



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

HENRIQUE BIANCHI

**COMPARAÇÃO DE CAPACIDADE DE PRODUÇÃO ENTRE O
ELETRODO TUBULAR E O ELETRODO MACIÇO**

CURITIBA-PR

2013

HENRIQUE BIANCHI

**COMPARAÇÃO DE CAPACIDADE DE PRODUÇÃO ENTRE O
ELETRODO TUBULAR E O ELETRODO MACIÇO**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti.

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

HENRIQUE BIANCHI

COMPARAÇÃO DE CAPACIDADE DE PRODUÇÃO ENTRE O ELETRODO TUBULAR E O ELETRODO MACIÇO

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora :

Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR

Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR

Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Américo Scotti, pela orientação e incentivo para a realização deste trabalho, sem o qual não seria possível.
- Ao Prof. Paulo Cesar Okimoto, pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Labsolda/UFPR, pelos recursos e laboratórios usados nesta pesquisa.
- Ao programa de especialização em Engenharia UFPR pela oportunidade de realização deste trabalho.
- Ao técnico do laboratório Derik, pela colaboração com os ensaios práticos.
- Aos familiares e amigos pelo incentivo e apoio.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo sobre o rendimento de deposição do metal de solda entre dois processos de soldagem distintos, sendo eles o MIG/MAG e o Eletrodo Tubular. Muito utilizados na indústria atual, o processo eletrodo tubular é conhecido e comercializado como um arame de alto rendimento (devido à alta densidade de corrente do consumível, ou seja, do arame tubular). Porém, a presença de fluxo em seu interior constitui uma parte do material transferido para a poça, mas não para o cordão, ou seja, não participa em termos de metal depositado na peça a ser soldada. Para avaliar o desempenho entre os processos em termo de capacidade de produção, foram realizadas deposições de metal pelos dois processos na posição plana, utilizando-se um mesmo nível de corrente e mantendo-se o mesmo volume de material transferido para a peça por unidade de comprimento de solda. Observou-se que o arame tubular apesar de apresentar rendimentos de deposição inferior ao eletrodo maciço, obteve maiores taxa de deposição de material, possibilitando assim alcançar maiores valores de velocidade de soldagem. No entanto, o valor médio da solda com eletrodo tubular, foi consideravelmente maior que o maciço, devido principalmente ao elevado custo do material envolvido.

PALAVRAS CHAVE: MIG/MAG, Eletrodo Tubular, Rendimentos.

ABSTRACT

In this paper we present a comparative study on the yield of deposition of weld metal between two different welding processes, namely the MIG / MAG and electrode Tubular. Widely used in industry today, the tubular electrode process is known and marketed as a high performance wire (due to high current density consumable, ie the tubular wire). However, the presence of flow inside a part of the material is transferred to the pool, but not the umbilical, that is, not participating in terms of metal deposited on the workpiece being welded. To evaluate the performance between processes in terms of production capacity, metal depositions were performed by two processes in the flat position, using the same level of current and keeping the same volume of material transferred to the workpiece per unit weld length. It was observed that the tubular wire despite having incomes below the deposition electrode mass, obtained higher deposition rate material, thus allowing to reach higher values of welding speed. However, the average value of the welding with flux cored electrode was considerably higher than the solid, mainly to the high cost of the material involved.

KEYWORDS: GMAW, FCAW, Efficiency.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1	PROCESSO MIG/MAG.....	11
2.1.1	<i>Transferência metálica</i>	<i>12</i>
2.1.2	<i>Variáveis do processo MIG/MAG.....</i>	<i>15</i>
2.1.3	<i>Vantagens e desvantagens do processo MIG/MAG</i>	<i>18</i>
2.2	PROCESSO FCAW	19
2.2.1	<i>Transferência metálica</i>	<i>20</i>
2.2.2	<i>Variáveis do processo FCAW.....</i>	<i>21</i>
2.2.3	<i>Vantagens e desvantagens do processo FCAW.....</i>	<i>23</i>
2.3	GASES DE PROTEÇÃO.....	24
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
3.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	26
3.2	PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	31
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
5	CONCLUSÃO	46
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

Acompanhar um mundo competitivo e em transformação, exige cada vez mais das empresas uma melhoria contínua de seus produtos e processos, além de uma redução de custos para valores competitivos. Para tanto, estudos e pesquisas se fazem necessários em todos os campos do desenvolvimento. O avanço na tecnologia de soldagem e os novos tipos de materiais fazem com que haja necessidade cada vez maior de se investigar os efeitos dessa tecnologia no dia-a-dia.

Conhecido e comercializado como um processo de grande versatilidade, produtividade e eficiência na taxa de deposição, o processo de eletrodo tubular vem ganhando espaço nos meios industriais onde até então eram dominados por outros processos, como eletrodo revestido e o MIG/MAG. Por unir as vantagens e características desses dos dois processos, o eletrodo tubular se apresenta como alternativa a esses processos.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos com o intuito de avaliar as características desses processos, muitos destes, descrevem a maior qualidade e produtividade por parte do processo com eletrodo tubular em relação ao eletrodo maciço, porém muitos desses trabalhos se baseiam em resultados práticos obtidas por intermédio do soldador, o que pode levar a interpretações errôneas de resultados (CARVALHO, 2010), sendo também muito relativa essa percepção. Além disso, a qualidade e a produtividade de uma solda podem ser influenciadas das mais diversas maneiras como, posição de soldagem, tipo de gás, modo de transferência, fonte de soldagem, tipo de chanfro, etc.

Nesse trabalho levou-se em consideração às diferenças fundamentais de cada processo, mas para que uma comparação coerente fosse possível, foi admitida como premissa básica a manutenção entre todas as soldas da mesma taxa de deposição por unidade de comprimento a uma mesma corrente média.

Assim, este trabalho se propõe a avaliar do ponto de vista da capacidade de produção os processos MIG/MAG (com arame maciço) e o processo Eletrodo Tubular (com arame tubular) em condições similares de soldagem na posição plana.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Este método de união, considerado em conjunto com a brasagem, tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas de toneladas de peso (MARQUES, 2009).

Embora a soldagem, na sua forma atual, seja um processo recente, com cerca de 100 anos, a brasagem e a soldagem por forjamento tem sido utilizadas desde épocas remotas. Os metais eram fabricados principalmente com a finalidade bélica e de instrumentos cortantes, eram produzidos e conformados por martelamento na forma de blocos e quando necessário soldado por forjamento. Assim, a soldagem foi, durante um longo período, um processo importante na tecnologia metalúrgica, principalmente, pela escassez e o alto custo do aço e o tamanho reduzido dos blocos de ferro (MARQUES, 2009).

A soldagem permaneceu como um processo secundário de fabricação até o século XIX, quando a sua tecnologia começou a mudar radicalmente, principalmente com o desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica que possibilitaram o aparecimento dos processos de soldagem por fusão. Ao mesmo tempo, o início da fabricação e utilização do aço na forma de chapas tornou necessário o desenvolvimento de novos processos de união para a fabricação de equipamentos e estruturas (MARQUES, 2009).

2.1 PROCESSO MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas - também conhecido como GMAW (Gas Metal Arc Welding)) é um processo de soldagem que utiliza como fonte de calor para a fusão dos materiais a serem unidos um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame-eletrodo alimentado continuamente e a peça a soldar. Quando a proteção da região a ser soldada é realizada por uma atmosfera protetora de gás inerte (argônio (Ar) e hélio (He)) e, conseqüentemente, não há atividade química com a poça de fusão, o processo é denominado MIG. Mas quando se

utiliza um gás ativo (dióxido de carbono (CO_2) ou misturas de Ar com CO_2 , O_2 e N_2) há ocorrência de atividade química com a poça de fusão, passando o processo ser denominado MAG. Mas de uma forma geral, se denomina o processo como MIG/MAG.

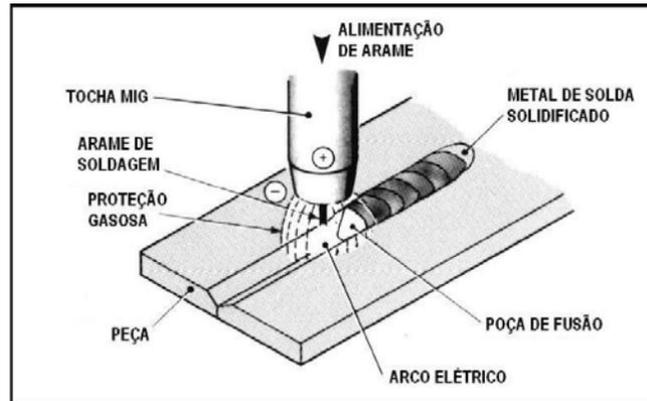


Figura 2.1 – Processo básico de soldagem MIG/MAG.

2.1.1 Transferência Metálica

Uma das características mais importantes a se conhecer nos processos de soldagem com adição de material é a forma pela qual o este material se transfere para a peça. Segundo MODENESI, 2012, no processo de soldagem MIG/MAG, a forma pela qual o metal fundido se transfere para a poça de fusão é através do arco elétrico e ocorre por meio de gotas de metal fundido geradas na ponta do arame-eletrodo. O modo de transferência influencia diversos aspectos operacionais da soldagem, em particular, o nível de respingos e fumos, a capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, o formato do cordão e, enfim, a estabilidade e o desempenho operacional do processo. Já o modo de transferência, segundo SCOTTI e PONOMAREV, 2008, é influenciado dentre outros fatores, pelo material e diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, pela intensidade e polaridade da corrente de soldagem, pelo comprimento do arco e pela pressão ambiente.

