

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

O processo Eletrodo Tubular é um processo de soldagem, cujo arco é estabelecido entre a peça e o eletrodo, sendo protegido pela ação de um gás externo e pela decomposição do fluxo alojado no interior do arame (Welding Handbook, 1963; Mota, 1998; Braga, Mota e Farias, 1998). Este fluxo é composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, dentre as quais, a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal de solda, a proteção do banho de fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória (Mota, 1998).

Existem duas variações para o processo; uma com proteção adicional de gás (**Figura 2.1**) e a outra, sem a proteção externa de gás ou autoprotégido (**Figura 2.2**). Na soldagem com arame tubular autoprotégido o metal fundido é protegido por uma camada de escória, pelos gases e pelos elementos desoxidantes/desnitretantes resultantes da decomposição do fluxo (Braga, Mota e Farias, 1998).

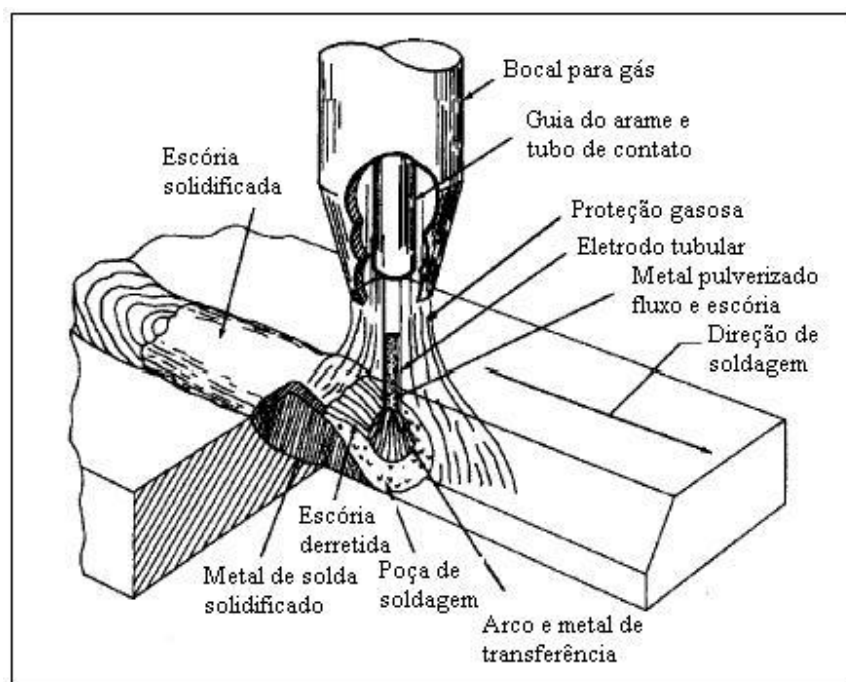


Figura 2.1 – Soldagem com Eletrodo Tubular com proteção gasosa.

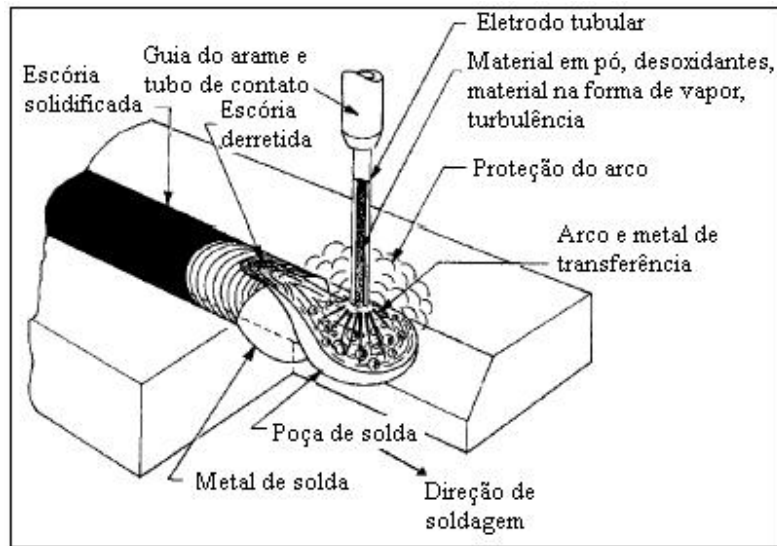


Figura 2.2 – Soldagem com Eletrodo Tubular autoprotetido.

Apesar da similaridade entre os processos Eletrodo Tubular com proteção gasosa e MAG, aquele apresenta algumas vantagens e limitações em relação a este. Assim sendo o processo Eletrodo Tubular se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual, além de soldar vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras, apresentar alta taxa de deposição devido à alta densidade de corrente, apresentar alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas, possuir relativamente alta eficiência de deposição e alta produtividade (Araújo, 2004). Em virtude dessas características, pode-se concluir que o processo Eletrodo Tubular é uma excelente opção quando o objetivo é qualidade, produtividade e facilidade operacional. Por outro lado, o processo Eletrodo Tubular limita-se por apresentar um alto custo do arame tubular na base de peso em relação ao arame de eletrodo sólido (Araújo, 2004). No entanto, segundo Stridh (2000), o custo total de produção de um componente de carro fabricado com soldagem robotizada, utilizando-se um arame tubular tipo “metal cored” com 1,4 mm de diâmetro é menor que com o uso de arame sólido de 1,0 mm de diâmetro, embora não tenham sido informados os parâmetros de soldagem, nem as composições de gases de proteção utilizados.

A proteção gasosa nas operações de soldagem teve início de utilização na década de 30, para resolver problemas da contaminação atmosférica nas soldas de materiais reativos (alumínio, titânio e ligas de magnésio), tendo sua origem com o processo TIG (Tungsten Inert Gas). Em 1948, surge o processo MIG, que possui o mesmo princípio de funcionamento do TIG, ou seja, um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e a peça, envolto por uma atmosfera protetora de gás inerte; e que difere do anterior por utilizar um eletrodo consumível de alimentação contínua. Inicialmente foi utilizado para

ligas altamente reativas, pois a utilização de gases inertes tornava seu custo elevado para utilização em aços carbono e baixa liga. No entanto, com a introdução do CO₂ como gás de proteção, revelou-se um processo bem aceito para soldagem dos referidos materiais, tendo barateado o custo do processo. Porém, o processo MIG/MAG ainda apresentava a dificuldade de se evitar porosidade e falta de fusão nas soldagens de aços comuns ao carbono (Mota, 1998).

Assim sendo, por volta dos anos 50, com a comprovação das vantagens da utilização do semi-automatismo do MIG/MAG e com a possibilidade de produzir soldas sem poros devido a ação desoxidante do recheio (Mota, 1998), iniciam-se os estudos para a utilização do arame tubular, com a ajuda de proteção externa gasosa.

A utilização de arame tubular deu uma alta qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos e possibilidade de soldar em todas as posições, tendo ganho popularidade para soldagem de aços carbono e baixa liga, em chapas de espessura grossa e fina (Mota, 1998). Devido à versatilidade dos arames, possibilitou-se a obtenção de um melhor nível de resistência mecânica e melhor tenacidade com uma maior taxa de deposição (Mota, 1998; Machado, 1997). Além disso, ainda, foi utilizado em grandes espessuras onde a geometria de junta e posição de soldagem não permitia a aplicação de outros processos de alto rendimento tal como o arco submerso (Mota, 1998).

Em 1956 a aplicação comercial do processo com proteção gasosa crescia rapidamente nos EUA, e de 1960 a 1980 o consumo anual passou de 500 para mais de 60000 toneladas por ano (Scotti e Silva, 1986). Mas, a popularidade, versatilidade e simplicidade do eletrodo revestido fez estimular também o desenvolvimento dos tubulares sem proteção gasosa. Os mesmos foram introduzidos no final da década de 50 quase que simultaneamente pelo instituto Patton (URSS) e pela firma LINCOLN (EUA), esta última denominando o processo de “Innershield” (Scotti e Silva, 1986).

As maiores limitações encontradas para o uso deste processo, com ou sem proteção externa, eram a impossibilidade de soldar fora de posição e a baixa resistência ao impacto do cordão de solda. O desenvolvimento de novos consumíveis, principalmente nos EUA, fez com que estas deficiências fossem bem diminuídas, e o processo passou a ser largamente utilizado neste país.

Apesar de, inicialmente, a aceitação pelos europeus ter sido menor, as evidências dos méritos do processo fizeram com que sua utilização crescesse no mundo todo.

2.2 - Características do Fluxo

Como já mencionado, o processo de soldagem com arame tubular consiste na utilização de um arame-eletrodo de alimentação contínua, cujo núcleo é preenchido por um fluxo fusível de composição química definida. A mistura deste fluxo pode incluir pó metálico, compostos minerais, sinterizados, compostos químicos, dentre outros. As principais funções cumpridas pelo fluxo são relacionadas à presença e ao teor dos elementos formadores de gás, de escória, dos estabilizadores do arco voltaico, dos desoxidantes e desnitretantes e de elementos de liga. E com os diversos tipos de metal e de fluxo, dispõe-se de muitas possibilidades para diversificar os métodos de desoxidação e desnitretação e de adição de elementos de liga na composição química final da solda. A capa metálica pode ser de aço baixo carbono ou de um material similar àquele que será soldado, como por exemplo, um aço inoxidável (Mota, 1998).

Além disso, a presença do fluxo torna os consumíveis mais tolerantes às variações inerentes as condições de operação, tais como a velocidade de alimentação do arame e a tensão do arco elétrico, minimizando seus efeitos na qualidade da junta soldada.

Portanto, a principal característica do processo é a presença do fluxo, que é uma mistura de materiais cuja composição química é projetada para garantir, além das características metalúrgicas, outras características que definem a proposta do consumível. Isto torna este processo de relevante importância tecnológica, uma vez que alia a possibilidade de aumentos consideráveis na taxa de deposição através da alta produtividade dos processos de arame contínuo com as vantagens metalúrgicas dos processos com fluxos.

O percentual de fluxo no interior do arame pode variar de 15 a 50% do seu peso. Este percentual vai depender, entre outros fatores, das funções a serem desempenhadas pelo fluxo. Arames tubulares autoprotégidos possuem percentuais de fluxo consideravelmente superiores aos que utilizam proteção gasosa (Mota, 1998).

No entanto, o balanceamento da composição química do fluxo, torna-se uma tarefa muito complexa pela grande quantidade dos ingredientes envolvidos, pela diversidade de suas funções, pelas suas interações e pelo reduzido espaço disponível no núcleo do arame que limita bastante a relação fluxo/metal. Além do mais, é difícil de precisar o papel específico para um ingrediente isolado, uma vez que pequenas modificações podem significar profundas e inesperadas alterações nos resultados pretendidos. Desta forma, teores inadequados de desoxidantes e desnitretantes podem aumentar a incidência de porosidade e/ou reduzir a tenacidade da solda (Ferree, 1996).

Neste sentido, diversas pesquisas têm sido realizadas como forma de melhor adequar o processo a determinadas características específicas da solda, como na melhoria das propriedades mecânicas através de alterações no sistema ligante do fluxo (Mota, 1998; French e Bosworth, 1997; Lee, 2001), na relação fluxo/formação da escória ou de seus reflexos frente à presença de contaminantes (Bauné, 2000; Atkins, 2002). Assim sendo, algumas pesquisas têm sido realizadas no sentido de desenvolver eletrodos que proporcionem à solda características específicas. Mota (1998), por exemplo, num estudo do desempenho de oito tipos de arames derivados do arame tubular da classe AWS E 71T-7, alterando apenas o sistema ligante com substituição de teores de manganês e de níquel por ferro, buscou melhorar a tenacidade da solda em baixas temperaturas; French e Bosworth (1997) também fizeram uma investigação, buscando encontrar uma fórmula para o arame tubular básico que permitisse que tal arame pudesse realizar soldas em todas as posições utilizando o modo pulsado. Para isto desenvolveram, a partir de um arame padrão, uma série de arames cujos componentes formadores de escória foram reduzidos.

