

**Felipe da Gama Meyen**

(Engenheiro de Produção, UNESP, 2008)

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DOIS ARAMES  
SÓLIDOS ER70S-6 AWS 5.18, COM E SEM  
PROTEÇÃO DE COBRE, PARA APLICAÇÃO EM  
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:

Engenharia da Soldagem

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Março/2014

*"Não sabendo que era impossível, foi lá e fez."*

*Jean Cocteau*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha esposa, Nathália Cristina Cirone Silva, pela paciência e incentivo em realizar esta especialização, tendo que dividir os finais de semana entre as aulas e a atenção a ela.

Gostaria ainda de agradecer meu orientador Dr. Sérgio Duarte Brandi por todo conhecimento transmitido durante o curso com toda sua experiência na área de soldagem, bem como na orientação deste trabalho, de forma que fosse feito da melhor forma possível.

Obviamente que a minha família não poderia ser deixada de lado, agradecendo, portanto, à minha mãe e irmãs pelo incentivo e meu tio Arlindo Ramos pelos conselhos, principalmente quando fiz a escolha de iniciar este curso.

Finalmente gostaria de agradecer o pessoal que me ajudou bastante ao realizar este trabalho. Primeiramente meu antigo chefe José Auriovaldo Covillo e posteriormente Flávio Batista Oliveira por me liberarem as sextas de forma que pudesse atender o curso. Tendo que citar ainda a ajuda do Sr. Maurício Silva, Supervisor da Ferramentaria, por liberar seus funcionários para preparar os materiais para o estudo em questão, bem como os Srs. Fábio Tutimes e Reinaldo Pereira dos Santos Jr., que trabalham no setor de Metrologia da empresa, possibilitando a obtenção dos resultados deste trabalho.

## **RESUMO**

O presente estudo visa buscar soluções para redução de custo em uma empresa automobilística, através da mudança de um arame sólido ER70S-6 AWS 5.18 para um arame também sólido, de mesma classificação, sem a cobertura de cobre, utilizado habitualmente para prolongar o efeito da oxidação superficial nos arames de soldagem e melhorar o contato arame com o bico de contato. Dentre as vantagens mais facilmente identificadas tem-se a redução de tempo de parada de máquina devido à redução do desgaste do sistema de alimentação, constituído por conduíte, roldanas e bico de contato, sendo, portanto, o foco deste estudo verificar os demais fatores como a formação de silicatos sobre o cordão de solda, efeitos de diferenças de tensões superficiais no ponto de contato do cordão com a chapa e quanto à formação do cordão de soldagem, verificando as diferenças na penetração, largura e reforço do cordão, podendo assim verificar a viabilidade da troca do arame através da redução de custo do processo.

**Palavras-chave:** Arame de solda sólido, proteção de cobre, formato do cordão, penetração.

## **ABSTRACT**

This study aims to find solutions to reduce costs in an automotive company, through the change of a solid wire ER70S-6 AWS 5.18 for an also solid wire, with the same classification without protective copper coating, commonly used to extend the effect of oxidation in welding wires and also to improve wire electric contact in contact tube. Among the advantages that are identified more easily, reduction of machine down time due to wear reduction of the feeding system consisting of conduit, pulleys and contact tip is the easier of identifying, thus being the focus of this study to verify the other factors such as formation of silicates on the weld bead, differences in surface tension at the contact point of the bead with the plate and the shape of the weld bead, checking the differences in penetration, bead width and reinforcement height, and thus can verify the viability of the wire exchange to reduce process costs.

**Keywords:** Solid welding wire, wire copper coating, weld bead shape, weld penetration.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
1. JUSTIFICATIVA .....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1. Processo de soldagem MIG/MAG .....	4
3.1.1. Definição.....	4
3.1.2. Formato do cordão e influência do tipo de gás utilizado .....	6
3.1.3. Modos de transferência metálica.....	12
3.1.3.1. Transferência por Curto circuito .....	12
3.1.3.2. Transferência Globular.....	14
3.1.3.3. Transferência Spray.....	14
3.1.4. Efeitos dos parâmetros na soldagem .....	17
3.1.4.1. Corrente de soldagem .....	17
3.1.4.2. Tensão de Soldagem .....	19
3.1.4.3. Velocidade de Soldagem.....	19
3.1.4.4. Ângulo de Deslocamento .....	20
3.2. Arames de Solda.....	22
3.2.1. Especificação e classificação dos arames .....	23
3.2.2. Influência dos elementos de liga nos arames .....	26
3.3. Formato do cordão de solda.....	28
3.3.1. Energia térmica produzida por partículas desaceleradas.....	29
3.3.2. Energia térmica das gotas do metal de adição transferidas para a poça de fusão.....	32
3.3.3. Efeito do balanço de tensão superficial no formato do cordão.....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1. Aspecto visual do cordão .....	44
5.2. Formato do cordão depositado .....	46
6. CONCLUSÃO.....	54
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	55
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

## 1. JUSTIFICATIVA

A busca constante pela redução de custos, aumento da exigência em relação à qualidade e a entrada de diversos novos competidores no mercado automobilístico brasileiro atualmente fazem com que as empresas deste ramo de atividade busquem constantemente melhorias em suas linhas de produção, em termos de produtividade, com aumento das quantidades produzidas, tendo ganhos de escala, aumento da qualidade, devido a exigência cada vez maior dos consumidores, e a redução de custos, para que a empresa esteja sempre competindo com as demais no mercado, obtendo lucros.

Para isso, não é apenas suficiente a busca interna de melhorias contínuas, mas também a busca de parceiros para o desenvolvimento de novas tecnologias. O desenvolvimento de novas tecnologias e produtos com fornecedores próximos, criando parcerias comerciais e tecnológicas tendem a trazer benefícios para às empresas, com melhorias que em curto prazo podem não representar um valor considerável, mas que em médio prazo tendem a dar retornos que fazem com que o investimento tenha seu retorno através das economias geradas com o mesmo.

Além do fator custo, o fator de qualidade tem se tornado algo com uma representação considerável dentro das empresas. Novamente os fornecedores, vistos não apenas como fabricantes de materiais, mas também como parceiros, podem auxiliar bastante para o aumento da qualidade e manutenção da estabilidade do processo, sendo também um fator importante quando se trata de qualidade dos produtos.

Tomando-se como base os itens acima descritos, buscam-se através dos resultados comparativos de tensões residuais, alteração da zona afetada pelo calor,

com relação à sua microestrutura, e a presença de silicatos sobre o cordão de solda, comparando-se os dois arames de soldagem, de forma que sejam verificados os melhores resultados com relação à qualidade obtida e também chances para redução dos custos durante a produção.

## 2. OBJETIVO

Tem-se como objetivo com este estudo verificar possíveis diferenças de resultados entre dois arames de soldagem sólidos de mesma classificação, ER70S-6 AWS 5.18, tendo como diferença a proteção contra oxidação, sendo um deles com a proteção comum de cobre, utilizada na maioria dos arames, e o segundo uma proteção anti-oxidação, nova no mercado.

Para a obtenção das comparações entre as duas proteções superficiais dos arames serão analisadas a penetração, através de macrografias; a presença de silicato sobre o cordão de solda, através de comparativos visuais pela quantidade de silicato em uma área pré-definida; e o efeito das diferenças de tensões superficiais entre o cordão de solda e a chapa base, através da caracterização dos formatos dos cordões de solda e análises da zona afetada pelo calor (ZAC).

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Processo de soldagem MIG/MAG**

##### **3.1.1. Definição**

O conceito de soldagem, teve início em meados de 1920, através de P.O. Nobel, utilizando-se de um eletrodo metálico com corrente direta e alterando a tensão do arco para regular a penetração de solda. Neste experimento ainda não era utilizado nenhum tipo de gás de proteção.

Em 1940, os irmãos Hobart, desenvolveram um equipamento muito parecido com os equipamentos atualmente utilizados. E em 1948, finalmente foi desenvolvido um equipamento nos moldes atuais. Na época era utilizado um arame de diâmetro pequeno, uma fonte com tensão constante e com alta taxa de deposição de material, sendo utilizado um gás inerte para a soldagem de alumínio, iniciando assim a aplicação do termo soldagem MIG. Entretanto, os altos custos de gases de proteção tornavam este processo de soldagem inviável.

Em 1953, com a descoberta do gás  $\text{CO}_2$  para uso na soldagem, além de outras misturas de gases, o termo GMAW (Gas Metal Arc Welding) foi sendo mais comumente utilizado, já que tantos gases inertes quanto reativos começaram a ser empregados, e assim os processos MIG/MAG finalmente tornaram-se viáveis economicamente (ANDERSON, 2005).

No processo de soldagem ao arco elétrico, utilizando-se gases de proteção, mais popularmente conhecidos como processos de soldagem MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas), a fusão do arame ocorre através da abertura do arco

elétrico, devido a diferença de potencial entre a peça, ou metal base, e o próprio arame, ou metal de adição (FORTES, 2005).

Conforme ocorre a alimentação do arame, que pode ser semi-automática (soldador) ou totalmente automatizada (robô), o arco elétrico funde a ponta do arame, realizando assim a transferência de material para a poça de fusão, no metal base.

A proteção deste processo de soldagem é feito através de gases puros ou mistura entre gases. Esta proteção é feita através de um fluxo contínuo de gás que é acionado assim que ocorre o comando para iniciar a alimentação do arame.

Desta forma, quando ocorre a abertura do arco elétrico, a transferência de material está protegida contra os gases atmosféricos, que podem causar descontinuidades na solda (SVETSAREN, 2003), conforme poderá ser visto mais para frente neste trabalho.

A escolha entre a utilização do processo MIG ou MAG varia de acordo com a necessidade do projeto e a funcionalidade a qual a solda estará submetida. Para realizar uma comparação entre os diferentes gases oferecidos, se tratando da qualidade do cordão de solda (aspecto, metalurgia e resistência mecânica), é necessário encontrar uma condição comum de soldagem para todos os tipos de gases (FERREIRA FILHO, BALSAMO, FERRARESI, 2007)

Devido a diversos fatores que influenciam a soldagem, alguns pontos são de extrema importância que se faça um controle para que não ocorra uma variação de forma que influencie nos resultados. É importante que se mantenha as mesmas corrente de soldagem, taxa de deposição (manter valor constante entre a velocidade de alimentação do arame de solda e a velocidade de soldagem) e, se possível, as mesmas energias de soldagem para todos os gases.

### **3.1.2. Formato do cordão e influência do tipo de gás utilizado**

Para a maioria dos diversos tipos de soldagem há uma imensa combinação de gases, puros ou em mistura com outros gases, que são possíveis de serem utilizados de forma que se realize a junção de duas chapas. A determinação da melhor combinação de misturas depende de uma série de necessidades relacionadas ao tipo de trabalho o qual a estrutura soldada estará submetida (LYTTLE, 1993).

Esta diversidade de mistura de gases está relacionada ao foco no desenvolvimento para a soldagem GMAW, especialmente para a junção de aços carbono. Estas misturas podem ser classificadas em quatro diferentes tipos: gases puros, misturas argônio-oxigênio, misturas argônio-dióxido de carbono e misturas entre três diferentes tipos de gases, entre eles argônio, hélio, oxigênio, dióxido de carbono ou hidrogênio. A tabela 3.1, abaixo, apresenta sugestões de mistura de gases dependendo do tipo de material, a espessura do mesmo e o modo de transferência de material desejado.

**Tabela 3.1 - Gases de proteção recomendados para soldagem GMAW (Adaptado de LYTTLE, 1993)**

MATERIAL	ESPESSURA (mm)	MODO DE TRANSFERÊNCIA	GÁS DE PROTEÇÃO RECOMENDADO	VANTAGENS E LIMITAÇÕES
Aços Carbono	< 2,0	Curto Circuito	Ar-25CO <sub>2</sub> Ar-15CO <sub>2</sub> Ar-8CO <sub>2</sub>	-Boa penetração e controle da distorção
	2,0 ~ 3,2	Curto Circuito	Ar-8CO <sub>2</sub> Ar-15CO <sub>2</sub> Ar-25CO <sub>2</sub>	- Alta taxa de deposição - Baixa distorção e respingos - Bom controle da poça de fusão (principalmente para soldagens fora de posição)
	> 3,2	Curto Circuito	Ar-15CO <sub>2</sub> Ar-25CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>	- Soldagem em altas velocidades de deslocamento - Boa penetração e controle da poça de fusão
		Globular	Ar-25CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>	- Adequado para altas correntes e altas velocidades de soldagem - Alta taxa penetração - Grande potencial de fusão do metal base gerando furos no cordão de solda
		Spray	Ar-1O <sub>2</sub> Ar-2O <sub>2</sub> Ar-5CO <sub>2</sub> Ar-8CO <sub>2</sub> Ar-10CO <sub>2</sub> Ar-15CO <sub>2</sub> Misturas de Ar-CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	- Boa estabilidade do arco elétrico - Poça de fusão mais fluida com o aumento de O <sub>2</sub> na mistura gasosa - Boa coalescência e contorno do cordão - Boa aparência do cordão e controle da poça
		Spray Pulsado	Ar-5CO <sub>2</sub> Misturas de Ar-He-CO <sub>2</sub> Misturas de Ar-CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	- Utilizado tanto para bitolas quanto para soldagens fora de posição - Atinge uma boa estabilidade de spray pulsado, sob diferentes características de arco e deposição
Ligas de Aço	Todas as espessuras	Curto Circuito	Ar-8CO <sub>2</sub> Ar-15CO <sub>2</sub> Misturas de Ar-CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	- Altas velocidades de soldagem - Boa penetração e controle da poça de fusão - Aplicável para soldagens fora de posição - Adequado para altas correntes e altas velocidades de soldagem
		Spray	Ar-2O <sub>2</sub> Ar-5CO <sub>2</sub> Misturas de Ar-CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> Misturas de Ar-He-CO <sub>2</sub>	- Redução de mordeduras - Maior taxa de deposição e aumento da molhabilidade do cordão - Boa penetração e boa propriedade mecânica
		Spray Pulsado	Ar-2O <sub>2</sub> Ar-5CO <sub>2</sub> Ar-8CO <sub>2</sub>	- Utilizados tanto para bitolas maiores quanto menores e soldagens fora de posição - Atinge uma boa estabilidade de spray pulsado, sob diferentes características de arco e deposição