Diferentes formas de transferência de metal são observadas para os diferentes processos e condições operacionais. Varias classificações foram propostas ao longo dos tempos. Uma delas é a do Instituto Internacional de Soldagem (IIW), a qual é

baseada em aspectos fenomenológicos da transferência de metal e é apresentado nas tabelas a seguir.

Dentre os métodos de transferência metálica descritos acima, os principais são:

- Curto-Circuito;
- Globular;
- Goticular;

Tabela 2.1 – Formas usuais de transferência de acordo com o (IIW).

Tipos de transferência	
1	Queda Livre
	1.1 Globular
	1.1.1 Globular
	1.1.2 Repelida
	1.2 Goticular
	1.2.1 Projetado
	1.2.2 Com alongamento
	1.2.3 Rotacional
	1.3 Explosiva
2	Por Contato
	2.1 Curto Circuito
	2.2 Continua
3	Protegida por Escória
	3.1 Guiada pela parede
	3.2 Outros modos

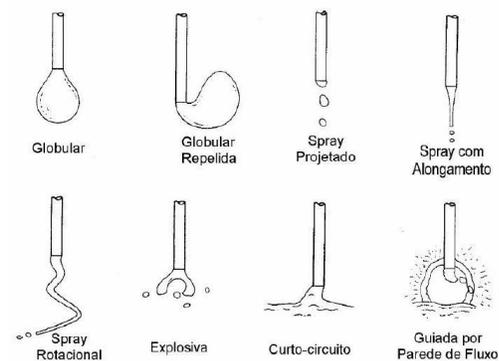


Figura 2.2– Transferência de acordo com a classificação do IIW

2.1.1.1 Curto Circuito

Na transferência por curto-circuito, a gota de metal fundido é transferida para a poça de fusão através do contato do arame-eletrodo com a peça curto circuitando o conjunto. Esse modo de transferência por contato só é possível devido ao baixo comprimento do arco elétrico (tensão baixa) utilizado nesse modo. SILVA, 2008, afirma que com a utilização de correntes baixas, a gota de metal fundido começa crescer na ponta do eletrodo, porém antes que atinja dimensões suficientemente grandes ocorre o curto-circuito. Segundo MODENESI, 2012, durante o curto-circuito, a corrente de soldagem se eleva rapidamente, e ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnéticas, em seguida, o contato é rompido e o arco é restabelecido iniciando novo ciclo. Por utilizar baixas correntes, a poça de fusão gerada tende a ser pequena e se solidifica rapidamente. Por essas características, é muito utilizada para soldagem de chapas finas e fora de posição.

2.1.1.2 Globular

A transferência globular é caracterizada pela transferência irregular do metal de adição para a poça de fusão. De acordo com SANTOS, 2010, por esse modo de transferência utilizar correntes baixas e tensões altas, a gota de metal líquido se mantém presa ao eletrodo por mais tempo (devido à ação da tensão superficial), crescendo até diâmetros superiores ao eletrodo. Com esse aumento de tamanho, seu peso também aumenta, ocasionando então o destacamento da gota por efeito gravitacional. Devido a essas características, o modo globular apresenta uma baixa frequência de transferência do metal para a poça de fusão, um elevado nível de respingos e instabilidade do arco, o que torna a posição de operação restrita à posição plana. Outros fatores podem também influenciar para esse modo de transferência como tipo de gás, polaridade do eletrodo e composição do material base a ser soldado.

2.1.1.3 Goticular

Na soldagem GMAW com uma proteção gasosa rica em argônio e com o eletrodo ligado ao pólo positivo da fonte, à medida que a corrente de soldagem aumenta, o diâmetro das gotas sendo transferidas se reduz lentamente. Segundo MODENESI, 2010, ao continuar o aumento na intensidade de corrente, em um determinado nível ocorre uma rápida redução do diâmetro das gotas, aumentando a frequência de transferência. O arco antes confinado à porção inferior da gota, ainda ligada ao arame, passa a envolvê-la completamente. O metal é transferido através da coluna do arco elétrico em alta velocidade e alta energia, o que faz com que a poça de fusão seja bastante fluida, estável, com mínimas perturbações do arco e poucos respingos. Ainda segundo MODENESI, 2012, nestas condições a transferência não é mais controlada pela gravidade e as gotas são transferidas em direção à poça de fusão independentemente da posição de soldagem. Porém, devido ao elevado aporte, o modo de transferência do tipo goticular fica restrito à posição plana ou horizontal, além de uma espessura mínima por risco de danificação da chapa.

2.1.2 Variáveis do processo MIG/MAG

O número de parâmetros a regular no processo MIG/MAG é muito grande e todos eles, em maior ou menor grau, governam a saída do processo, ou seja, a geometria do cordão e a produção. Considera-se com parâmetro de soldagem toda variável que possa alterar as características do cordão de solda, desde a composição e vazão do gás de proteção, passando pelo diâmetro e composição do arame-eletrodo, velocidade de soldagem, ângulo da tocha, velocidade de alimentação do arame, corrente, comprimento do arco (ou tensão), etc (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

CORRENTE

Por estar diretamente ligada a quantidade de calor transferido para a peça, a corrente de soldagem é uma variável fundamental para que o processo de soldagem se estabeleça. Através deste parâmetro se determina a quantidade de fusão no metal de base, a penetração da solda e a taxa de fusão do eletrodo. Segundo SCOTTI e PONOMAREV, 2008, o calor para que isso aconteça é oriundo de diversas fontes, tais

como efeito Joule devido à passagem da corrente pelo eletrodo, calor da coluna de plasma, calor na conexão arco-eletrodo e da poça de fusão. Maiores valores de corrente resultam em maiores taxas de fusão, maior penetração, cordões mais largos e até alteração no tipo de transferência metálica.

TENSÃO

A tensão de soldagem está associada diretamente com o comprimento do arco, um aumento de tensão resulta num arco com maior comprimento. MODENESI, 2012, afirma que a tensão tem um menor efeito na penetração, pois variações desta causam maiores efeitos na coluna do arco cujo calor gerado é transmitido principalmente na direção radial. Por ter um formato de tronco cone, pode-se concluir que a tensão de soldagem afeta principalmente a largura do cordão, tensões mais baixas tendem a gerar cordões com perfil mais estreito, ao passo que tensões maiores resultam em cordões mais largos.

VELOCIDADE DE SOLDAGEM

A velocidade de soldagem é a relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo. A influência da velocidade de deslocamento na largura e penetração do cordão pode ser associada com uma redução do aporte térmico, quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento desta, com um aumento da velocidade. A influência no reforço do cordão, ou melhor, na área depositada pode ser associada à redução da quantidade de material de adição fornecido à solda com o aumento da velocidade de soldagem (MODENESI, 2012).

DIÂMETRO DO ELETRODO

Cada eletrodo de uma dada concepção e natureza tem uma faixa de corrente utilizável de trabalho. Esta faixa é naturalmente delimitada por efeitos indesejáveis, tais como ausência de molhabilidade em valores muito baixos de correntes e salpicos e porosidades, no caso de valores muito elevados. Tanto a taxa de fusão de um eletrodo, com sua penetração, são entre outras coisas função da densidade de corrente. Assim, em igualdade de corrente, um eletrodo mais fino penetrará mais e depositará mais

rapidamente do que um eletrodo de maior diâmetro. SANTOS, 2010, diz que a definição do diâmetro do eletrodo ocorre principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e outros fatores que restrinjam o tamanho da poça de fusão.

EXTENSÃO LIVRE DO ELETRODO

A extensão do eletrodo (stick-out) é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do bico de contato, e a peça de trabalho. Formada pela soma de dois comprimentos, comprimento do arco e comprimento energizado do eletrodo, é uma variável de processo importante de ser controlada, pois como estão correlacionada com a velocidade de alimentação, tensão, corrente, e até mesmo com as características estáticas da fonte, uma variação no comprimento livre do eletrodo resulta em variações nos demais parâmetros de soldagem.

OUTROS FATORES

Além destas variáveis, outros fatores afetam de forma mais ou menos importante o formato do cordão de solda. O posicionamento da tocha em relação à peça, por exemplo, influencia a concentração e distribuição do calor transferido do arco para a peça e, desta forma, afeta o formato do cordão. Define-se como plano de deslocamento, aquele formado pelo eixo da solda e a normal à face desta. O ângulo formado entre essa normal e a projeção do eletrodo no plano de deslocamento é o ângulo de deslocamento. De acordo com esse ângulo, processo será feito “puxando” ou “empurrando” a poça de fusão, o que influencia o formato final do cordão, tendendo o cordão feito puxando-se o arco a ser mais estreito e a apresentar uma maior penetração.

Como a espessura e geometria dos componentes sendo soldado influenciam o escoamento de calor da região da poça de fusão para o restante da poça, elas também afetam a forma do cordão de solda. Neste sentido, cordões de solda depositado em peças de pequenas espessuras tendem a ter uma maior penetração em comparação com aqueles depositados nas mesmas condições sobre peças de maior espessura.

Na soldagem com proteção gasosa, a composição do gás de proteção também influencia o formato do cordão de solda. Esta influencia pode estar ligada a fatores como mudanças nas condições de transferência de calor para a peça, no modo de transferência do metal de adição e na pressão do arco sobre a poça de fusão e no movimento do metal líquido na poça de fusão.

