

UTILIZAÇÃO DA SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR NO PROCESSO DE MANUFATURA MECÂNICA

Douglas de Albuquerque Heringer¹
Paulo Roberto Portella de Albuquerque Lincoln²

RESUMO

Com a competitividade cada vez mais acirrada e necessidade de entregar produtos e serviços mais rápido e com maior qualidade, os processos que envolvem a manufatura mecânica estão em constante desenvolvimento, com isso a soldagem tem avançado em suas tecnologias e procedimentos. Este trabalho tem como objetivo demonstrar que a utilização do processo de soldagem por arame tubular na manufatura mecânica, pode ser uma boa alternativa para o ganho de qualidade e produtividade de solda, esclarecendo o potencial do processo, pontos que devem ganhar maior atenção e comparando-o a outros processos, espera-se aumentar o conhecimento sobre soldagem, em especial o processo de soldagem por arame tubular, que vem ganhando destaque nas últimas décadas. Por meio da revisão de literatura disponível são estudadas as características de utilização do processo de soldagem por arames tubulares, tecnologia utilizada, interferências que podem ocorrer na soldagem, suas consequências e o comportamento da soldagem por arame tubular em relação a tais interferências. Para tanto foi observado o impacto da utilização do processo de soldagem por arame tubular no ganho de qualidade e produtividade de solda na manufatura mecânica, salientando pontos importantes na soldagem como taxa de deposição de material, comparando-o com o processo MIG/MAG e o que suas características podem trazer de eficaz frente aos pontos críticos da soldagem. Foi possível verificar que o processo de soldagem por arame tubular traz benefícios em diversos aspectos como produtivos, econômicos e técnicos bem como características importantes de aplicação.

Palavras-chave: Soldagem; Tubular; Produtividade; Processo; Solda.

¹ Engenheiro Mecânico, pós-graduado em Engenharia de Automação e Eletrônica Industrial; e Engenharia e Gerenciamento de Manutenção, Centro Universitário Anhanguera, Rio de Janeiro.

albuquerqueheringer@gmail.com

² Engenheiro Mecânico, Centro Universitário Anhanguera, Rio de Janeiro. paulorportella@hotmail.com



USE OF TUBULAR WIRE WELDING IN THE MECHANICAL MANUFACTURING PROCESS

ABSTRACT

With the ever-increasing competitiveness and the need to deliver products and services faster and with higher quality, the processes involving mechanical manufacturing are constantly developing, so welding has advanced in its technologies and procedures. This work aims to demonstrate that the use of the tubular wire welding process in mechanical manufacturing can be a good alternative for the gain of weld quality and productivity, clarifying the potential of the process, points that should gain more attention, and to other processes, it is hoped to increase the knowledge about welding, especially the tubular wire welding process, which has been gaining prominence in the last decades. By means of the review of available literature, the characteristics of the welding process using tubular wires, technology used, interferences that can occur in the welding, its consequences and the welding behavior by tubular wire in relation to such interferences are studied. In order to do so, the impact of the welding process on tubular wire in the welding quality and weld productivity gain was observed in the mechanical manufacturing, highlighting important points in the welding as a material deposition rate, comparing it with the MIG / MAG process and that its characteristics can bring of effective in front of the critical points of the welding. It was possible to verify that the process of welding by tubular wire brings benefits in several aspects as productive, economic and technical as well as important characteristics of application.

Keywords: Welding; Tubular; Productivity; Process; Welding.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é a técnica de união de materiais onde ocorre coalescência localizada. Durante o processo é desejável que se mantenham as características do material das peças como propriedades físico-químicas e resistência mecânica. Existem vários processos de soldagem que são empregados de acordo com a necessidade de aplicação, material utilizado e resultado esperado.

É um processo presente em muitas atividades de produção e seu desempenho está diretamente ligado à produtividade e ao nível de qualidade do projeto executado. Por isso é um processo de fabricação importante e os avanços tecnológicos nessa área trouxeram grandes benefícios, diminuindo tempo e custos, aumentando a qualidade e empregabilidade.

A relevância dessa pesquisa deu-se pela importância do assunto abordado no processo de manufatura mecânica, e colaborou para o aumento do conhecimento dos processos de soldagem, cujo relatório poderá ser usado como fonte de consulta para técnicos e acadêmicos que realizem estudos dos assuntos abordados. Com a importância do processo de soldagem na indústria, a produção desse trabalho científico impactará de forma positiva discussões e avanços que podem ser refletidos no âmbito acadêmico.

Aumentar a produtividade e qualidade em seus processos tem sido um desafio para a indústria, principalmente em processos de grande importância como a soldagem. Qual o impacto da utilização do processo de soldagem por arame tubular no ganho de qualidade, e produtividade na manufatura mecânica?

Este trabalho teve por objetivo “Demonstrar que a utilização do processo de soldagem por arame tubular na manufatura mecânica, pode ser uma boa alternativa para o ganho de qualidade e produtividade de solda, esclarecendo o potencial do processo, pontos que devem ganhar maior atenção e comparando-o a outros processos”. Para isso foram definidos três objetivos específicos a fim de melhorar o entendimento do objetivo proposto pelo trabalho, são eles: “estudar a taxa de deposição de material de solda no processo de soldagem por arame tubular de acordo com a tecnologia e consumíveis utilizados no mesmo”; “determinar o que o processo de arame tubular pode ter de positivo em relação aos pontos críticos e as interferências externas que ocorrem na soldagem” e salientar as principais vantagens e desvantagens em comparação ao processo MIG/MAG”.

Tendo como objetivo observar o impacto do processo de soldagem por arame tubular na manufatura mecânica, a pesquisa foi realizada utilizando o método de revisão de literatura baseando-se nos títulos apresentados na referência bibliográfica. Os assuntos pesquisados e expostos têm caráter descritivo, os dados foram pesquisados em livros, sites de pesquisa, catálogos de fabricantes de máquinas e consumíveis de soldagem, artigos científicos além de normas e associações técnicas.

2. METODOLOGIA

Tendo como objetivo observar o impacto do processo de soldagem por arame tubular na manufatura mecânica, a pesquisa será realizada utilizando o método de revisão de literatura baseando-se na literatura disponível sobre o tema da pesquisa. Os assuntos pesquisados e expostos terão caráter descritivo, os dados serão pesquisados em livros, sites de pesquisa, informações fornecidas por fabricantes de máquinas e consumíveis de soldagem, artigos científicos além de normas e associações técnicas, serão coletados de fontes publicadas nos últimos 40 anos objetivando-se aproximar o máximo do contexto atual na indústria. Os termos e palavras chaves utilizados serão: soldagem, solda, arame tubular, produtividade, taxa de deposição, qualidade.