2.3 - Consumíveis

2.3.1 - Tipos e Formas

Os eletrodos para soldagem com arame tubular protegido externamente, em geral, podem ser divididos em três classes de acordo com o tipo de escória formada. Estas classes são: arames com fluxo rutílico, com fluxo básico e com fluxo metálico ou “metal cored” (French e Bosworth, 1995).

Os arames com fluxo rutílico, geralmente, são de uso mais “amigável”. Formam arco mais estável e cordão de boa aparência, apresentam um limite mais extenso de valores de corrente, em que operam satisfatoriamente e podem ser soldados em todas as posições. Entretanto, não produzem soldas com boas propriedades de impacto a baixa temperatura ou valores muito baixos de hidrogênio depositado na solda (menores que 5 ml/100 g de metal depositado) (French e Bosworth, 1995). Suas vantagens operacionais incentivaram o uso deste eletrodo no presente trabalho.

Os arames com fluxo básico são usados quando se necessita de melhores propriedades mecânicas e baixos níveis de hidrogênio depositados na solda; segundo Melton et al (1992), arames tubulares com fluxo básico produzem soldas com excelente qualidade, boas propriedades mecânicas a baixas temperaturas e níveis de hidrogênio difusível menores que 5 ml/100g de metal depositado. O grande problema desses arames é o seu comportamento operacional. Comparados com os eletrodos

com fluxo rutilico, eles apresentam arco instável, produzem cordão de solda mais convexo e muitos respingos (French e Bosworth, 1995; Blackman e Norrish, 1988). No entanto, utilizando o modo pulsado, a soldagem pode ser controlada da mesma maneira que com arames sólidos em soldagem MIG pulsada (Blackman e Norrish, 1988).

Os arames com fluxo metálico ou “metal cored” promovem uma alta taxa de deposição e uma pequena camada de escória formada, devido a natureza de seu núcleo, que é preenchido basicamente com pó metálico. Esta característica dos arames “metal cored” faz com que sua densidade total volumétrica seja muito próxima a de arames maciços de aço carbono; diferentemente dos arames rutilicos e básicos, que devido aos diferentes tipos de óxidos presentes em seus fluxos, apresentam densidade total volumétrica inferior a de arames maciços de aço carbono (Starling et al, 2003). Os arames “metal cored” normalmente operam com argônio puro como gás de proteção e com uma densidade de corrente e tensão para facilitar o tipo de transferência por spray (French e Bosworth, 1995).

O tipo de arame tubular também influencia na transferência metálica, sendo que, em arames com fluxo rutilico, o fluxo forma uma coluna que toca a poça de fusão e que se quebra imediatamente antes da transferência da gota de metal fundido para a poça de fusão (Bracarense et al., 2002). Nos arames com fluxo básico e “metal cored” a transferência metálica, geralmente necessita da influência da gravidade, já que os valores de correntes usados são baixos. Portanto, o seu uso também não é muito adequado para soldagem fora de posição (French e Bosworth, 1995).

Logo, pode-se dizer que os arames rutilicos são utilizados para soldas fora de posição e os eletrodos básicos e “metal cored” possuem vantagens em relação às propriedades mecânicas, níveis de hidrogênio depositados na solda, taxa de deposição e eficiência. As principais desvantagens dos eletrodos básicos e “metal cored” são a restrição ao uso de altos valores de corrente e a impossibilidade de soldar fora de posição (French e Bosworth, 1995).

Além do tipo de fluxo contido no arame tubular, deve-se levar em consideração na escolha do tipo de eletrodo o formato e o método de construção do arame tubular, pois estes fatores têm uma correlação muito grande com o desempenho dos eletrodos (Scotti e Silva, 1986; Mota, 1998); por isso existem variadas formas geométricas para os mesmos. Assim sendo, a configuração metal/fluxo na seção do arame, pode apresentar-se como tubular simples ou multifolder, conforme é ilustrado na **Figura 2.3**.

Geralmente as formas simples (**Figura 2.3(a, b)**) são de fácil fabricação e mais baratas. Nas seções mais complexas (**Figura 2.3(c)**), projetadas para arame de maior diâmetro, as características operacionais (estabilidade) do arco são superiores e propiciam melhor soldabilidade (Scotti e Silva,

1986; Huisman, 1996), o que se justifica pela maior homogeneidade do aquecimento do recheio, devido ao melhor contato térmico entre o metal e o recheio e conseqüentemente mais uniformidade de aquecimento e fusão do fluxo investido no interior; no entanto, têm dificuldades para a soldagem fora da posição plana (Huisman, 1996).

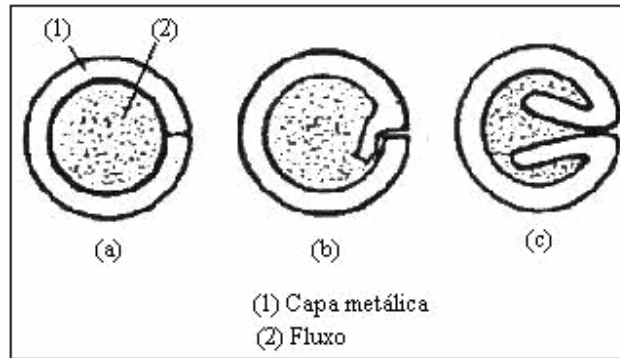


Figura 2.3 - Formas da seção transversal de arames tubulares: a e b – seção simples; c – “multifolder”.

As características de fusão simultânea da capa metálica e do fluxo são importantes no estudo de mecanismos de fusão dos arames tubulares. A fusão de um arame tubular apresenta diferenças com relação aos arames maciços, pois a condutibilidade térmica do fluxo depende das composições químicas da parte metálica e da parte mineral, sendo menor com o aumento da temperatura e maior com o aumento do tamanho de suas partículas (Mota, 1998).

Isto ocorre porque o fluxo reduz o grau de “aquecimento ôhmico” (efeito Joule) do arame durante a passagem de corrente. A taxa de aquecimento da capa metálica é então menor devido ao consumo de calor requerido para a fusão do fluxo. A área do fluxo adjacente à capa metálica fundida é um sistema não homogêneo com uma resistência térmica adicional, dependente não somente dos parâmetros geométricos, mas também de propriedades térmicas desta camada superficial, da distribuição e do tamanho das partículas, da concentração dos componentes e de suas interações. Desta maneira, a condutibilidade térmica de um arame tubular aumenta com o incremento da transferência de calor através do fluxo e da capa metálica, afetando o seu consumo (Mota, 1998). O processo de fusão dos arames tubulares, além da troca de calor e de massa entre o fluxo e a capa metálica, inclui também os processos de formação de escória, a evolução de produtos gasosos e a evolução de reações químicas, o que o torna extremamente complexo (Mota, 1998).

2.3.2 – Classificação

Os Eletrodos Tubulares para soldagem de aço comum ao carbono e aço baixa liga estão classificados pela AWS nas especificações AWS A-5-20 e AWS A-5-29 (AWS, 1979; AWS, 1980) . Estas classificações se baseiam na aplicabilidade do arame, quanto à utilização ou não do gás de proteção e quanto a adequabilidade para simples ou múltiplos passes. Também leva em consideração o tipo de corrente e posição de soldagem recomendada e propriedades mecânicas do metal de solda. O sistema de classificação usa o seguinte modelo:

EXYT – Z – K

onde:

E – Eletrodo a arco elétrico; X – Resistência mínima à tração, em 10000 Psi; Y – Indica a posição de soldagem recomendada, sendo “0” para posição plana e horizontal e “1” para todas as posições; T – indica ser arame tubular; Z – Indica a aplicabilidade e desempenho, dividindo os eletrodos em grupos de 1 a 8, além dos números 10, 11, G, Gs; K – Indica a composição química do metal de solda, necessário para os eletrodos de aço liga.

As **Tabelas 2.1 e 2.2** ilustram requisitos de propriedades mecânicas e composição química dos eletrodos para aço comum ao carbono.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas requeridas (Scotti e Silva, 1986).

Classificação	Lim. Res.	Lim. Esc.	Elongamento	Impacto
AWS	(Kgf/mm²)	(Kgf/mm²)	(%)	Charpy-V
E6XT-1	43,6	35,2	22	27 J a 18 °C
E6XT- 4/7/11/G	43,6	35,2	22	não requerido
E6XT- 5/6/8	43,6	35,2	22	27 J a 29 °C
E6XT- GS	43,6	não requerido	não requerido	não requerido
E7XT- 1	50,7	42,2	22	27 J a 18 °C
E7XT- 2/3/10/GS	50,7	não requerido	não requerido	não requerido
E7XT- 4/7/11/G	50,7	42,2	22	não requerido
E7XT- 5/6/8	50,7	42,2	22	27 J a 29 °C

Tabela 2.2 - Condições de operação e composição química especificadas para o metal de solda (Scotti e Silva, 1986).

Classificação AWS	Meio de Proteção	Nº de passes e Polaridade	Composição Química (%) - Valores máximos									
			C ⁽²⁾	P	S	V	Si	Ni	Cr	Mo	Mn	Al ⁽¹⁾
EXXT-1	CO2	Multi, CC+		0,004	0,03	0,08	0,90	0,50	0,20	0,30	1,75	1,80
EXXT-4	Auto Prot.	Multi, CC+										
EXXT-5	CO2	Multi, CC+										
EXXT-6	Auto Prot.	Multi, CC+										
EXXT-7	Auto Prot.	Multi, CC-										
EXXT-8	Auto Prot.	Multi, CC-										
EXXT-11	Auto Prot.	Multi, CC-										
EXXT-G		Multi										
EXXT-GS		Único										
EXXT-2	CO2	Único, CC+	Não requerida, pois a análise do metal de solda não é									
EXXT-3	Auto Prot.	Único, CC+	significativa, uma vez que são eletrodos para alta diluição									
EXXT-10	Auto Prot.	Único, CC-										

1- Somente para eletrodos autoprotetidos

2- Deve ser determinado, mas não é especificado

Nesse trabalho utilizou-se o arame AWS E71T-1. O desempenho e a aplicabilidade do grupo, referenciado por T-1 podem ser resumidos por serem classificados para uso com CO₂, mas pode ser utilizado com mistura argônio-CO₂, especialmente, quando necessitar de soldagem fora de posição. Quanto maior a proporção de argônio na mistura, maior poderá ser a resistência ao impacto, devido ao crescimento do Mn e Si na solda. Diâmetros maiores que 1,6 mm são recomendados fora de posição. O tipo de transferência é “spray” com poucos respingos e escória de boa destacabilidade (Scotti e Silva, 1986). A maioria dos fluxos é de alto rutilo, que produz um cordão plano e de ótima configuração, e de boa penetração. Existem também fluxos à base de calcário e misto calcário-rutilo. O fluxo quanto mais básico, proporciona pior aspecto do cordão, aumentando a convexidade, mas melhora as propriedades ao impacto, conforme já foi mencionado (Scotti e Silva, 1986).

2.4 - Gases de Proteção

Os gases utilizados para soldagem com arame tubular são basicamente os mesmos utilizados na soldagem MAG com arame sólido, sendo os mais utilizados o dióxido de carbono como gás ativo e

argônio e ou hélio como gases inertes, podendo também se utilizar a mistura de dióxido de carbono com argônio ou com hélio, de acordo com as especificações do fabricante de consumível.

De acordo com Miranda (1999), a mudança do tipo de gás influi na geometria do arco voltaico, gerando mudanças na forma do cordão.

2.4.1 - Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (CO_2) é muito usado para proteção durante a soldagem com arames tubulares. Duas vantagens deste gás são o baixo custo e alta penetração. A alta penetração obtida se dá porque CO_2 apresenta uma maior condutibilidade térmica, provocando arcos mais estreitos e uma transferência de calor maior para a peça. Além disso, o arco elétrico sob a proteção de CO_2 assegura elevadas pressões na poça de fusão promovendo uma influência marcante na geometria da solda, aumentando não somente a penetração, mas também o reforço e diminuindo a largura do cordão (Sales et al, 2001).

Apesar de o processo de soldagem com arames sólidos não permitir o alcance da transferência por “spray” utilizando-se o CO_2 puro, um aspecto interessante a ser observado em soldagens com arame tubular, é que este processo, mesmo utilizando 100% de CO_2 como gás de proteção, permite que se alcance a transferência metálica do tipo “spray” (Nascimento et al, 2003).

