

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO – LATO SENSU
ENGENHEIRO DE CAMPO – CONSTRUÇÃO E MONTAGEM

TRABALHO DE FIM DE CURSO

**ACOMPANHAMENTO DA UTILIZAÇÃO E DO
CONTROLE DE QUALIDADE DAS SOLDAS NA
CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE PONTES METALICAS**

HENRIQUE DELBONI FARDIN

MOACYR ROLIM JUNIOR

VITÓRIA/ES
02/2009

HENRIQUE DELBONI FARDIN

MOACYR ROLIM JUNIOR

**ACOMPANHAMENTO DA UTILIZAÇÃO E DO
CONTROLE DE QUALIDADE DAS SOLDAS NA
CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE PONTES METÁLICAS**

Trabalho de Fim de Curso elaborado pelos alunos Henrique Delboni Fardin e Moacyr Rolim Junior apresentado ao Colegiado do Curso de Pós Graduação – Lato Sensu, em Engenharia de Campo do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do certificado Especialista.

VITÓRIA/ES

02/2009

HENRIQUE DELBONI FARDIN

MOACYR ROLIM JUNIOR

**ACOMPANHAMENTO DA UTILIZAÇÃO E DO
CONTROLE DE QUALIDADE DAS SOLDAS NA
CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE PONTES METÁLICAS**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Temístocles de Sousa Luz, Dr.

**Prof. Oswaldo Paiva Almeida Filho,
M.Sc.**

Vitória – ES, 28 de Fevereiro de 2009

AGRADECIMENTOS

Ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal e a PETROBRÁS.

Aos professores do curso do PROMINP em especial ao orientador, Temístocles.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	VIII
CAPÍTULO I.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	9
CAPÍTULO II	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM.....	12
2.1.1 Definição de Soldagem.....	12
2.1.2 Formação de uma Junta Soldada	13
2.1.3 Soldagem GMAW (MIG/MAG).....	15
2.1.4 Soldagem ao Arco Submerso	18
2.1.5 Soldagem com Eletrodos Revestidos	20
CAPÍTULO III.....	25
3 A IMPORTÂNCIA DO PROCESSO NA SOLDAGEM DE CAMPO	25
CAPÍTULO IV.....	26
4 CONTROLE DE QUALIDADE NA SOLDA POR ELETRODO REVESTIDO ..	26
4.1 NORMAS E QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS	26
4.2 – CONTROLE DURANTE A SOLDAGEM	29
4.2.1 – Armazenamento dos Eletrodos	29
4.2.2 – Procedimento de soldagem.....	29
4.3 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	30
4.3.1 – Inspeção Visual.....	30
4.3.2 Inspeção Radiográfica	31
4.3.3 Inspeção por Líquido Penetrante	31
4.3.4 Inspeção por Ultra-som	32
CAPÍTULO V	34
5 ESTUDO DE CASO	34
5.1 – OBJETIVO	34
5.2 – INFORMAÇÕES DA OBRA	34
5.3 SOLDAGEM	35
5.3.1 – Equipamentos	35
5.3.2 – Eletrodos	36
5.3.3 – Procedimento de soldagem.....	37
5.3.3.1 – Recebimento e armazenamento dos eletrodos	37
5.3.3.2 – Preparação das juntas.....	39
5.3.3.3 – A soldagem	40
5.4 – CONTROLE DE QUALIDADE DA SOLDA	42
5.4.1 – Controle antes da soldagem	42