2.1. IMPORTÂNCIA DA TAXA DE DEPOSIÇÃO NA SOLDAGEM

O avanço constante da tecnologia tem proporcionado o rápido desenvolvimento dos processos de soldagem, com isso o estudo de seus parâmetros e fatores que influenciam na produtividade e qualidade de solda tornam-se ainda mais importantes. Cada vez mais busca-se minimizar possíveis interferências e desequilíbrios no sistema

Aprimorando o conhecimento sobre a interação dos fatores e parâmetros de soldagem e aplicando soluções e técnicas para reduzir qualquer perda, busca-se melhores resultados principalmente em termos de produtividade e qualidade. O progresso da tecnologia leva a indústria à otimizar seus processos para que sejam minimizados custos de produção e alcançados níveis melhores de qualidade (ESAB, 2018).

Na soldagem, que é um dos principais processos de fabricação atuais e um dos mais presentes no setor industrial não poderia ser diferente. Sempre em constante inovação tem

alcançado resultados satisfatórios e proporcionado desenvolvimento mais rápido e com maior qualidade nos projetos que o envolve, trazendo melhores técnicas, materiais e procedimentos.

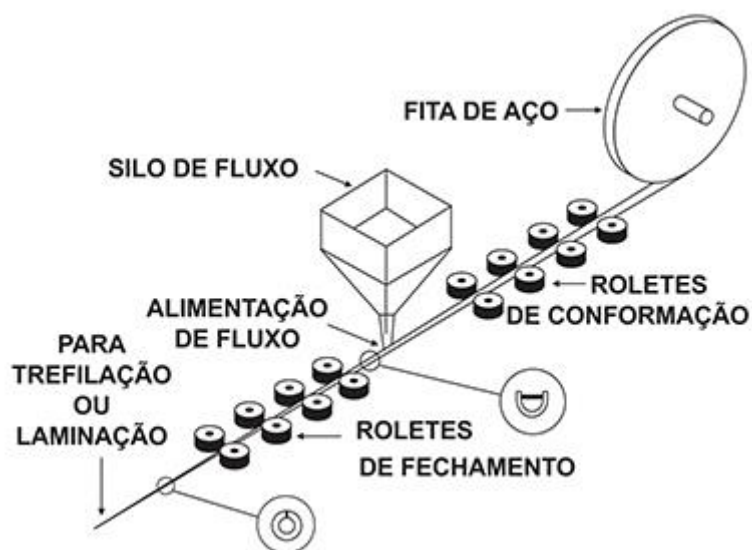
A soldagem por arame tubular une as vantagens dos processos MIG/MAG (arames sólidos) e eletrodo revestido (MARQUES et.al.,2005) em seu funcionamento o processo de arame tubular assemelha-se ao MIG/MAG como na alimentação do arame, técnica de soldagem, alto fator de trabalho, alta taxa de deposição e rendimento.

Alia-se ao seu bom funcionamento as características do processo eletrodo revestido como a proteção e participação do fluxo que assume características metalúrgicas semelhantes ao revestimento do eletrodo. Tornando o processo ainda mais produtivo e versátil facilitando sua aplicação e melhorando o resultado da soldagem.

2.1.1 FABRICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DO ARAME TUBULAR

No processo de soldagem por arame tubular é utilizado eletrodo consumível que é composto por um invólucro metálico com um pó em seu interior (FORTES, 2004). O pó em questão é denominado fluxo que é adicionado dentro do arame em seu processo de fabricação, como mostra a figura 1.

Figura 01: Fabricação de arames tubulares



Fonte: Adaptado de FORTES (2004)

O arame encontra-se a princípio em formato de tira em uma bobina que passa por roletes e fica em forma de “U” para possibilitar a adição do fluxo, após o fluxo ser adicionado a fita é fechada por outros roletes até adquirir a forma de tubo com o fluxo em seu interior.

O fluxo presente no interior do arame pode ser composto por fórmulas diferentes e possuir componentes minerais, metálicos, ferros liga entre outros. Os componentes que compõem o fluxo assumem o papel de promoverem estabilidade do arco elétrico, proteção da poça de fusão, formação de escória e podem interferir na composição do metal de solda e na transferência metálica que é uma das particularidades do arame tubular em relação ao arame sólido (BRACARENSE, 2000; FORTES, 2004).

2.2 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA DA TAXA DE DEPOSIÇÃO

A taxa de deposição é um desses fatores, ela é definida pelo cálculo da taxa de material depositado por unidade de tempo como mostrado na eq.(1). Portanto ao analisar um processo de soldagem é um dado importante a ser observado, visto que dependendo da quantidade de solda a ser consumida a taxa de deposição elevada do processo ajuda na redução de tempo de produção.

$$Td = \frac{Mf - Mi}{Ta} \quad (1)$$

Onde:

Td : taxa de deposição (g/min)

Mf : massa final da chapa (g)

Mi : massa da chapa inicial (g)

Ta : Tempo de arco aberto (min)

Entre diversos fatores, a taxa de deposição de material tem papel importante na produtividade de solda em determinado processo, como podemos observar na eq.(2) utilizada para cálculo de produtividade na soldagem, sendo diretamente ligada à quantidade de material depositado. Saber a taxa de deposição é passo importante na escolha de um processo de soldagem e no controle da produtividade.

$$\textit{Produtividade(m/h)} = \frac{\textit{Taxa de Deposição(kg/h). CicludeTrabalho}}{\textit{MetalDepositado (kg/m)}} \quad (2)$$

Nos processos de soldagem normalmente são definidos em projeto a quantidade de solda que necessita determinada peça, assim como as características do cordão (perna, garganta, forma, dimensão) e para que não se perca produtividade existem fatores que devem ser observados para que tais especificações sejam atendidas.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA TAXA DE DEPOSIÇÃO DE MATERIAL

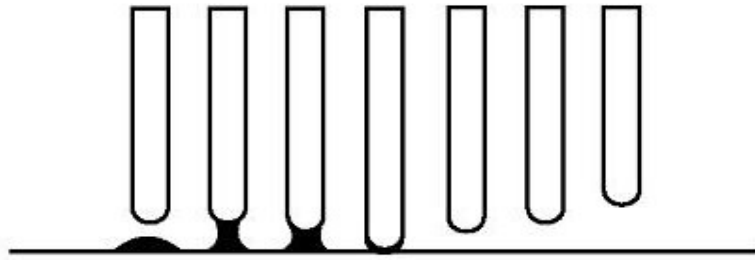
A taxa de material depositado na soldagem por arame tubular pode ser impactada por diversos fatores, alguns dos principais são: tipos de transferência metálica na poça de fusão, densidade de corrente que é conduzida pela área metálica do eletrodo, parâmetros de soldagem, tipo de gás, fluxo utilizados no processo e distância do bico de contato à peça (stick-out) (SOUZA, 2011).