**Continuação Tabela 3.1 - Gases de proteção recomendados para soldagem GMAW**  
(Adaptado de LYTTLE, 1993)

Aços Inoxidáveis, Cobre, Níquel, Ligas de Cobre e Níquel	Todas as espessuras	Curto Circuito	Ar-1O <sub>2</sub> Ar-2CO <sub>2</sub> Misturas de He-Ar-CO <sub>2</sub> Misturas de Ar-He-CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixa concentração de CO<sub>2</sub> minimiza riscos de corrosão intergranular</li> <li>- A concentração de He melhora a molhabilidade da poça</li> <li>- Concentrações de CO<sub>2</sub> acima de 5% devem ser utilizadas com cautela para algumas ligas</li> <li>- Aplicável para qualquer posição de soldagem</li> </ul>
		Spray	Ar-1O <sub>2</sub> Ar-2O <sub>2</sub> Misturas de Ar-He-CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa estabilidade do arco elétrico</li> <li>- Uma poça bem fluida porém controlável</li> <li>- Boa coalescência e contorno do cordão</li> <li>- Reduz mordeduras em chapas de maior espessura</li> </ul>
		Spray Pulsado	Ar-1O <sub>2</sub> Ar-2O <sub>2</sub> Misturas de Ar-He-CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizados tanto para bitolas maiores quanto menores e soldagens fora de posição</li> <li>- Atinge uma boa estabilidade de spray pulsado, sob diferentes características de arco e deposição</li> </ul>
Alumínio, Titânio e Outros Metais	≤ 13	Spray	Ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhor transferência de metal, estabilidade de arco e limpeza da chapa</li> <li>- Redução de respingos</li> <li>- Remoção de óxidos quando utilizado em polaridade reversa</li> </ul>
			75%He - 25%Ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto aporte térmico</li> <li>- Alta fluidez da poça, contorno de cordão plano e alta penetração</li> <li>- Minimiza a porosidade</li> </ul>
	> 13	Spray	He 50%He - 25%Ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto aporte térmico</li> <li>- Indicado para soldas mecanizadas e solda sobre-cabeça</li> </ul>
		Spray Pulsado	Ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa molhabilidade</li> <li>- Bom controle da poça de fusão</li> </ul>

O argônio puro é mais comumente utilizado para materiais base não ferrosos, como alumínio, níquel, cobre e ligas de magnésio e metais reativos, como o titânio. O argônio promove uma maior proteção à poça de fusão, devido sua densidade ser maior do que a do ar atmosférico. Além disso, o argônio, por ser um gás inerte, melhora as propriedades mecânicas do cordão de solda devido a retenção dos elementos de liga no cordão de solda. Sua baixa taxa de ionização facilita a abertura do arco elétrico e melhora a estabilidade do arco em correntes mais baixas (DILLENBECK & CASTAGNO, 1987).

Já o dióxido de carbono é utilizado somente para juntas de aços carbono. Dentre suas vantagens estão a sua alta disponibilidade além do seu baixo custo.

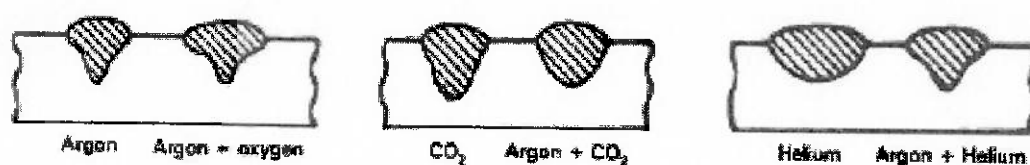
Entretanto, o  $\text{CO}_2$  é um gás que não permite a transferência tipo spray e, assim sendo, a sua taxa de deposição é menor e as taxas de respingo e fumos de solda mais altas do que quando utilizamos misturas de argônio. O alto potencial de ionização do  $\text{CO}_2$  e sua característica de dissociação sob aquecimento gera uma maior fusão do metal base e conseqüentemente uma maior penetração (LYTTLE, 1993).

Em relação ao hélio, devido a sua alta condutividade térmica, gera um maior aporte de energia no metal base enquanto mantém uma atmosfera inerte, sendo mais comumente utilizado em soldagens de metais como alumínio, magnésio e ligas de cobre (SVETSAREN, 2003).

Entretanto, podemos ter também misturas gasosas que, dependendo da proporção entre diferentes gases, pode-se gerar efeitos distintos na estabilidade do arco e na penetração do cordão de solda.

Quando se adiciona uma quantidade pequena de oxigênio em uma mistura com a maior proporção de argônio, obtém-se um arco elétrico mais estável, aumenta a taxa de deposição de material, reduz a corrente de transição para uma transferência tipo spray e influencia o formato do cordão (Fig. 3.1). As misturas mais comuns contêm de 1 a 8% de  $\text{O}_2$  no Argônio (SVETSAREN, 2003).

O oxigênio ainda é citado por Jönsson, Murphy e Szekely (1995) como sendo um oxidante que, misturado com o Argônio, suaviza o perfil do cordão de solda, possibilitando uma melhoria na questão da molhabilidade da poça de fusão, devido a redução da tensão superficial no ponto de contato entre a poça de fusão e o metal base.



**Figura 3.1** - Efeito da mistura de gases no formato do cordão, utilizando-se polaridade direta.

Um efeito parecido com o descrito acima é quando se adiciona  $\text{CO}_2$  ao argônio, entretanto com um aumento da penetração de solda com o aumento das concentrações de  $\text{CO}_2$  na mistura. Quando se deseja obter transferências tipo spray, as concentrações de  $\text{CO}_2$  devem ser mantidas abaixo de 20%. Para concentrações acima desta até um valor de 50% será mais facilmente encontrada uma transferência tipo curto circuito/globular, com um aumento considerável de respingos (LYTTLE, 1993).

Este gás é um dos mais utilizados na soldagem MIG/MAG devido ao seu baixo custo. A dissociação do  $\text{CO}_2$  durante a soldagem forma  $\text{CO} + \text{O}$ , gerando assim uma proteção oxidante, sendo um gás ativo nas temperaturas que envolvem a soldagem. Sua alta condutividade térmica é responsável por transferir uma grande quantidade de calor para o metal base (LYTTLE; STAPON, 1990).

Entretanto, segundo Strassburg (1996), os efeitos da presença de elementos oxidantes no gás de proteção influenciam no aumento da perda de manganês, cromo, nióbio e silício, em proporções de 0,3% para o manganês e cromo e cerca de 0,1% para o nióbio e silício, para teores de oxigênio abaixo de 30% na mistura gasosa.

Entretanto, a utilização de  $\text{CO}_2$  causa a inclusão de carbono no metal base. Esta inclusão tem a desvantagem do decréscimo do teor de ferrita, já que o carbono é forte formador de austenita (LUNDQVIST, 1980).

Já uma mistura muito utilizada para materiais não-ferrosos é entre o argônio e o hélio, a fim de se obter os benefícios de ambos os gases. O hélio aumenta o aporte de energia ao material de base e, assim, é utilizado para unir chapas espessas, termicamente condutoras. Com o aumento da concentração do hélio há também um aumento da geração de respingos e da relação largura-profundidade (LYTTLE, 1993).

Há também a possibilidade de mistura entre três diferentes gases o que gera uma maior versatilidade para a soldagem, possibilitando transferências tipo curto circuito, globular e spray para o mesmo tipo de misturas. No caso de misturas com argônio, oxigênio e dióxido de carbono são utilizadas para a soldagem de aços carbono e ligas de aço (LYTTLE, 1993).

Tem-se também a opção de misturas de argônio, hélio e dióxido de carbono. A adição destes dois gases ao argônio tem como finalidade o aumento do aporte térmico ao metal base além da possibilidade de uma transferência suave tipo spray para concentrações abaixo de 40% de He+CO<sub>2</sub> em soldagens de aços carbono e aços de baixa-liga (LYTTLE, 1993).

Finalmente, tem-se a mistura de argônio, dióxido de carbono e hidrogênio, que é utilizada para a soldagem de aços inoxidáveis. Devido a adição do hidrogênio esta mistura de gases não deve ser utilizada para a soldagem de aços carbono. O CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub> atuam na mistura aumentando o aporte de energia no metal de base, aprimorando também a característica do formato do cordão além de promover a possibilidade de aumento na velocidade de soldagem (LYTTLE, 1993).

### 3.1.3. Modos de transferência metálica

A transferência metálica nada mais é do que a forma a qual o metal de adição é transferido da ponta do arame à poça de fusão. Apesar de algumas literaturas destacarem diversos tipos de transferências de metal, pode-se destacar basicamente três principais tipos, sendo os demais apenas variações destes. Entre eles estão inclusos o curto circuito, o globular e o spray (FORTES, 2005).

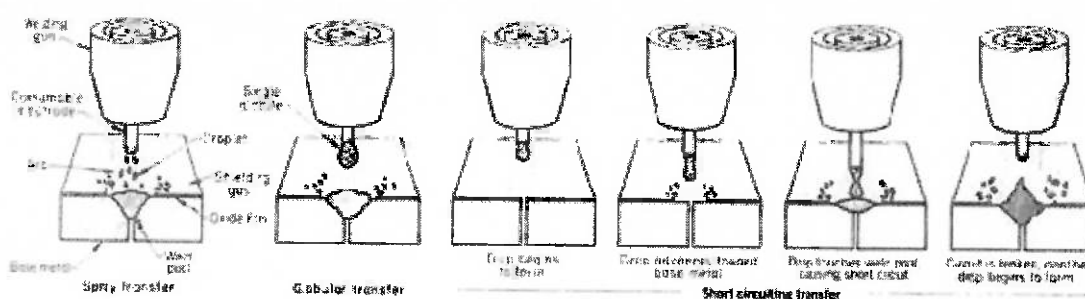


Figura 3.2 - Modos de transferência metálica para processo GMAW (HOLLIDAY, 1993).

Segundo Modenesi (2004), o modo como a transferência de material é realizada influencia nas características do processo como, por exemplo, a quantidade de gases absorvidos pelo metal fundido, principalmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, os quais podem ser prejudiciais às propriedades mecânicas da junta soldada.

#### 3.1.3.1. Transferência por Curto Circuito

Este tipo de transferência adota este nome pois o arame é transferido ao metal de base quando ocorre o contato entre os dois, ocorrendo assim o curto circuito entre as partes, desprendendo o material fundido, que permanece na poça

de fusão (FORTES, 2005). Logo abaixo, na figura 3.3, é possível entender como que ocorre este curto circuito durante a soldagem. O comportamento da corrente e tensão, esquematizados graficamente, conforme a posição do arame de soldagem.

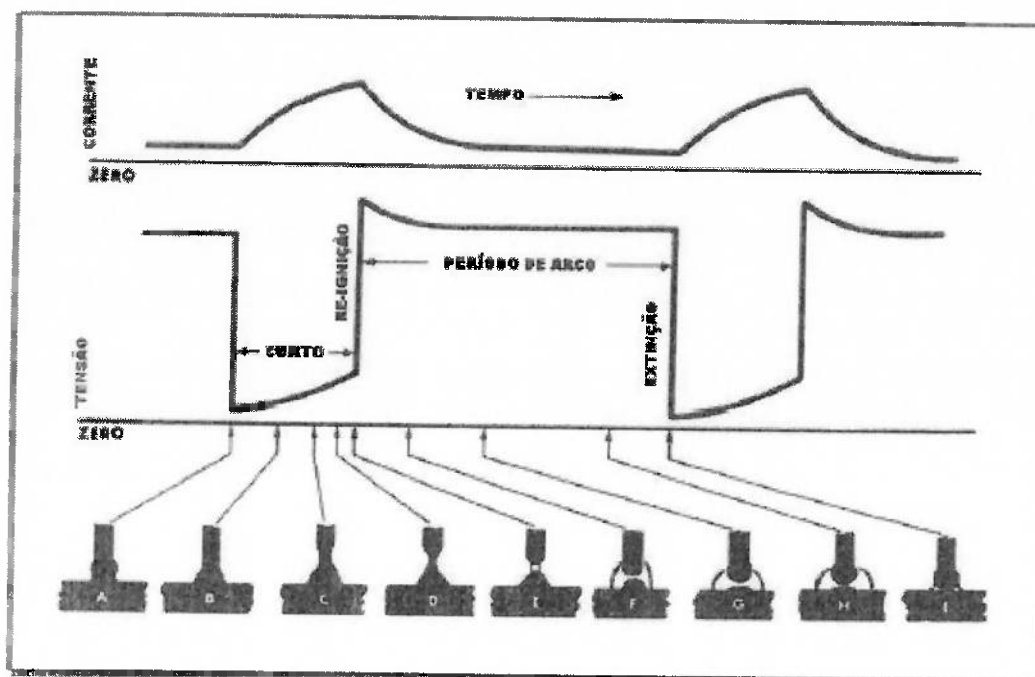


Figura 3.3 - Corrente-tensão versus tempo típico do ciclo de curto circuito (FORTES, 2005).

Neste tipo de soldagem, uma das características importantes é a utilização de gases ativos ( $\text{CO}_2$ ) ou misturas com teores deste gás acima de 25%. Outra característica importante é a baixa tensão necessária para que esse tipo de transferência ocorra. Desta forma, o metal líquido na ponta do arame entra em contato com a poça de fusão antes que ocorra seu destacamento. Analogamente, pode-se afirmar que deve se empregar correntes mais baixas durante a soldagem. Assim, a porção fundida na ponta do arame atinge periodicamente a poça de fusão, causando o curto circuito e a extinção momentânea do arco (MIRANDA, 1999).

### **3.1.3.2. Transferência Globular**

Este tipo de transferência ocorre quando os parâmetros, como tensão e corrente, durante a soldagem são aumentados para acima da janela a qual ocorre o curto circuito. Neste caso, é formado na ponta do eletrodo grandes gotas de metal líquido, de diâmetro superior ao do eletrodo utilizado, se desprendendo através da ação da força da gravidade. (FORTES, 2005; MODENESI, 2007).

Devido a esta forte influência da gravidade no desprendimento da parte fundida do arame, este tipo de transferência acaba se limitando para a posição plana (HOLLIDAY, 1993).

Outra característica marcante deste tipo de processo é a grande presença de respingos provenientes da soldagem, que são gerados devido às forças atuantes no interior da gota, no caso do metal de adição possuir materiais voláteis em sua composição, ou devido às forças geradas pela polaridade entre eletrodo e metal base ou pela vaporização de componentes da própria gota (MODENESI, 2007).

### **3.1.3.3. Transferência Spray**

Este é um tipo de transferência que se pode obter quando se utiliza uma mistura gasosa rica em argônio. É requerido ainda a utilização da polaridade direta, sendo o eletrodo a parte positiva, e um valor de corrente acima do valor crítico, chamado de "corrente de transição". Para valores abaixo deste, a transferência é dada de forma globular, com uma taxa de transferência pequena. Já para valores acima da "corrente de transição" a transferência é feita na forma de pequenas gotas,

aceleradas axialmente através da abertura do arco e que são destacadas do eletrodo numa taxa de centenas por segundo (HOLLIDAY, 1993).