5.4.2	<i>Controle durante a soldagem</i>	43
5.4.3	<i>Controle após a soldagem - END</i>	44
5.4.3.1	<i>– Inspeção Visual</i>	44
5.4.3.2	<i>– Líquido Penetrante</i>	46
5.4.3.3	<i>– Ultra-Som</i>	46
CAPÍTULO VI		50
6	CONCLUSÃO	50
CAPÍTULO VII		51
7	BIBLIOGRAFIA	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Variação de energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função da distância de separação entre eles (Modenesi e Marques, 2006).	14
Figura 2.2 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças (Modenesi e Marques, 2006).	14
Figura 2.3 - Representação esquemática da superfície metálica limpa, espessura de 200 camadas atômicas ou 500 ângstrons (Modenesi e Marques, 2006)	14
Figura 2.4 - Soldagem por pressão ou deformação (Modenesi e Marques, 2006).	15
Figura 2.5 – (a) Representação esquemática da soldagem por fusão. (b) Macrografia de uma junta (Modenesi e Marques, 2006).	15
Figura 2.6 – Processo de soldagem MIG/MAG (Modenesi e Marques, 2006).	16
Figura 2.7 – Equipamento para a soldagem GMAW (Modenesi e Marques, 2006).	17
Figura 2.8 – Esquema da soldagem ao arco submerso (Modenesi e Marques, 2006).	19
Figura 2.9 – Esquema do equipamento para soldagem a arco submerso	19
Figura 2.10 – Equipamento para soldagem SMAW (Modenesi e Marques, 2006).	21
Figura 2.11 – Esquema de classificação de eletrodos de aços carbono de acordo com a AWS (Modenesi e Marques, 2006).	24
Figura 5.1 – Vista geral da estrutura metálica da ponte.	34
Figura 5.2 – Longarinas e transversinas sendo transportadas da fábrica até o local da obra	35
Figura 5.3 – Equipamentos utilizados no processo de soldagem (quadro de distribuição e máquinas de solda).	36
Figura 5.4 – Gerador utilizado como fonte de energia para soldagem.	36
Figura 5.5 – Especificação do eletrodo utilizado.	37
Figura 5.6 – Armazenamento das embalagens dos eletrodos.	38
Figura 5.7 – Estufa para ressecagem dos eletrodos	39
Figura 5.8 – Estufa portátil para armazenamento dos eletrodos (“cochichos”)	39
Figura 5.9 – Remoção da pintura por esmerilhamento para execução da solda.	40
Figura 5.10 – Soldagem das juntas entre as longarinas.	41
Figura 5.11 – Remoção de escoria após a finalização da solda.	42
Figura 5.12 – Junta preparada para início da solda.	43
Figura 5.13 – Inspeção visual após a soldagem.	45
Figura 5.14 – Inspeção visual após a soldagem.	45
Figura 5.15 – Realização do ensaio de líquido penetrante entre os passes de solda.	46
Figura 5.16 – Remoção do revestimento para realização do ensaio de Ultra-Som	47
Figura 5.17 – Realização do ensaio de Ultra-Som	48
Figura 5.18 – Indicação das descontinuidades encontradas na solda.	48
Figura 5.19 – Remoção da solda para reparo dos defeitos encontrados.	48
Figura 5.20 – Remoção da solda para reparo dos defeitos encontrados.	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo GMAW.	18
Tabela 2.2 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo arco submerso.	20
Tabela 2.3 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo SMAW.....	21

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diferentes tipos de pontes existentes, registram-se as pontes de madeira como sendo uma das mais antigas. A primeira ponte romana era uma estrutura de madeira empilhada sobre o rio Tiber em Roma.

Apesar da capacidade de sociedades avançadas, como os romanos, de construir pontes de pedras, o material da época, seu custo sempre foi um problema. As pontes de madeira foram uma alternativa econômica importante para todas as civilizações durante todos os períodos da história. Mas embora extremamente versátil, a madeira tem uma desvantagem óbvia: ela pode estar sujeita a incêndios. Havia contudo, um outro material cujo uso no final do século XVIII ofereceu aos engenheiros de pontes uma alternativa para os materiais tradicionais (madeira, pedras e blocos). Embora tenha primeiro sido usado na antiguidade, o ferro foi o “material milagroso” da Revolução Industrial. A primeira ponte de ferro do mundo, porém, só foi construída em 1779. As pontes foram um dos primeiros usos estruturais do ferro, precedido apenas por colunas para suportar os pisos de laminadores. Como o material não podia ter uma modelagem elaborada, extravagantes decorações em arcos de ferro eram usadas em pontes para pedestres. (Brinck, 2004).