2.1.3 Vantagens e desvantagens Variáveis do processo MIG/MAG

2.1.3.1 Vantagens

As principais vantagens do processo do processo MIG/MAG citados por SCOTTI e PONOMAREV, 2008, são:

- Soldagem de praticamente todos os metais e ligas comerciais;
- Alimentação contínua do eletrodo;
- Soldagem em todas as posições;
- Elevada taxa de fusão do arame-eletrodo e também de deposição;
- Alta capacidade produtiva;
- Geração de pouco fumo e pouca escória;
- Permite a automatização industrial, possibilitando a utilização de robôs.

2.1.3.2 Desvantagens

As principais restrições do processo MIG/MAG citadas na literatura por SCOTTI e PONOMAREV, 2008, são:

- Maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de soldagem;
- Uma alta emissão de calor e luz;
- Relativa dificuldade para manipular o equipamento de soldagem;
- Utilização mais restrita em locais de difícil acesso, devido à maior complexidade e dimensões dos equipamentos;
- O arco deve ser protegido das correntes de ar, para garantir a eficiência da proteção gasosa utilizada.

2.2 PROCESSO FCAW

O processo de soldagem com arame tubular (FCAW – “Flux Cored Arc Welding”) é um processo de soldagem por fusão, onde o calor necessário para se realizar a soldagem é fornecido por um arco elétrico que se estabelece entre a ponta de um eletrodo continuamente alimentado e o metal base a ser soldado. A característica que distingue este processo de outros é a o fluxo contido no interior do eletrodo tubular, podendo ou não ter a proteção adicional de um gás externo (AWS, 1991). O mesmo procedimento para se iniciar a soldagem no MIG/MAG é utilizado para o arame tubular.

O eletrodo do processo FCAW é formado por um arame metálico no formato tubular e um fluxo composto de diversos materiais em seu interior os quais possuem diversas funções. Durante a soldagem esse fluxo se funde formando uma capa de escória sobre o cordão de solda, agindo na proteção da poça de fusão, na estabilização do arco elétrico e podendo também atuar na composição da solda com a adição de elementos de liga (AWS, 1991). Segundo STARLING *et al*, (2004), no processo FCAW, a parte metálica do arame é a principal responsável pela condução da corrente elétrica até o arco. O arco ocorre externamente ao fluxo e, assim, as condições para fusão do fluxo são menos favoráveis do que no processo de soldagem ao arco submerso (SAW).

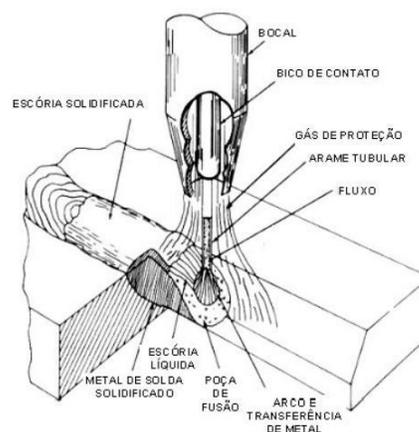


Figura 2.3 - Processo básico de soldagem FCAW com proteção adicional.

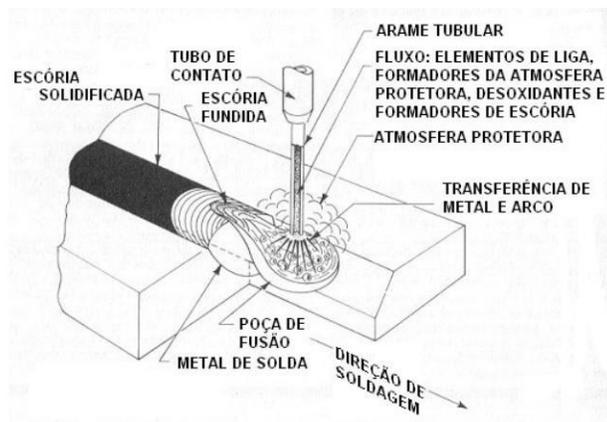


Figura 2.4 - Processo básico de soldagem FCAW com proteção adicional.

O processo possui duas grandes variações que se diferem entre si pelo modo de proteção do arco e poça de fusão da contaminação atmosférica. Um deles é o eletrodo auto-protetido, onde a proteção da poça de fusão é obtida pela decomposição e vaporização do fluxo contido no interior do eletrodo devido ao aquecimento pelo arco elétrico. O segundo tipo, um gás de proteção adicional externo é utilizado. Em ambas as variações do processo, a fluxo promove uma formação considerável de escória para proteger o metal de solda solidificando (AWS, 1991).

2.2.1 Transferência metálica

Assim como em outros processos de soldagem com eletrodo consumível, o material do eletrodo é aquecido desde sua temperatura inicial até sua temperatura de fusão e, a seguir, ser fundido e separado (transferido) do eletrodo para a poça de fusão através do cone de arco elétrico (STARLING, 2006). Porém para o arame tubular existe a participação do fluxo na transferência, segundo FELIZARDO, 2005, como a seção do eletrodo é tubular e a parte metálica esta envolvendo uma porção de fluxo as gotas de metal fundido não são formadas na direção do eixo do arame, mas sim nas laterais. Para SALES, 2002, a gota formada na ponta do eletrodo é envolvida pela escoria, que serve como guia para sua transferência. Os arames tubulares são caracterizados pela transferência globular não axial de gotas metálicas médias e grandes. Ainda conforme SALES, 2002, as gotas formadas, crescem girando

na borda do arame, de modo que a transferência, em muitos casos, é irregular em função da diferença das condutibilidades térmicas e elétricas do fluxo e do arame. Esta diferença de condutibilidade promove o atraso da fusão do fluxo em relação à fusão do metal e, como consequência a excesso de fluxo não fundido na ponta do eletrodo. Com a formação de gás em função da fusão desse fluxo, há um escoamento desse gás em direção a poça de fusão, o que dificulta a formação e transferência da gota no sentido axial do eletrodo.

Da mesma maneira que no processo MIG/MAG, é importante conhecer e compreender o modo de transferência do arame tubular, pois afeta diretamente as características e eficiência do processo, estando também relacionada com os ajustes de corrente, tensão, polaridade, diâmetro do eletrodo, composição do eletrodo, fluxo e gás de proteção.

2.2.2 Variáveis do processo

O número de parâmetros a regula no processo MIG/MAG é muito grande e todos eles, em maior ou menor grau, governam a saída do processo, ou seja, a geometria do cordão e a produção. Considera-se com parâmetro de soldagem toda variável que possa alterar as características do cordão de solda, desde a composição e vazão do gás de proteção, passando pelo diâmetro e composição do arame-eletrodo, velocidade de soldagem, ângulo da tocha, velocidade de alimentação do arame, corrente, comprimento do arco (ou tensão), etc (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Da mesma maneira que o processo MIG/MAG a soldagem com arame tubular é influenciada de diversas maneiras como corrente, tensão, diâmetro do arame, velocidade de soldagem, etc., portanto é importante uma correta compreensão das principais variáveis do processo.

CORRENTE

Corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo de soldagem por eletrodo tubular, sendo que a taxa de deposição e penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem (AWS, 1991). Diferente

do arame maciço aonde toda seção transversal do arame conduz corrente, no arame tubular a corrente é conduzida pela fita metálica que envolve o fluxo resultando então numa maior densidade de corrente e numa maior ação do efeito Joule sobre a taxa de fusão, (FORTES, 2005). Aumentando a corrente, aumenta a taxa de deposição, penetração, produzindo cordões de aparência convexa. Já uma corrente insuficiente muda o modo de transferência metálica para globular gerando excessivos respingo e possibilidade de porosidade. O aumento ou diminuição da corrente deve sempre ser acompanhado de uma regulagem dos demais parâmetros para manter uma relação ótima entre corrente e tensão (AWS, 1991).

TENSÃO

A tensão no arco esta diretamente relacionada com o comprimento do mesmo e podem afetar características do cordão de solda, como perfil do arco, penetração, largura e as propriedades do cordão. Grandes comprimentos de arco causam muitos respingos irregularidades do cordão, além da introdução de nitrogênio no banho (para arames autoprotetidos), enquanto que para pequenos comprimentos de arco há uma diminuição na tensão superficial da poça, originando cordões convexos de pouca penetração (AWS, 1991).

EXTENSÃO LIVRE DO ELETRODO

A extensão livre do eletrodo influencia de forma importante no arame tubular, pelo efeito Joule (resistência elétrica) à temperatura do eletrodo é função do seu comprimento energizado. A temperatura por sua vez afeta a energia do arco, taxa de deposição e penetração da solda. DBCP muito grande tendem a provocar instabilidade no arco e respingos, enquanto que um DBCP muito pequeno remete a uma tensão muito particular.

VELOCIDADE DE SOLDAGEM

A velocidade de soldagem para o arame tubular influencia de forma semelhante ao processo MIG/MAG. Mantida a regulagem dos parâmetros uma melhor penetração na solda é conseguida com o aumento da velocidade, até um valor máximo (devido à

sobreposição do arco na poça e não no metal base para baixas velocidades), a partir desse máximo a penetração passa a diminuir novamente (agora o aporte de energia transferida para o metal base vai diminuindo com o aumento da velocidade). Baixas velocidades podem ainda provocar o aprisionamento de escoria na solda e altas demais tendem a gerar soldas irregulares.

OUTROS FATORES

Alguns fatores também devem ser levados em conta como variáveis de processo no processo de eletrodo tubular. Semelhante ao MIG/MAG, o ângulo da tocha, o diâmetro do eletrodo são variáveis importantes no processo, pois influencia em mais ou menos graus na penetração, acabamento da solda e posição e acesso de/para soldagem.