Devido a esta alta taxa de transferência de material, em alta velocidade, a força da gravidade se torna insignificante, podendo assim ser utilizada em qualquer posição de soldagem, dependendo de algumas condições, já que devido a formação de uma poça de fusão grande e de difícil controle. Além disso, devido a inexistência do curto circuito, o nível de respingos é praticamente nulo, se não totalmente eliminado (HOLLIDAY, 1993; MODENESI, 2007).

Entretanto, a necessidade de uma corrente relativamente alta, inviabiliza o uso deste tipo de transferência metálica para chapas finas e a corrente de transição depende de alguns fatores como o diâmetro e composição química do eletrodo, além do gás de proteção utilizado, conforme pode ser visto na Tabela 3.2 (HOLLIDAY, 1993).

**Tabela 3.2 - Corrente de Transição Globular-Spray para os respectivos eletrodos (Adaptado de HOLLIDAY, 1993).**

Tipo de Arame	Gás de Proteção	Diâmetro do Arame		Corrente mínima do spray (A)
		pol (")	mm	
Aço Carbono	98%Ar - 2%O <sub>2</sub>	0,023	0,58	135
		0,030	0,76	150
		0,035	0,89	165
		0,045	1,14	220
		0,062	1,57	275
	95%Ar - 5%O <sub>2</sub>	0,035	0,89	155
		0,045	1,14	200
		0,062	1,57	265
	92%Ar - 8%CO <sub>2</sub>	0,035	0,89	175
		0,045	1,14	225
		0,062	1,57	290
	85%Ar - 15%CO <sub>2</sub>	0,035	0,89	180
		0,045	1,14	240
		0,062	1,57	295
	80%Ar - 20%CO <sub>2</sub>	0,035	0,89	195
		0,045	1,14	255
		0,062	1,57	345
Aços Inoxidáveis	99%Ar - 1%O <sub>2</sub>	0,035	0,89	150
		0,045	1,14	195
		0,062	1,57	265
	Ar - He - CO <sub>2</sub>	0,035	0,89	160
		0,045	1,14	205
		0,062	1,57	280
	Ar - H <sub>2</sub> - CO <sub>2</sub>	0,035	0,89	145
		0,045	1,14	185
		0,062	1,57	255
Alumínio	Argônio	0,030	0,76	95
		0,047	1,19	135
		0,062	1,57	180
Cobre	Argônio	0,035	0,89	180
		0,045	1,14	210
		0,062	1,57	310
Bronze	Argônio	0,035	0,89	165
		0,045	1,14	205
		0,062	1,57	270

### 3.1.4. Efeitos dos parâmetros na soldagem

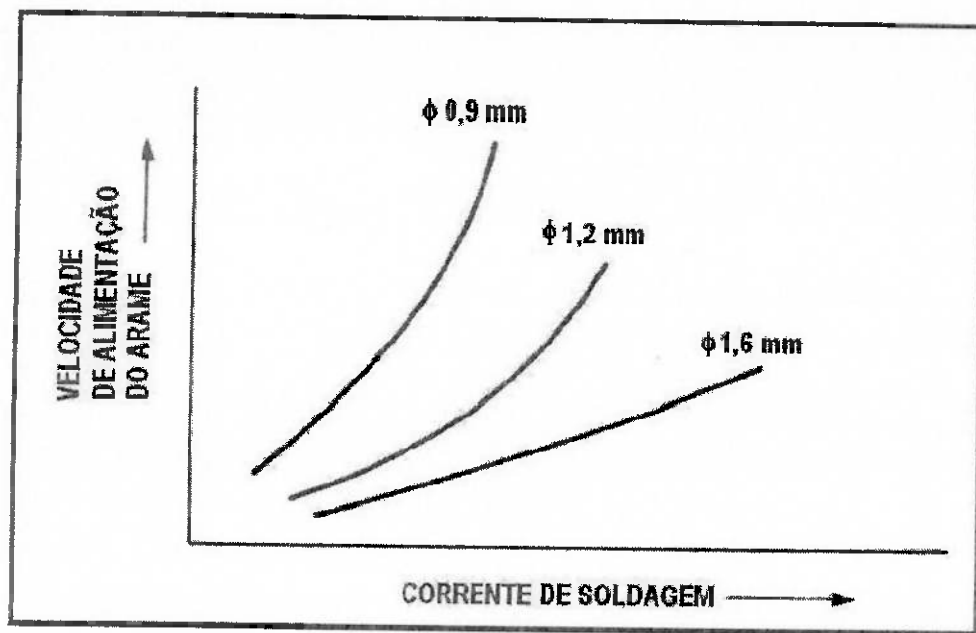
Diversos são os fatores que influenciam a soldagem e cada um tem a sua devida importância para que o cordão de solda tenha sua qualidade e propriedades mecânicas garantidas, dentre eles, podem ser citados a corrente de soldagem, a extensão do eletrodo (*stickout*), a tensão de soldagem, a velocidade de soldagem e a posição da tocha. Para isso se faz necessário que todos estes parâmetros sejam controlados durante a soldagem. Qualquer alteração significativa em relação a estes parâmetros, pode afetar na qualidade do cordão de solda (FORTES, 2005).

#### 3.1.4.1. Corrente de soldagem

Para o processo MIG/MAG a corrente elétrica está diretamente relacionada com a velocidade de alimentação do arame, mantendo-se a distância entre a ponta do bico de contato e o material base (*stickout*) constante. Ou seja, quando ocorre um aumento na velocidade de alimentação do arame, consequentemente, ocorre um aumento na corrente elétrica (FORTES, 2005).

Podemos ainda considerar a corrente elétrica como sendo um dos principais fatores de qualidade do cordão de solda e do modo de transferência de material em uma solda GMAW, conforme já citado anteriormente (HU & TSAI, 2006).

A figura 3.4 representa exatamente esta relação direta entre a velocidade de alimentação e a corrente de soldagem, para diferentes diâmetros de arames.



**Figura 3.4** - Relação entre a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação para diferentes diâmetros de arames (FORTES, 2005)

O que vale ser observado no gráfico representado na figura acima é que para correntes mais baixas, independente do diâmetro do arame, a relação entre a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame é praticamente linear. Entretanto com o aumento da corrente de soldagem esta relação passa a não ser linear, principalmente para arames de menores diâmetros (FORTES, 2005).

Esse fato ocorre pelo aumento da resistência à passagem de corrente elétrica pela extensão do arame que fica exposta além do bico de contato. Este efeito de aquecimento resistivo é conhecido como Efeito Joule ( $I^2R$ ). Quanto maior a corrente de soldagem, maior será o aquecimento resistivo (FORTES, 2005).

### **3.1.4.2. Tensão de Soldagem**

A tensão de soldagem, junto com o comprimento do arco, são dois parâmetros que caminham juntos na determinação das características do cordão de solda. No caso, a tensão é dependente do comprimento de arco, o diâmetro do eletrodo e do gás de proteção escolhido para a soldagem, determinando assim o modo de transferência de material. Considerando todos os parâmetros constantes e havendo um aumento da tensão, pode-se observar uma mudança geométrica do cordão, ocorrendo um aumento na largura e uma redução na altura do reforço, além da redução na penetração de solda. (FORTES, 2005).

Entretanto, a mudança na tensão não afeta somente as características geométricas do cordão de solda mas também a sua microestrutura, podendo ser observada se a soldagem realizada obteve os resultados esperados ou não (MODENESI, 2007). Até porque é sempre necessário realizar um ajuste na tensão quando ocorre alguma alteração na corrente, e vice-versa, de forma a se manter uma estabilidade do arco elétrico (FORTES, 2005).

### **3.1.4.3. Velocidade de Soldagem**

A velocidade de soldagem é inversamente proporcional à penetração, largura e reforço do cordão. A influência da penetração e da largura do cordão de solda está associada à diminuição do aporte de energia, que se define como a energia fornecida por unidade de comprimento do metal base, a qual também é inversamente proporcional à velocidade de soldagem, considerando todos os outros parâmetros constantes (MODENESI, 2007).

A influência do reforço do cordão de solda está associada com a redução da quantidade de material que é adicionado ao cordão de solda com o aumento da velocidade de soldagem, o que é dado por (MODENESI, 2007):

$$A_d = \frac{A_w \cdot f}{v}$$

Sendo:

$A_d$  - Área depositada

$A_w$  - Área da seção transversal do eletrodo

$f$  - Velocidade de alimentação

$v$  - Velocidade de Soldagem

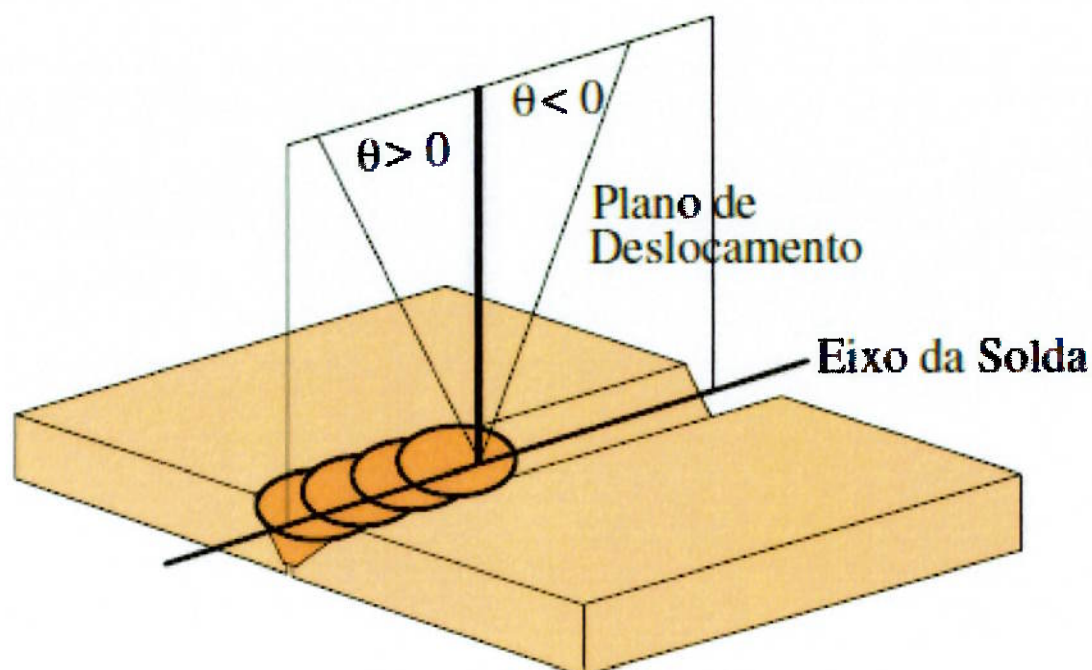
Para Fortes (2005), pode-se enunciar três regras básicas a respeito da velocidade de soldagem:

- quando a espessura da peça aumenta, a velocidade de soldagem deve diminuir;
- para uma dada espessura de chapa e tipo de junta, quando ocorre um aumento da corrente de soldagem, a velocidade de soldagem também deve aumentar, e vice-versa;
- pode-se obter maiores velocidades de soldagem utilizando-se da técnica de "empurrar".

#### 3.1.4.4. Ângulo de Deslocamento

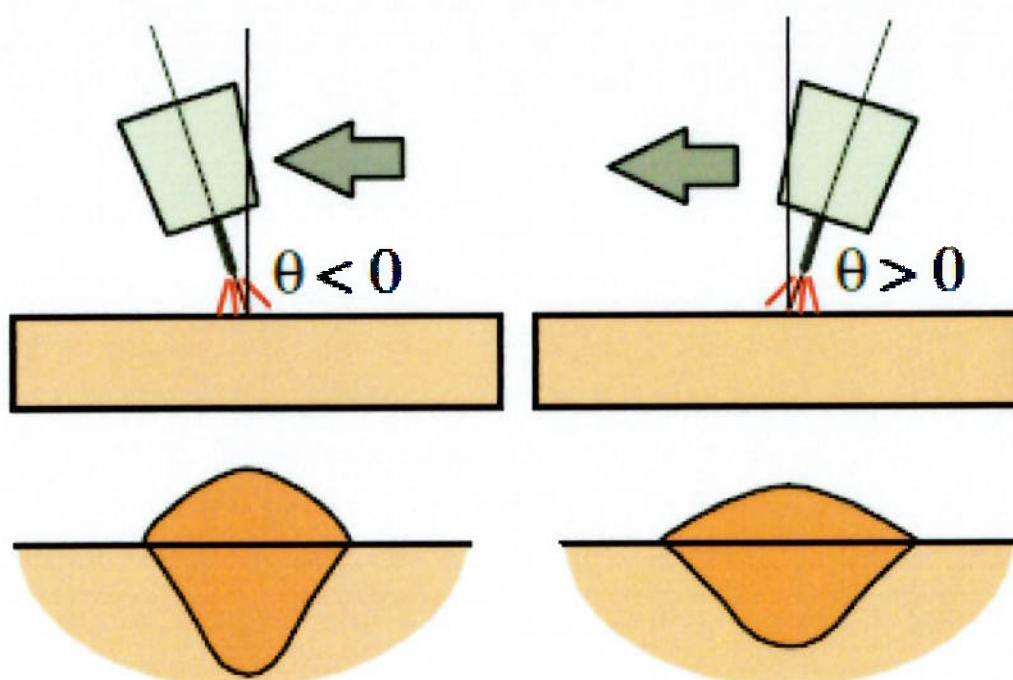
Quando se fala de ângulo de deslocamento, está sendo tratado da forma como o eletrodo se projeta no plano de deslocamento, formando um ângulo entre o

eixo do cordão de solda e a normal à face desta (figura 3.5). Quando  $\theta > 0$ , tem-se uma solda sendo executada "empurada", enquanto quando  $\theta < 0$ , pode-se afirmar que a solda foi "puxada" (MODENESI, 2007).



**Figura 3.5** - Ângulo de deslocamento da tocha (MODENESI, 2007).

Ainda segundo MODENESI (2007), este ângulo de deslocamento influencia no formato do cordão, sendo que quando o mesmo é feito puxado observa-se um cordão mais estreito e com uma maior penetração, conforme demonstrado na Figura 3.6.



**Figura 3.6** - Efeito do ângulo de deslocamento no formato do cordão (MODENESI, 2007)

Deve ser observado que não é necessária nenhuma alteração nos parâmetros e nem no sentido de soldagem de forma a facilitar uma ou outra "técnica de soldagem", mas apenas a mudança no posicionamento da tocha, no sentido longitudinal, já basta para mudar da técnica puxada para empurrada e vice-versa (FORTES, 2005).