Um mesmo equipamento e processo de soldagem pode apresentar diferentes tipos de transferência, segundo (MARQUES et.al.,2005) o tipo de transferência pode mudar de acordo com o material que está sendo soldado, o gás de proteção e a definição dos parâmetros de soldagem. A transferência de material será formada por um conjunto de fatores, e sua utilização definida para melhorar a performance na soldagem.

No momento da soldagem o material do eletrodo precisa ser transferido para a poça de fusão (MARQUES et.al.,2005). No arame tubular o tipo de transferência de material ocorre de maneira semelhante aos demais processos de transferência de gotas metálicas líquidas. O tipo de transferência utilizado pode afetar resultados importantes do processo de soldagem, como a taxa de deposição de material. São os mais utilizados e recorrentes nesse processo os tipos de transferência curto-circuito, globular, spray (SOUZA, 2011).

De acordo com Marques et.al.,2005, a transferência por curto-circuito ocorre com a utilização de baixas corrente e tensão, nela é formada uma gota na ponta do eletrodo e vai aumentando de tamanho a ponto de encontrar-se com a região onde ocorre a fusão do material onde é atraída devido à ação da tensão superficial no material como representa a figura 2.

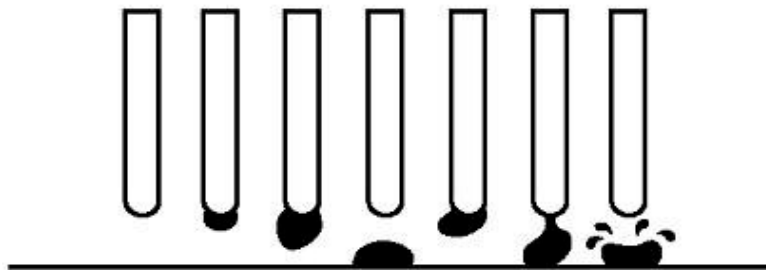
Figura 1 - Transferência por curto-circuito



Fonte: Adaptado de FORTES (2004)

Na transferência globular formam-se gotas de metal líquido que se destacam do eletrodo e são transferidas para a poça de fusão pela ação da gravidade como observado na figura 3, sua utilização é limitada a posição plana devido esse fator. Este tipo é evitado pois a transferência é caótica, tornando propícia a formação de respingos em alta quantidade (MARQUES et.al.,2005).

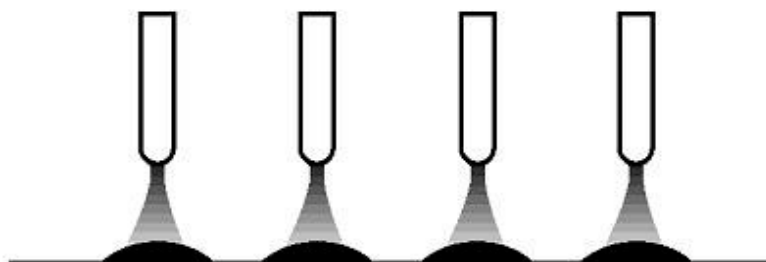
Figura 2 - Transferência globular



Fonte: Adaptado de FORTES (2004)

A transferência por spray ou aerossol ocorre em correntes relativamente altas, o metal em gotas pequenas é transferido para a poça de fusão que possui tamanho elevado dificultando utilização fora da posição plana. Esse tipo ocorre somente para determinados gases ou misturas utilizadas na soldagem e possui característica de arco bastante estável, o que leva a menor ou quase nenhuma formação de respingos (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Figura 3 - Transferência por spray ou aerossol



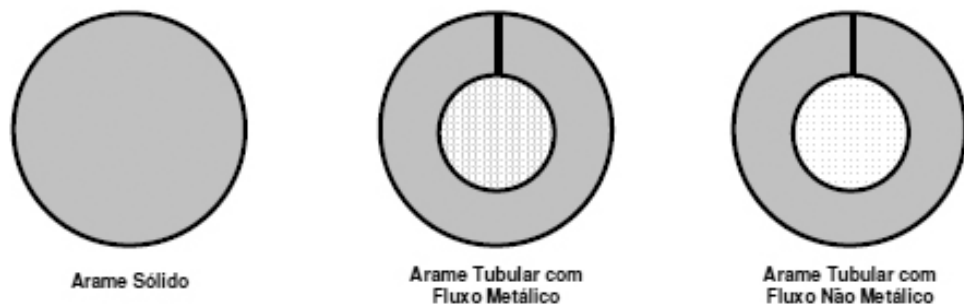
Fonte: Adaptado de FORTES (2004)

O tipo de transferência metálica interfere na taxa de deposição de material pois é a maneira que ocorre o destacamento das gotas de metal líquido para a solda. Ela influencia diretamente no diâmetro e frequência das gotas que passam do eletrodo para a poça de fusão e por consequência a quantidade de material que está sendo depositado (FORTES, 2004; MARQUES et.al.,2005)

Outro fator importante que influencia na taxa de deposição de material é a densidade de corrente que passa pelo eletrodo. A soldagem por arame tubular é um processo de soldagem a arco elétrico, ou seja, a fonte de calor necessária para a fusão do material é provida por um arco elétrico formado entre duas extremidades que são peça e eletrodo (MARQUES et.al.,2005)

A corrente elétrica fornecida pela fonte de energia passa pelo eletrodo com isso, no caso do eletrodo tubular, por ter seu núcleo composto pelo fluxo, a área metálica de sua seção transversal é menor que no arame sólido, mesmo os eletrodos tendo o mesmo diâmetro, o que aumenta a densidade de corrente que passa pelo eletrodo com isso maior quantidade de calor é gerada.

Figura 4 - Seção transversal eletrodos maciços e tubulares



Fonte: Adaptado de FORTES (2004)

A quantidade de calor fornecida aumenta pela atuação do efeito Joule eq.(3), devido ao eletrodo tubular possuir menor área de seção transversal metálica sua resistividade é maior, potencializando a geração de calor como pode-se observar na eq.(4) (COSTA, 2013).

$$Q = I^2 x R e x t \quad (3)$$

Onde:

Q: quantidade de calor liberado

I: corrente

Re: resistividade do material

$$Re = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

Onde:

ρ : resistividade do condutor

L: comprimento

A: área (seção transversal)

No caso do eletrodo tubular a área transversal torna-se menor pois deve-se descontar a área transversal ocupada pelo fluxo como representado na eq.(5).

$$A = (de - di)^2 \quad (5)$$

Portanto a resistividade será maior e ao retornar na eq.(2) vê-se que a quantidade de calor fornecida também será maior aumentando por consequência a taxa de deposição de material (FORTES, 2004).