2.2.3 Vantagens e desvantagens

2.2.3.1 Desvantagens

- Alta qualidade do metal depositado;
- Excelente acabamento, solda uniforme, contorno;
- Grande variedade de aços soldáveis com uma grande faixa de espessura;
- Facilmente automatizável;
- Arco visível;

2.2.3.2 Desvantagens

- Atualmente limitado à soldagem de metais ferrosos e ligas a base de níquel;
- O processo produz escória que deve ser removida;
- Custo de eletrodo mais caro que o maciço;
- O alimentador de arame e a fonte de soldagem devem ficar mais próximos do operador;
- Geração mais acentuada de fumos;

2.3 GASES DE PROTEÇÃO

Em quase toda totalidade dos processos de soldagem, uma proteção da região a ser soldada se faz necessária. A maneira mais comumente utilizada de promover essa proteção é através de um fluxo de gás direcionado sobre o metal base para proteger a poça de fusão e o metal a ser transferido. Essa proteção evita a contaminação da poça por elementos nocivos presentes na atmosfera, elementos que podem comprometer a qualidade da região soldada.

Uma diferenciação dos gases de proteção pode também ser realizada quanto ao comportamento reativo com o metal de solda. Segundo SCOTTI e PONOMAREV, 2008, os gases de proteção são classificados como inertes ou ativos. Gases inertes seriam aqueles que não reagem quimicamente com o metal de solda, enquanto os ativos são aqueles, puros ou em combinação com gases inertes, que tem reatividade química moderada e controlada. Essa reatividade dos gases afeta não somente as reações químicas e metalúrgicas da solda, mas também as propriedades resultantes da solda como possibilidade de gerar porosidade, formação do cordão, estabilidade do arco e controlar a operacionalidade e transferência metálica.

Outros fatores também devem ser levados em consideração para uma boa proteção da região a ser soldada, a saber, a vazão de gás, posição de soldagem, geometria da junta influenciam em maior ou menor grau tanto na proteção em si, quanto em aspectos econômicos.

Os principais gases utilizados em soldagem são:

Argônio – é um gás de proteção inerte, utilizado quase sempre em mistura com outros elementos reativos para garantir uma melhor estabilidade do arco. O argônio puro geralmente é utilizado pra soldagem de materiais não ferrosos e reativos, devido a seu baixo potencial de oxidação (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). Por apresentar uma densidade maior que ar, a proteção gasosa da poça de fusão por argônio é favorecida em posição plana.

Hélio – outro gás de proteção inerte, porém de custo mais elevado o hélio, segundo Ivanilza, possui um potencial de ionização maior que o argônio, e conseqüentemente, uma tensão mais alta pode ser adotada durante a soldagem, quando outras variáveis

são mantidas constantes. O alto calor imposto e a energia mais uniformemente distribuída na poça favorecem a soldagem materiais com elevada condutividade térmica e a formação de cordões mais largos e arredondados.

Dióxido de Carbono – o CO₂ é gás ativo mais utilizado comercialmente devido ao seu baixo custo e o único utilizado na forma pura em soldagem (FELIZARDO, 2006). É frequentemente utilizado na soldagem de aços com baixo teor de carbono, devendo ser evitada sua utilização em materiais reativos. Sua alta capacidade de troca de calor comparado ao argônio tem um comportamento similar ao hélio em relação à geometria do cordão (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Misturas de gases

Argônio – CO₂ – principal mistura de gases utilizada no processo MIG/MAG, o gás desta mistura produz uma notável melhora na estabilidade do arco, além de uma melhor fluidez da poça de fusão, podendo ainda melhorar a aparência do cordão de solda. Aplicado quase que exclusivamente para soldagem de aços de baixo teor de carbono, os teores variam de 3% a 25% sendo estes valores dependentes da condição da superfície, geometria da junta, posição de soldagem e da composição química do metal base.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A proposta deste trabalho é gerar um estudo comparativo do rendimento de deposição entre dois processos de soldagem similares, mas que usam eletrodos distintos, sendo eles o processo MIG/MAG e o Arame Tubular.

Cada um desses processos apresenta suas próprias características e diferenças que variam das mais diversas maneiras. Portanto, para que esta comparação fosse possível, foi adotado um procedimento experimental que garantisse uma correlação entre os processos. Conhecendo as diferenças entre os processos, o estudo comparativo foi realizado mantendo-se alguns parâmetros idênticos, porém não se restringindo a manter todos os demais iguais. Com o objetivo proposto em termos de rendimento de deposição, as soldas foram realizadas dentro de uma mesma faixa de corrente e procurando manter a mesma taxa de deposição por unidade de comprimento em todas as placas de teste.

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

BANCADA

A bancada onde foi realizado o experimento é constituída de uma estrutura metálica em forma de mesa, sobre esta estrutura foram realizados os testes de soldagem. Próximo a esta estrutura, uma fonte de soldagem adaptada a um robô operado remotamente, realizou o procedimento de soldagem.



Figura 3.1 – Visão geral dos equipamentos utilizados.

FONTE E CABEÇOTE ALIMENTADOR DE ARAME.

Para a realização dos experimentos em ambos os processos utilizou-se uma fonte de soldagem da marca Fronius Transinergic CMT. O arame foi alimentado por um cabeçote alimentador Fronius VR 700 CMT. Para a realização dos testes, em ambos os processos optou-se por utilizar a fonte em modo convencional de soldagem (tensão constante), possibilitando desta maneira, uma regulagem (“ajuste fino”) de parâmetros durante a soldagem.



Figura 3.2 – Fonte de soldagem

ROBÔ

Para a realização dos testes foi optado pela utilização de robô na operação de soldagem. Por apresentar um maior controle e manutenção dos parâmetros de soldagem como DBCP e velocidade de soldagem a utilização do mesmo diminui consideravelmente defeitos e imprecisões inerente ao processo na operação manual. O robô utilizado foi o IRB 1600 da marca ABB.



Figura 3.3 – Robô de soldagem utilizado.

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição e monitoramento dos sinais de soldagem foram realizados por um sistema computacional. Esse equipamento captura os sinais elétricos do processo de soldagem através da ligação de sensores nos terminais energizados do sistema a ser soldado.

Após a coleta dos dados é realizado um tratamento dos sinais elétricos com o auxílio de software específico o qual possibilita a exposição de maneira gráfica na tela do computador.



Figura 3.4 – Equipamento utilizado na aquisição de sinal.

METAL DE ADIÇÃO

Para o processo de soldagem MIG/MAG o metal de adição escolhido foi um arame maciço de aço carbono da classe AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro, da ESAB. No processo Eletrodo Tubular, o arame utilizado foi o AWS E71T-1C(M) do tipo rutilico, diâmetro 1,2 mm, também de fabricação da ESAB. A escolha pelos ditos arames ocorreu devido à maior utilização industrial e disponibilidade comercial dentro de suas áreas de atuação. A tabela 3.1 apresenta a composição química e mecânica desses arames eletrodos.

Tabela 3.1 – Valores nominais de composição química e propriedades mecânicas dos consumíveis

	C	Mn	Si	L.R (MPa)	L.E. (MPa)	Alongamento (%)	Charpy [J] (– 30°C)
AWS ER70S-6	0,08	1,50	0,90	560	470	26	70
AWS E71T-1C(M)	0,04	1,10	0,48	590	540	28	86

Para a realização do cálculo da taxa de fusão dos eletrodos (item 3.2), é necessário se determinar uma grandeza importante dos arames eletrodos que é a sua densidade (ρ). Para isso, se utilizou um método semelhante ao utilizado por SANTOS, 2010, para se encontrar essa grandeza. Um segmento de dois metros de arame foi cortado e com o auxílio de um paquímetro (resolução de 0,2 mm) foi medido o diâmetro do arame em diversos pontos. Após a medição dos diâmetros, o mesmo segmento de arame foi pesado em uma balança de baixa resolução (0,01g). Conhecido a massa e o volume do material, determina-se a densidade do arame. O procedimento foi realizado igualmente para os dois arames, obtendo-se os valores de 6,69 g/cm³ e 7,67 g/cm³ para densidade dos arames tubular e maciço, respectivamente. Esses valores estão próximos aos encontrados por SANTOS, 2010, a qual em seu trabalho obteve as densidades de 6,37 g/cm³ e 7,48 g/cm³ para o arame tubular e maciço respectivamente.

METAL BASE

Como metal de base foi escolhido o aço carbono A-36, devido a sua grande

utilidade na indústria e a sua facilidade de se encontrar este material. Em cada placa de teste, ilustrado na Figura 3.5, foi preparado um chanfro, para tomar os resultados mais aplicáveis a condições reais. Sobre este material foram realizados os testes de soldagem, tanto para a etapa do trabalho que consistia em encontrar as velocidades de alimentação que fornecessem as correntes desejadas quanto à deposição dos cordões de solda sobre o chanfro.