### 3.2. Arames de Solda

Para uma soldagem com qualidade um dos itens de maior importância é a escolha do arame de solda correto. Esta escolha, juntamente com o gás de proteção, determinarão as propriedades físicas e químicas do cordão de solda. Entretanto, segundo Fortes (2005), são cinco os fatores que determinam essa escolha:

- a composição química do metal base;

- as propriedades mecânicas do metal base;
- o gás de proteção empregado;
- o tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- o tipo do projeto de junta.

Como uma forma de simplificar a escolha correta do arame, a AWS (*American Welding Society*) criou uma classificação dos arames de soldagem de forma que os mesmos produzam o melhor resultado para determinados materiais base de acordo com todos os requisitos acima citados. Outras normas como a API (*American Petroleum Insitute*), utilizada para a fabricação de tubulações, e ASME (*American Society for Mechanical Engineers*), utilizada para a fabricação de vasos de pressão e caldeiras, se utilizam da classificação AWS para a escolha dos consumíveis mais adequados conforme os requisitos necessários (SOUZA, 2011).

Deve se citar o fato que as especificações de soldagem da AWS e do ASME são idênticas, sendo a única diferença que a AWS trata as especificações como A5.(número da especificação) enquanto o ASME II, parte C, acrescenta o termo SF antes da especificação A5 (SFA 5.), sendo o termo SF uma abreviação do termo inglês *Specification* (SOUZA, 2011).

### **3.2.1. Especificação e classificação dos arames**

As especificações AWS agrupam os diferentes metais de adição conforme sua composição química e/ou o processo de soldagem a ser utilizado. Alguns requisitos básicos são exigidos pela AWS de forma que os consumíveis atendam as propriedades mecânicas, a composição química e a sanidade do metal depositado (SOUZA, 2011).

Ainda segundo Souza (2011), além de classificar os consumíveis de soldagem, a norma AWS ainda exige que alguns requisitos de fabricação, critérios de aceitação, ensaios específicos para cada tipo de consumível, embalagem, identificação, certificação, garantias e validade, sejam atendidos.

Já a classificação AWS fornece informações a respeito das propriedades mecânicas, sua composição química, o seu tipo de revestimento e inclusive as características operacionais que devem ser utilizadas (SOUZA, 2011).

Resumidamente, a especificação determina as características dos consumíveis e dá garantias sobre suas propriedades enquanto a classificação define de maneira lógica qual o consumível deve ser designado para o projeto específico, conforme pode ser verificado na tabela 3.3.

**Tabela 3.3 - Especificação AWS dos diferentes tipos de arame (SOUZA, 2011)**

<b>Designação AWS / ASME II parte C</b>	<b>Especificação</b>
<b>A5.1 – SFA 5.1</b>	Eletrodos de Aço Carbono para o Processo de Soldagem Eletrodo Revestido.
<b>A5.2 – SFA 5.2</b>	Varetas de Aço Carbono e Baixa Liga para o Processo de Soldagem Oxi-Gás.
<b>A5.4 – SFA 5.4</b>	Eletrodos de Aço Inoxidável para o Processo de Soldagem Eletrodo Revestido.
<b>A5.5 – SFA 5.5</b>	Eletrodos de Aço tipo Baixa Liga para o Processo de Soldagem Eletrodo Revestido.
<b>A5.9 – SFA 5.9</b>	Eletrodos Nus e Varetas de Aço Inoxidável para os Processos de Soldagem GMAW, PAW, GTAW e SAW.
<b>A5.17 – SFA 5.17</b>	Fluxos e Eletrodos de Aço Carbono para ao Processo de Soldagem Arco Submerso.
<b>A5.18 – SFA 5.18</b>	Eletrodos e Varetas de Aço Carbono para Processo de Soldagem com Proteção a Gasosa.
<b>A5.20 – SFA 5.20</b>	Eletrodos de Aço Carbono para o Processo de Soldagem Arame Tubular (FCAW)
<b>A5.22 – SFA 5.22</b>	Eletrodos de Aço Inoxidável para o Processo de Soldagem Arame Tubular (FCAW)
<b>A5.29 – SFA 5.29</b>	Eletrodos de Aço tipo Baixa liga para o Processo de Soldagem Arame Tubular (FCAW)
<b>A5.32 – SFA 5.32</b>	Gases de Proteção para os Processos de Soldagem GTAW, GMAW, FCAW e PAW.

Como o foco do estudo em questão é a comparação entre dois arames de especificação AWS A5.18, serão dada maior atenção para a classificação destes consumíveis. Dentro da especificação acima mencionada, estão englobados os eletrodos sólidos ou compostos (tubular com núcleo metálico - *metal cored*) e varetas para os processos GMAW e GTAW, para a soldagem de aço carbono (SOUZA, 2011).

Os eletrodos são classificados, obrigatoriamente da seguinte forma:

### ER XX Y - Z

**ER** - designa o eletrodo em forma de arame ou vareta

**XX** - designa o limite de ruptura para o ensaio de tração em Ksi

**Y** - pode ser a letra **S** para eletrodos sólidos ou **C** para eletrodos compostos

**Z** - designa a faixa de composição química

A seguir são mostradas tabelas com as propriedades mecânicas e químicas dos principais eletrodos e varetas de soldagem para a especificação AWS A5.18.

**Tabela 3.4** - Propriedades mecânicas de varetas e eletrodos segundo AWS 5.18 (SOUZA, 2011)

Classificação AWS	Gás de Proteção (a)	Ensaio de Tração		A (%)	Ensaio de Impacto
		LR Ksi – MPa	LE Ksi – MPa		
ER70S-3	SG – C	70 – 480	58 – 400	22	27J a -20°C
ER70S-6	SG – C	70 – 480	58 – 400	22	27J a -30°C
ER70S-G	SG – C	70 – 480	58 – 400	22	(c)
E70C-6(X)	(b)	70 – 480	58 – 400	22	27J a -30°C
E70C-G(X)	(b)	70 – 480	58 – 400	22	(c)

(a) - Para GTAW, utilizar Argônio

(b) - definido pelo fornecedor/cliente. O (x) pode assumir a letra C quando se utiliza CO<sub>2</sub> ou M, quando se utiliza uma mistura de gases

(c) - definido pelo fornecedor/cliente

**Tabela 3.5** - Propriedades químicas de varetas e eletrodos segundo AWS 5.18 (SOUZA, 2011)

Classificação AWS	Análise Química									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-3	0,06 ~ 0,15	0,9 ~ 1,4	0,45 ~ 0,75	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5
ER70S-6	0,06 ~ 0,15	1,4 ~ 1,85	0,8 ~ 1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5
ER70S-G	Não especificado - acordo fornecedor/cliente									
E70C-6(X)	0,12	1,75	0,9	0,03	0,03	0,5	0,2	0,3	0,08	0,5
E70C-G(X)	Não especificado - acordo fornecedor/cliente									

A forma de análise química dos eletrodos sólidos ou varetas, segundo a norma AWS e citado por Souza (2011), é a retirada material do próprio produto para a análise.

### 3.2.2. Influência dos elementos de liga nos arames

Primeiramente, antes de abordar as especificidades dos arames para a soldagem MIG/MAG, deve-se dizer que existem similaridades entre os arames ferrosos quanto aos elementos de liga adicionados ao ferro. Estes elementos de liga, na soldagem MIG/MAG, tem a função de desoxidantes da poça de fusão além de auxiliar nas propriedades mecânicas do cordão de solda. A desoxidação é resultante da combinação do oxigênio com um elemento da poça de fusão, formando um filme vítreo, mais conhecido como a escória da soldagem MIG/MAG, que se localiza na superfície do cordão de solda. Em contra-partida a remoção do oxigênio é essencial para evitar um dos principais defeitos causados por este elemento, a porosidade (FORTES, 2005).

O arame de solda deve também atender certas demandas dos processos de soldagem como a estabilidade do arco, o tipo de transferência de material e as

características de solidificação. Saunders (1997), cita o silício e o manganês como os principais elementos de liga desoxidantes acrescentados no arame de soldagem como forma de reduzir o fenômeno de oxidação.

Fortes (2005) detalha em sua apostila um pouco mais as especificidades dos elementos de liga nos arames de soldagem.

**Silício (Si)** - é o elemento de liga mais comumente utilizado como desoxidante nos arames para a soldagem MIG/MAG. A faixa de aplicação de Silício nos arames de soldagem variam de 0,4% a 1,0%, dependendo da aplicação específica a qual o arame será empregado, apresentando uma desoxidação muito boa. Para quantidades maiores de silício é possível observar um aumento da resistência mecânica do cordão de solda, com uma pequena redução da ductilidade e tenacidade. Entretanto, para concentrações acima de 1,0% - 1,2% no metal de solda, o mesmo pode se tornar susceptível a fissuras.

**Manganês (Mn)** - tem como propriedade o aumento da desoxidação e também da resistência mecânica. É encontrado nos arames de soldagem com concentrações que variam de 1,0% a 2,0%. Quanto maior a sua concentração, maior será também a sua resistência mecânica, sendo sua influência maior do que a do silício neste quesito, além de reduzir a susceptibilidade à fissuração a quente.

**Alumínio (Al), Titânio (Ti) e Zircônio (Zr)** - estes três elementos são desoxidantes extremamente poderosos, não sendo encontrados teores totais dos três elementos maiores do que 0,20%. Nesta faixa é possível observar também aumento da resistência mecânica do cordão de solda.

**Carbono (C)** - este é o elemento que tem maior influência em relação às propriedades mecânicas e microestruturais. Para os arames de soldagem MIG/MAG, as concentrações de carbono se mantêm entre 0,05% e 0,12%. Esta faixa de

concentração de carbono proporciona uma resistência mecânica necessária ao material, sem afetar a ductilidade e a tenacidade. Quando o teor de carbono ultrapassar 0,12% a tendência de ocorrer porosidade no cordão de solda aumenta, devido ao metal base perder carbono na forma de CO. Entretanto o acréscimo de desoxidantes adicionais auxiliam a reduzir este fenômeno.

**Níquel (Ni), Cromo (Cr) e Molibdênio (Mo)** - estes três elementos são frequentemente utilizados para melhorias das propriedades mecânicas e/ou resistência à corrosão. São mais utilizados em arames de solda para aços inoxidáveis, entretanto podem ser encontrados também em arames de aço carbono, em quantidades bem reduzidas, como forma de aumentar a resistência e a tenacidade do depósito. Quando a soldagem é realizada com a utilização de argônio e com teores de oxigênio variando de 1% a 3% a composição química do metal depositado não distingue muito em relação à composição química do arame de soldagem. No entanto, quando se utiliza o CO<sub>2</sub> como gás de proteção observa-se uma redução nos teores de silício, manganês e outros elementos desoxidantes. Já os teores de níquel, cromo molibdênio e carbono permanecem constantes.

### 3.3. Formato do cordão de solda

Na soldagem, o formato do cordão de solda está relacionado com a fusão do metal de adição e sua interação com o metal base. Esta fusão pode ocorrer devido à liberação de energia devido à desaceleração de cargas (íons e elétrons) que incidem no metal base (no caso dos processos TIG, feixes de elétrons, laser, plasma, etc.). ou através de outras fontes de energia. Neste caso podemos citar a ionização de elementos químicos que compõem a atmosfera do arco elétrico, ocorrendo a

aceleração da parte fundida do metal de adição, em forma de gotas, em direção à poça de fusão, além da energia proveniente de reações de ionização e dissociação de elementos químicos que compõem os gases de proteção da poça de fusão durante a soldagem, no caso da soldagem realizada através de eletrodo revestido, arame tubular, arame sólido, arco-submerso, etc. (FERNANDES, 2004).

### 3.3.1. Energia térmica produzida por partículas desaceleradas

Na soldagem à arco elétrico, o formato do cordão de solda, assim como a diluição e o volume do metal fundido, são determinados, em parte, pela energia fornecida pelas partículas aceleradas e carregadas.

A densidade de elétrons ( $J$ ), emitidos pelo aquecimento do catodo (emissão termiônica) e pelo campo elétrico na mancha catódica (emissão por campo), pode ser determinada pela equação de Richardson-Schotky (LUCAS, *apud* FERNANDES, 2004):

$$J = AT^2 \exp \left( \frac{-e\phi}{kT} + \frac{e^2 E_e^2}{kT} \right) \quad (3.1)$$

Na equação acima, o primeiro termo dentro da função exponencial está relacionado com a emissão termiônica de elétrons ( $\phi$ ), enquanto o segundo termo está associado à emissão por campo elétrico ( $E_e$ ).

Realizando a análise do primeiro termo dentro da função exponencial pode-se perceber que quanto menor for a função trabalho termiônico ( $\phi$ ), menor será a energia de emissão de um elétron termionicamente e, assim, maior ser a densidade

de corrente. Ou seja, maior será a quantidade de elétrons emitidos e, conseqüentemente, maior será a energia liberada para o metal base.

Na soldagem com adição de material, como é o caso da solda MIG/MAG, os elétrons são emitidos através da ação de um campo elétrico. Os elétrons emitidos e acelerados se chocam com átomos presentes na atmosfera do arco, composta pelos átomos do gás de proteção e elementos de liga que compõem o metal base e que evaporaram com a transferência de energia. Estes átomos podem se ionizar, gerando elétrons, desviando assim a trajetória dos elétrons incidentes. Este é o fenômeno responsável para que o arco elétrico se mantenha aberto. Assim sendo, quanto menor for o potencial de ionização, maior será a facilidade em manter o arco elétrico aberto (FERNANDES, 2004).

Segundo Ecker *apud* Fernandes (2004), a corrente do catodo é determinada através do fluxo de íons positivos através do catodo, liberando a potência ( $I_+ \cdot U_c$ ) para o metal base. A energia adicional é absorvida pelo metal base de forma a neutralizar estes íons, dada por ( $I_+ \cdot U_i$ ).

Em contrapartida, a energia perdida pelo metal base ocorre devido à emissão catódica ( $I_- \cdot \phi$ ), a emissão por campo ( $I_- \cdot E_c$ ) e a neutralização dos íons positivos ( $I_+ \cdot \phi$ ).

Assim sendo, segundo Fernandes (2004), o balanço energético do metal base através do mecanismo catódico é dada por:

$$H_c = I_+(U_c + U_i) - I\phi - I_-E_c \quad (3.2)$$

onde:

$$I = I_+ + I_- \quad (3.3)$$

O mecanismo de transferência na região do anodo é bem mais simples do que descrever do que na região do catodo, haja vista que na região do anodo há uma corrente que é transferida somente por elétrons (FERNANDES, 2004).