O mais antigo conhecimento que se tem do uso do aço em construções de pontes, é de 1828 na Áustria. O aço estrutural é mais resistente e mais flexível que o ferro fundido forjado e permite projetos mais flexíveis. O aço reduziu pela metade o peso do ferro forjado e a primeira ponte, utilizando realmente o aço, foi construída em 1874. Depois disso, diversas pontes em aço foram e continuam sendo concebidas até os dias de hoje (Brinck, 2004).

Entretanto as pontes construídas atualmente necessitam cada vez mais de baixo custo, velocidade de construção, qualidade e durabilidade. Para atingir todos esses requisitos devem ser tomadas precauções desde a concepção arquitetônica até a finalização da obra.

Após a concepção arquitetônica da ponte são realizados estudos para embasar a elaboração de um projeto de qualidade, que são basicamente:

- Estudo Topográfico
- Estudo hidrológico
- Estudo geotécnico
- Planejamento de construção

Após a fase de estudo inicia-se a elaboração do projeto da ponte. Uma importante escolha feita durante a concepção do projeto é o material base a ser utilizado na construção da estrutura.

Dentre os materiais disponíveis para construção de pontes atualmente o aço se destaca entre os demais (madeira e concreto) devido às características abaixo descritas:

- O aço é produzido em uma grande variedade de tipos e formas, cada qual atendendo eficientemente a uma ou mais aplicações. Esta variedade decorre da necessidade de contínua adequação do produto às exigências de aplicações específicas que vão surgindo no mercado;
- Menor tempo de execução: a estrutura metálica é projetada para fabricação industrial e seriada, de preferência, levando a um menor tempo de fabricação e montagem;
- Maior confiabilidade: devido ao fato do material ser único e homogêneo, com limites de escoamento e ruptura e módulo de elasticidade bem definidos, além de ser uma estrutura fabricada e montada por profissionais qualificados;
- Maior limpeza de obra: devido à ausência de entulhos, como escoramento e fôrmas;
- Maior facilidade de transporte e manuseio: em função da maior resistência do material, as peças de aço são menores, com menor peso relativo, facilitando assim o carregamento, transporte e manipulação.
- Maior facilidade de ampliação: é bastante frequente a necessidade de ampliação de estruturas industriais, ocasião em que a expansão deve ser executada sem interferir nas outras atividades: isto só é possível devido à precisão e menores dimensões das peças e à fabricação fora do local da obra;
- Maior facilidade de montagem: sendo a estrutura de aço feita em regime de fabricação industrial, a equipe montadora já recebe as peças nos tamanhos definidos, com as extremidades preparadas para soldagem ou aparafusamento durante a montagem; esta é rápida e eficiente, feita com mão de obra qualificada e equipamentos leves;
- Facilidade de desmontagem e reaproveitamento: a estrutura de aço tem a seu crédito o valor residual que não é perdido com a execução da obra, pois ela pode ser desmontada e transferida para outro local sem maiores problemas;
- Facilidade de vencer grandes vãos: a maior resistência do aço, conduz à melhoria das condições para vencer grandes vãos, com menores dimensões das peças e menores pesos;
- Precisão das dimensões dos componentes estruturais: como a fabricação obedece a rigorosas especificações dimensionais, pode-se encomendar todos os acessórios antecipadamente, sejam portas, janelas, basculantes e outros. Menores são também os

gastos com alvenarias e argamassas; no caso de prédios, após a montagem da estrutura, ela está totalmente nivelada e aprumada, o que serve de guia para as demais etapas;

- Maior facilidade de reforço: quando houver necessidade de aumento de carga, a estrutura pode ser facilmente reforçada, em alguns casos com a colocação apenas de uma chapa numa viga ou coluna;
- Resistência à corrosão: o aço apresenta excelente resistência à corrosão atmosférica desde que determinados cuidados sejam tomados. Para melhorar ainda mais a resistência do aço à corrosão, protege-se a estrutura com pintura e/ou galvanização; pode-se ainda trabalhar com aços de alta resistência à corrosão atmosférica, que são capazes de durar quatro vezes mais que os aços comuns;
- Redução da carga nas fundações: a grande consequência da alta resistência do aço aos esforços de tração, compressão e cisalhamento é o enorme alívio de cargas para as fundações. As estruturas em aço são cerca de 6 vezes menos pesadas que as estruturas em concreto.