É possível observar que o processo de soldagem por arame tubular apresenta, devido à característica de seu arame, uma taxa de deposição maior que influencia diretamente na velocidade de soldagem utilizada e na quantidade de material depositado na junta, sendo assim o processo proporciona economia de tempo de soldagem e arco aberto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas das interferências que podem ocorrer durante os processos de soldagem e levar a solda à apresentar descontinuidades são: alterações na corrente, alterações na voltagem, velocidade de soldagem incorreta, ação de ventos e umidade no ambiente, má preparação da junta (limpeza e dimensionamento), má manipulação do eletrodo e conservação dos consumíveis.

3.1 DESCONTINUIDADES NAS JUNTAS SOLDADAS

Durante o processo de soldagem podem ocorrer interferências que levam a junta soldada a apresentar defeitos, que podem ou não, dependendo de sua característica e significância, comprometer a qualidade da solda. Se uma junta soldada apresentar descontinuidades que estiverem acima do limite permitido na norma ou projeto, é necessário reparar ou, em alguns casos, substituí-la o que leva ao retrabalho e perda de insumos e HH.

Define-se como descontinuidade qualquer interrupção da estrutura típica ou esperada de uma junta soldada. Assim pode ser considerado descontinuidade a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda (MODENESI, 2001).

Segundo Modenesi (2001), existem quatro tipos gerais de descontinuidades que podem ocorrer nos processos de soldagem, são eles: descontinuidades dimensionais, descontinuidades estruturais, descontinuidades relacionadas com propriedades indesejáveis da região da solda e descontinuidades relacionadas com as propriedades do metal base.

As descontinuidades dimensionais são aquelas que não tenham dimensões e formas dentro do especificado no projeto ou norma. Segundo Modenesi (2001), as principais descontinuidades dimensionais são:

- Distorção
- Preparação incorreta da junta
- Dimensão incorreta da solda
- Perfil incorreto da solda
- Formato incorreto da junta

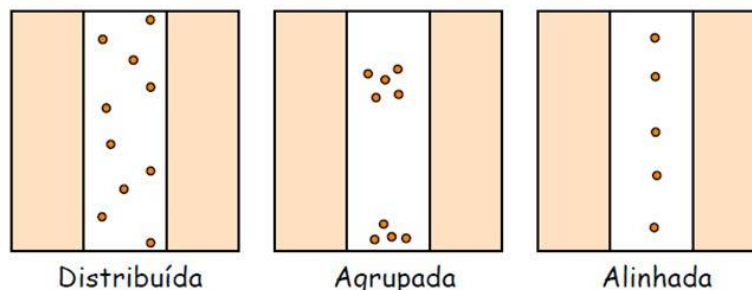
Esse tipo de descontinuidade não está muito relacionado com o processo de soldagem que está sendo utilizado mas sim com fatores como: deformação térmica do material durante a soldagem (processos de soldagem por fusão fornecem grande quantidade de calor localizado, o que pode gerar deformações na junta soldada), má confecção do chanfro ou preparação da junta soldada, erros operacionais (manipulação incorreta da tocha, parâmetros de soldagem incorretos e até mesmo ao posicionamento das peças que serão soldadas como desalinhamento e espaçamento incorreto).

As descontinuidades estruturais são encontradas na micro ou macroestrutura da região da solda, podem estar ligadas a diversos fatores como falta de material depositado, material estranho em quantidade considerável. A gravidade de sua ocorrência depende do tipo, extensão e de sua geometria (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Essas são as descontinuidades que podem ocorrer com grande frequência e comprometer a região soldada, e podem em sua grande maioria serem corrigidas por ações simples que podem evitar grande parte de sua ocorrência. As mais comuns presentes nos processos de soldagem por fusão são: porosidade, inclusões de escória, falta de fusão, falta de penetração, mordeduras e trincas.

Porosidades é formada pela evolução de gases que se encontram na parte posterior da poça de fusão no decorrer da solidificação da solda. Podem apresentar formato esférico ou alongados conhecidos como porosidade vermiforme (conhecidos também como pé de galinha). A porosidade pode apresentar agrupamentos diferentes no cordão de solda como mostrado na figura 6.

Figura 6 - Esquema de tipos de distribuição de porosidade



Fonte: Adaptado de MODENESI 2001

A distribuição da porosidade deve ser analisada e de acordo com sua ocorrência no decorrer do cordão de solda devem ser analisados os limites de concentração e ocorrência de acordo com o limite aceitável no projeto ou norma.

Entre as causas da ocorrência de porosidade estão contaminações no metal base como sujeira, oxidação e umidade, que também pode ocorrer no consumível, por perturbações na proteção (turbulência no gás de proteção por efeito de uma vazão muito elevada ou por efeitos de correntes de ar), como diz MODENESI, 2001.

Outra descontinuidade que pode ocorrer é a inclusão de escória, alguns processos de soldagem criam uma proteção instantânea após a soldagem que consiste em um material não metálico que serve como proteção para a solda. Muitos dos componentes da escória são provenientes do revestimento no caso dos eletrodos revestidos e no caso dos arames tubulares é formada pelo fluxo presente no interior do arame.

É por onde são retirados durante a fusão elementos que não são desejados. Na poça de fusão ocorrem reações que podem gerar materiais insolúveis que, separam-se do metal que está em estado líquido, e formam a escória (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Na poça de fusão a escória tende a sobrenadar devido a sua menor densidade em comparação com o metal que está sendo fundido (MODENESI, 2001). A inclusão de escória ocorre quando parte da escória escoar a frente da poça de fusão ficando aprisionada sob o cordão de solda ou, em uma solda com vários passes, quando a escória não é removida corretamente assim os passes subsequentes aprisionam a escória no cordão de solda como mostra a figura 7.

Este problema pode ser causado pelo manuseio incorreto do eletrodo no momento da soldagem ou pela remoção e limpeza incorreta dos passes em uma solda com mais de um passe fazendo com que partes da escória formada no cordão fiquem na solda.

Figura 7 – Inclusão de escória em cordão multipasse

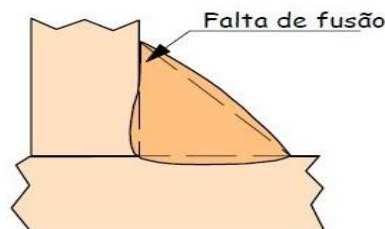


Fonte: Adaptado de MODENESI 2001

Essa descontinuidade tornar-se um ponto concentrador de tensão e ocasionar surgimento de trincas. Se estiver acima do limite aceitado deve ser corrigido, o que gera retrabalho e perda de material. Este problema pode ser agravado em passes com convexidade excessiva ou em chanfros muito estreitos (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Outra descontinuidade é a falta de fusão que significa que não houve continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal base ou entre passes (MODENESI, 2001) como mostra a figura 8, ou seja, o metal adicionado não se funde totalmente ao metal base em toda a seção transversal do passe. É causada pela manipulação incorreta do eletrodo, limpeza incorreta da junta, baixa energia de soldagem (que pode ser causada por baixa corrente ou velocidade excessiva) e impossibilidade de o arco alcançar parte da junta.