O dióxido de carbono é relativamente inativo na temperatura ambiente. Quando ele é aquecido a altas temperaturas pelo arco elétrico, dissocia-se formando o monóxido de carbono (CO) e o oxigênio. O oxigênio proveniente desta dissociação irá reagir com os elementos do metal fundido oxidando-os. Assim, materiais desoxidantes são adicionados ao fluxo do eletrodo para compensar os efeitos oxidantes do CO_2 (Bracarense, 2000).

2.4.2 - Misturas de Gases

O uso da mistura de gases na soldagem com arames tubulares pode combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases. O aumento de gás inerte aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração será reduzida. O Argônio é capaz de proteger a poça de fusão em todas as temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidade suficiente resulta na diminuição da oxidação comparativamente a proteção com CO_2 (100%)

(Bracarense, 2000). A **Figura 2.4** apresenta um comparativo do efeito do gás de proteção no perfil do cordão de solda em soldagem com Eletrodo Tubular.

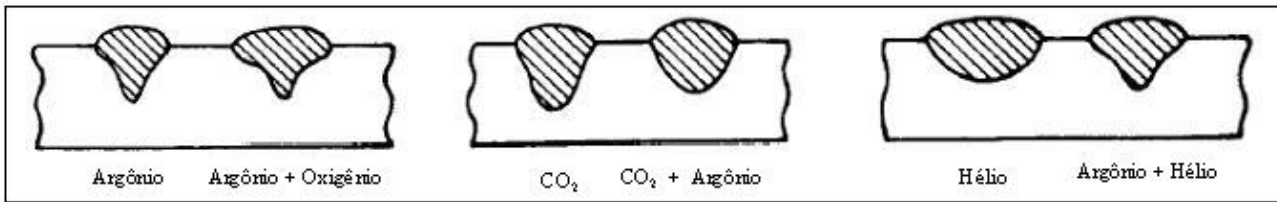


Figura 2.4 - Efeito do Gás de Proteção no Perfil do Cordão de Solda (Bracarense, 2000).

Alguns resultados da influência benéfica da mudança do gás CO₂ para uma mistura de Argônio e CO₂ são verificadas através da obtenção de melhores propriedades metalúrgicas (Surian e Rissone, 1998).

Atualmente, diversos tipos de mistura de gases estão disponíveis no mercado. A mistura de gases mais usada em soldagem com Eletrodo Tubular é 75% de Argônio e 25% de CO₂. O metal de solda depositado com esta mistura tem alto limite de escoamento e resistência à tração, comparado com o metal depositado com 100% de proteção com CO₂ (Bracarense, 2000).

Segundo Melton et al (1992), os gases mais adequados para soldagens com arame tubular básico, no modo pulsado, são as misturas de argônio com 12–15% de CO₂. Altas concentrações de CO₂ ocasionam soldagens com muitos respingos, ao passo que baixas concentrações de CO₂ (aproximadamente 5 %) permite gerar uma melhoria na forma da transferência metálica. Também Blackman e Norrish (1988), num estudo sobre soldagem com arames tubulares no modo pulsado, realizaram uma investigação com vários tipos de gases, incluindo argônio + 5-20% CO₂ e misturas de hélio, argônio e CO₂; e observaram que a mistura de argônio + 5% de CO₂ proporcionou uma maior estabilidade do arco.

Outros resultados em soldagem no modo pulsado (Sales et al, 2001), utilizando-se uma mistura de gases no lugar do CO₂ puro mostraram que a mistura afetou significativamente o reforço e a largura do cordão de solda. Observou-se que as soldas realizadas com Ar + CO₂ tendem a possuir um menor reforço e uma maior largura, como se observa nas **Figuras 2.5 e 2.6**, onde se analisa também a influência de dois níveis de distância do bico de contato à peça, DBCP (20 mm e 25 mm) . Isto indica que as soldas com a mistura Ar + CO₂ possuem um aspecto mais tênue, com uma melhor conformação do cordão, reduzindo a formação de pontos de concentração de tensão e melhorando o aspecto do depósito.

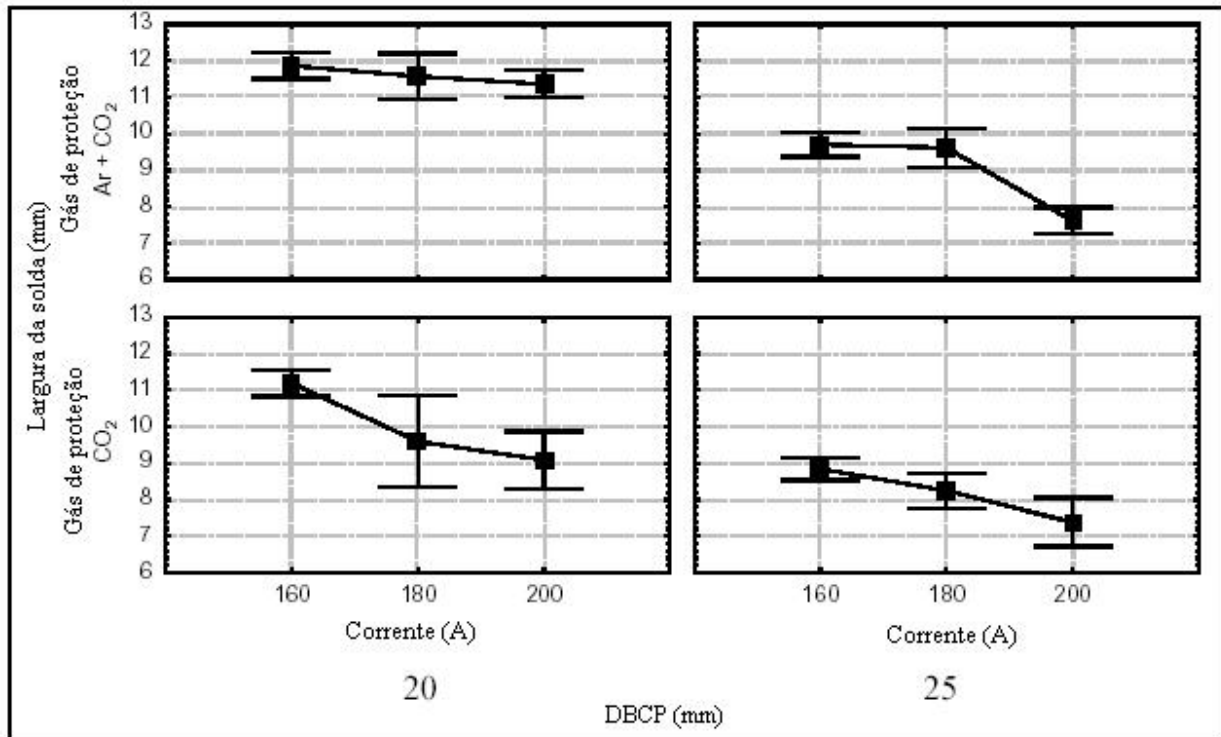


Figura 2.5 – Efeito da variação do tipo de gás sobre a largura do cordão (Sales et al, 2001).

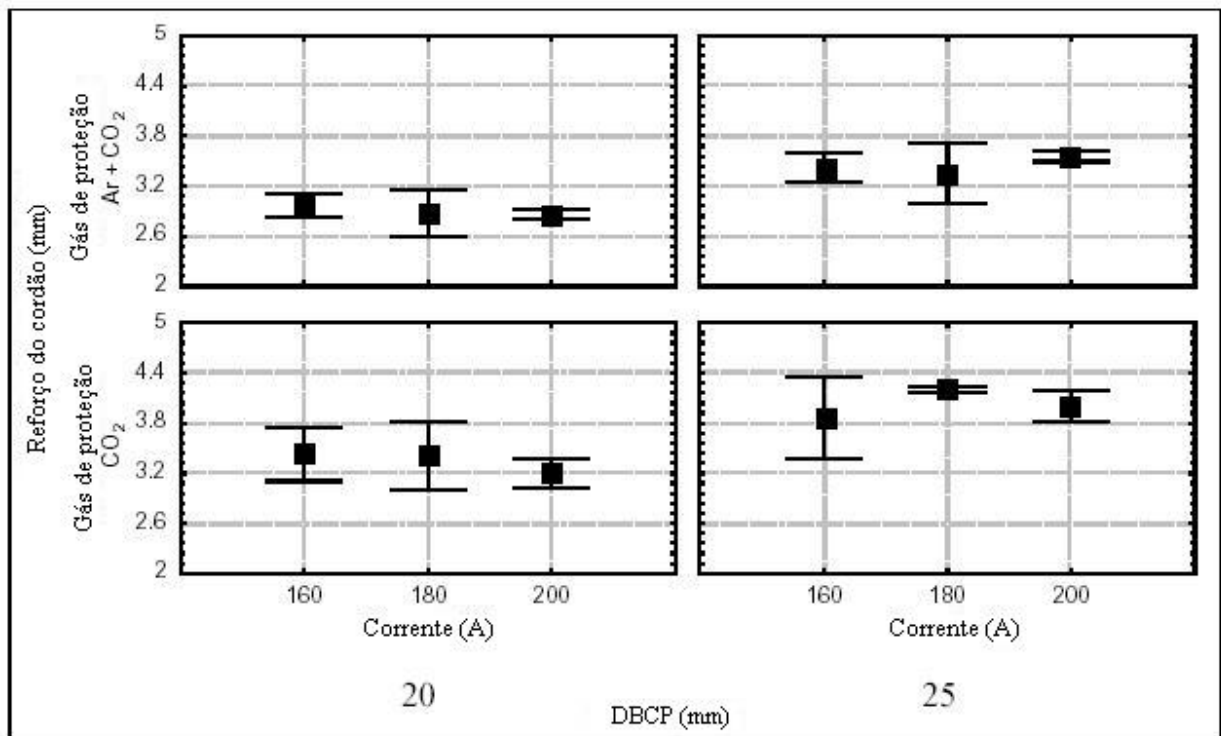


Figura 2.6 – Efeito da variação do tipo de gás sobre o reforço do cordão (Sales et al, 2001).

Estas características também foram observadas por Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989). Em ensaios com arames tubulares E 71T-5 e E 71T-1 utilizando-se os gases CO_2 e Ar + 20 % CO_2 , no modo pulsado, perceberam que os arcos foram mais estáveis com Ar + 20 % CO_2 comparativamente ao CO_2 , conforme pode ser observado na **Figura 2.7**. Notaram que praticamente não houve salpicos para ambos os arames protegidos por atmosfera de Ar + 20 % CO_2 . Com a proteção de CO_2 puro, verificaram a formação de gotas grandes, aumentando com o aumento do diâmetro do consumível, originando uma transferência assimétrica e acompanhada de bastantes salpicos. Este comportamento foi observado com arames de 1,2 e 1,6 mm de diâmetro.