Apesar das vantagens das pontes em aço, a construção e montagem de uma ponte metálica apresentam inúmeros desafios. Dentre eles destacam-se a união em campo das peças fabricadas, a soldagem, bem como seu controle de qualidade.

Neste trabalho são apresentados os processos de soldagem existentes, quais as vantagens de cada método e qual deles é mais utilizado na construção e montagem de campo de uma ponte metálica. São apresentados também os procedimentos para controle de qualidade das soldas. Para demonstração prática dos estudos, será apresentado um estudo de caso da construção e montagem de uma ponte metálica.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de soldagem

Os métodos de união de metais podem ser divididos em duas categorias principais, isto é, aqueles baseados no aparecimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles baseados em forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares). No primeiro caso, do qual são exemplos a parafusagem e a rebiteagem, a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento do parafuso ou rebite, mais as forças de atrito entre as superfícies em contato. No segundo caso, a união é conseguida pela aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, ou destas e um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações metálicas e de Van der Waals. Como exemplos desta categoria citam-se a soldagem, a brasagem e a colagem (Modenesi e Marques, 2006).

2.1.1 Definição de Soldagem

Um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é abrangido pelo termo SOLDAGEM. Classicamente, a soldagem é considerada como um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com os de soldagem são utilizados para o corte ou para o recobrimento de peças. Diversos aspectos dessas operações de recobrimento e corte são similares à soldagem e, por isso, muitos aspectos destes processos são abordados juntamente com esta. Algumas definições de soldagem são:

- "Processo de junção de metais por fusão". (Deve-se ressaltar que não só metais são soldáveis e que é possível soldar metais sem fusão).
- "Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas".

- "Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição." (Definição adotada pela AWS - American Welding Society).
- "Processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de contato entre os materiais sendo unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais." (Modenesi e Marques, 2006).

2.1.2 Formação de uma Junta Soldada

De uma forma simplificada, uma peça metálica é formada por um grande número de átomos dispostos em um arranjo espacial característico (estrutura cristalina). Átomos localizados no interior desta estrutura são cercados por um número de vizinhos mais próximos, posicionados a uma distância r_0 , na qual a energia do sistema é mínima, como mostra a figura 2.1

Nesta situação, cada átomo está em sua condição de energia mínima, não tendendo a se ligar com nenhum átomo extra. Na superfície do sólido, contudo, esta situação não se mantém, pois os átomos estão ligados a menos vizinhos, possuindo, portanto um maior nível de energia do que os átomos no seu interior. Esta energia pode ser reduzida quando os átomos superficiais se ligam a outros. Assim, aproximando-se duas peças metálicas a uma distância suficientemente pequena para a formação de uma ligação permanente, uma solda entre as peças seria formada, como ilustrado na figura 2.2. Este tipo de efeito pode ser obtido, por exemplo, colocando-se em contato íntimo dois blocos de gelo (Modenesi e Marques, 2006).

Entretanto, sabe-se que isto não ocorre para duas peças metálicas, exceto em condições muito especiais. A explicação para isto está na existência de obstáculos que impedem uma aproximação efetiva das superfícies até distâncias da ordem de r_0 . Estes obstáculos podem ser de dois tipos básicos:

As superfícies metálicas, mesmo as mais polidas, apresentam uma grande rugosidade em escala microscópica e sub-microscópica (figura 2.3).

Mesmo uma superfície com um acabamento cuidadoso apresenta irregularidades da ordem de 50nm de altura, cerca de 200 camadas atômicas. Isto impede uma aproximação efetiva das superfícies, o que ocorre apenas em alguns poucos pontos de contato, de modo que o número de ligações formadas é insuficiente para garantir qualquer resistência para a junta (Modenesi e Marques, 2006).