No caso da soldagem MIG/MAG o calor desenvolvido através do aquecimento anódico é dado por (LESNEWICH *apud* FERNANDES, 2004):

$$H_a = c(V_a + \phi)I \quad (3.4)$$

E o calor desenvolvido no aquecimento catódico é dado por (LESNEWICH *apud* FERNANDES, 2004):

$$H_c = [(f_g + f_m)(V_c - \phi) + f_g V_{ig} + f_m V_{im} - f_e \phi]I \quad (3.5)$$

Ainda segundo Fernandes (2004), para o aquecimento catódico ocorrem reações no choque dos íons positivos e a neutralização desses íons na superfície do catodo, liberando energia. Existem também reações que absorvem energia, como a emissão de elétrons e a neutralização de íons positivos pelos elétrons no catodo.

O calor gerado pela radiação do arco e da poça de fusão pode ser desprezado, devido aos aquecimentos de maior representação providos do eletrodo (FERNANDES, 2004).

### 3.3.2. Energia térmica das gotas do metal de adição transferidas para a poça de fusão

A geração de energia para que ocorra a fusão do metal base não ocorre somente através das movimentações de cargas, mas também através das gotas metálicas que são transferidas, no caso de processos que utilizam eletrodos consumíveis, as quais são uma fonte extra de energia que auxiliam nesse processo (FERNANDES, 2004).

Esta quantidade de calor que é transferida para as gotas metálicas é determinada pela radiação e convecção do arco elétrico além do efeito do aquecimento gerado pela resistência através da extensão do arame, fenômeno este denominado como efeito Joule (FERNANDES, 2004).

$$E_{joule} = UI = RI^2 = \frac{\rho_{arame} l}{s} I^2 \quad (3.6)$$

Realizando a análise da equação acima, podemos perceber que, considerando uma corrente elétrica com valor constante, temos um aumento da energia fornecida através do efeito Joule quando se aumenta a resistividade do arame utilizado ( $\rho$ ) ou a distância entre o bico de contato e a peça (*stick-out*), ou ainda quando se diminui a secção transversal do arame (FERNANDES, 2004).

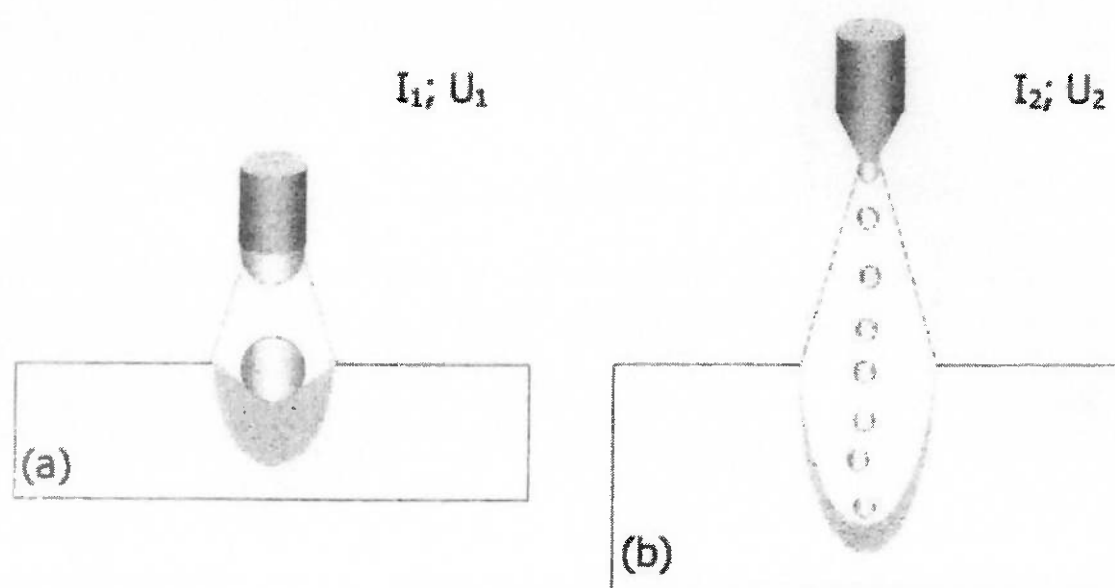
O aquecimento produzido pelo arco elétrico é uma relação entre a área da superfície externa e o volume da gota metálica fundida. Quanto menor for esta relação, maior será a temperatura da gota, considerando fixo o tempo de exposição da gota ao arco elétrico. Assim sendo, as gotas são dirigidas em direção à poça de

fusão a uma temperatura muito elevada, auxiliando a fusão do metal base, modificando o formato do cordão de solda (FERNANDES, 2004).

Durante a exposição ao arco elétrico as gotas são aceleradas devido a ação da força de arraste do arco elétrico, a qual está associada à força eletromagnética de constrição do arco. Assim sendo, quanto menor for o tamanho da gota, maior será a sua velocidade (FERNANDES, 2004).

Em seu experimento, Esser e Walter *apud* Fernandes (2004), mostraram que, para processos de soldagem que utilizam eletrodos consumíveis, o mecanismo de penetração está relacionado com a movimentação das gotas que incidem na poça de fusão. No caso do processo MIG/MAG, a penetração maior é obtida quando ocorre uma transferência por *spray*, quando gotas menores são aceleradas em velocidades elevadas e com uma frequência de destacamento maior que o observado em uma transferência globular.

O efeito da penetração ainda é acentuado pela ação da pressão do arco elétrico sobre a poça de fusão. Esta pressão causa uma deformação na superfície da poça de fusão, fazendo com que a quantidade de material no local da incidência da gota seja menor do que nas regiões anteriores, as quais se encontram solidificadas. Na figura 3.7, é possível observar a diferença da ação da pressão do arco entre dois processos distintos, *spray* e globular (FERNANDES, 2004).

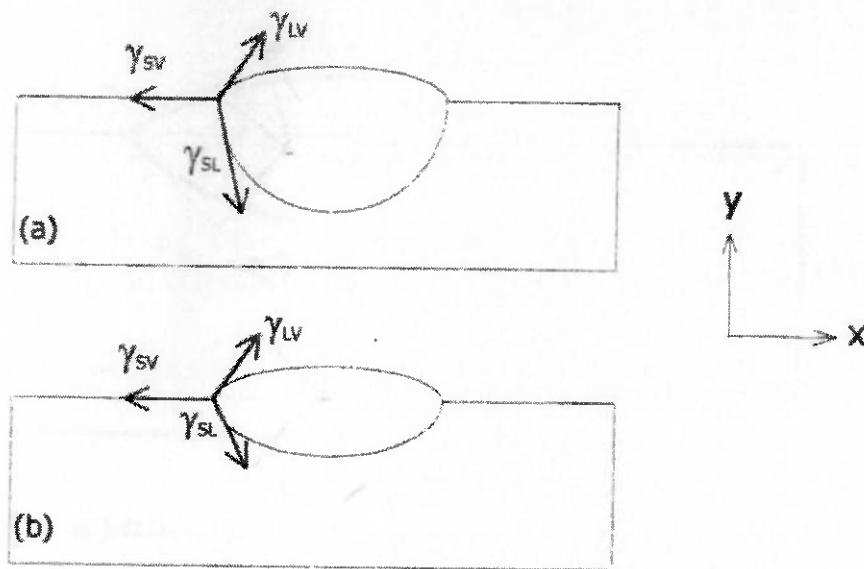


**Figura 3.7** - Esquema do mecanismo de penetração no processo MIG. (a) transferência globular e (b) transferência por *spray* (FERNANDES, 2004).

O formato do cordão de solda é determinado pelo balanço da energia introduzida na poça de fusão e transmitida pelo metal base, que está relacionada à velocidade de resfriamento, sem que sejam consideradas outras perdas de energia (FERNANDES, 2004).

### 3.3.3. Efeito do balanço de tensão superficial no formato do cordão

Além de todos os efeitos acima citados, deve ser considerado ainda como um fator que influencia o formato do cordão as tensões superficiais que atuam na linha de contato do cordão de solda com o metal base, conforme demonstrado na figura 3.8. Este efeito está relacionado com a composição química do metal de adição, a alteração da composição química provocada pela diluição do metal base, além da composição química do gás de proteção utilizado na soldagem (HAZLETT, ROPER *apud* FERNANDES, 2004).



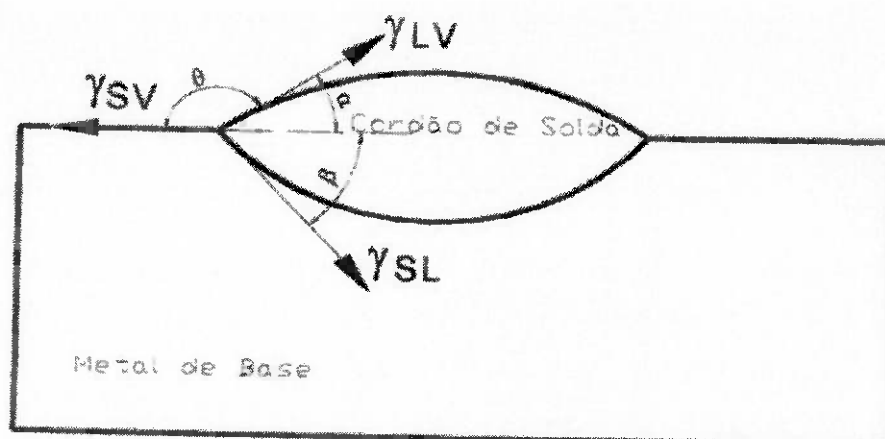
**Figura 3.8** - Balanço de tensões superficiais e seu efeito no formato do cordão (FERNANDES, 2004).

Conforme mencionado por Fernandes (2004), a penetração de solda está relacionada com a magnitude e o ângulo formado. Assim sendo, supondo que as tensões superficiais são vetores, e fazendo um equilíbrio de tensões no ponto da linha de contato, obtém-se as seguintes equações:

$$\frac{\gamma^{SV}}{\gamma^{LV}} = \frac{\text{sen}\beta \cos\alpha}{\text{sen}\alpha} + \cos\beta \quad (3.7)$$

$$\frac{\gamma^{LV}}{\gamma^{SL}} = \frac{\text{sen}\beta}{\text{sen}\alpha} \quad (3.8)$$

Conforme a linha de contato se desloca para a direita ou para a esquerda, no eixo x, a largura do cordão é modificada. Da mesma forma, uma resultante maior ou menor em direção ao eixo y pode ocorrer alterações na penetração de solda, conforme demonstrado na figura 3.9 (FERNANDES, 2004).



**Figura 3.9** - Tensões superficiais e ângulos de contato (FERNANDES, 2004).

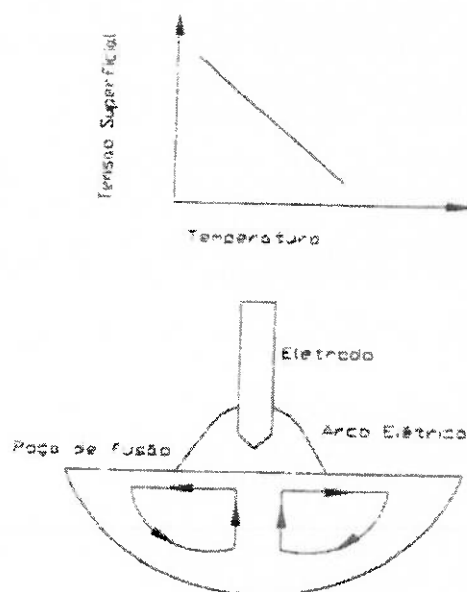
Através da figura acima pode-se verificar que o que determina a largura do cordão é a diferença entre as tensões superficiais  $\gamma^{SV}$  e as componentes vetoriais horizontais das tensões superficiais  $\gamma^{LV}$  e  $\gamma^{SL}$ . Conforme a intensidade destas tensões, o cordão pode ser mais largo, no caso de  $\gamma^{SV}$  seja maior do que as componentes vetoriais horizontais de  $\gamma^{LV}$  e  $\gamma^{SL}$  (FERNANDES, 2004).

Da mesma forma, a penetração é determinada pela diferença entre as componentes vetoriais verticais das tensões superficiais  $\gamma^{LV}$  e  $\gamma^{SL}$ . Quanto maior for a componente vertical da tensão  $\gamma^{SL}$ , maior será a penetração de solda (FERNANDES, 2004).

A geometria do cordão de solda também é influenciada pela convecção forçada da poça de fusão, devido à agitação eletromagnética, e também pela convecção induzida, devido à variação da tensão superficial e o gradiente de temperatura na poça de fusão. De uma forma geral, a convecção induzida devido a tensão superficial tem uma maior influência comparando com a convecção devido à passagem de corrente elétrica no metal fundido. Assim sendo, a convecção global da poça de fusão no sentido horário irá promover um cordão de solda mais largo e

com penetração baixa, devido a movimentação do metal líquido superaquecido para as regiões mais superiores e periféricas do cordão, enquanto o metal mais resfriado se movimenta em direção a raiz do cordão (FERNANDES, 2004).

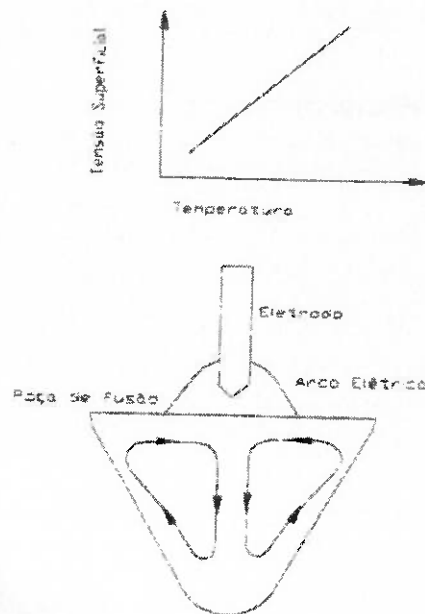
O sentido de circulação da poça de fusão está relacionado com a variação de tensão superficial líquido/vapor com a temperatura. Quando a tensão superficial diminui de acordo com a temperatura, a poça de fusão gira no sentido horário. Este fenômeno normalmente ocorre na ausência de elementos ativadores como o oxigênio e o enxofre (HEIPLE & ROPLER *apud* FERNANDES, 2004). Neste caso, o metal líquido estará em contato com a superfície superior do cordão, gerando um alargamento do mesmo com uma menor penetração, conforme demonstrado na figura abaixo.



**Figura 3.10** - Efeito da variação da tensão superficial com a temperatura ( $\frac{d\gamma}{dt} < 0$ ) sobre o formato do cordão (Heiple & Roper *apud* FERNANDES, 2004).

No caso da presença de elementos tensoativos nos aços, como o oxigênio, enxofre e silício, o gradiente de tensão superficial irá aumentar de acordo com o

aumento da temperatura, linearmente, gerando um cordão mais estreito e com uma penetração maior, conforme demonstrado na figura abaixo (FERNANDES, 2004).