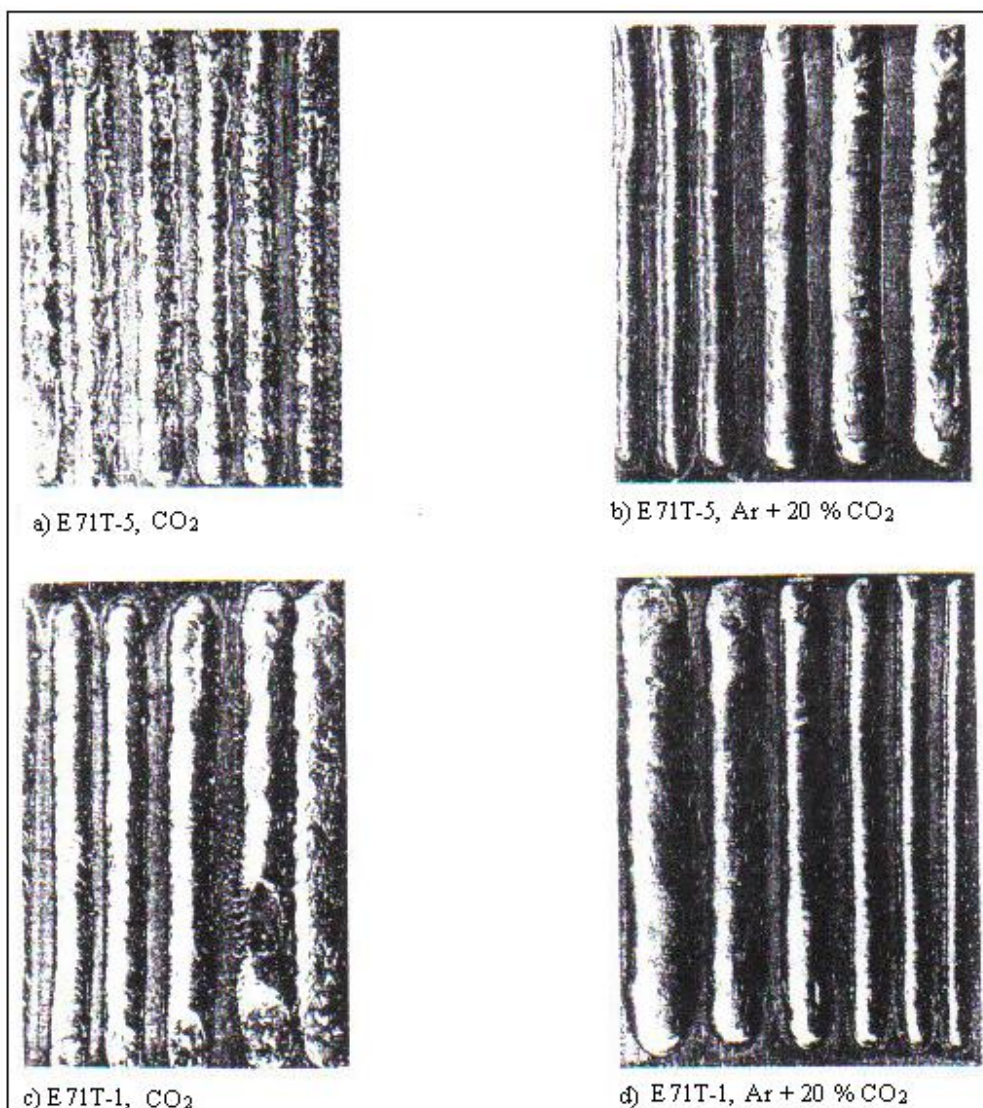


Figura 2.7 – Depósitos realizados com diferentes arames tubulares e gases de proteção (Im variável de 50 a 300 A de 50 a 50 A, $v = 3$ mm/s) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Neste trabalho utilizou-se a mistura de gases Ar + 25% CO₂ devido às vantagens aqui citadas.

2.5 - Parâmetros de Soldagem

2.5.1 - Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo, sendo que a taxa de deposição e penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem (Poepcke, 1997; Sales et al, 2001). A **Figura 2.8** mostra a influência da intensidade de corrente para arames do grupo T-1 sobre a taxa de deposição (Bracarense, 2000). Além disso, o aumento da corrente de soldagem causa também, uma diminuição na quantidade de salpicos, porosidades, e diâmetro da gota, bem como, na formação excessiva de nitretos e má aparência do cordão (Poepcke, 1997).

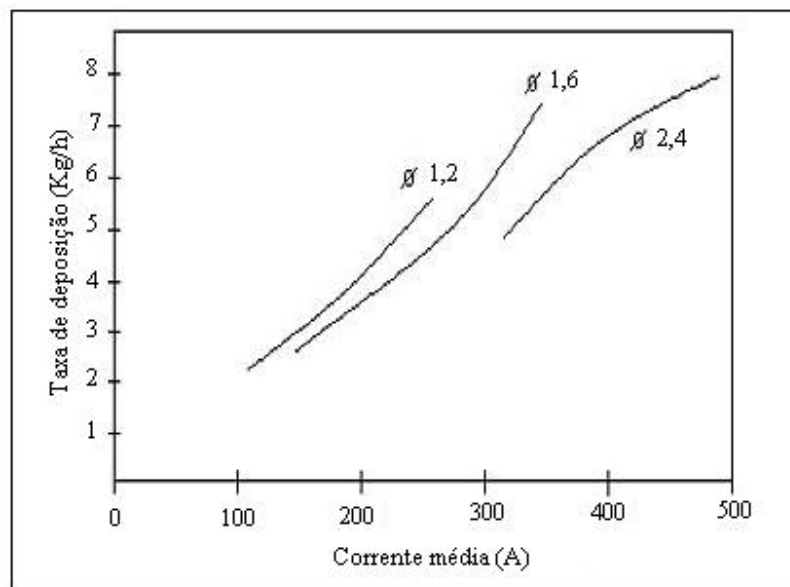


Figura 2.8 – Influência da intensidade de corrente sobre a taxa de deposição para arames do grupo T-1 (Bracarense, 2000).

Tratando-se do modo pulsado, Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989) também observaram que a penetração teve um acréscimo com o aumento da intensidade da corrente média, sendo essa relação linear conforme pode ser observado na **Figura 2.9**.

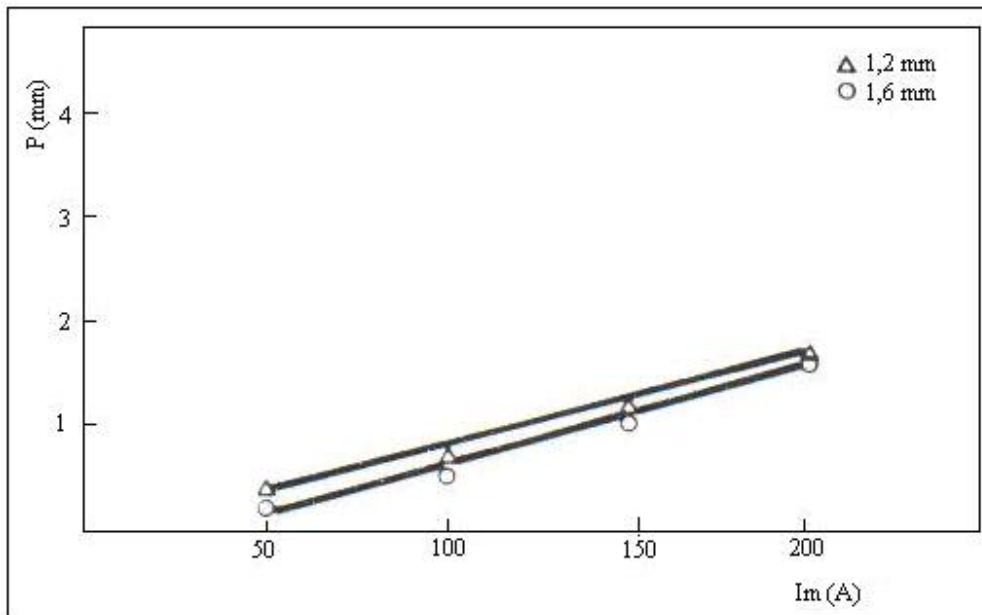


Figura 2.9 – Influência da corrente média (I_m) na penetração (P) para diferentes diâmetros de arame (Arame E71T-1, Ar + 20 % CO_2 , CC^+ , $v = 3$ mm/s) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Uma das atrações dos arames tubulares é o fato de ser possível a utilização de intensidades de correntes mais elevadas do que para arames sólidos, em qualquer posição. Em termos de características de fusão, com intensidades elevadas de corrente há aumentos de diluição e, conseqüentemente, redução da susceptibilidade de ocorrência de defeitos de soldagem, sendo o mesmo efeito observado em corrente pulsada (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Estudos feitos para arames sólidos (Allum e Quintino, 1985; Allum, 1985; Oliveira Santos e Allum, 1986) indicam que o produto da intensidade da corrente média (I_m) pela velocidade de soldagem (v) é a relação determinante no comportamento da diluição. Para arames tubulares essa relação é semelhante, sendo verificado, entretanto, o crescimento da diluição com o produto $I_m \times v$ até um determinado valor (que depende do tipo de arame tubular e do seu diâmetro) e a tendência para estabilizar por volta de 45% para valores de $I_m \times v$ elevados, o que pode ser observado na **Figura 2.10** (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Com o uso de correntes excessivamente altas o cordão torna-se convexo e de morfologia deteriorada, enquanto que baixas intensidades de corrente tem como conseqüência uma transferência globular com gotas grandes e excessivos respingos (Bracarense, 2000) .

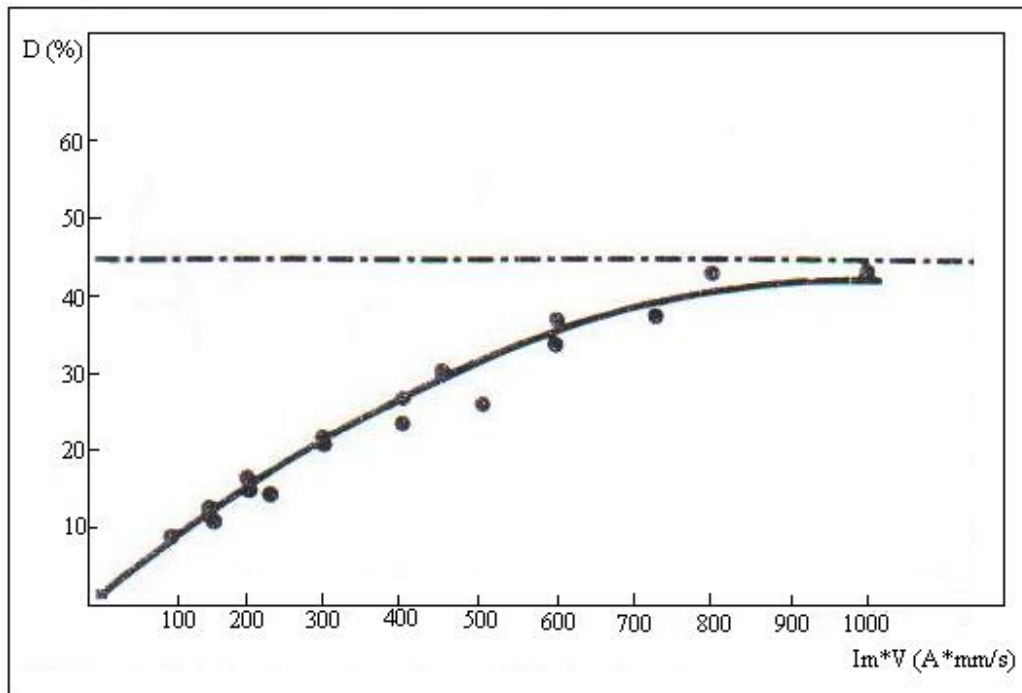


Figura 2.10 – Influência do produto $I_m \times v$ na diluição (D) (E 71T-1, Ar + 20 % CO_2 , $I_m/F = 2$) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

2.5.2 - Tensão de Soldagem

A tensão do arco e o seu comprimento estão diretamente relacionados. A aparência, penetração e propriedades do cordão de solda obtido através do processo Eletrodo Tubular podem ser afetadas pela tensão do arco. Altas tensões (comprimento de arco maior) podem resultar em respingos excessivos, contorno irregular do cordão de solda e porosidades (Poepcke, 1997). Em eletrodos autoprottegidos, o aumento da tensão pode provocar aumento na absorção de hidrogênio. Com eletrodo de aço baixo carbono pode causar porosidade. Tensões baixas (arco menor) podem resultar em uma superfície estreita, em excesso de respingos e em redução de penetração (Bracarense, 2000; Poepcke, 1997).

2.5.3 - Extensão do Eletrodo

Extensão do eletrodo é seu comprimento não fundido a partir do bico de contato. Um aumento na extensão do eletrodo tende a aumentar a temperatura do mesmo devido ao efeito Joule, influenciando na fusão do arame e no aquecimento do fluxo interno. Grande extensão do eletrodo pode causar salpicos, cordões convexos, falta de penetração e aumento na taxa de fusão; já uma extensão

muito pequena, pode ocasionar porosidades, excesso de salpicos e oxidação da poça de fusão (Saito, 2001).