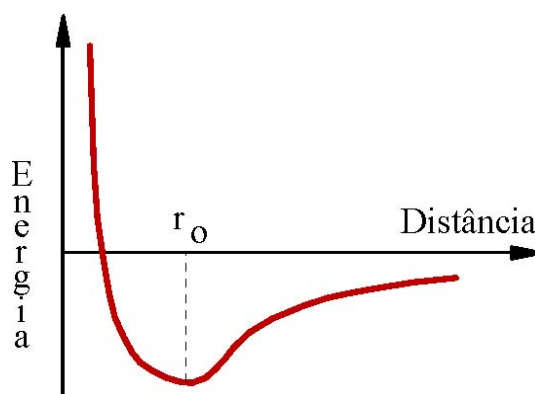


Figura 2.1 – Variação de energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função da distância de separação entre eles (Modenesi e Marques, 2006).

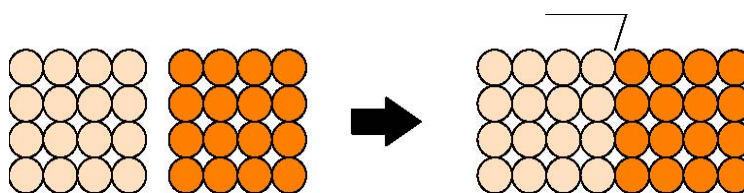


Figura 2.2 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças (Modenesi e Marques, 2006).

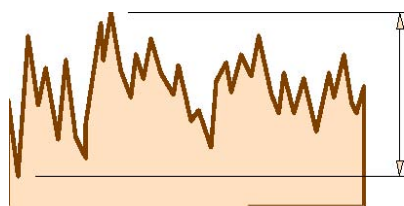


Figura 2.3 - Representação esquemática da superfície metálica limpa, espessura de 200 camadas atômicas ou 500 ângstrons (Modenesi e Marques, 2006) .

As superfícies metálicas estão normalmente recobertas por camadas de óxidos, umidade, gordura, poeira, etc, o que impede um contato real entre as superfícies, prevenindo a formação da solda. Estas camadas se formam rapidamente e resultam exatamente da existência de ligações químicas incompletas na superfície.

Dois métodos principais são utilizados para superar estes obstáculos, os quais originam os dois grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro consiste em deformar as superfícies de contato permitindo a aproximação dos átomos a distâncias da ordem de r_0 (figura 2.4). As peças podem ser aquecidas localmente de modo a facilitar a deformação das superfícies de contato.

O segundo método se baseia na aplicação localizada de calor na região de união até a sua fusão e do metal de adição (quando este é utilizado), destruindo as superfícies de contato e produzindo a união pela solidificação do metal fundido (figura 2.5).

Desta forma, uma forma de classificação dos processos de soldagem consiste em agrupá-los em dois grandes grupos baseando-se no método dominante para produzir a solda: (a) processos de soldagem por pressão (ou por deformação) e (b) processos de soldagem por fusão.

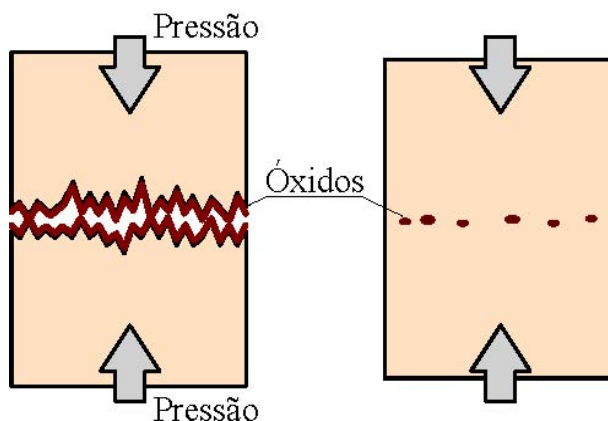


Figura 2.4 - Soldagem por pressão ou deformação (Modenesi e Marques, 2006).