**Figura 3.11** - Efeito da variação da tensão superficial com a temperatura ( $\frac{d\gamma}{dt} > 0$ ) sobre o formato do cordão (Heiple & Roper *apud* FERNANDES, 2004).

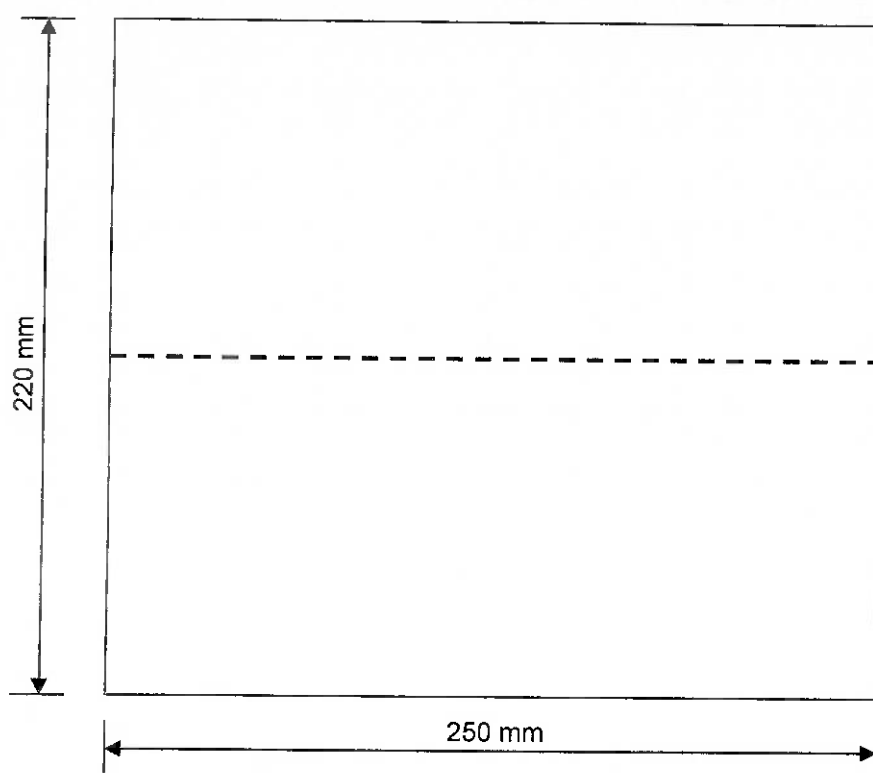
Assim sendo, podemos afirmar que diversos são os fatores que influenciam no formato do cordão, interagindo entre si simultaneamente. Dentre estes foram citados neste capítulo três deles, sendo um de origem elétrica (relacionado a quantidade de partículas carregadas), outro de origem física (relacionado com a movimentação das gotas transferidas ao metal base) e por último os fenômenos relacionados com as tensões superficiais e a composição química do conjunto metal base, metal de adição e gás de proteção (FERNANDES, 2004).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo foram utilizadas chapas de aço carbono, com espessura de 6mm e dimensões de 220 x 250 mm com composição química conforme tabela 4.1:

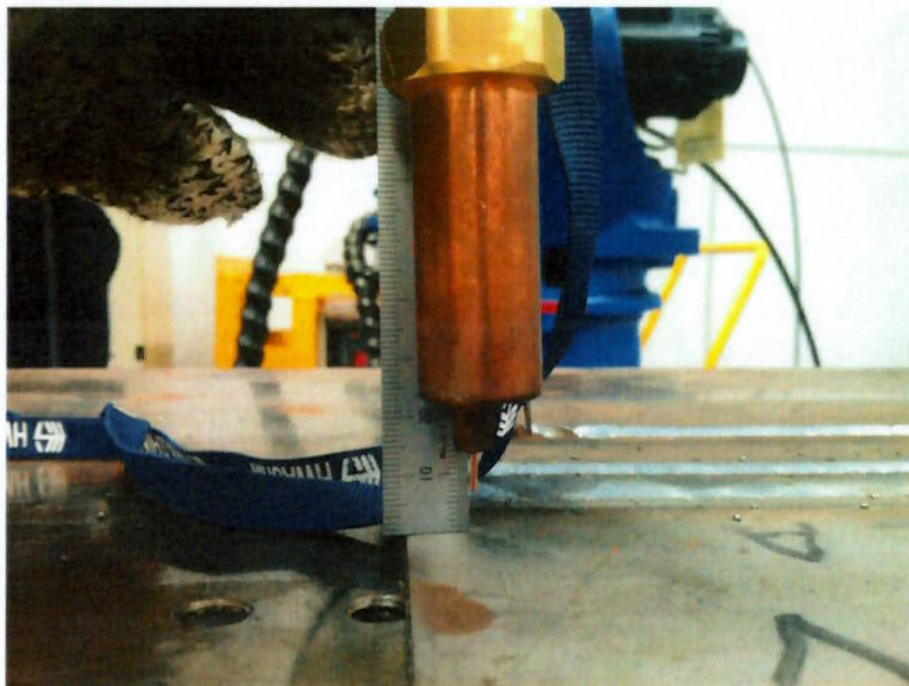
**Tabela 4.1** - Composição química do metal base utilizado no estudo (% do peso)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr	Ni	N	Nb	V
0,150	0,010	0,590	0,028	0,003	0,030	0,001	0,020	0,010	0,0033	0,0001	0,001



**Figura 4.1** - Dimensão da chapa utilizada no estudo (a linha tracejada representa aproximadamente a posição dos cordões de solda)

Os cordões de solda foram feitos sobre a chapa utilizando de um robô de seis eixos, permanecendo constante a distância entre o bico de contato e a chapa (*stick-out*) em torno de 15 mm e com o arame perpendicularmente ao metal base, sem que a soldagem fosse executada pelo método "puxado" ou "empurrado".



**Figura 4.2** - *Stick-out* utilizado para a soldagem dos cordões

Os arames utilizados no presente estudo são dois arames sólidos de mesma classificação e especificação (AWS 5.18 ER70S-6), com diâmetro de 1,2mm, porém com uma diferença em sua proteção contra oxidação. O primeiro deles, é um arame comumente utilizado em diversas empresas, o qual possui a cobertura de cobre ao seu redor, enquanto o segundo possui uma camada de produto anti-oxidante aparentando, visualmente, não possuir proteção alguma.

**Tabela 4.2** - Composição química dos arames de solda conforme catálogo dos fabricantes

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>
Arame com cobre	0,06 a 0,15	0,8 a 1,15	1,4 a 1,85	Máx 0,025	Máx 0,035	Máx 0,5
Arame sem cobre	0,1	0,9	1,5	-	-	-

A soldagem foi realizada utilizando-se de uma mistura gasosa com concentrações em torno de 90% Ar e 10% CO<sub>2</sub> e uma vazão de gás em torno de 17 l/min.



**Figura 4.3** - Vazão de gás durante a soldagem

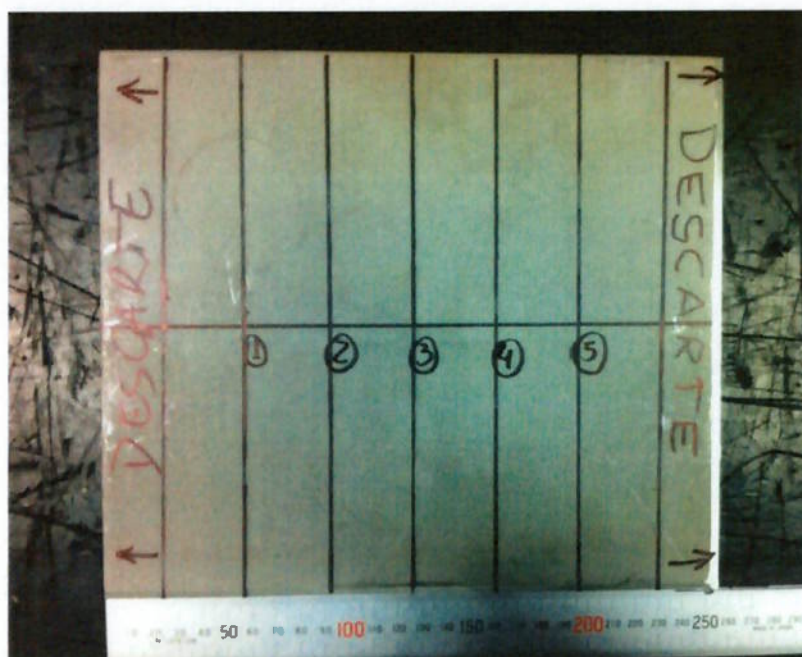
Os parâmetros de soldagem foram determinados a partir dos parâmetros utilizados em um dos processos de soldagem da empresa, variando o valor para 10% acima deste valor e 10% abaixo deste valor, conforme tabela abaixo, permanecendo constante a velocidade de soldagem (70 cm/min).

**Tabela 4.3** - Parâmetros utilizados na soldagem e a respectiva nomenclatura adotada para os diferentes tipos de arame.

	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Arame com Cobre</b>	<b>Arame sem Cobre</b>
<b>Parâmetro inicial</b>	220	24	C1	SC1
<b>10% abaixo</b>	198	21,6	C2	SC2
<b>10% acima</b>	242	26,4	C3	SC3

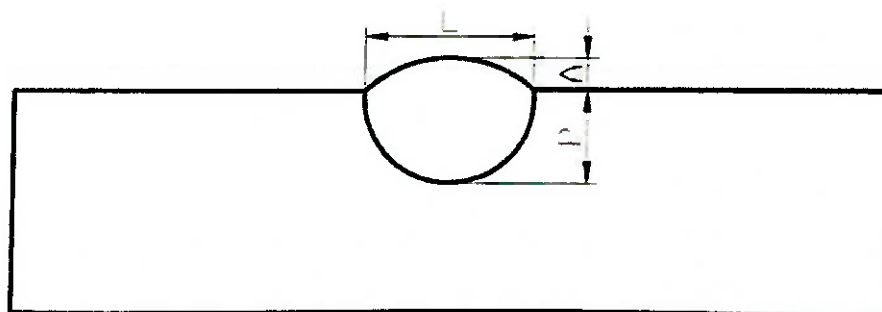
Foram definidos cinco pontos para comparação e assim feitos marcações nas chapas de forma que as mesmas fossem cortadas todas no mesmo ponto e assim realizar a comparação do formato do cordão para os diferentes parâmetros de soldagem utilizados e os dois diferentes arames, sendo descartadas as duas

extremidades (25 mm de cada lado) desprezando a abertura do arco e o fechamento do mesmo não influenciarem nos resultados.



**Figura 4.4** - Definição dos pontos de comparação do estudo (1 a 5).

Para o estudo do formato do cordão foram determinadas três medidas para comparação. Para cada seção transversal determinada conforme figura 4.4 acima será verificado os valores de largura (L), penetração (P) e altura do reforço do cordão (A), conforme demonstrado na figura 4.5 abaixo.



**Figura 4.5** - Esquema das medidas de altura, largura e penetração do cordão de solda (FERNANDES, 2004).

Será analisado também para cada ponto pré-definido em cada chapa as tensões na linha de contato do cordão com o metal base, conforme figura 3.9, sendo determinados os ângulos formados entre o cordão de solda e o metal base, no ponto de contato, as quais influenciam na penetração de solda.

Desta forma, considerando dois tipos diferentes de arame, três parâmetros distintos para cada arame e cinco pontos distintos em cada cordão feito, tem-se um total de 30 corpos de prova para análise das questões levantadas e propostas neste estudo, de forma a verificar se há diferença entre os dois arames conforme ocorre a variação dos parâmetros de soldagem.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

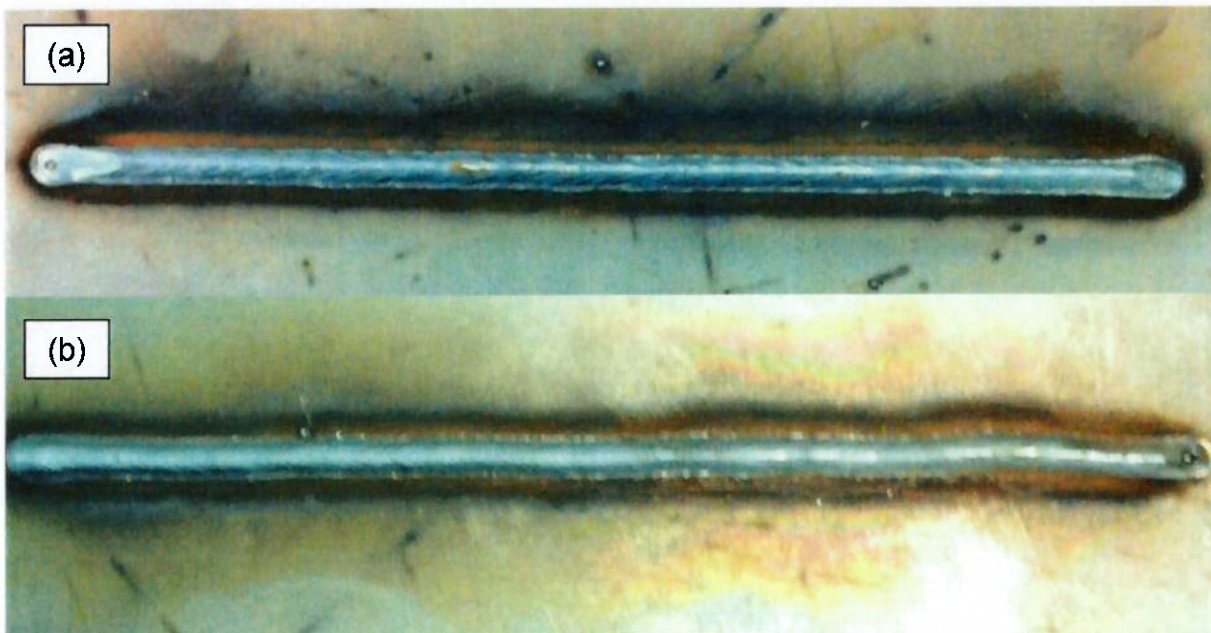
### 5.1. Aspecto visual do cordão

Logo após a soldagem, observou-se a diferença visual dos cordões de solda utilizando-se os dois diferentes tipos de arame e comparando entre si os cordões soldados com os mesmos parâmetros.