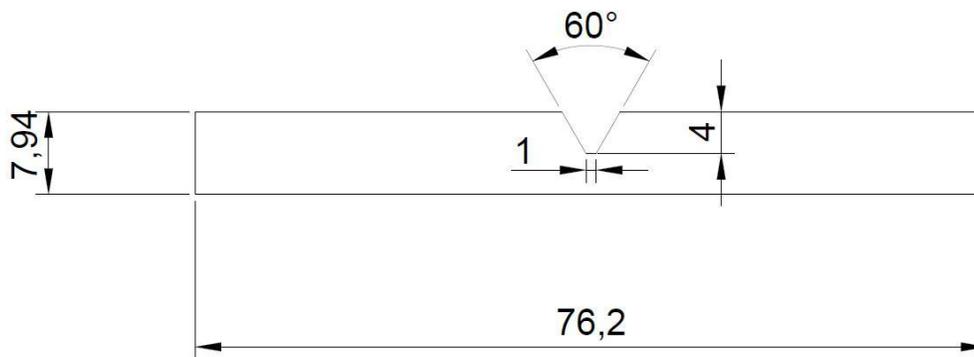


Figura 3.5 – Desenho esquemático com dimensões da chapa.

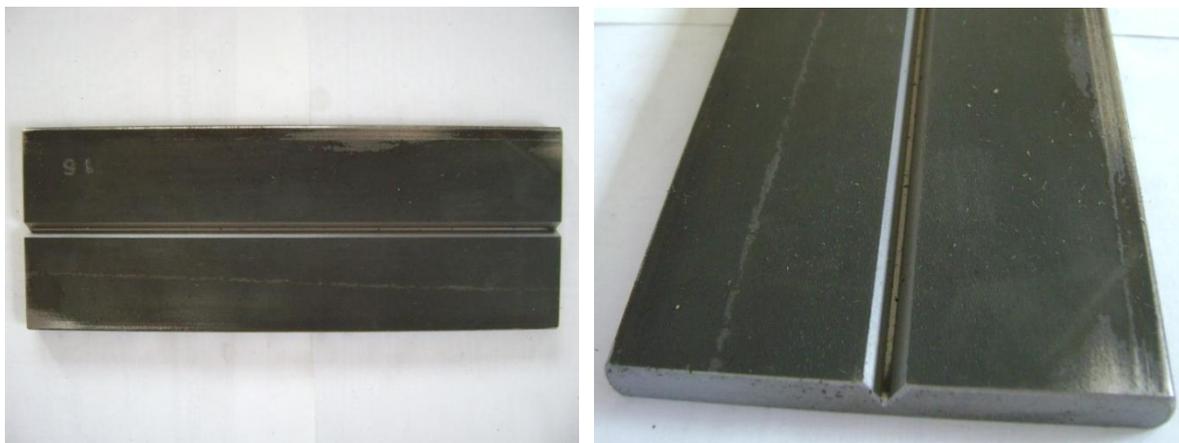


Figura 3.6 – Chapa com chanfro utilizada para os experimentos.

GASES DE PROTEÇÃO

Os gases de proteção adotados para os procedimentos experimentais realizado foi 100% CO₂ em soldagem pelo processo de arame tubular e Ar+2%CO₂ para o processo MIG/MAG. Procurou-se regular as vazões do gás para valores recomendados pelos fabricantes, o qual permaneceram entre 15 e 20 l/min.

3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Neste trabalho comparativo entre os arames, alguns parâmetros foram escolhidos para serem mantidos constantes, sendo eles a corrente de soldagem, a DBCP (distância bico de contato peça) e diâmetro do arame.

A escolha dos valores de corrente ocorreu dentro de uma faixa que pudesse atender aos dois arames, segundo os catálogos de fabricantes para o diâmetro utilizado. Observando tais catálogos, adotou-se dois níveis de corrente, de 250 A e 300 A.

A distância bico de contato peça (DBCP) foi mantido constante em 20 mm, valor característico do processo de eletrodo tubular, segundo o fabricante. Já para o processo MIG/MAG, devido ao modo de transferência utilizada no experimento ser o goticular, essa distância também foi adotada atendendo às necessidades.

Para a realização dos ensaios, foi adotado os seguintes passos:

- Regular a velocidade de alimentação de arame (V_{alim}) progressivamente até encontrar a corrente de soldagem desejada;
- Calcular a taxa de deposição por unidade de comprimento;
- Regular uma velocidade de soldagem (V_{sol}) a qual fosse possível preencher um chanfro de dimensões conhecidas em um único passe, mantendo-se a mesma taxa de deposição por unidade de comprimento.

Para um teste inicial um cordão de solda foi depositado em uma chapa de aço carbono proveniente de sucata. O valor de tensão recomendado pelos fabricantes para o diâmetro utilizado foi regulado no equipamento. Numa primeira aproximação, a velocidade de alimentação de arame foi obtida através de experimentos semelhantes realizado por SANTOS, 2010, para quem para essa corrente os valores conseguidos ficavam em 5,0 m/min. A partir daí, iniciou-se uma variação deste valor para cima e para baixo até se obter a corrente desejada, que ficou em 248 A para uma velocidade de alimentação de 10,5 m/min. Pequenos ajustes de tensão foram realizados para melhorar a estabilidade do arco e modos de transferência quando foram necessários. De forma semelhante se determinou as velocidades de alimentação que fornecesse as

demais correntes em ambos os processos.

Tabela 3.2 – Velocidade de alimentação para corrente desejada com eletrodo tubular.

Corrente [A]	V _{alim.} [m/min]
248	10,5
312	13,0

Tabela 3.3 – Velocidade de alimentação para corrente desejada com eletrodo maciço.

Corrente [A]	V _{alim.} [m/min]
251	7,0
302	8,5

Os seguintes cálculos foram empregados para ajudar na parametrização.

$$T_D = \frac{(N_D \times T_F)}{V_{sol}} \quad \left[\frac{g}{cm} \right] \quad (\text{Eq 3.1})$$

T_D – Taxa de deposição por unidade de comprimento, [g/cm];

N_D – Rendimento de deposição;

T_F – Taxa de fusão, [g/min];

V_{sol} – Velocidade de soldagem, [cm/min].

$$T_F = \left(\frac{\pi \times d^2}{4} \right) \times V_{alim} \times \rho \quad \left[\frac{g}{min} \right] \quad (\text{Eq 3.2})$$

T_F – Taxa de fusão do eletrodo, [g/min];

d - Diâmetro do eletrodo, [mm]

V_{alim} – Velocidade de alimentação do eletrodo, [cm/min];

ρ – Densidade do arame, [g/cm³].

$$T_d = \frac{(M_f - M_i)}{t_{ab}} \quad \left[\frac{g}{min} \right] \quad (\text{Eq 3.3})$$

T_d – Taxa de deposição, [g/min];

M_f - Massa final, [g];

M_i – Massa inicial, [g];

T_{ab} – tempo de arco aberto, [min].

$$N_D = \frac{T_d}{T_F} \quad [\%] \quad (\text{Eq 3.4})$$

N_D – Rendimento de deposição, [%];

T_d – Taxa de deposição, [g/min];

T_F – Taxa de fusão do eletrodo, [g/min].

Através da velocidade de soldagem (V_{sol}), pode-se obter o volume de material depositado em um cordão por unidade de comprimento de solda para uma dada corrente selecionada. Assim, pode-se conhecer a taxa de deposição por unidade de comprimento envolvida no processo de soldagem. Se for mantido esse valor para as demais correntes e nos dois processos, garante-se um parâmetro para efeito de comparação.

Para essa etapa, optou-se pelo início do experimento utilizando o arame tubular. A regulagem da velocidade de soldagem foi realizada de modo que o chanfro da chapa de teste fabricada para o experimento fosse totalmente preenchido em um único passe. Para uma primeira aproximação, uma velocidade de soldagem aleatória inicial de 7,5 mm/min foi usada. Utilizando-se a velocidade de alimentação obtida anteriormente (correspondente a corrente desejada), depositou-se um cordão de solda sobre o chanfro da chapa. Após a soldagem, uma limpeza do cordão foi realizada, removendo escórias e respingos de solda. Ao final disso, foi feita uma avaliação visual do cordão a fim de se observar a aparência do cordão e principalmente o preenchimento completo do chanfro. Observou-se que o cordão, apesar de preencher o chanfro não apresentava uma geometria muito boa com um volume elevado de material depositado, além de um reforço muito grande. A velocidade de soldagem, então, foi aumentada para 9,0 mm/min. Um novo cordão foi realizado repetindo o procedimento, tendo para essa velocidade agora, além do completo preenchimento do chanfro, uma boa aparência quanto a reforço e largura (considerados aceitáveis para efeito deste trabalho).

Adotado como um cordão padrão, a massa dessa chapa foi medida antes e depois da soldagem. Com os dados da medição da massa e com a utilização da equação 3.3 foi encontrada uma taxa de deposição (T_d) igual a 1,207 g/min. Com a densidade do arame calculada anteriormente, obteve-se com a equação 3.2 a taxa de fusão do eletrodo. Por fim com a equação 3.4, calculou-se o rendimento de deposição

para este eletrodo que permaneceu em torno de 82 %.

Agora, de maneira iterativa, as demais velocidades de soldagem foram obtidas mediante o uso das equações já descritas, para a corrente de 300 A e utilizando eletrodo tubular o rendimento de deposição N_D calculado anteriormente foi mantido para se encontrar a nova velocidade de soldagem. Posteriormente, tendo posse das massas das chapas antes e depois da soldagem esse rendimento foi recalculado.

Esse procedimento foi realizado de maneira semelhante ao eletrodo maciço. O mesmo cálculo iterativo foi realizado para obter os valores de velocidade de soldagem para o arame maciço nas duas correntes desejadas, sendo a única alteração realizada no que se diz respeito ao rendimento inicial para esse eletrodo, o qual foi adotado em 100%, sendo posterior também realizada correção para valores reais obtidos com as massas das chapas.

