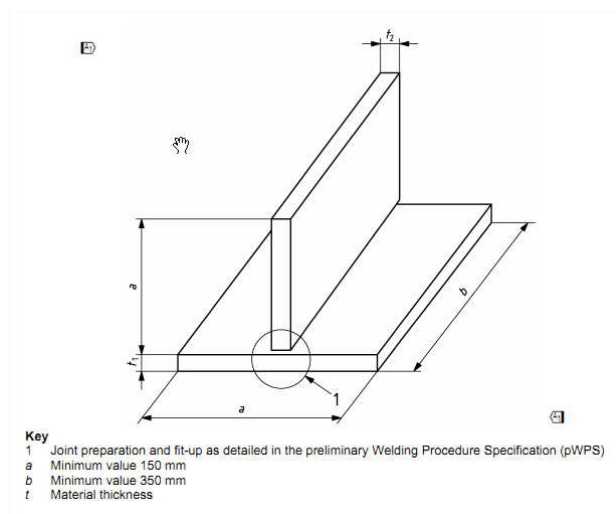
Figura 19: QUINTO 603, Cloos



Fonte: Bruning

Usado corpos de prova de chapa de Aço de 8,00 mm de espessura e material ASTM A572 GR 50, com juntas em “T”, conforme Figura 20, conforme a norma DIN EN ISO 15614-1, em Anexo 01, em posição de solda em posição PB, Figura 21, conforme norma DIN EN ISO 6947, em Anexo 02. Usaremos para validar este ensaio dois corpos de prova por curva usada, isso para termos uma representação melhor sobre o ensaio realizado. A Figura 27.

Figura 20: Corpo de prova usado



Fonte: DIN EN ISO 15614-1

Após a soldagem as peças serão avaliadas, quanto à qualidade de soldagem e penetração conforme norma DIN EN ISO 25817, em Anexo 03.

Para que possamos delimitar a pesquisa vamos restringir alguns dados de soldagem, pois sem esta delimitação os dados não serão conclusivos e muito vagos. Para tanto usaremos todas as variáveis de soldagem fixa conforme EPS-174/2014, em Anexo 04 e somente iremos mudar os modos de deposição, alternado de curto circuito “C/C”, pulsado “I/U” e pulsado “I/I”.

Figura 21: Posição de solda PB



Fonte: Bruning

### 3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Na figura 22 temos os resultados da análises da penetração, onde podemos tirar varias observações, todas as soldas tiveram um bom resultado quanto à penetração.

Todas as amostras estão com uma penetração boa, somente podemos perceber que as penetrações se comportam de uma forma assimétrica, principalmente nas amostras 1, 2, 5 e 6. Porém as penetrações são em sentidos opostos nestas amostras isso se apresenta somente pela razão de ter trocado a curva característica da solda. Já as amostras 3 e 4 deram o melhor resultado, justificando o melhor modo de deposição já discutido anteriormente, porém o seguidor de junta não funciona neste método.

Figura 22: Resultados das análises

Amostras	Curva usada	Penetração no material soldado	Penetração no material base
1	U/I	8	5
2	U/I	10	6
3	I/I	6	4
4	I/I	6	4
5	CC	3	11
6	CC	3	10

Fonte: Própria

As amostras 01 e 02 foram soldadas usando uma curva “U/I”, conforme figura 23. Onde podemos perceber a limpeza superficial da solda e uma solda muito simétrica, sem mordeduras e aprovado conforme relatório no Anexo 05. Uma boa observação a ser feita é o bom rendimento do seguidor de junta.

As amostras 03 e 04 foram soldadas usando uma curva “I/I”, conforme figura 24. Onde podemos perceber a limpeza superficial da solda, más a solda estava assimétrica e com uma mordedura muito forte no final do cordão e uma das amostras reprovou por mordedura, conforme relatório no Anexo 05, como não foi analisado a simetria uma das peças mesmo com o cordão assimétrico foi aprovada. Porém para realizar as amostras tivemos que desligar o seguidor de junta, pois o seguido se desviou da junta.

As amostras 05 e 06 foram soldadas usando uma curva "C/C", conforme figura 25. Onde podemos perceber que já tem presença de respingos de solda, apesar da solda estar limpa, estava com uma mordedura muito forte no final do cordão, conforme relatório no Anexo 05. Uma boa observação a ser feita é o bom rendimento do seguidor de junta.