Observa-se através das figuras 5.1, 5.2 e 5.3 que os cordões de solda realizados com o arame coberto com cobre tem uma quantidade de silicatos e uma área de carepa ao redor do cordão maior do que o cordão realizado com o arame sem a cobertura de cobre. Considerando que tanto o silicato quanto a carepa são gerados a partir de óxidos, percebe-se que a ação do oxigênio durante a soldagem com o arame com a cobertura de cobre é maior do que a realizada com o arame sem a cobertura de cobre, lembrando que todas as variáveis foram mantidas constantes, sendo alterado apenas o tipo de arame utilizado.



**Figura 5.1** - Comparação visual entre os cordões de solda, utilizando-se parâmetros de 220 A e 24 V; (a) arame com cobertura de cobre, (b) arame sem cobertura de cobre



**Figura 5.2** - Comparação visual entre os cordões de solda, utilizando-se parâmetros de 198 A e 21.6 V; (a) arame com cobertura de cobre, (b) arame sem cobertura de cobre

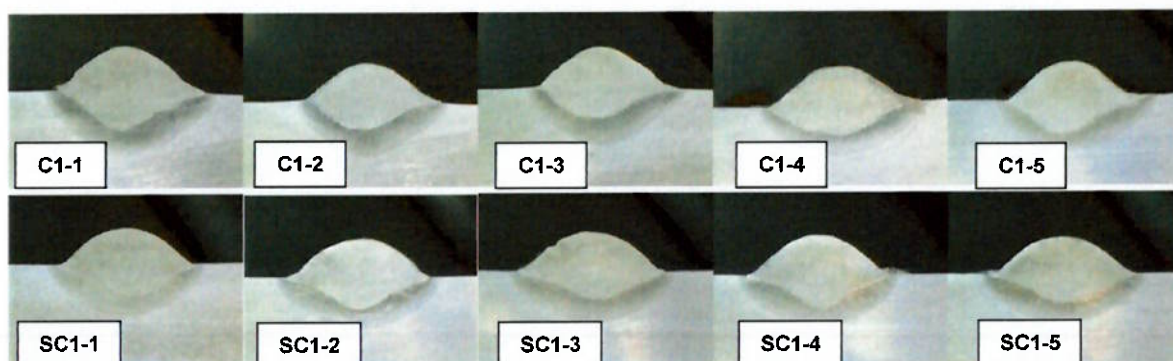


**Figura 5.3** - Comparação visual entre os cordões de solda, utilizando-se parâmetros de 242 A e 26,4 V; (a) arame com cobertura de cobre, (b) arame sem cobertura de cobre

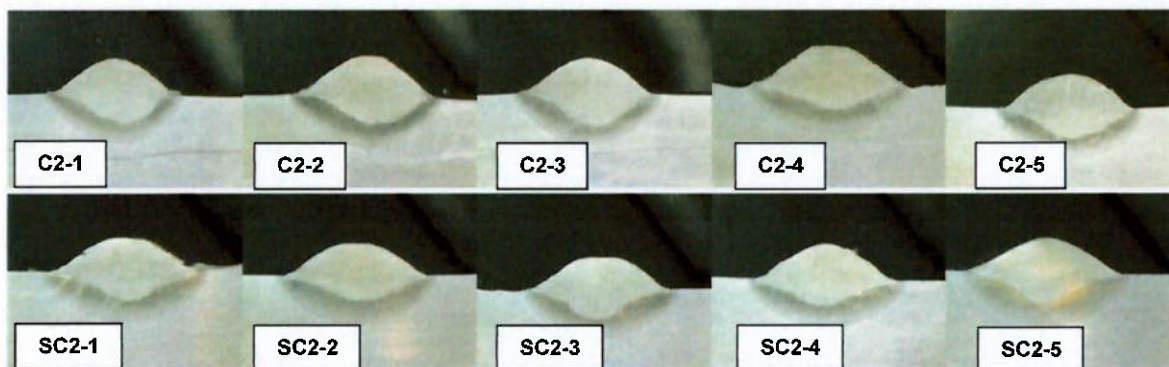
## 5.2. Formato do cordão depositado

Quanto à questão da formação do cordão, foram feitas as análises para cada um dos cinco pontos determinados previamente, para cada cordão de solda realizado, gerando assim 30 macrografias a serem analisadas a questão da penetração do cordão de solda, o reforço do cordão e a sua largura, além dos ângulos formados na linha de contato do cordão, para assim determinar as possíveis variações entre as razões das tensões superficiais.

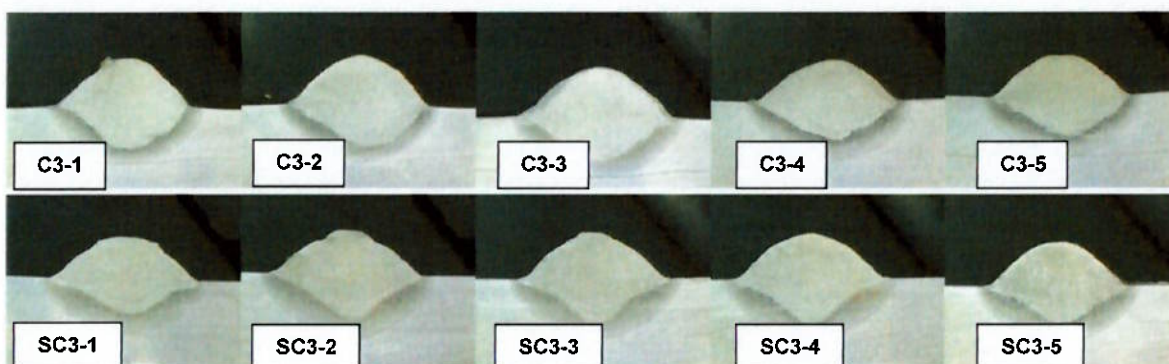
Cada um desses pontos está disposto nas figuras a 5.4, 5.5 e 5.6, representados pelas suas respectivas macrografias. A partir destas macrografias, foi possível determinar os dados que serão expostos mais adiante neste mesmo capítulo.



**Figura 5.4** - Cordões de solda executados com 220A e 24V, para os diferentes arames: com cobertura de cobre (C1) e sem cobertura de cobre (SC1) para os cinco diferentes pontos de análise.



**Figura 5.5** - Cordões de solda executados com 198A e 21,6V, para os diferentes arames: com cobertura de cobre (C2) e sem cobertura de cobre (SC2) para os cinco diferentes pontos de análise.



**Figura 5.6** - Cordões de solda executados com 242A e 26,4V, para os diferentes arames: com cobertura de cobre (C3) e sem cobertura de cobre (SC3) para os cinco diferentes pontos de análise.

Visualizando as macrografias acima é possível perceber certas diferenças entre os cordões de solda, sempre realizando a comparação com relação o mesmo ponto e, assim, não sejam feitas comparações errôneas. Dentre estas diferenças, a mais marcante, e que é facilmente identificada, é o formato característico do cordão de solda de uma transferência de material em uma transição de curto circuito para *spray* quando são utilizados parâmetros em torno de 242A e 26,4V.

Entretanto o aspecto visual se torna muito superficial para a análise necessária a ser feita e assim possam ser tiradas conclusões, para isso então são necessários extrair dados para que não ocorram suposições, mas que se possa obter um resultado concreto.

Na tabela 9 é possível verificar os valores encontrados acima descritos, sendo nomeadas como C1, C2, C3, etc. conforme determinado na tabela 8, considerando as variações de tensão, corrente o tipo de arame utilizado.

Além dos valores da largura do cordão (L), penetração (P) e altura do reforço (A), foram determinados também os ângulos formados entre o cordão de solda e o metal base, conforme demonstrado na figura 3.9 anteriormente.

Através dos valores dos ângulos é possível obter a relação entre as tensões superficiais  $\gamma^{SV}/\gamma^{LV}$  e  $\gamma^{LV}/\gamma^{SL}$  e desta forma verificar a influência destas forças na formação do cordão de solda, com relação à sua largura e penetração.

**Tabela 5.1** - Valores encontrados para os diferentes pontos do mesmo cordão, considerando as variações de parâmetros e diferentes arames utilizados.

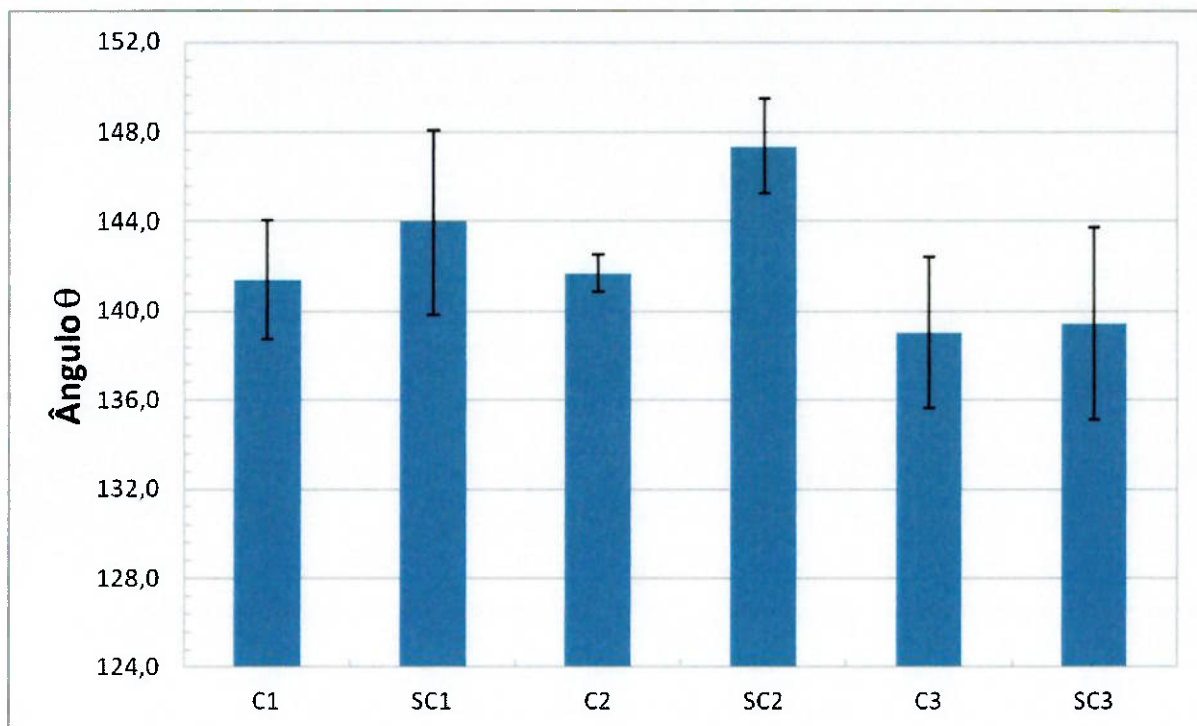
ITEM		L	P	A	$\theta$	$\alpha$	B	$\gamma^{SV}/\gamma^{LV}$	$\gamma^{LV}/\gamma^{SL}$
C1	1	7,68	2,14	2,27	147,45	32,55	40,53	1,78	1,21
	2	7,14	1,45	2,03	146,87	33,13	41,21	1,76	1,21
	3	7,33	1,49	2,20	138,28	41,72	50,83	1,50	1,16
	4	7,74	1,48	2,05	137,17	42,83	33,70	1,43	0,82
	5	7,09	1,64	1,99	137,26	42,74	38,40	1,46	0,92
C2	1	7,61	1,38	1,83	142,35	37,65	18,60	1,36	0,52
	2	6,66	1,49	1,70	139,72	40,28	24,45	1,40	0,64
	3	5,93	1,49	1,87	142,17	37,83	29,06	1,50	0,79
	4	7,12	1,53	2,01	143,91	36,09	36,86	1,62	1,02
	5	6,72	1,59	1,85	140,33	39,67	37,49	1,53	0,95
C3	1	7,14	2,11	2,00	142,20	37,80	31,07	1,52	0,84
	2	7,09	1,98	2,12	134,03	45,97	32,74	1,36	0,75
	3	6,77	2,11	2,48	147,04	32,96	41,18	1,77	1,21
	4	7,11	2,14	2,51	141,79	38,21	40,55	1,59	1,05
	5	7,68	2,18	2,51	130,09	49,91	39,97	1,31	0,84
SC1	1	6,85	1,53	1,83	137,56	42,44	33,23	1,44	0,81
	2	7,35	1,64	1,92	141,76	38,24	27,47	1,47	0,75
	3	7,42	1,35	2,05	145,27	34,73	19,94	1,43	0,60
	4	7,14	1,70	1,98	157,59	22,41	39,06	2,30	1,65
	5	7,33	1,49	1,85	137,68	42,32	25,95	1,38	0,65
SC2	1	7,44	1,49	1,70	147,91	32,09	20,62	1,50	0,66
	2	7,27	1,20	1,68	145,16	34,84	20,29	1,44	0,61
	3	6,89	1,59	1,62	145,64	34,36	24,82	1,52	0,74
	4	7,16	1,42	1,72	143,71	36,29	24,60	1,48	0,70
	5	7,75	1,53	1,87	154,39	25,61	24,89	1,79	0,97
SC3	1	7,53	1,68	2,22	153,92	26,08	22,02	1,69	0,85
	2	7,42	2,25	2,20	142,22	37,78	29,02	1,50	0,79
	3	7,61	2,20	2,37	130,28	49,72	31,68	1,30	0,69
	4	7,70	2,14	2,37	136,97	43,03	35,98	1,44	0,86
	5	7,20	1,90	2,20	139,43	40,57	32,40	1,47	0,82

De forma a analisar de forma mais simplificada os dados obtidos, foram extraídas as médias da largura, penetração e altura do reforço, bem como as razões das tensões superficiais. Além da média, foi obtido o desvio padrão de cada um dos tópicos listados, para analisar a abrangência dos valores a partir da média, conforme tabela 5.2.