Em corrente pulsada, Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989) verificaram que o aumento da extensão do eletrodo provoca um incremento na velocidade de alimentação, pois se aumenta a fusão do mesmo devido ao aumento da energia gerada pelo efeito Joule. Em consequência, a taxa de deposição também é elevada, conforme se verifica na **Figura 2.11**.

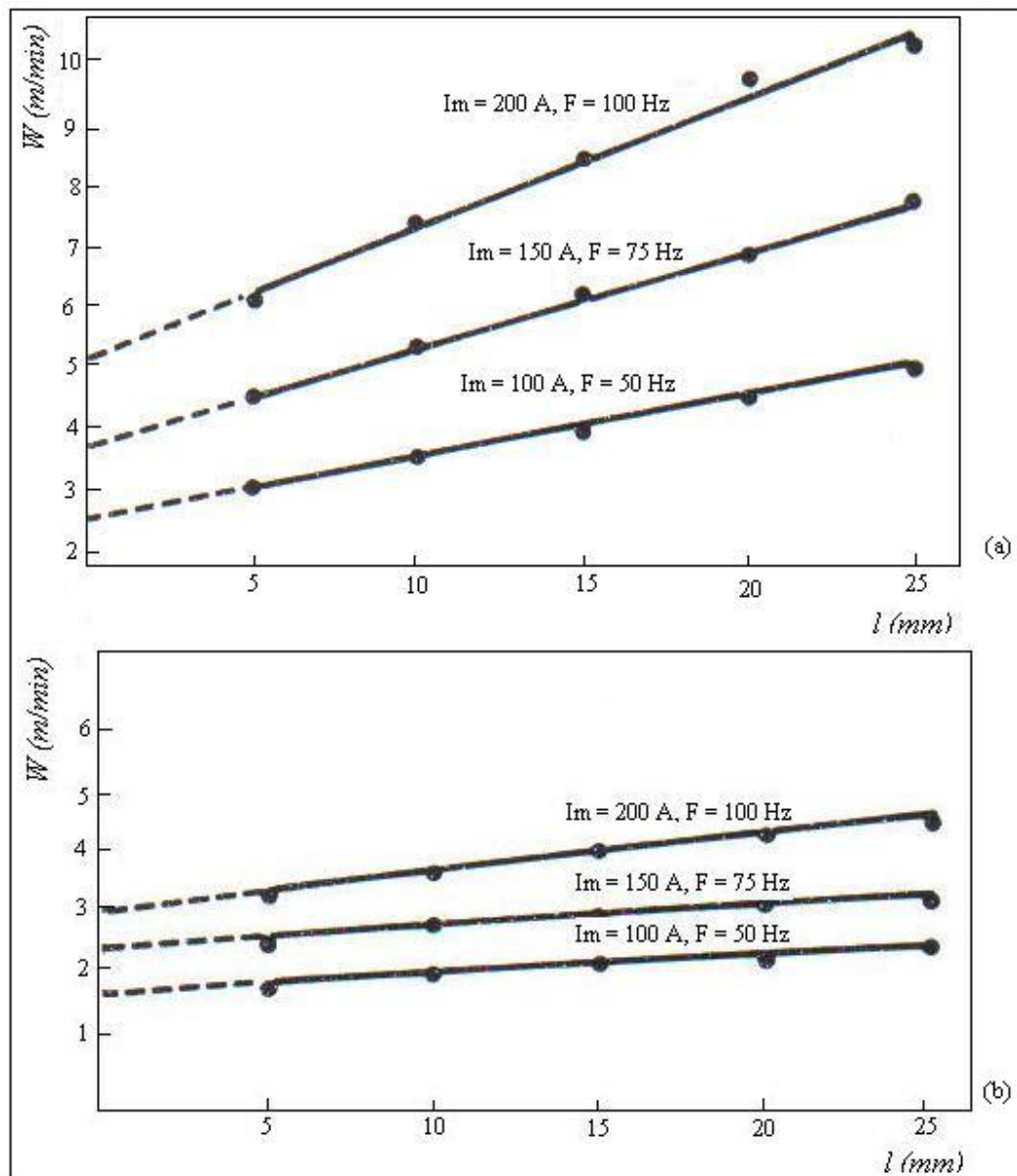


Figura 2.11 – Influência da extensão do eletrodo (l) na velocidade de alimentação do arame (W) para o arame E 71T-5 com diâmetro de 1,2 mm (a) e 1,6 mm (b) ($I_p = 350$ A, $T_p = 4$ ms, Ar + 20 % CO_2 , CC^+) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Braga, Mota e Farias (1998), trabalhando com arame autoprotetido, no modo pulsado, também notaram que o aumento da extensão do eletrodo provocou o aumento da taxa de deposição e de fusão, conforme pode ser observado na **Figura 2.12**.

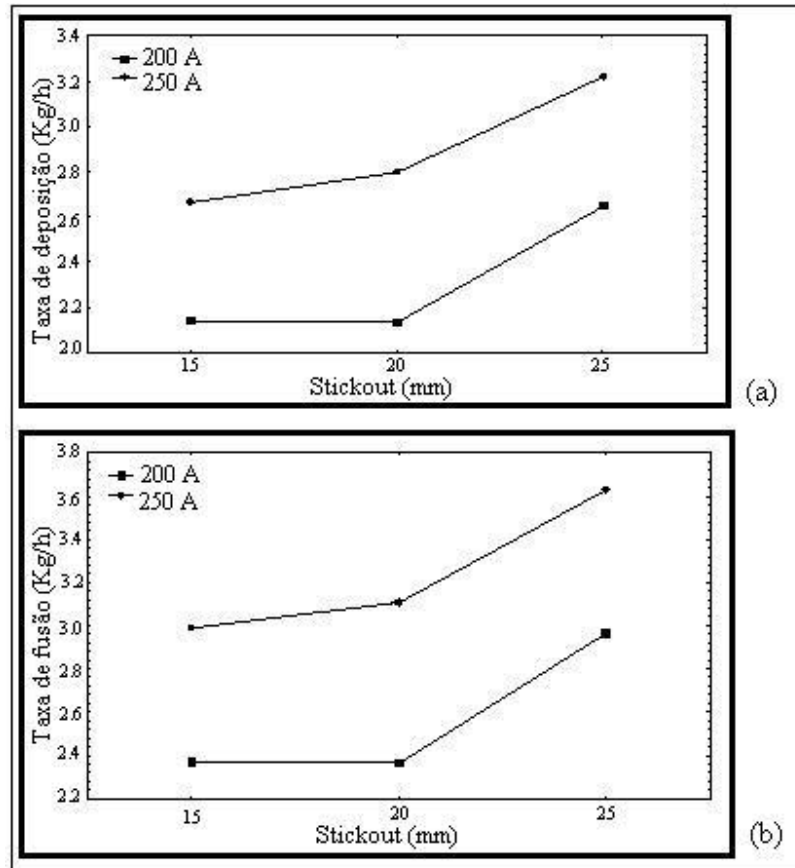


Figura 2.12 – Efeito do “stickout” sobre: (a) Taxa de deposição (b) Taxa de fusão (Braga, Mota e Farias, 1998).

No modo convencional de soldagem, Sales et al (2001), num estudo onde variaram a extensão do eletrodo, encontraram que este parâmetro afeta a largura e o reforço do cordão. Dependendo do gás utilizado (se CO₂ puro) o aumento da extensão do eletrodo provoca um aumento significativo do reforço do cordão de solda. Já em relação à largura do cordão, utilizando-se uma corrente de 160 A, notaram que um aumento da extensão do eletrodo causou a sua diminuição. No modo pulsado, Sales et al (2001) encontraram que a variação da extensão do eletrodo afeta a largura, o reforço do cordão de solda. O aumento da extensão do eletrodo tende a diminuir a largura e aumentar o reforço.

Os fabricantes recomendam a extensão de 19 a 38 mm para eletrodos com proteção gasosa e 19 a 95 mm com eletrodos autoprotetidos, dependendo da aplicação (Bracarense, 2000) .

2.5.4 - Vazão do Gás de Proteção

Na soldagem com proteção gasosa, a vazão do gás é uma variável que afeta diretamente na qualidade do metal depositado. Uma vazão inadequada propiciará pouca proteção da poça de fusão e conseqüentemente ocorrência de poros e oxidação no material fundido e na ponta do arame (Saito, 2001). Vazão excessiva de gás resultará em turbulência e aumento de impurezas no metal depositado. A escolha correta da vazão do gás dependerá do tipo e diâmetro do bocal da tocha, distância do bocal até a peça de trabalho e correntes de ar durante a soldagem (Bracarense, 2000).

2.5.5 - Taxa de Deposição e Rendimento

Nos processos de soldagem, freqüentemente necessita-se avaliar algumas características de desempenho objetivando a análise do comportamento produtivo, sendo, nesse trabalho, retratadas como taxa de deposição e rendimento do processo.

Taxa de deposição é a quantidade de eletrodo (em massa ou peso) depositado por unidade de tempo. Os fatores principais que governam a taxa de fusão são o tipo e estabilidade da transferência metálica, e ainda as características do fluxo que podem conter elementos de adição. Essa estabilidade pode ser influenciada pela tensão do arco e tipo de gás de proteção. Valores muito baixos de tensão podem provocar interrupções no arco ocasionando falhas na transferência do metal de adição. Conforme o tipo de gás de proteção utilizado no processo ocasiona instabilidades na transferência podendo provocar uma grande formação de salpicos. O tipo de transferência metálica determina a quantidade de material levado à peça para um determinado período de tempo, sendo o tipo por spray o que promove melhores resultados e a corrente elétrica o principal parâmetro de soldagem que determina o tipo de transferência do metal fundido (Saito, 2001). Além desses fatores, outros como diâmetro, composição e extensão do eletrodo também influenciam a taxa de deposição. Em soldagem com arames tubulares, relativamente à soldagem com arames sólidos, a taxa de deposição é significativamente maior. Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989), observaram que é possível obter taxas de fusão 30 a 35% superiores utilizando arames tubulares (**Figura 2.13**), possivelmente provocadas pela maior resistividade apresentada por estes consumíveis, devido a sua alma de fluxo. Perceberam, ainda, que o tipo de gás de proteção não influencia na taxa de fusão.

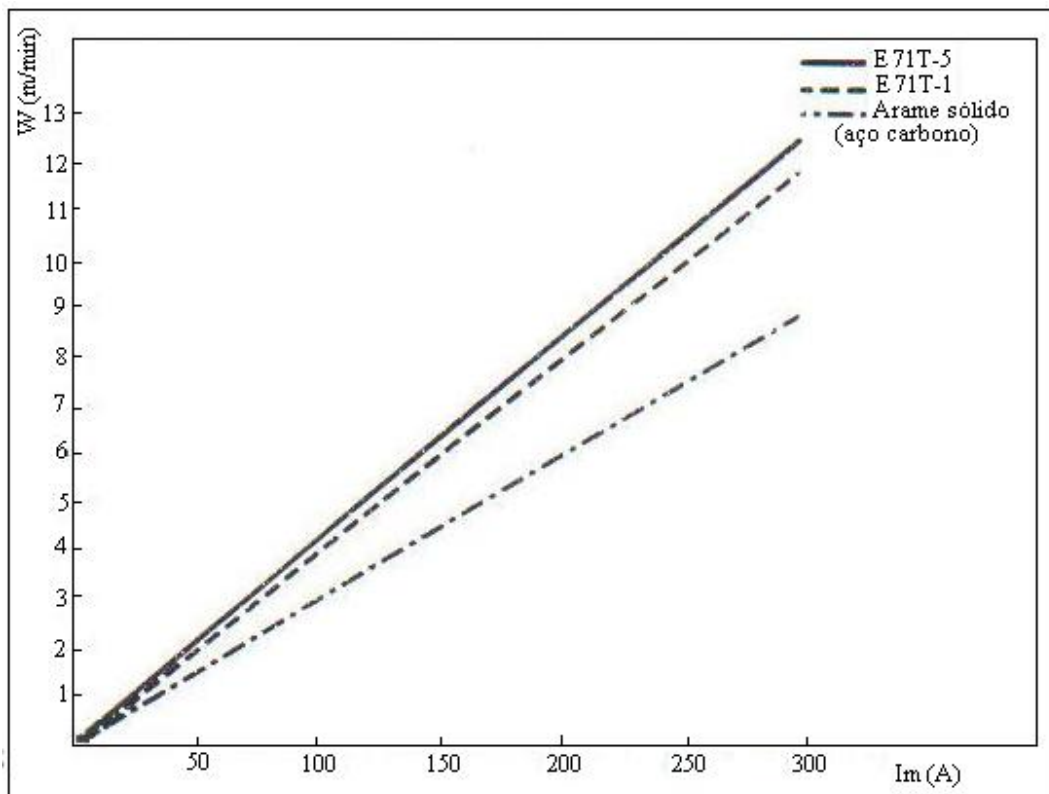


Figura 2.13 - Representação gráfica da velocidade de alimentação em função da corrente média para arames diferentes em condições idênticas ($I_p = 350$ A, $t_p = 4$ ms, $I_m/F = 2$, $D = 1,2$ mm, Ar + 20 % CO_2 , CC^+ , $V = 3$ m/s) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

O rendimento do processo é uma característica importante na análise de um processo de soldagem, pois influencia diretamente no aporte de calor e nos custos de soldagem. Os fatores que levam ao decréscimo no rendimento são, normalmente, as perdas na formação de respingos (Saito, 1997).