Figura 23: Corpo de prova 01 e 02



Fonte: Próprio

Figura 24: Corpo de prova 03 e 04



Fonte: Próprio

Figura 25: Corpo de prova 05

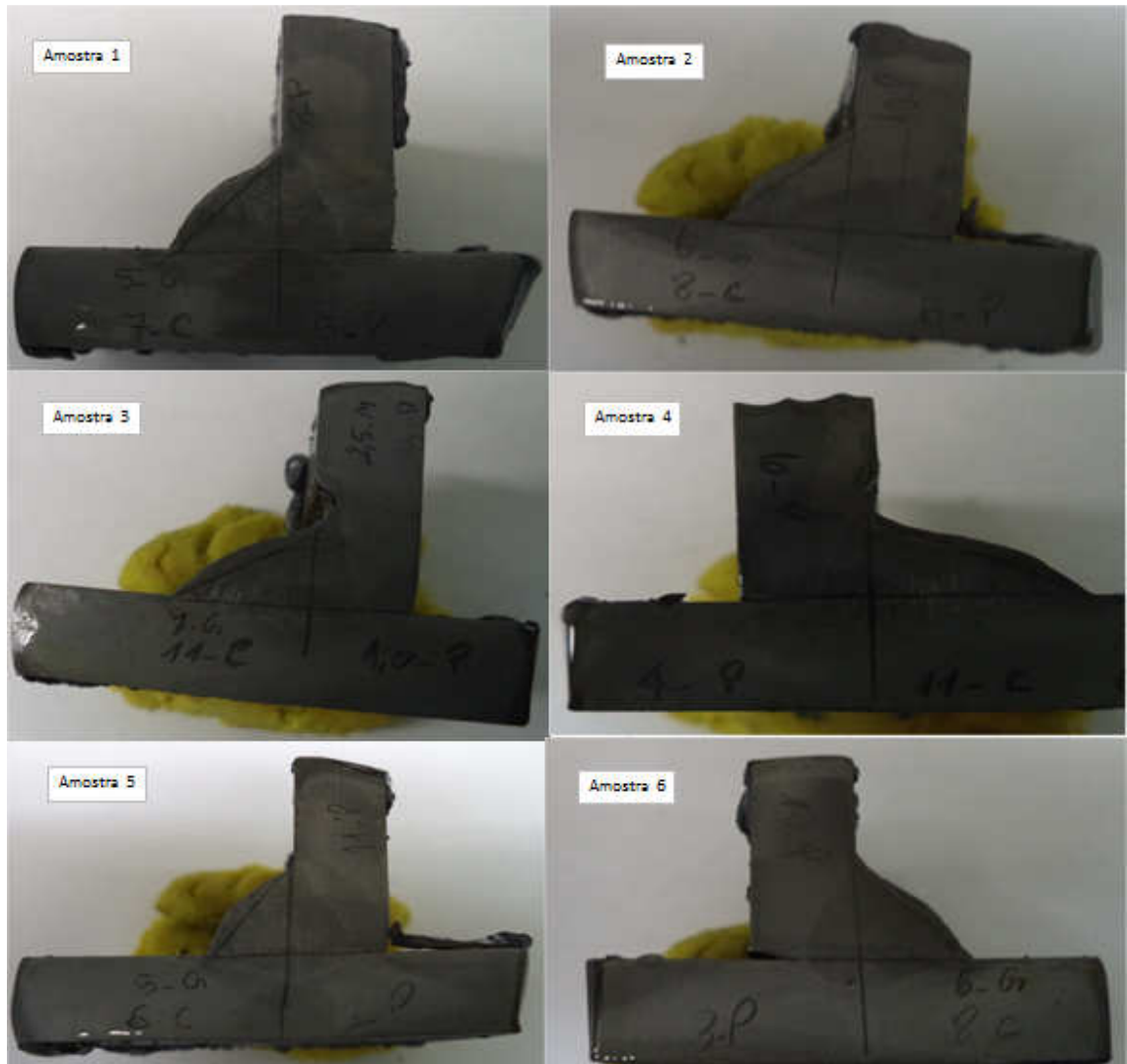


Fonte: Próprio

Conforme figura 26, fica bem perceptível a influencia do aporte térmico caudado pelos tipos e curvas usado. As amostras 01 e 02 demonstra um moderado aporte térmico que ajuda para que não tenhamos uma deformação excessiva em peças grandes. As amostras 03 e 04 demonstra um pequeno aporte térmico, que é excelente para proporcionar uma mínima deformação, neste caso o seguidor de junta não funciona e para peças grandes isso causa uma dificuldade para termos uma penetração constante. As amostras 05 e 06 que foram soldadas com curto circuito, tivemos um grande aporte térmico tanto que as amostras estavam todas deformadas e muito quentes, além de que a solda estava em um estado muito liquido não sendo muito fácil de ser soldado.



Figura 26: Corpos de provas para macrografia



Fonte: Próprio

Figura 27: Amostras

Amostra	Quant.	Curva	Material	Espessura (mm)	Fonte de solda	Robô	EPS
1	2	U/I	ASTM A572 GR 50	8,00	QUINTO 603 CLOOS	QUIROX 350 CLOOS	174/2014
2	2	U/I	ASTM A572 GR 50	8,00	QUINTO 603 CLOOS	QUIROX 350 CLOOS	174/2014
3	2	I/I	ASTM A572 GR 50	8,00	QUINTO 603 CLOOS	QUIROX 350 CLOOS	174/2014
4	2	I/I	ASTM A572 GR 50	8,00	QUINTO 603 CLOOS	QUIROX 350 CLOOS	174/2014
5	2	CC	ASTM A572 GR 50	8,00	QUINTO 603 CLOOS	QUIROX 350 CLOOS	174/2014
6	2	CC	ASTM A572 GR 50	8,00	QUINTO 603 CLOOS	QUIROX 350 CLOOS	174/2014

Fonte: Própria

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo para investigar a influência da mudança das curvas características no processo de soldagem (GMAW – Gas Metal Arc Welding) por arco na penetração dos corpos de prova. As conclusões relevantes obtidas foram as seguintes:

- A curva “U/I” se apresenta a melhor solução para ter um alto rendimento e mantendo uma boa penetração e solda limpa sem retrabalho posterior;
- A curva “I/I” se mostrou o melhor rendimento na relação a penetração, más por ser uma solda muito líquida não é aplicado em algumas posições de solda, e outro fator que é prejudicial ao seu uso em robôs de solda é o do seguidor de junta não obedecer;
- A curva “C/C” que é o curto circuito teve um bom desempenho em relação à penetração, más a solda fica deslocada e ocasiona muitos respingos de solda;

Os objetivos alcançados com o estudo foram comprovados pela literatura consultada. A mudança de curvas da solda tem se mostrado muito viável para termos uma soldagem em alto rendimento, com nenhum respingo de solda. Porém o seu uso depende muito a aplicação, muitas vezes temos que avaliar melhor a peça onde aplicaremos e que tipo de processo usará (manual ou robotizado), pois isso tudo vai interferir em que curva pode usar.

O que se conclui que as empresas fornecedoras de fontes de solda estão dispondo para os seus clientes um grande leque de opções de modos de deposição, porém dizer qual é o melhor, é impossível de dizer pois cada modo tem a sua finalidade, o que importa é testar o modo que se tem o melhor rendimento.

## REFERÊNCIAS

Machado, IVAN G., Soldagem e técnicas conexas: Processos, Ed. Autor, p.477, Porto Alegre, 1996.

ESAB BR; FORTES, CLEBER, Apostila de Soldagem Mig/Mag, p.3 e 4, 25 de janeiro de 2005.

Mondenese, Paulo J., Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais, p.60 à 89, Belo Horizonte, 2007.

CLOOS DE; PITZER, Ian, Moderne Schweißverfahren in der Fertigung, p.12, Haiger, 2014.

FRONIUS AT, WELINGUER, Martin, Basic Welding, p.8, Linz, 2013.

**ANEXO 01 – DIN EN ISO 15614-1**

## **ANEXO 02 – DIN EN ISO 6947**

**ANEXO 03 – DIN EN ISO 25817**

**ANEXO 04 – EPS-174/2014**



## **ANEXO 05 – RELATÓRIOS DAS AMOSTRAS**