Figura 8 – Falta de fusão demonstrada na seção transversal



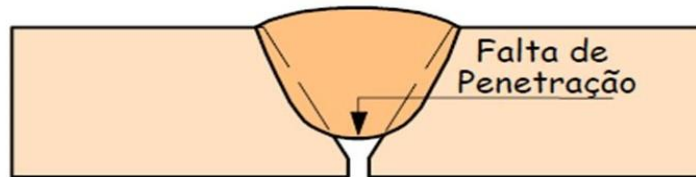
Fonte: Adaptado de MODENESI 2001

A falta de fusão é um ponto concentrador de tensões e pode acarretar no aparecimento de trincas além disso reduz a seção efetiva de solda deixando-a menos resistente a esforços mecânicos comprometendo sua confiabilidade e utilização da peça em questão.

Outra descontinuidade recorrente é a falta de penetração que consiste em falha ao preencher e fundir completamente a raiz da solda (MODENESI, 2001), como mostra a figura 9.

Ao percorrer o cordão de solda nota-se que a solda não alcançou a raiz deixando um espaço entre o topo da chapa e a solda.

Figura 9 – Falta de penetração



Fonte: Adaptado de MODENESI 2001

Esta descontinuidade ocorre por manipulação incorreta do eletrodo, confecção incorreta da junta (chanfro e abertura da raiz mal projetados), baixa corrente de soldagem, velocidade de soldagem elevada e escolha incorreta do diâmetro do eletrodo (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005). Suas consequências na junta soldada afetam a seção útil de solda e causa pontos concentradores de tensões comprometendo a resistência mecânica da solda entre outras consequências.

A mordedura é outra descontinuidade relevante, consiste em ocorrer a fusão do metal de base sem ocorrer o preenchimento pelo metal de adição, gerando uma reentrância na região que se localiza às margens do cordão de solda (MODENESI, 2001), como mostra a figura 10.

Figura 10 - Mordedura



Fonte: Adaptado de MODENESI 2001

Ou seja, o metal de base é aquecido a ponto de ocorrer sua fusão, porém aquela região não é preenchida pela solda formando uma deformidade como um “canal” às margens da solda.

Entre as causas principais da ocorrência de mordedura estão manipulação incorreta do eletrodo, comprimento excessivo do arco (o que pode ser consequência da escolha incorreta da voltagem) e soldagem com altas correntes ou velocidade.

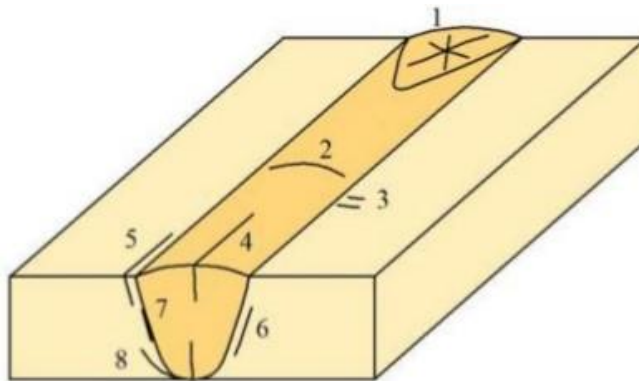
Sendo vistas como as mais graves descontinuidades em soldagem, as trincas podem causar o aparecimento de fraturas na estrutura soldada, comprometendo a confiabilidade da

solda. Trincas podem ser consideradas como a incapacidade do material em suportar as forças que ocorrem localmente proveniente das tensões que ocorrem durante a soldagem (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Durante o processo de soldagem ocorre o aquecimento localizado que leva à ocorrência de expansões e contrações localizadas no material, essas tensões em conjunto com a fragilização e modificações na microestrutura podem ocasionar as trincas (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005). O material não consegue reagir a tais tensões, normalmente devido à algum problema de fragilização (MODENESI, 2001).

Como mostra a figura 11, as trincas podem ocorrer em diferentes áreas da solda e também na ZTA e em diferentes sentidos, na ZF podem estar localizadas na superfície da solda (trincas superficiais) ou no interior, sendo detectadas somente por alguns tipos de inspeções.

Figura 11 – Trincas na solda



Fonte: Adaptado de MODENESI 2001

Diferente de outras discontinuidades as trincas podem ocorrer em diferentes momentos do processo de soldagem como durante ou após sua execução ou até mesmo durante a utilização da peça soldada.

3.2 COMPORTAMENTO DO PROCESSO DE ARAME TUBULAR FRENTE AS INTERFERÊNCIAS NA SOLDAGEM

O arame tubular, como visto anteriormente, possui características que o destacam em relação a outros processos de soldagem. Apesar de ser um processo muito semelhante ao MIG/MAG em termos operacionais, a característica de seu consumível traz alguns pontos interessantes que pode facilitar sua aplicação, e melhorar a solda em certas aplicações.3

Devido possuir um fluxo no seu interior, o arame tubular pode operar com produtividade maior e resistir melhor a interferências como vento como em soldagem em campo, proporcionando aumento de produtividade em determinadas situações.

O processo de soldagem por arame tubular pode ser otimizado para atender algumas situações principais, que são: alta produção, alta velocidade de soldagem e soldagem fora da posição (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Seu fluxo permite que possíveis impurezas possam ser escorificadas no momento da soldagem (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005), removendo, até certas quantidades, impurezas que possam estar presentes na junta impedindo formação de descontinuidades como porosidade e falta de fusão.

Devido a proteção que seu fluxo fornece a poça de fusão e determinados arames tubulares, a soldagem em campo, ou ambiente com maior ventilação, com vazões de gás mais baixas podem ser executadas sem causar defeitos como porosidades e respingo.

Também devido a suas propriedades como combinação de fluxo e gás de proteção aliados a maior taxa de deposição, a soldagem como arame tubular pode ser executada, em alguns casos, com maior velocidade de soldagem, permitindo maior produtividade e sem ocasionar aparecimento de mordeduras, falta de fusão e penetração.

Contudo, apesar de poder operar em algumas situações com velocidade de soldagem, maior stick-out e em ambiente adversos, na soldagem por arame tubular podem ocorrer todos as descontinuidades citadas anteriormente no item 3.1, porém suas características podem proporcionar maior rendimento do trabalho sem que ocorram tais inconformidades, porém dentro de seus limites operacionais.