Vale notar também que uma outra variável escolhida como parâmetro de comparação entre as correntes e entre os processos foi o taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D). Esse valor obtido no cordão tido como padrão 1,207 g/cm também foi mantido constante em todos os cálculos realizados para obtenção das demais variáveis envolvidas na soldagem.

Tabela 3.4 – Massas das chapas antes e após a soldagem.

Peça	M_i [g]	M_f [g]	ΔM [g]
1	919,31	943,43	24,12
2	920,53	945,41	24,88
3	920,80	944,42	23,62
4	922,78	946,33	23,55

Após a soldagem de todos os corpos de prova, uma macrografia de cada uma das seções soldadas foi realizada. Para isso, um corte com serra circular padrão metalográfico foi realizado no corpo de prova no sentido transversal ao cordão de solda. Com o segmento da chapa em mão, um lixamento nas superfícies foi feito utilizando lixa d'água com granulometrias de 220, 320, 400 e 600 mesh em seqüência e sentidos ortogonais uma em relação a cada lixa. Em seguida a superfície foi atacada quimicamente com uma solução de Nital 10 por alguns segundos. Depois de retirar o corpo de prova da solução foi removido o excesso de Nital por meio da utilização de álcool etílico na região a ser analisada. Terminado a secagem da superfície, com o

auxílio de um microscópio, a superfície do corpo de prova foi visualizada e o perfil do cordão de solda analisado.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A utilização da metodologia proposta neste trabalho e descrita no capítulo anterior, possibilitou a realização de testes experimentais a fim de se gerar um estudo comparativo entre os eletrodos maciço e tubular utilizado no processo MIG/MAG e o processo de arame tubular respectivamente. As Figuras 4.1 a 4.4 ilustram as placas de teste depois de soldadas.

A opção pelo modo de transferência metálica do tipo goticular no processo MIG/MAG permitiu um arco elétrico regular e estável gerando poucos respingos, isso contribuiu consideravelmente no rendimento de deposição do eletrodo maciço, porém, como uma das variáveis escolhidas a serem mantidas constantes no processo era a distância bico de contato peça (DBCP), o arco elétrico gerado para este modo de transferência foi muito grande para o tipo e dimensões do chanfro utilizado. Devido a isso, as soldas realizadas pelo processo MIG/MAG apresentaram mordeduras nas bordas do cordão conforme pode ser observado nas figuras 4.3 e 4.4.

Como o objetivo do trabalho era avaliar rendimentos dentro de uma série de parâmetros mantidos constantes entre os processos, optou-se por não realizar correções na geometria do cordão. Porém para um nível de produção industrial, tal descontinuidade deve ser evitada através da regulação dos parâmetros que se forem necessários.

Para a realização do experimento, após alcançar um cordão aceitável com o primeiro arame utilizado, foram realizados os cálculos referentes à taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento do arame-eletrodo. Mantendo a mesma taxa de deposição por unidade de comprimento para os demais testes, os corpos de provas soldados na seqüência puderam apresentar um parâmetro importante de comparação entre os corpos de prova.

Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os valores monitorados e calculados de parâmetros que foram objetos de estudo neste trabalho. Observa-se que, com exceção da corrente de 312 A os valores obtidos estão de acordo com o proposto.

Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos para a soldagem com eletrodo tubular e proteção gasosa

100% CO₂

I [A]	U [V]	V _{alim} [m/min]	V _{sol} [mm/s]	T _d [g/min]	T _F [g/min]	N _D [%]	T _D [g/cm]
248	30,0	10,5	9,0	65,18	79,44	82,06	1,207
312	33,5	13,0	11,15	83,18	98,36	84,57	1,207

Tabela 4.2 – Parâmetros obtidos para a soldagem com eletrodo maciço e proteção gasosa Ar +

2%CO₂

I [A]	U [V]	V _{alim} [m/min]	V _{sol} [mm/s]	T _d [g/min]	T _F [g/min]	N _D [%]	T _D [g/cm]
251	31,5	7,0	8,38	59,49	60,72	97,98	1,207
302	32,5	8,5	10,18	71,92	73,73	97,54	1,207

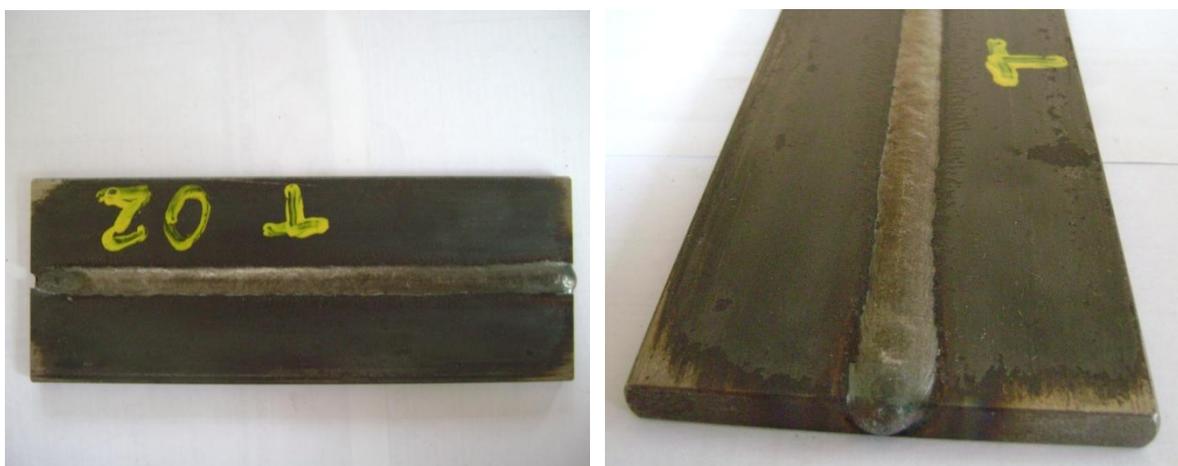


Figura 4.1 – Chapa soldada com arame tubular 250 A.



Figura 4.2 – Chapa soldada com arame tubular 300 A.

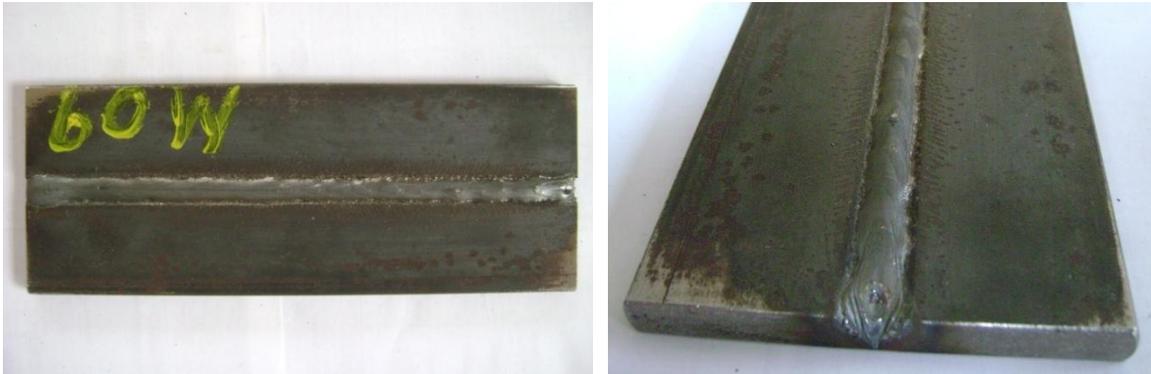


Figura 4.3 – Chapa soldada com arame maciço 250 A.



Figura 4.4 – Chapa soldada com arame maciço 300 A.

Ainda pelas tabelas 4.1 e 4.2 é possível observar que para a mesma condição de soldagem, ou seja, utilizando para a mesma faixa de corrente, a taxa de fusão do eletrodo do eletrodo tubular é superior a do eletrodo maciço em ambos os testes realizados. Apesar dos processos de soldagem estudados utilizarem gases de proteção diferentes nos experimentos, e que estes influenciam, além do modo de transferência metálica, a taxa de fusão do eletrodo, o principal motivo do eletrodo tubular apresentar uma maior taxa de fusão é que esta variável é controlada pelo calor gerado no arco elétrico e pelo efeito Joule proveniente da resistência a passagem de corrente pela extensão livre do eletrodo. No eletrodo tubular por este apresentar uma seção transversal em formato tubular, somente a fita metálica que envolve o fluxo conduz a

corrente elétrica na seção. Para o mesmo diâmetro selecionado e corrente monitorada, a densidade de corrente nesta área é maior, resultando num aumento na taxa de fusão do eletrodo.

Quando analisamos o cálculo do rendimento de deposição entre os processos, o tubular apresentou um rendimento inferior, ficando entre 82% e 84% contra 97% do eletrodo maciço. Esse rendimento apresentado pelo eletrodo tubular ocorre pela perda de material através de respingos, fumos metálicos, mas principalmente pela presença do fluxo contido no interior do arame. Esse fluxo participa da composição da massa inicial do eletrodo, porém ao se fundir e transferir para a poça de fusão, se transforma na escória protetora do processo, sendo removida após a conclusão do passe de soldagem (não participa da massa final de material transferida para a peça a ser soldada). Observa-se também que esse rendimento apresentado ficou abaixo dos rendimentos apresentados pelos fabricantes de eletrodo, os quais divulgam como rendimento de deposição na ordem de 88%.