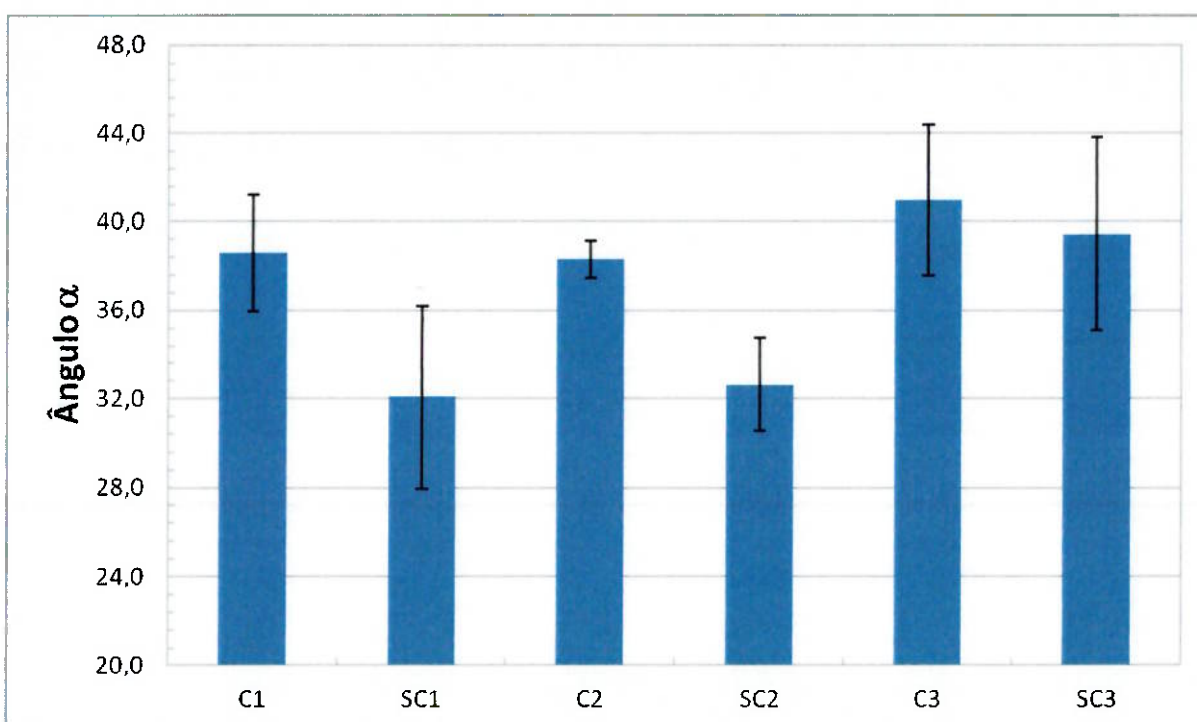
**Tabela 5.2** - Valores da média e desvio padrão relativos aos valores obtidos no experimento.

ITEM	L		P		A		$\gamma^{SV}/\gamma^{LV}$		$\gamma^{LV}/\gamma^{SL}$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
<b>C1</b>	7,40	0,30	1,64	0,29	2,11	0,12	1,59	0,17	1,06	0,18
<b>C2</b>	6,81	0,62	1,50	0,08	1,85	0,11	1,48	0,10	0,79	0,21
<b>C3</b>	7,16	0,33	2,10	0,08	2,32	0,25	1,51	0,18	0,94	0,19
<b>SC1</b>	7,22	0,23	1,54	0,14	1,93	0,09	1,60	0,39	0,89	0,43
<b>SC2</b>	7,30	0,32	1,45	0,15	1,72	0,09	1,54	0,14	0,74	0,14
<b>SC3</b>	7,49	0,19	2,03	0,24	2,27	0,09	1,48	0,14	0,80	0,07

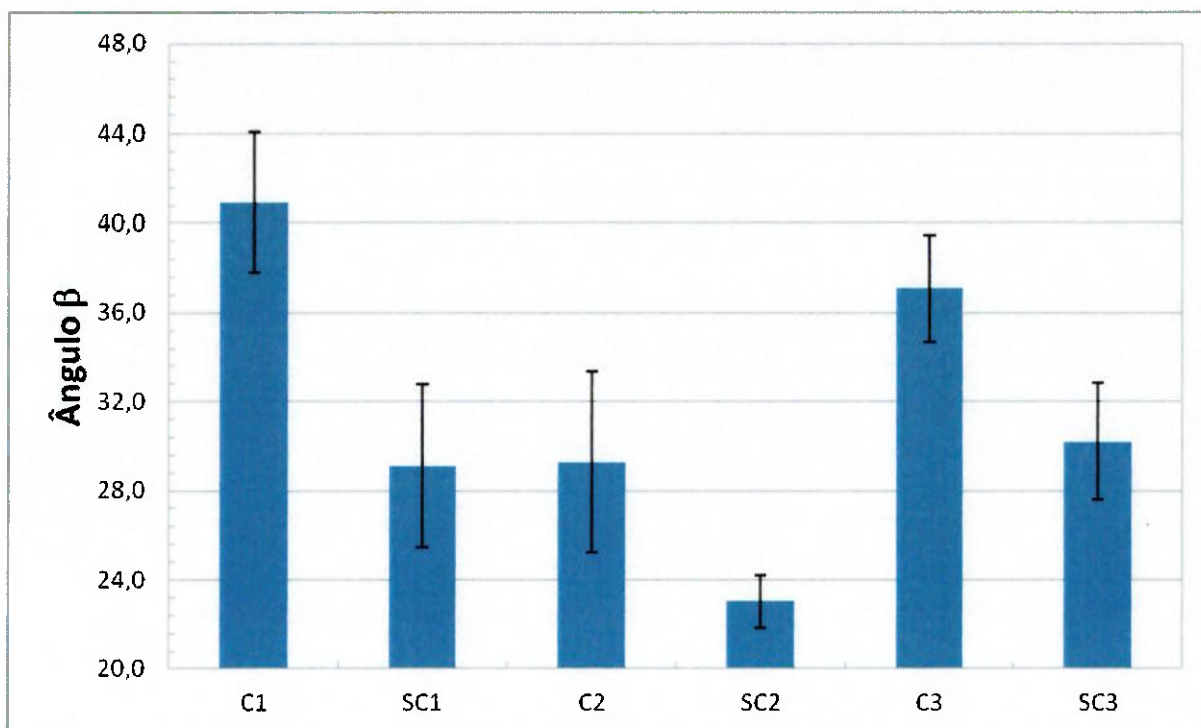
A partir das tabelas acima foram feitos gráficos (figuras 5.7, 5.8 e 5.9) de cada um dos ângulos formados ( $\theta$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ ), conforme figura 3.9, de forma a facilitar as análises comparativas entre os dois arames de solda e os seus respectivos ângulos formados através dos diferentes formatos de cordão.



**Figura 5.7** - Comparação da medida do ângulo  $\theta$  de acordo com o formato do cordão de solda.



**Figura 5.8** - Comparação da medida do ângulo  $\alpha$  de acordo com o formato do cordão de solda.



**Figura 5.9** - Comparação da medida do ângulo  $\beta$  de acordo com o formato do cordão de solda.

Através dos valores obtidos das médias e analisando os respectivos desvios, observa-se que utilizando o arame de soldagem com cobertura de cobre, obtém-se uma maior penetração do cordão de solda, o que pode ser reforçado através dos valores médios da razão entre as tensões superficiais  $\gamma^{LV}/\gamma^{SL}$ , sendo estas maiores para o arame com a cobertura de cobre do que para o arame sem a cobertura de cobre.

Em contra-partida, analisando o arame sem a cobertura de cobre, é possível verificar uma largura maior do cordão, bem como uma altura menor do seu reforço, o que pode ser enfatizado quando se observa os valores médios obtidos da razão entre as tensões superficiais  $\gamma^{SV}/\gamma^{LV}$ , comparando-as com os valores obtidos com os cordões realizados com a cobertura de cobre.

Ao mesmo tempo, ao analisar os gráficos feitos para a análise comparativa entre os ângulos formados, observa-se através dos gráficos de  $\theta$  e  $\alpha$  (figuras 5.7 e 5.8, respectivamente) que o reforço do cordão do arame sem a cobertura de cobre é

um pouco menor, já que os valores médios de  $\theta$  são sempre menores para os arames com a cobertura de cobre, ao se comparar com os arames sem a cobertura de cobre e utilizando-se dos mesmos parâmetros de soldagem. Bem como os valores de  $\alpha$  são maiores para os arames com a cobertura de cobre, realizando a mesma comparação anterior. Este mesmo resultado pode ser observado na tabela 5.2, onde os valores da média da altura do cordão é sempre menor para o arame sem a cobertura de cobre.

Ao se realizar a mesma comparação gráfica do ângulo  $\beta$  é possível também verificar valores menores para o caso dos arames sem a cobertura de cobre, sendo esta a maior diferença entre os dois tipos de arame, ao se comprar os mesmos parâmetros utilizados. Caso fosse analisado somente este dado poderíamos cometer um equívoco ao dizer que provavelmente a penetração seria menor para o caso do arame sem a cobertura de cobre, entretanto não é isso que é observado ao verificar os valores médios de penetração na tabela 5.2, os quais são muito próximos para ambos tipos de arame.

O que pode ainda ser observado através das figuras 5.4, 5.5 e 5.6, de modo a reforçar esta análise, é a diferença de formato de cordão entre os dois tipos de arame. O arame mais comumente utilizado pelas indústrias metalúrgicas tem um formato de cordão um pouco mais arredondado, enquanto o arame sem a cobertura de cobre tem um formato mais pontiagudo, característico de transferência de material por spray.

O que se pode afirmar, portanto, é que, os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  formados entre a superfície do material base e o cordão de solda são menores quando se utiliza o arame sem a cobertura de cobre o que, conseqüentemente, leva a afirmar que as tensões superficiais são menores para esse mesmo tipo de arame. Isso reforça a

teoria proposta por Fernandes (2004), que diz que quanto menor for o valor de  $\gamma^{SL}$ , menor será a penetração do cordão de solda.

Entretanto, vale enfatizar que, considerando os valores absolutos de penetração e largura do cordão, as diferenças obtidas entre os dois arames para a questão de penetração é muito pequena, girando em torno de 0,07 mm em média. Enquanto isso, para a questão da largura do cordão, esta diferença média entre os cordões tem um valor aproximado de 0,33 mm.

Outra análise que pode ser feita é com relação a área da seção transversal do cordão de solda. Verifica-se que a área aproximada dos cordões de solda feitos com o arame sem a cobertura de cobre são levemente maiores do que as áreas dos cordões feitos com o arame com a cobertura de cobre. Ou seja, isso reforça a tese de que é possível se obter uma transferência por *spray*, utilizando-se parâmetros mais baixos, ao se utilizar o arame sem a cobertura de cobre, já que quando se obtém a transferência por *spray* a taxa de deposição de material é maior e a quantidade de respingos gerados é menor, ou seja, uma maior quantidade de material é aproveitada, sendo transferido para a poça de fusão.

## 6. CONCLUSÃO

Com o presente estudo foi possível tirar algumas conclusões a respeito da utilização do acabamento superficial dos dois arames. Percebe-se que ao utilizar o arame sem a cobertura de cobre é obtido um cordão de solda mais limpo, sem tanto silicato vítreo e também uma carepa menor ao redor do cordão, o que para a indústria automobilística é bastante interessante, já que há a necessidade de remoção destes dois itens para uma qualidade maior de pintura das peças, reduzindo, portanto o custo de limpeza das peças.

Portanto, diversos são os fatores que fazem com que o arame sem a cobertura de cobre tenha suas vantagens sobre o arame comumente utilizado nas empresas metalúrgicas. Levando em consideração tanto o aspecto visual da solda, quanto a respeito da formação de cordão, verifica-se que não se pode limitar as vantagens do arame sem a cobertura de cobre apenas em relação à sua alimentação e o menor desgaste dos conduítes, roldanas, bico de contato, etc., mas também deve ser levado em consideração o principal objetivo ao realizar a soldagem, uma junção de qualidade com uma penetração satisfatória, conforme a norma utilizada, e se possível com uma menor geração de respingos, fatores estes que o arame sem a cobertura de cobre conseguiu atingir e superar o arame com cobre.

## 7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento deste trabalho, ao se comparar os dois arames de soldagem, de mesma classificação e especificação, entretanto com um diferencial quanto a sua proteção contra oxidação, além dos conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia de Soldagem, podem-se sugerir alguns trabalhos a serem desenvolvidos.

- Avaliação da quantidade de oxigênio dos cordões de solda;
- Análise da composição do material antioxidante do arame sem a cobertura de cobre;
- Estudo comparativo da quantidade de respingos gerados através dos dois arames de soldagem para diferentes parâmetros utilizados
- Estudo comparativo da escória vítrea, característica dos processos de soldagem MIG/MAG, verificando tanto a quantidade quanto o tamanho das escórias sobre os cordões de solda de mesmo comprimento.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, T. Solução - Edição Especial em comemoração aos 100 anos da ESAB. ESAB. 2005.
- CAMPOS, M. F. M; LIMA II, E. J. ; CASTRO, C. A. ; BRACARENSE, A. Q. . Determinação da Relação Entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspectos do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade. Soldagem & Inspeção, Uberlândia - MG, v. 10, n. 4, 2005.
- DILLENBECK, V. R. and CASTAGNO, L. The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel, Welding Journal, set. 1987.
- FERREIRA FILHO, D. BÁLSAMO, P.S.S, FERRARESI, V.A. Influência do tipo de gás de proteção da soldagem MIG/MAG na qualidade do cordão de aço inoxidável. In: Anais do 4<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Pedro, 2007.
- FERNANDES, P. E. A., Redes Neurais artificiais aplicadas ao processo de soldagem à arco com proteção gasosa: modelamento do formato do cordão. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2004.
- FORTES, C., VAZ C. T. Soldagem MIG/MAG. ESAB. 2005.
- HOLLIDAY, D. B. Gas-Metal Arc Welding - Process Fundamentals. ASM HANDBOOK - Welding Brazing and Soldering, Vol. 6, 1993
- HU, J., TSAI, H.L., Effects of current on droplet generation and arc plasma in gas metal arc welding. Journal of applied physics, September 2006.
- JÖNSSON, P. G., MURPHY, A. B. and SZEKELY, J. Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Processes, Welding Research Supplement - Welding Journal, February 1995.

LESNEWICH, A. Influence of Welding on Steel Weldment Soundness. ASM HANDBOOK - Welding Brazing and Soldering, Vol. 6, 1993.

LUNDQVIST, B., Aspects of Gas-Metal Arc Welding of Stainless Steels, in Swedish. Sandvik AB, Sandviken, Sweden, 1980.

LYTTLE, K. A. Shielding Gas for Welding. ASM HANDBOOK - Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6, 1993.

LYTTLE, K. A.; STAPON, F. G. Select the Best Shielding Gas Blend for the Application, Welding Journal, p 21 – 28, nov. 1990.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q., Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3ª Edição. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2009.

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

MIRANDA, C. H. Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição sobre cabeça, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, Fevereiro, 1999.

MODENESI, P. J., Introdução à Física do Arco Elétrico e Sua Aplicação na Soldagem de Metais. Belo Horizonte, 2007.

SAUNDERS, H. L., Gas Metal Arc Welding Guide. Third Edition. Lincoln Electric, 1997.

SOUZA, A. C., Consumíveis de Soldagem. Lincoln Electric do Brasil. Guarulhos, 2011.

STRASSBURG F. W., Schweissen nichtrostender Stähle, DVS Band 67, DCS GmbH, Dusseldorf, FRG, 1976.