3.3. ASPECTOS IMPORTANTES NA ESCOLHA DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

A globalização e o aumento da competitividade em diversas áreas têm levado as indústrias a priorizarem a melhor utilização de seus recursos e insumos, visando reduzir perdas de tempo, falhas em seus processos de produção, desperdício de material e HH (homem-hora) além de buscar aumento constante de qualidade de seus procedimentos para obter melhores resultados.

Segundo Carvalho (2011), com um ambiente corporativo mais competitivo a busca para atingir maior eficácia e elevados níveis de qualidade tornam-se fundamentais para garantia do

espaço de uma companhia no mundo globalizado, desenvolvendo sempre altos níveis de competitividade com seus concorrentes e revendo suas estratégias operacionais.

Sendo a soldagem um dos principais processos de fabricação é necessário que as indústrias que o utilizam busquem aperfeiçoar seus processos de modo a evitar ao máximo defeitos, perdas de material, tempo de operação entre outros fatores, que possam interferir no resultado, solda, e por consequência prejudicar a qualidade do projeto que está sendo executado.

A busca por melhores processos que se adaptem às condições de produção e apresentem melhores performances em qualidade e produtividade geram avanços tecnológicos na área de soldagem. Com diversos processos disponíveis, na escolha do processo de soldagem mais adequado para utilização em determinada peça ou projeto, devem ser levados em consideração diversos aspectos dos processos como custo, aplicação, produtividade, e aspectos da solda a ser executada como material, espessura, posição, entre outros.

3.3 ASPECTOS IMPORTANTES NA ESCOLHA DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

A escolha de processos soldagem mais adequados ao ambiente e ao tipo de serviço executado geram bons resultados operacionais. Três grupos importantes a serem analisados, englobam os aspectos a serem levados em consideração para a escolha do processo de soldagem, são eles: aspectos técnicos, de produção e econômicos (2-ASM Treinamentos). O estudo desses aspectos apresenta qual processo de soldagem pode melhor atender o projeto desenvolvido.

3.4.1 Aspectos técnicos

Aspectos técnicos são os que estão ligados às características específicas da solda a ser realizada como propriedades físico-químicas do material que compõe a junta a ser soldada, espessura, projeto de junta, acessibilidade e posição de soldagem. (2-ASM Treinamentos).

Muitas propriedades dos materiais podem restringir o uso de alguns processos de soldagem, entre as mais importantes, que podem vir a causar algum efeito indesejado caso seja utilizado o processo incorreto, estão: condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica, oxidação e sensibilidade à trinca.

A condutividade térmica deve ser levada em consideração interfere no aquecimento local, ou seja, em materiais com alta condutividade pode não atingir a temperatura necessária

para fundir o material, e em materiais com baixa condutividade podem ocasionar o excesso de calor na região da solda provocando aquecimento diferenciado levando ao aparecimento de tensões residuais.

Devido a maioria dos processos de soldagem utilizarem o calor para fundir e unir os materiais o coeficiente de expansão térmica do material pode implicar em expansão e contração acima do aceitável para determinada junta, o que pode ocasionar distorções e tensões residuais.

A oxidação pode interferir pois para uma solda com qualidade é necessário que a junta esteja nas melhores condições possíveis, quando em materiais que oxidam com maior facilidade em contato com o ambiente atmosférico a soldagem tornar-se mais difícil, sendo necessário utilizar processos com proteção gasosa e eliminar o oxigênio da região da solda.

A sensibilidade à trinca acontece pela afinidade que alguns materiais podem apresentar em alta temperatura com o hidrogênio, assim pode ocorrer absorção desse gás que está presente em vários pontos que cercam o ambiente de soldagem como umidade, hidrocarbonetos presentes em óleos e graxas que podem estar na junta e consumíveis. A absorção do hidrogênio pode causar trincas a frio e porosidade nos materiais, comprometendo a qualidade e características mecânica da solda.

Ou seja, de acordo com esses aspectos, a utilização de alguns processos de soldagem no projeto pode ser descartada por motivos técnicos, visto que determinados processos de soldagem podem não atender as especificidades requeridas pelo material.

3.4.2 Aspectos de produção

Os aspectos de produção estão ligados à execução da atividade de soldagem, isso quer dizer que de acordo com as necessidades e características do processo de soldagem alguns tipos podem não ser os melhores para os resultados que querem ser alcançados.

Alguns fatores que estão ligados aos aspectos de produção são: tamanho e forma da peça, taxa de deposição de material, disponibilidade de materiais que serão utilizados durante o processo, manutenção de equipamentos, fumos e respingos gerados, necessidade de pré-aquecimento da junta ou tratamentos pós-solda, habilidade do operador, possibilidade de mecanização e automação, compatibilidade com outros processos, entre outros.

3.4.3 Aspectos econômicos

Os aspectos econômicos estão ligados aos custos associados ao processo de soldagem como consumíveis, mão de obra, custo de manutenção, custo de preparação da junta e do ambiente; a análise dessas e mais variáveis compõem o valor total gasto na soldagem.

A análise de custos na soldagem tem papel importante para estimar o custo de determinada soldagem ou para avaliar o que está sendo gasto em processos que já se encontram em andamento em determinado projeto afim de determinar o custo do produto final (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Dependendo do volume de solda necessário em determinado projeto, o custo da soldagem pode interferir de forma significativa no preço final do projeto ou serviço. Portanto a análise correta do custo pode levar companhias a oferecerem preços que gerem melhor competitividade e melhorar os processos reduzindo custos e mantendo a qualidade da solda. O custo total de soldagem pode ser definido de maneira simplificada pela eq.(6).

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC \quad (6)$$

Onde:

CMO - custo da mão de obra

CC - custo dos consumíveis

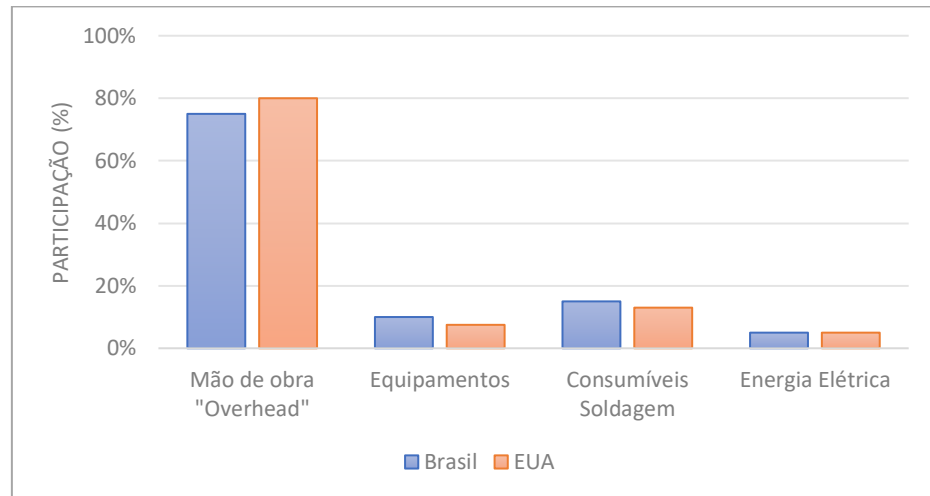
CE – custo da energia elétrica

CM – custo da manutenção

CD – custo de depreciação

CMC – custo de outros materiais de consumo

Diversos fatores influenciam no custo de soldagem, para escolha de processos de produção é necessário que se escolha os que possuem o menor custo desde que mantenha-se a qualidade desejada do projeto final. Dentre as variáveis que formam o custo as que representam maior percentual na formação do custo total são os custos com mão de obra e custo dos consumíveis como demonstrado no gráfico 1.