Machado (1995), acrescenta que a eficiência aliada com taxa de deposição e a massa do metal de solda a ser depositado podem ser alterados e melhor estabelecidos, a fim de aumentar a produtividade e reduzir custos nos diversos processos de soldagem.

2.5.6 - Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem influencia na penetração e contorno do cordão. Para altas velocidades de soldagem a penetração é baixa (Bracarense, 2000). Baixas velocidades e altas correntes podem resultar na ocorrência de inclusões de escórias e fusão do metal de base (Bracarense, 2000).

Um aspecto interessante foi observado por Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989) sobre a influência da velocidade de soldagem sobre a penetração em soldagem pulsada com arame tubular. Segundo os autores, ocorre uma diminuição da penetração para velocidades crescentes de soldagem entre 1 e 2 mm/s. Deste modo, a penetração apresenta um valor mínimo para velocidades de soldagem próximas de 2 mm/s seja qual for a intensidade média de corrente, e após este mínimo apresenta uma tendência para crescer com a velocidade, estabilizando logo em seguida, mantendo-se praticamente constante com o aumento da velocidade de deslocamento. Este comportamento pode ser observado na **Figura 2.14**.

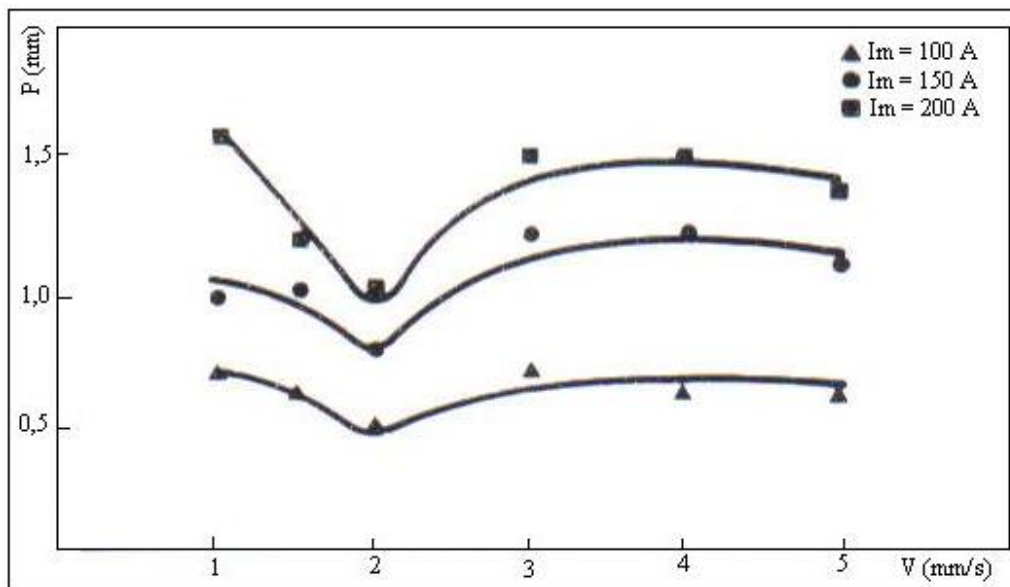


Figura 2.14 - Influência da velocidade de soldagem (V) na penetração (P) (E71T-1, D = 1,2 mm, Ar-20% CO₂, CC⁺) (Medeiros et al, 1989).

Ainda, de acordo com Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989), a área de penetração, a área de reforço e a área total que é a soma das duas anteriores são influenciadas pela velocidade de soldagem. Segundo eles, a área de reforço apresenta tendência para decrescer com o aumento da velocidade de soldagem, o que, aliás, já era de se esperar. A área de penetração apresenta um resultado semelhante, mas menos pronunciado e que se torna mais significativo com o aumento da intensidade média de corrente. A área total, como era de se esperar, apresenta um comportamento decrescente com o aumento da velocidade de soldagem. Esses comportamentos podem ser observados na **Figura 2.15**.

Em relação a diluição, a influência da velocidade de soldagem pode vista na **Figura 2.16**, que indica que, independentemente da corrente média, a tendência dos resultados é a mesma, a diluição

assume uma distribuição de valores mais ou menos crescentes com o aumento da velocidade de soldagem, não apresentando esta relação, no entanto, uma forma clara (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

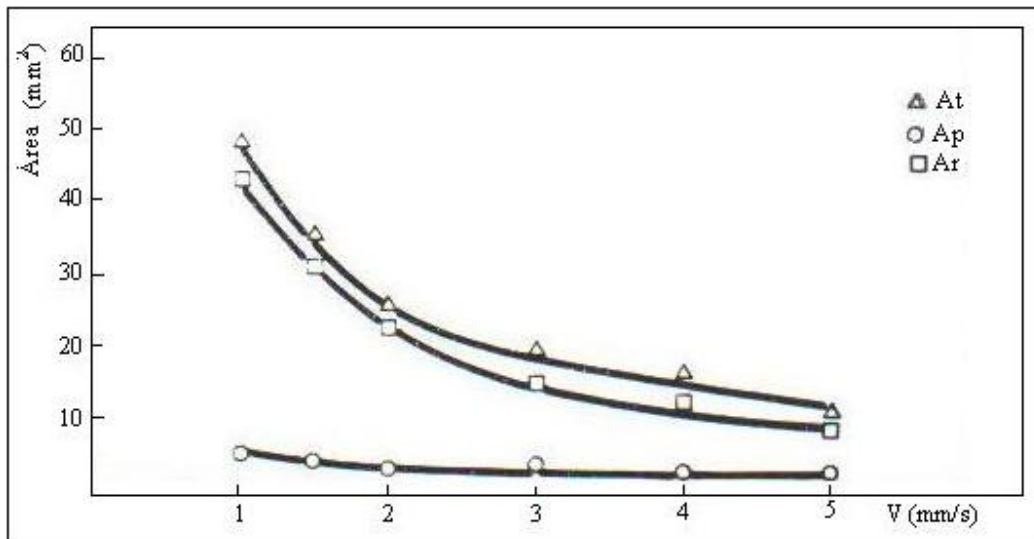


Figura 2.15 – Influência da velocidade de soldagem na área de reforço, na área de penetração, e na área total (E 71T-1, D = 1,2 mm, Ar + 20 % CO₂, I_m = 100 A, F = 50 Hz, CC⁺) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

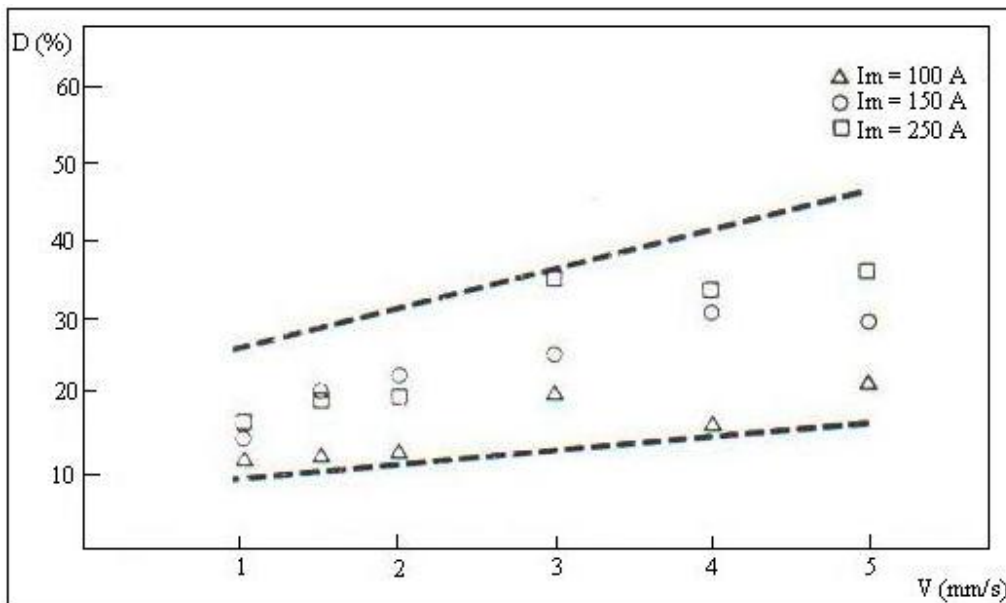


Figura 2.16 – Influência da velocidade de soldagem na diluição (E 71T-1, 1,2 mm, Ar + 20% CO₂, I_m/F = 2) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

2.6 – Processo Eletrodo Tubular x Processo MAG

Em função da similaridade entre os processos Eletrodo Tubular e MAG muitas vezes se torna interessante um comparativo entre os processos, de modo a avaliar as vantagens, principalmente, do processo Eletrodo Tubular sobre o MAG, devido ao seu alto custo.

Uma diferença essencial entre os arames sólidos (MAG) e os arames tubulares (Eletrodo Tubular) para soldagem com gás de proteção é o modo de transferência do metal de solda em uma soldagem ao arco aberto. Arames sólidos, que necessitam de misturas Ar + CO₂ para a soldagem ao arco aberto, produzem um arco pequeno e uma transferência de metal muito localizada. As gotas atravessam o arco ao longo de uma linha de centro, uma após outra a uma alta frequência, sendo que isso pode ser visto no cone característico do arco. Por causa dessa transferência axial, as gotas penetram na poça de fusão dentro de uma área de projeção relativamente pequena. Conseqüentemente, toda a energia contida nas gotas fica concentrada nessa área (Araújo, 2004).

Arames tubulares possuem um arco mais largo. As gotas espalham-se e criam uma área de projeção maior, distribuindo, portanto, toda a energia de soldagem mais uniformemente. Essa diferença nas características do arco entre os arames sólidos e os arames tubulares tem um efeito significativo na qualidade do metal de solda. Tipicamente, a penetração de arames sólidos é pequena e estreita, ou seja, é uma penetração característica no formato dediforme - *fingerform* - (**Figura 2.17**) (Araújo et al, 2001; Araújo, 2004; Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Embora o arco do arame sólido tenda a escavar profundamente o metal de base, há um risco de defeitos de falta de fusão por causa da penetração em forma de dedo. O menor desalinhamento da tocha pode causar uma falta de fusão lateral para uma junta em ângulo. A penetração dos arames tubulares tem uma forma mais rasa, porém mais larga, possibilitando uma tolerância muito maior para desalinhamentos da tocha e, adicionalmente, reduzindo os riscos de defeitos de falta de fusão. Esse efeito é ainda mais pronunciado quando o CO₂ é usado como gás de proteção em vez de misturas Ar + CO₂. Já que o CO₂ tem uma condutibilidade térmica maior, a energia térmica do arco espalha-se sobre uma área maior, o que favorece uma penetração na forma circular (**Figura 2.17**) (Araújo, 2004).