No entanto, segundo SCOTTI e PONOMAREV, 2008, num processo de soldagem um dos fatores mais importante em uma medição de produtividade é a taxa de deposição o qual o processo oferece. Nas tabelas 4.1 e 4.2 acima, nota-se que apesar de o arame tubular apresentar um rendimento de deposição inferior, ele tem uma taxa de deposição maior que o maciço, é essa taxa que mede o material que realmente é transferido para a peça a ser soldada. Essa maior frequência deposição de material se deve justamente a maior taxa de fusão do arame, (conforme discutido anteriormente), a qual supera a limitação do rendimento. Com esse aumento da frequência de transferência de material, torna-se possível o aumento da velocidade de soldagem utilizando o arame tubular, isso acaba tornando o processo mais competitivo economicamente, pois reduz o tempo de realização de uma determinada solda. Essa taxa de deposição pode ser influenciada de diversas maneiras como tipo de gás, modo de transferência, tipo de eletrodo entre outras formas, por isso, deve ser levado em consideração em uma análise técnica e econômica para a seleção de um processo de soldagem.

Ainda nas tabelas 4.1 e 4.2 observa-se que nos corpos de teste realizados, para a mesma quantidade de material depositado por unidade de comprimento, temos as maiores velocidades de soldagem (para a mesma faixa de corrente), também conseguidas com a utilização do arame tubular, 11,15 mm/s contra 10,18 mm/s em 300 A e 9,0 mm/s contra 8,38 mm/s para 250 A. Já uma comparação de velocidade de soldagem com taxa de fusão nota-se que a taxa de fusão do arame tubular na corrente de 250 A é inclusive superior a taxa de fusão do arame maciço para a corrente de 300 A.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram as imagens obtidas das macrografias realizadas nas placas de teste após a soldagem. Nota-se claramente a diferença de perfil do cordão entre os dois processos, formato este que é influenciado principalmente devido aos gases de proteção utilizados em cada processo, o arame tubular utilizando o CO_2 apresentando um formato parabólico e o arame maciço utilizando uma mistura de $\text{Ar}+2\%\text{CO}_2$ em formato dediforme. Segundo FOGAGNOLO, 2011, o gás CO_2 devido a seu maior potencial de ionização gera mais calor no arco elétrico, facilitando a formação de cordões mais largos. De acordo com AMÉRICO SCOTTI (comunicação verbal), a razão para os cordões mais largos não é exatamente devido ao maior potencial de ionização por si só, á maior capacidade de troca de calor com o material de base. Já a mistura utilizada com arame maciço, ainda segundo FOGAGNOLO, 2011, por ser essencialmente Argônio, esse gás por ter um menor potencial de ionização propicia um arco estável com boa condução de elétrica e alta densidade de corrente propiciando uma concentração do arco em uma pequena área, gerando um perfil de penetração profunda. Já AMÉRICO SCOTTI (comunicação verbal) justifica o perfil dediforme também baseado na menor transferência de calor do gás ionizado ou para a chapa.

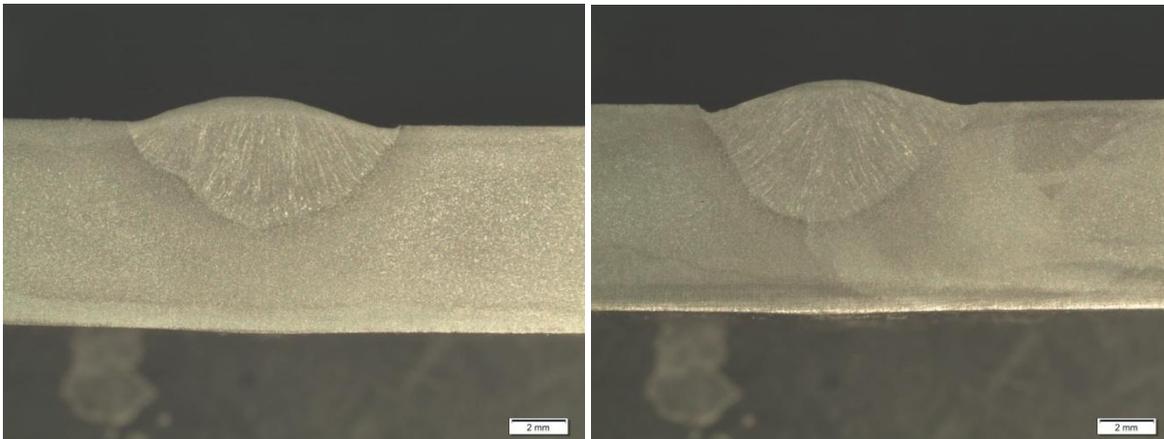


Figura 4.5 – Macrografia do cordão de solda realizado com arame tubular corrente de 250 A e 300 A respectivamente.

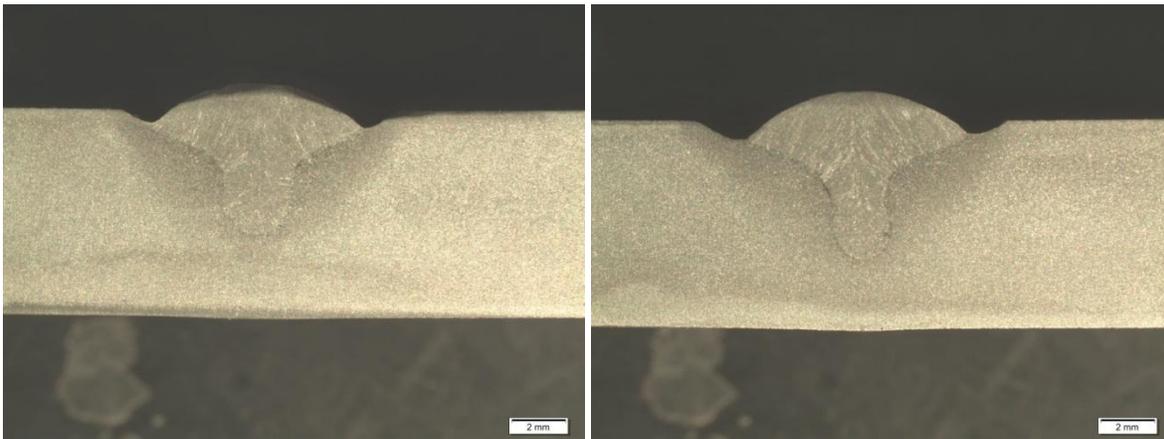


Figura 4.6 – Macrografia do cordão de solda realizado com arame maciço corrente de 250 A e 300 A respectivamente.

A figura 4.7 mostra o cordão de solda realizada com o arame maciço a 300 A. É possível observar a ocorrência de falta de fusão nas laterais do cordão. Essa descontinuidade poderia ser eliminada no momento da realização do cordão utilizando-se técnicas e procedimentos operacionais de soldagem, tal como o movimento de tecimento. Deve-se lembrar que nesse trabalho optou-se pelo deslocamento simples da tocha sem esse movimento. Outra maneira, para eliminar tal defeito, seria utilizar um gás de proteção com um teor de CO_2 mais elevado (um gás mais “quente”). Com a aplicação dessas duas recomendações/sugestões tem-se uma melhor distribuição de calor sobre o metal base, facilitando assim a fusão completa dos materiais.

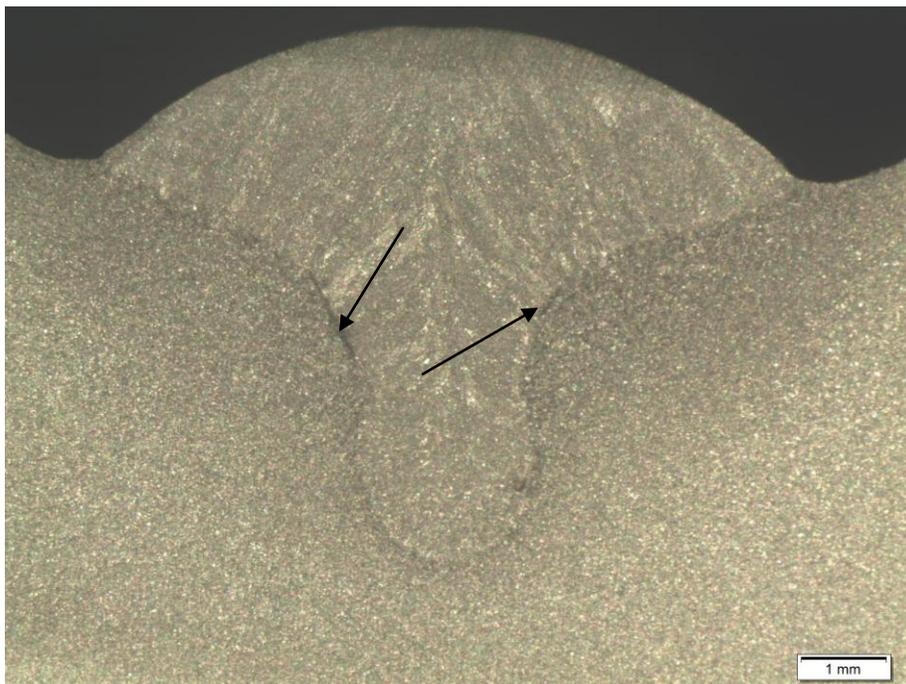


Figura 4.7 – Falta de fusão encontrada no cordão de solda realizado com arame maciço 300 A.