Gráfico 1 - Distribuição dos principais custos de soldagem

Fonte: Adaptado de MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005

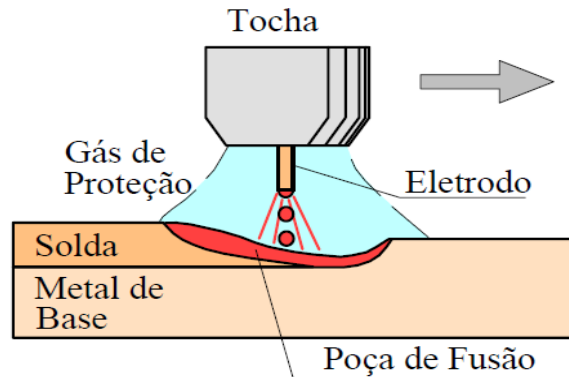
No gráfico são comparados entre Brasil e Estados Unidos os principais custos na soldagem, sua relevância e participação na formação dos custos.

3.4 PROCESSO MIG/MAG

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW) é o processo de soldagem de união de peças metálicas com proteção gasosa (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005). As siglas MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas) diferenciam-se na mistura de gases de proteção utilizada, na MIG é utilizada proteção com gás inerte ou rica em gases inertes e na MAG é utilizada gás ativo ou mistura rica em gases ativos.

Na soldagem MIG/MAG o arco elétrico é formado entre um eletrodo metálico contínuo (arame sólido) e o metal base (peça), a proteção da poça de fusão ocorre por meio dos gases de proteção que saem da tocha ao redor do arame formando uma “nuvem” de proteção na região onde ocorre a fusão do material, como mostra a figura 12.

Figura 12 – Soldagem MIG/MAG (esquemática)



Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Os equipamentos utilizados no processo MIG/MAG são semelhantes aos utilizados no arame tubular. Os equipamentos de soldagem são os mesmos, entre equipamentos para arames sólidos e tubulares os componentes que se diferenciam são roldanas de alimentação do arame e alguns consumíveis que compõem a tocha de soldagem.

Quanto ao funcionamento e operação as diferenças são quase nulas, as técnicas de soldagem e habilidade requerida do soldador são as mesmas para os dois tipos de arame, o processo de soldagem por arame tubular apresenta algumas particularidades, como no modo de transferência de metal onde pode ser observada para alguns tipos de arame tubulares a formação de uma ponte de fluxo entre o eletrodo e a poça de fusão (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

3.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS ARAME TUBULAR E SÓLIDO

Apesar dos processos utilizarem técnicas de soldagem, equipamentos, modos de transferência e operarem em posições de soldagem similares, diferenciam-se em alguns pontos como taxa de deposição, velocidade de soldagem, aplicações, entre outros aspectos. Essa diferença é causada, em grande parte, devido as características que os consumíveis utilizados, arame tubular ou sólido, proporcionam em sua aplicação.

As tabelas 1 e 2 representam algumas das vantagens e limitações de cada processo, quem englobam os aspectos citados anteriormente, relacionados a escolha e avaliação de processos de soldagem.

Tabela 1 – Vantagens e limitações do processo MIG/MAG

VANTAGENS	LIMITAÇÕES
Processo com eletrodo contínuo	Equipamento relativamente caro e complexo
Permite soldagem em qualquer posição	Pode apresentar dificuldade para soldar juntas de acesso restrito
Elevada taxa de deposição de metal	Proteção do arco é sensível a correntes de ar
Elevada penetração	Pode gerar elevada quantidade de respingos
Pode, em princípio, soldar diferentes ligas metálicas	
Exige pouca limpeza após soldagem	

Fonte: Adaptado de MODENESI 2012

O processo de soldagem com arames sólidos possui vantagens em relação a alguns outros processos de soldagem, como taxa de deposição, posições de soldagem, metais que podem ser soldados por esse processo entre outros fatores. Tais características o tornaram um dos processos mais utilizados para soldagem na indústria. Sua fácil aplicação também é um importante fator que o torna um processo bastante utilizado.

Tabela 2 – Vantagens e limitações do processo Arame Tubular

VANTAGENS	LIMITAÇÕES
Elevada produtividade e eficiência	Equipamento relativamente caro
Soldagem em todas as posições	Pode gerar elevada quantidade de fumos
Custo relativamente baixo	Necessita limpeza após soldagem
Produz solda de boa qualidade e aparência	

Fonte: Adaptado de MODENESI 2012

Os arames tubulares apresentam certa vantagem em relação aos arames sólidos devido à composição do arame, o que proporciona algumas características a solda e ao processo. Os arames tubulares podem ser compostos por fluxos metálicos (metal cored) e fluxos não metálicos (flux-cored) compostos por minerais (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Por conterem um fluxo em seu interior, os arames tubulares, podem remover contaminantes da solda, ajudar na proteção, aumentar a molhabilidade (capacidade do metal de adição se mistura mais facilmente ao metal base fundido, melhorando a diluição entre os dois metais em estado líquido na poça de fusão) (FORTES, 2004).

4. DISCUSSÃO

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE ARAME SÓLIDO E TUBULAR

Em alguns estudos, foi comprovado que o arame tubular pode, além de vantagens nos aspectos técnicos e de produtividade, além de em uma análise global do processo, em alguns casos, ser uma melhor opção no aspecto econômico. Em teste realizado, para comparar resultados entre o arame sólido e arame tubular com fluxo metálico, o arame tubular mostrou melhor resultado em números como taxa de deposição e velocidade de soldagem como mostram as tabelas 3 e 4.

No teste foram utilizados os arames: Arame sólido ER70S-6 (ESAB) e o Arame tubular OK Tubrod 70MC, ambos arames com 1,2 mm de diâmetros e produzidos filetes de solda com mesmas dimensões.