Algumas diferenças adicionais são encontradas na aparência do cordão, especialmente em correntes de soldagem maiores, onde a transferência axial de gotas dos arames sólidos cria uma poça de fusão turbulenta e ondulada. Como resultado, os cordões de solda podem não ser planos, podendo exibir um aspecto rugoso e uma molhabilidade irregular nas laterais. O arco mais largo dos arames tubulares produz uma poça de fusão calma e plana que forma um cordão de solda de aspecto liso e com

boa molhabilidade. Uma quantidade reduzida de respingos é outra vantagem frequentemente oferecida pelos arames tubulares. Por exemplo, os arames tubulares rutílicos são praticamente livres de respingos no modo de transferência por “spray”, especialmente quando soldados com mistura como gás de proteção. Arames sólidos produzem níveis de respingos significativamente maiores, especialmente quando soldados no modo de transferência por curto-circuito ou globular. Arames tubulares oferecem maior facilidade de evitar o modo de transferência globular através de um aumento da tensão do arco (Araújo, 2004).

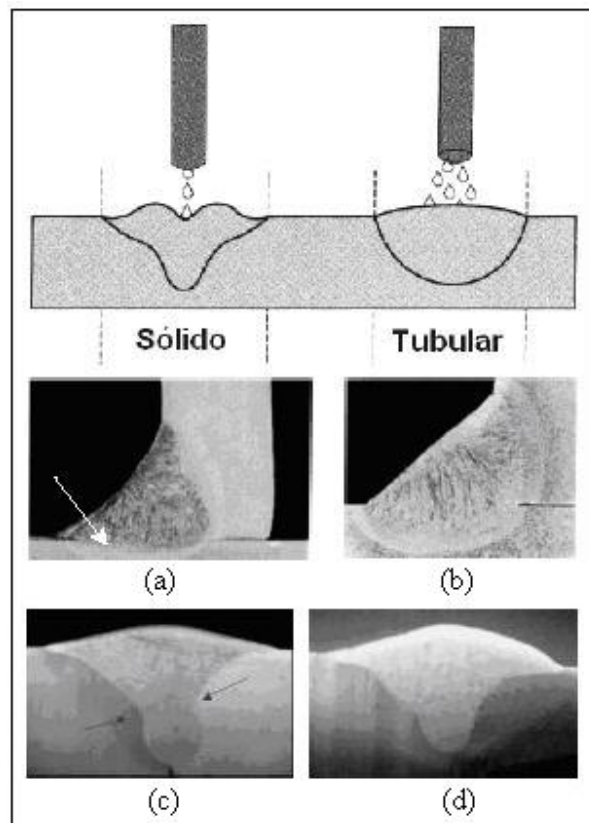


Figura 2.17 - Diferenças entre Arame Sólido e Arames Tubulares na Qualidade do Metal Depositado.

(a) Mistura Ar + CO₂, (b) 100 % CO₂, (c) e (d) 92 % Ar 8 % CO₂ (Araújo, 2004).

2.7 - Modo Pulsado

2.7.1 – Fundamentos do Processo

Conforme Amin (1983) e Alcan (1992), na operação em corrente contínua consegue-se obter a igualdade da velocidade de alimentação/taxa de fusão para toda faixa de corrente, porém a transferência por spray é obtida para correntes elevadas (acima de valor crítico) com grandes aportes de calor, pois para densidades de corrente menores ocorre transferência do tipo globular, que vem dificultar a soldagem fora de posição plana e horizontal.

A corrente pulsada põe fim às limitações impostas pela transferência globular, pois neste caso uma densidade de corrente que normalmente proporcionaria uma transferência globular é modulada para gerar uma onda de corrente com um nível alto (corrente de pico) e um nível baixo (corrente de base).

No modo pulsado, mecanismos de destacamento da gota metálica são principalmente ativados devido a rápida elevação da corrente de base aos níveis da corrente de pulso, que intensificam a ação das forças eletromagnéticas causadoras da constrição do filamento metálico que sustenta a gota à extremidade livre do arame em processo de fusão sob a ação do calor do arco voltaico (Subramaniam et al, 1998). Esta gota se destaca com um diâmetro, preferencialmente, próximo ao diâmetro do arame eletrodo, caracterizando, geralmente, um arco suave e estável.

Deste modo, transfere-se pequenas gotas com baixa entrega térmica. O esquema do processo apresenta-se na **Figura 2.18**.

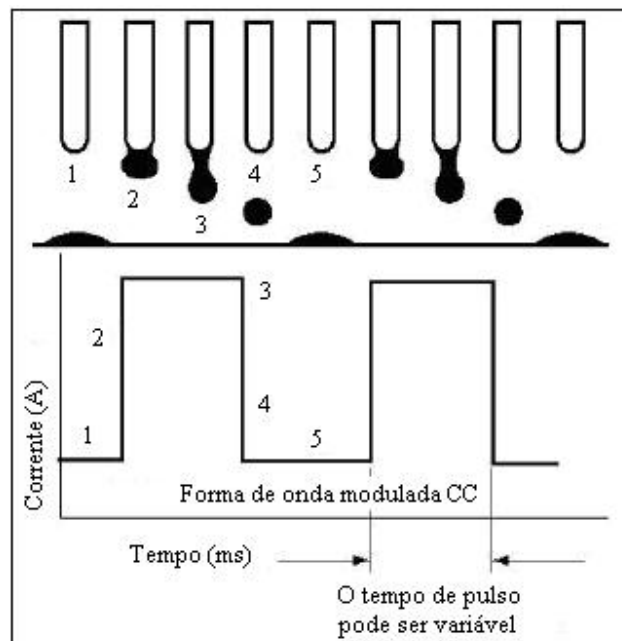


Figura 2.18 – Transferência por Arco Pulsado

A corrente de base serve, principalmente para manter o arco aberto, mas insuficiente para promover a transferência metálica. Já a corrente de pico é estabelecida para exceder o valor crítico, e assim proporcionar a transferência do metal em gotas pequenas. Além disso, o seu valor e o tempo de duração é tal que, a cada pulso, ocorre o destacamento de uma discreta gota de diâmetro igual ou menor que o eletrodo. Portanto, a técnica produz uma série de gotículas que resulta numa transferência do tipo spray, que se dá por meio de uma corrente média que normalmente produziria uma transferência do tipo globular, promovendo a formação de cordões de solda uniformes com mínimos defeitos.

Vários aspectos da soldagem pulsada tem sido apresentados na literatura. Borsworth (1991), por exemplo, acrescenta que utilizando corrente pulsada, a mesma eficiência térmica da corrente contínua é obtida, ou seja, em torno de 85%, com exceção da transferência por curto-circuito (95%). Ferree (1995), ainda ressalta que, operando com corrente pulsada, ocorre uma formação de salpicos pequena e uma menor formação de fumos.

Alcan (1992) destaca que a obtenção do tipo de transferência ideal depende dos corretos parâmetros de pulso: corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (T_p) e tempo de base (T_b), sendo que os tempos de pico e de base definem a frequência de pulso (F). Relata também, que a relação entre a taxa de alimentação do arame (V_a), conseqüentemente, a corrente média (I_m), e a frequência de pulso, é proporcional ao volume de gota destacada por pulso. Como a relação entre I_p e T_p só influenciam a frequência de destacamento da gota por pulso, a única forma de se manter uma dimensão de gota constante (estabilidade do processo) é a possibilidade de se variar continuamente a frequência, mantendo a relação entre velocidade de alimentação do arame e frequência constante. Assim, a dimensão da gota manter-se-á constante se a velocidade de alimentação do arame e a frequência de pulso forem aumentando na mesma proporção, uma vez que o comprimento do arame consumido por pulso será o mesmo.

2.7.2 - Vantagens do Processo

A grande vantagem na utilização do modo pulsado é que, devido a pequena energia fornecida ao processo, é possível executar soldas de pequenas espessuras e fora da posição plana utilizando-se o modo de transferência por spray.

Além disso, o processo Eletrodo tubular em corrente pulsada apresenta outras vantagens como a capacidade de produzir soldas automatizadas com maior estabilidade e produtividade do que quando se utiliza o modo convencional (Braga, Mota e Farias, 1998); um maior limite de valores de corrente, nos

quais esses arames podem ser processados satisfatoriamente, como pode ser observado na **Figura 2.19**, além da possibilidade de se soldar fora da posição plana (French e Bosworth, 1995; French e Bosworth, 1997; Blackman e Norrish, 1988).

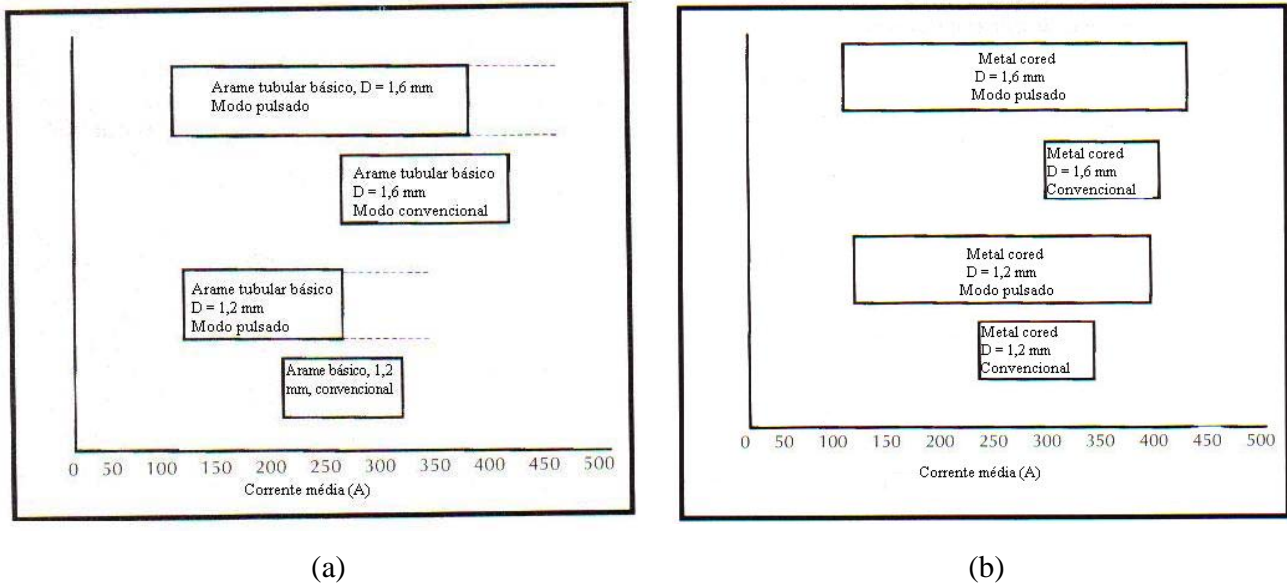


Figura 2.19 – Limites operacionais para soldagem (a) com arame básico (b) com arame “metal cored” em soldas de filete horizontal/vertical (French e Bosworth, 1995).

Ainda, French e Bosworth (1995) mostraram que a soldagem com arame tubular no modo pulsado é capaz de produzir soldas de maior qualidade que o modo convencional. A **Figura 2.20** apresenta seções de cordões de solda realizados com um arame tubular de fluxo básico de 1,2 mm de diâmetro no modo convencional e pulsado. Como pode ser visto, o cordão confeccionado no modo convencional (**Figura 2.20 A**) apresenta uma convexidade excessiva associada a uma ineficiente penetração de raiz. Já no modo pulsado (**Figura 2.20 B** e **Figura 2.20 C**), os cordões são, relativamente, planos e apresentam maior penetração de raiz.

No mesmo trabalho French e Bosworth (1995) notam as vantagens da soldagem no modo pulsado também com arame “metal cored”. Nas **Figuras 2.21 A** e **2.21 C**, onde são apresentadas as seções de dois cordões de solda realizados com arames de 1,6 mm e 1,2 mm de diâmetro, respectivamente, ambos com “metal cored” e no modo pulsado apresentaram cordões relativamente planos e com boa penetração de raiz. Por outro lado, na **Figura 2.21 B**, que apresenta a seção de um cordão de solda realizado com arame “metal cored” de 1,2 mm de diâmetro no modo convencional, nota-se a grande convexidade e a pequena penetração de raiz.