Antes da escolha do processo de soldagem, uma abordagem importante a ser realizada é em relação às viabilidades econômicas dos processos e do produto de fabricação. As velocidades de soldagem obtidas pelo processo tubular foram superiores ao do arame maciço, em ambas as correntes, 9,00 mm/min contra 8,38 mm/s em 250 A e 11,15 mm/s contra 10,18 mm/s a 300 A, sendo indicado onde o tempo de produção de um determinado produto é uma variável mais importante. Já para o caso do eletrodo maciço as velocidades de soldagem foram menores, porém, como já descrito anteriormente, o processo apresenta um rendimento de deposição superior, sendo indicado nesse quando o custo de deposição de material é a variável essencial.

Quando se fala em custos de soldagem e capacidade produtiva em uma linha industrial, vários fatores influenciam na formação do preço final de um produto, podemos destacar algumas como sendo, custo de material, mão de obra, equipamento e eletricidade. Porém para a seleção do processo a ser utilizado, o tempo (preparação de junta, realização de soldagem, limpeza/acabamento) para a realização de uma determinada atividade é a variável mais importante. Os custos envolvidos tendem a

variar conforme o tempo de duração da atividade varia por isso uma análise mais precisa acaba sendo de difícil realização, pois cada processo apresenta suas características próprias que oscilam das mais diversas maneiras.

Neste trabalho observou-se que o eletrodo tubular apresentou nos dois níveis de corrente estudado um menor rendimento de deposição do que o eletrodo maciço, porém apresentou uma taxa de fusão, e uma taxa de deposição superior, sendo essa última sim, um fator de importância na medição de indicativo de produção segundo SCOTTI e PONOMAREV, 2008.

Com a metodologia adotada neste trabalho e conhecida as grandezas descritas anteriormente, foi possível realizar uma comparação econômica entre os processos para o mesmo nível de corrente. Através da consulta a revendedores locais o preço do quilograma de arame eletrodo foi obtida. A tabela 4.3 mostra esses valores levantados.

Tabela 4.3 – Valores de obtidos em taxa de fusão, taxa de deposição, velocidade de soldagem e preço por quilograma.

Corrente [A]	Arame Eletrodo	Taxa de Fusão [kg/h]	Taxa de deposição [kg/h]	V_{Soldagem} [m/h]	Preço/kg
250	Maciço	3,64	3,57	30,17	7,40
	Tubular	4,77	3,91	32,40	15,80
300	Maciço	4,42	4,32	36,65	7,40
	Tubular	5,90	4,99	40,14	15,80

Nota-se que a taxa de fusão do eletrodo tubular é cerca de 32 % maior que o eletrodo maciço, esse maior consumo de eletrodo conduziu a um aumento no custo de produção devido à necessidade mais frequente de reposição do material. Outro fator contrário ao eletrodo tubular é o preço médio por quilograma, o qual é aproximadamente 113% maior, mais que duas vezes o custo médio do eletrodo maciço, estes resultados foram semelhantes aos encontrados por SANTOS, 2010, em seu trabalho. Já a velocidade de soldagem observa-se um valor superior do eletrodo tubular, conduzindo a uma diminuição do tempo de soldagem, conseqüentemente diminuindo o custo do processo.

Para auxiliar na realização dos custos de soldagem envolvido, utilizou-se as equações descritas abaixo.

$$M_c = \frac{T_f}{V_{soldagem}} \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (\text{Eq. 4.1})$$

M_c – Massa por unidade de comprimento de solda [kg/m];

T_f - Taxa de fusão [kg/h];

$V_{Soldagem}$ – Velocidade de soldagem [m/h].

$$P_c = P_s \times M_c \left[\frac{R\$}{m} \right] \quad (\text{Eq. 4.2})$$

P_c – Preço por unidade de comprimento de solda [R\$/m];

P_s – Preço por quilograma [R\$/kg];

M_c – Massa por unidade de comprimento de solda [kg/m].

A tabela 4.4 apresenta o custo por unidade de comprimento de solda obtido para os dois processos estudados, percebe-se que o custo de produção para se soldar o mesmo metro de solda com eletrodo tubular é de 160% maior que o eletrodo maciço. Com isso pode-se concluir que o custo de utilização do tubular esta vinculado intimamente ao preço de comercialização do arame.

Tabela 4.4 – Custo por unidade de comprimento para arame eletrodo.

Corrente [A]	Arame Eletrodo	M_c [kg/m]	Preço/Comp. [R\$/m]
250	Maciço	0,12	0,89
	Tubular	0,14	2,32

Outra observação importante na análise econômica é com relação ao gás utilizado. No trabalho realizado para cada processo utilizou-se um tipo de gás de proteção (CO_2 para o eletrodo tubular e $Ar+2\%CO_2$ para eletrodo maciço), os quais possuem custos também diferentes. Através da consulta a revendedores locais, constatou-se que o valor de CO_2 é de R\$11,50/m³, já a mistura de $Ar+2\%CO_2$ custa R\$18,00/m³, uma diferença de aproximadamente 56%. Neste trabalho não foi realizada uma análise mais detalhada sobre essa questão econômica dos gases. Porém, não pode ser deixado de lado em um estudo mais aprofundado, pois o consumo desses gases varia conforme vazão recomendada por fabricantes.

Uma observação também importante é de que os testes realizados nesse experimento foram conduzidos em condições bastante favoráveis, realizadas em laboratório sem a ação de ventos externos e outros possíveis agentes indesejáveis, soldagem na posição plana e realizada com auxílio de robô, garantindo, assim, ou pelo menos minimizando oscilações de variáveis adotadas como constantes, além de um controle e monitoramento de parâmetros elétricos através de softwares específicos. Isso tudo deve ser levado em consideração para uma possível implantação em escala de produção industrial, pois influenciam como visto nas mais diversas maneiras na realização da soldagem.

5 CONCLUSÃO

O presente teve como objetivo comparar a capacidade de produção de dois arames eletrodos largamente usados na indústria em geral. Conhecendo e respeitando as diferenças fundamentais entre os processos, e com base nesse estudo é possível concluir que:

- A comparação entre os processos de soldagem é possível, porém, devem-se atentar as limitações de cada processo e ajustes que possam ser necessários para a realização de uma soldagem de qualidade em ambiente industrial;
- Para um mesmo nível de corrente, o arame tubular apresentou uma taxa de fusão superior á do arame maciço, mas com um menor rendimento de deposição. Esse consumo maior de arame (tubular) para preencher um mesmo volume, encarece o custo do processo;
- O rendimento de deposição conseguido com o arame tubular foi cerca de 5% menor aos divulgados por fabricantes e revendedores;
- A possibilidade de soldar com maiores velocidades, devido à maior taxa de deposição, tornam a opção pela soldagem com arame tubular vantajosa para aumento de produção (redução do tempo de soldagem);
- O custo por metro de solda realizado por arame tubular foi bem superior ao arame maciço, principalmente pelo custo de comercialização do arame tubular;
- O cordão de solda produzido pelo arame tubular apresentou melhor geometria e molhabilidade durante a soldagem.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY, **Welding Handbook, Volume 2: Flux Cored Arc Welding**. 8th edition, 1991.

CARVALHO, R. S.; DUTRA, J. C.; CIRINO, L. M.; MELLER, R. N.; BONACORSO, N. G. **Análise comparativa entre o arame maciço e o tubular no processo de soldagem MIG/MAG – Posição Vertical Ascendente, XXXVI CONSOLDA, 2010.**

FELIZARDO, I. **Processos de fabricação por soldagem**. Departamento de Engenharia Mecânica UFMG, 2006.

http://www.demec.ufmg.br/Grupos/Irssi/ProcessosFabricacaoSOLDAGEM_Graduacao/Apostila_ProcessosSoldagem.pdf

FELIZARDO, I.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem MIG/MAG e com Arame Tubular, 2005.**

http://www.ivanilzafe.dominiotemporario.com/doc/GMAW-FCAW_Ivanilza.pdf

FOGAGNOLO, J. B. **Introdução a processos e metalurgia da soldagem. Apostila 1, 2011.** Unicamp.

<ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/Fogagnolo/apostila%20de%20soldagem.pdf>

FORTES, C.; ARAÚJO W. **Soldagem MIG/MAG, 2005.** Apostila ESAB.

http://www.esab.com.br/br/por/instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag.pdf

FORTES, C.; ARAÚJO W. **Arames Tubulares, 2004.** Apostila ESAB.

http://www.esab.com.br/br/por/instrucao/apostilas/upload/1901098rev0_ApostilaAramesTubulares.pdf

MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte, Didática Editora, 363p. 3^a Ed. 2009.

MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Introdução a física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**, 2012. Universidade Federal de Minas Gerais.

http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fisica_da_soldagem1.pdf

SALES, J. C. **Efeito do tipo de gás de proteção sobre o desempenho do arame tubular AWS E71T-1, utilizando processo convencional e pulsado**, 2002. 80p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SANTOS, R.P.G., **Uma avaliação comparativa dos processos MIG/MAG e eletrodo tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingo**, 2010. 130p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. São Paulo, Artliber Editora, 284p., 2008.

SILVA, J. J. S. **Processos de soldagem**, 2008. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Tecnologia.

http://www.fat.uerj.br/intranet/disciplinas/Processos%20de%20Fabricacao%20III/Apostila_Soldagem_2009_01.pdf

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Estudo da Transferência de Metal de um Arame Tubular Rutilico**, Soldagem e Inspeção, vol 9, nº 4, 2004, p. 185-191.

STARLING, C.M.D.; MODENESI, P. J. **Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares**. Soldagem e Inspeção, v.11, nº 3, 2006, p. 147-155.