Tabela 3 – Soldagem com arame sólido

Ø (mm)	Garganta (mm)	Perna (mm)	I (A)	V (V)	Vel. sold. (cm/min)	Vel. arame. (cm/min)	Taxa dep. (Kg/h)	Tempo arco (min/m)
1,2	2,5	4,0	200	26	50	440	2,15	2,0
1,2	4,0	6,0	290	30	60	1210	5,90	1,6
1,2	5,5	8,0	280	30	30	1100	5,40	3,3

Fonte: Adaptado de FORTES 2004

Tabela 4 – Soldagem com arame tubular

Ø (mm)	Garganta (mm)	Perna (mm)	I (A)	V (V)	Vel. sold. (cm/min)	Vel. arame. (cm/min)	Taxa dep. (Kg/h)	Tempo arco (min/m)
1,2	2,5	4,0	250	28	110	1000	4,69	0,90
1,2	4,0	6,0	360	32	80	1680	7,88	1,25
1,2	5,5	8,0	350	32	42	1515	7,09	2,38

Fonte: Adaptado de FORTES 2004

5. CONCLUSÃO

Com essa comparação fica visível algumas das vantagens do arame tubular, para eletrodos de mesmo diâmetro o tempo necessário de arco aberto foi consideravelmente menor e a taxa de deposição atingida superior na soldagem com o arame tubular.

Com esse comportamento os ganhos em produtividade são consideráveis visto que será necessário menos tempo para realizar o mesmo cordão de solda, apenas modificando o processo de soldagem para arame tubular.

Por suas características o arame tubular pode proporcionar uma série de vantagens na soldagem em grande escala. O fluxo, seu diferencial em relação ao processo MIG/MAG, traz características positivas para os aspectos técnicos e de produtividade na soldagem, no aspecto econômico, mesmo seu consumível possuindo valores pouco acima do arame sólido, os outros ganhos como economia no tempo de soldagem acabam balanceando seu custo/benefício tornando-o proporcionando maior utilização nos últimos anos deste processo.

Em relação aos aspectos técnicos pode apresentar as mesmas descontinuidades que o arame sólido, porém devido sua melhor performance pela presença do fluxo, pode sobressair-se em soldas em campo (com maior ação de ventos), remoção de elementos indesejados, como enxofre, por meio da escória e maior flexibilidade que o arame sólido quanto aos parâmetros de soldagem (FORTES, 2004).

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS), 2018. Disponível em: <<https://www.aws.org/about>>. Acesso em: 10 abril 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: apresentação de citações em documentos: procedimento. Rio de Janeiro, 2002.

ASM TREINAMENTOS, **Seleção de processos de soldagem**. Disponível em: <http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo131.pdf>. Acesso em 01 de outubro de 2018.

BARRA S. R; PEREIRA A. S. **Descontinuidades em soldagem**. UFCS, Florianópolis, 1999. Disponível em <<https://pt.scribd.com/doc/7925140/Descontinuidades-em-Soldagem>>. Acesso em 02 de outubro de 2018.

BOTINELLY D. A. **Estudo prático comparativo entre os processos de soldagem eletrodo revestido e arame tubular em união de tubo API 5L grau B**. Niterói, 2009. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/94295229/CUSTO-DE-SOLDAGEM>. Acesso em 29 de setembro de 2018.

BRACAENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Arame Tubular**. Apostila UFMG. Maio 2000.

CARVALHO, R. S. **Implantação de sistema de gestão da qualidade**: um estudo de caso em uma importadora de medicamentos. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. ISSN 1984-9354, 2011. Disponível em http://www.inovarse.org/sites/default/files/T11_0328_2178.pdf. Acesso em 01 de outubro de 2018.

ESAB. 2010. **Apostila de Arames Tubulares**. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramestubulares_ok.pdf>. Acesso em: 15 agosto 2018.

ESAB. 2010. **Guia de Soldagem**: Arames tubulares para aços ao carbono e de baixa liga em todas as posições. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/guia-de-soldagem-arames-tubulares-todas-as-posi%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em: 24 abril 2018.

ESAB. 2010. **Processos de Soldagem: Arames Tubulares**. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm>. Acesso em: 20 setembro 2018.

FORTES, C. Arames Tubulares, **Literatura ESAB BR**, Contagem, Maio, 2004.

HAYNIE, D. **Fluxado Arc Welding**. 2003. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/50210185/Fluxado-Arc-Welding>. Acesso em 05 de outubro de 2018

KUNTZ, M.R.K. **Análise comparativa entre a soldagem com arame sólido e metal cored no processo multipasses**. UNIUIÚ, Panambi, 2016 Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3994/Maiquel%20Rodrigo%20Klhan%20Kuntz.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25 abril 2018.

MACHADO, I.G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: UFRGS/ Centro de tecnologia/ LS&TC, Outono de 1996.

MARQUES, P.V.; Modenesi, P.J.; Bracarense A.Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005.

MEDEIROS R.C. **Processos de soldagem**. Petrobras. 2011. Disponível em <https://pt.scribd.com/doc/55471640/B1-APOSTILA-Processos-de-Soldagem-pdf>. Acesso em 01 de outubro de 2018.

NERIS, M.M. Apostila: **Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais**. São Paulo: CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA, 2012. Disponível em: <<https://www.nescon.medicina.ufmg.br/biblioteca/imagem/2886.pdf>>. Acesso em: 8 de abril 2018.

NOVAIS, P.R.S. (2010). **Avaliação das Principais Descontinuidades Encontradas nas Juntas Soldadas, Causas e Possíveis Soluções**. In: CONSTRUMETAL – CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. São Paulo: 31 de agosto a 2 de setembro 2010. Disponível em: <<http://www.abcem.org.br/construmetal/2010/downloads/contribuicoes-tecnicas/9-avaliacao-das-principais-descontinuidades-encontradas-nas-juntas-soldadas.pdf>>. Acesso em: 17 abril 2018.

SANCHES R. A. **Defeitos em solda detectáveis através de inspeção visual**. Manasu, 2010. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/88771386/Defeitos-Em-Soldagem>. Acesso em 10 de outubro 2018.

SENAI PB. **Soldagem a arco elétrico Processos Eletrodo revestido TIG e MIG-MAG**. 2008. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/60499969/Apostila-de-Solda-Curso-UFCG>. Acesso 07 de outubro de 2018.

SOUZA, C. I. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal**. UFU, Uberlândia ,2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242013000300009&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 10 de agosto de 2018.

WAINER E.; BRANDI S.D.; MELLO F.D.H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. Ed. Blucher, 1992.

ZANOTELLI, A.C.P.W. **Otimização de processos de soldagem: estudo de caso para o processo arame tubular na HZN Industrial LTDA.** UFES, Vitória, abril 2004. Disponível em: <
http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/anderson_e_wallace.pdf>. Acesso em: 24 abril 2018.