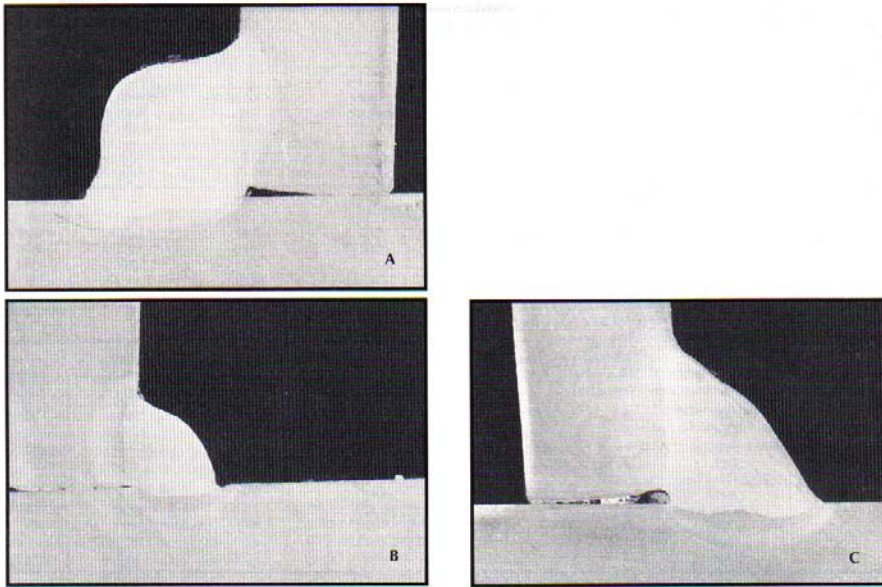


Figura 2.20 – Seções de cordões na posição vertical – arame básico, 1,2 mm de diâmetro. A) Cordão produzido no modo convencional. B) e C) Cordão produzido no modo pulsado (French e Bosworth, 1995)

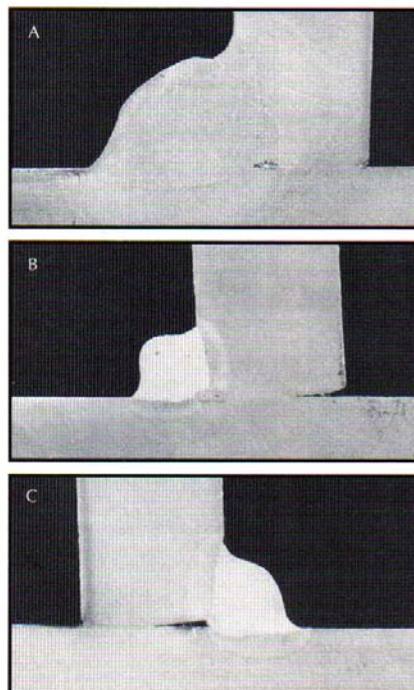


Figura 2.22 – Seções de cordões na posição vertical – arame “metal cored”. A) Cordão com 1,6 mm de diâmetro e modo pulsado. B) Cordão com 1,2 mm de diâmetro e modo convencional. C) Cordão com 1,2 mm de diâmetro e modo pulsado (French e Bosworth, 1995).

Por isto, pesquisas têm se concentrado na adequação do processo através da utilização do modo pulsado de soldagem o que permitiria sobrepor algumas dificuldades de utilização do mesmo, principalmente no que se refere à soldagem “fora de posição” ou ainda de chapas finas (French e Bosworth, 1995; Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989)

No entanto, são poucos os trabalhos publicados sobre este assunto, sendo escassas as fontes de pesquisas. Além disto, neste modo de soldagem são muitos os fatores variáveis responsáveis pela manutenção da operação de soldagem, devido a sua complexa natureza, o que exige um alto grau de habilidade por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais.

2.7.3 – Previsão dos Parâmetros de Pulsação

De acordo com Amin (1983) e Alcan (1992), na prática é um pouco difícil estabelecer as condições de pulso aplicáveis a um dado trabalho, o que normalmente é feito por tentativa e erro. Isso porque para uma dada velocidade de alimentação do arame, tanto a corrente de pico como o tempo de pico (magnitude do pulso) devem ser ajustados de tal forma que ocorra o destacamento de uma gota por pulso. Além disso, a corrente média calculada, utilizando-se todos os parâmetros juntos, deve fornecer uma taxa de fusão que se equipare com a velocidade de alimentação do arame de forma a manter o comprimento do arco constante. Caso a magnitude seja insuficiente, não ocorrerá concordância entre o destacamento e os pulsos, acarretando instabilidade na transferência, e conseqüentemente, defeitos de solda, tais como penetração irregular, falta de fusão e mordeduras.

Allum (1985) sugere em seu trabalho a utilização de arco pulsado com eletrodos tubulares, pois proporciona menores aportes térmicos, melhor formação e destacamento das gotas de metal fundido, promovendo melhorias nas propriedades mecânicas da junta através do controle das taxas de resfriamento e reações químicas, proporcionadas pelo fluxo dos eletrodos.

Estes fatos têm motivado as pesquisas sobre a influência dos parâmetros operacionais sobre as características da soldagem com arame tubular. Nascimento et al (1998), por exemplo, realizaram um procedimento experimental para seleção de parâmetros de pulso para soldagem com arame tubular, através do qual desenvolveram um pacote operacional, de acordo com uma velocidade de alimentação do arame de referência, o qual está apresentado na **Tabela 2.3**. O desenvolvimento desses pacotes operacionais em corrente pulsada para diferentes tipos de metal de adição e em vários diâmetros de eletrodos é muito importante porque contribui para a formação de um banco de dados que, conseqüentemente, auxilia na extinção das já mencionadas limitações sofridas pelo processo pulsado.

Tabela 2.3 – Parâmetros de pulso para soldagem com Eletrodo Tubular pulsado (Nascimento et al, 1998).

Va	Tpico	Ipico	Tbase	Ibase
(m/min)	ms	A	ms	A
5,5	1,8	278	2,7	33
6,5	1,5	299	2,3	58
7,5	1,3	319	2,0	85
8,5	1,2	336	1,7	113
9,5	1,0	353	1,6	142
10,5	0,9	369	1,4	171

Com o mesmo intuito, Braga, Mota e Farias (1998), estudaram o efeito da combinação da corrente média com níveis de variação da frequência de pulso e do “stickout” (distância tocha-peça), sobre a estabilidade do arco, as características econômicas do processo e a geometria do cordão de solda. Segundo eles, o aumento do “stickout” proporciona uma redução na estabilidade do arco, um aumento nas taxas de fusão e deposição e uma redução na penetração lateral e de raiz, que pode ser causada pela diminuição da energia de soldagem e, conseqüentemente, diminuição da diluição do metal de base, e um aumento na largura do cordão. O aumento da corrente média também ocasiona o crescimento na largura do cordão. Blackman e Norrish (1988), afirmam que o efeito da corrente média sobre a geometria do cordão, para soldagem com Eletrodo tubular, é o mesmo que para soldagem com arame sólido. Assim sendo, com o aumento da corrente média, o reforço e a penetração aumentam linearmente, e a diluição também aumenta. Portanto, melhores perfis de solda seriam encontrados utilizando-se altas correntes médias, o que, no entanto, na prática, é limitado pela posição de soldagem e energia fornecida ao processo.

Em relação a velocidade de soldagem, Blackman e Norrish (1988), afirmam que seu efeito é o mesmo sobre ambos os processos (com arame sólido e tubular), porém com limites diferentes. Com o aumento da velocidade de soldagem a penetração aumenta e o reforço diminui rapidamente. Porém com arames sólidos, isto ocorre até uma velocidade de soldagem limite de 12 cm/min; e com arames tubulares este limite aumenta para 24 cm/min (Blackman e Norrish, 1988).

Saito (2001) trabalhando com Eletrodo Tubular pulsado utilizando a mistura gasosa Ar + 25 % CO₂ e CO₂ puro observou que:

- a corrente média exerce grande influência sobre as características geométricas da solda e taxa de deposição, pois foi observado que o decréscimo da corrente média provocou a redução da área de reforço, do reforço, da largura e da área de deposição do cordão de solda; e que o aumento da corrente média provocou um incremento na penetração e na área de diluição do cordão e nas taxas de fusão e deposição.

- nas soldas utilizando o CO₂ como gás de protetor, mantendo-se os demais parâmetros de pulso constantes, os aumentos mais significativos no rendimento de deposição, largura do cordão e penetração da solda foram proporcionados pelo acréscimo na frequência de pulso; os maiores crescimentos na taxa de deposição, áreas de reforço e diluição foram provocados pelo aumento da corrente de base; o maior crescimento da altura do reforço foi provocado pelo aumento da corrente de pico;

- nos ensaios utilizando a mistura gasosa 75% Ar + 25% CO₂ como gás protetor, mantendo-se os demais parâmetros de pulso constantes, os maiores acréscimos no rendimento de deposição foram decorrentes de um incremento no tempo de pico; os maiores aumentos na taxa de deposição, áreas de reforço e de diluição, e ainda da largura do cordão, foram ocasionados pelo aumento da frequência de pulso; os maiores crescimentos na penetração da solda foram notados com o incremento na corrente de base; o aumento de qualquer parâmetro de pulso não provocou alterações expressivas na altura do reforço;

- no que se refere à influência dos dois gases, Saito (2001) verificou que, com a mistura gasosa, foram obtidos maiores valores de rendimento de deposição, largura do cordão, altura e área do reforço. Operando com o CO₂, foram conseguidos os maiores valores de penetração e área de diluição. Para a mesma corrente média, na maioria dos casos, utilizando o CO₂ obteve maiores valores de taxa de deposição, largura do cordão, penetração da solda, altura do reforço, áreas de reforço e diluição. O rendimento de deposição, na maioria dos casos, não sofreu alteração com a variação dos parâmetros de pulso.

2.8 – Considerações Finais

A revisão bibliográfica aqui apresentada abordou vários aspectos da soldagem com Eletrodo Tubular pulsada. No entanto, as informações aqui reunidas não se contentaram apenas em apresentar questões pertinentes às condições específicas estabelecidas neste trabalho; ao contrário tiveram como meta fornecer informações sobre o assunto, em geral. Isto porque, apesar da soldagem com o processo

Eletrodo Tubular ter ganho popularidade entre os fabricantes nos últimos anos, as fontes de pesquisa sobre o assunto ainda são escassas, como já mencionado em outras ocasiões. Como, provavelmente, pôde ser notado, muitas são as informações sobre a soldagem com arames tubulares básico e “metal cored” em relação às informações sobre a soldagem com arame rutilico, que é utilizado neste trabalho. Este é um exemplo dos reflexos da falta de fontes de pesquisas. No entanto, ao elaborar esta revisão, o pensamento era de que muitas das informações fornecidas sobre a soldagem com outros arames poderiam ser utilizadas para auxiliar nas análises realizadas no decorrer do trabalho, de modo que todas as informações aqui reunidas poderiam ser úteis ao desenvolvimento deste, e muitas realmente foram. Falou-se também, resumidamente, do processo Eletrodo Tubular em relação ao processo MAG; apesar de as informações sobre esta comparação parecerem inadequadas, vale ressaltar que a primeira parte do capítulo de resultados e discussões deste, procurou, justamente, comparar os dois processos; daí a importância dessas informações na elaboração da revisão bibliográfica.

Em adição, pode-se mencionar, que esta revisão procurou reunir o máximo de informações possível como forma de também contribuir para que o objetivo principal deste, que é ampliar o conhecimento sobre a soldagem com Eletrodo Tubular Pulsado, fosse atingido, fazendo com que este trabalho servisse de referência e fonte de pesquisa para outros.

Por fim, é importante ressaltar, que com esta revisão bibliográfica também foi possível conhecer os parâmetros e respostas considerados mais importantes e que têm sido estudados, ajudando a definir algumas condições aqui utilizadas.