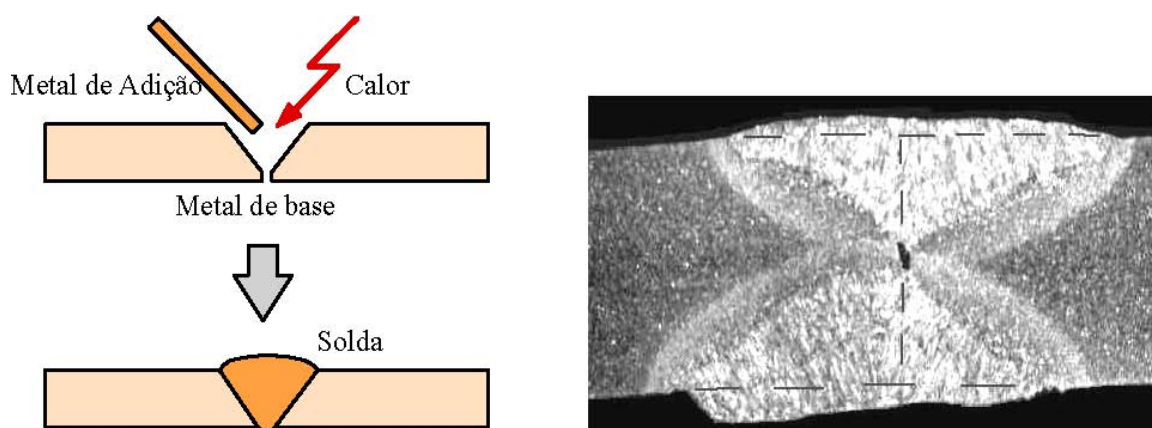


Figura 2.5 – (a) Representação esquemática da soldagem por fusão. (b) Macrografia de uma junta (Modenesi e Marques, 2006).

2.1.3 Soldagem GMAW (MIG/MAG)

A Soldagem a Arco Gás-Metal (Gas Metal Arc Welding -GMAW) é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça (figura 2.6).

A proteção do arco e poça de fusão é obtida por um gás ou mistura de gases. Se este gás é inerte (Ar/He), o processo é também chamado MIG (Metal Inert Gas). Por outro lado, se o gás for ativo (CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂), o processo é chamado MAG (Metal Active Gas). Gases inertes puros são, em geral, usados na soldagem de metais e ligas não ferrosas, misturas de gases inertes com pequenas quantidades de gases ativos são usadas,

em geral, com aços ligados, enquanto que misturas mais ricas em gases ativos ou CO₂ puro são usados na soldagem de aços carbono.

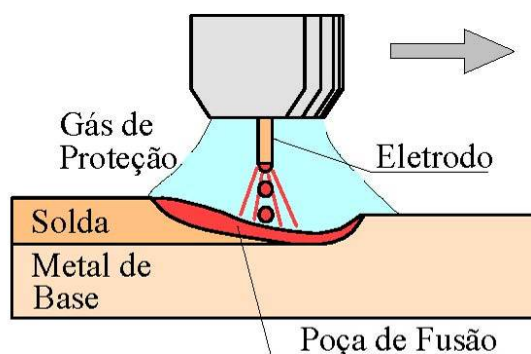


Figura 2.6 – Processo de soldagem MIG/MAG (Modenesi e Marques, 2006).

O processo é normalmente operado de forma semi-automática, podendo ser, também, mecanizado ou automatizado. É o processo de soldagem a arco mais usado com robôs industriais. Como trabalha com um (ou mais) arame(s) contínuo(s), o que permite um alto fator de ocupação, com elevadas densidades de corrente no eletrodo (elevada taxa de deposição) e, assim, tende a apresentar uma elevada produtividade. Estes aspectos têm levado a uma utilização crescente deste processo (e da soldagem com arames tubulares) em países desenvolvidos, onde o decréscimo do número de soldadores e a necessidade de maior produtividade causaram a substituição da soldagem com eletrodos revestidos em várias aplicações. A tabela 2.1 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW (Modenesi e Marques, 2006).

O equipamento básico para a soldagem GMAW consiste de fonte de energia, tocha de soldagem, fonte de gás e alimentador de arame (figura 2.7). A fonte de energia tem, em geral, uma saída de tensão constante, regulável entre 15 e 50V, que é usada em conjunto com um alimentador de arame de velocidade regulável entre cerca de 1 e 20 m/min. Este sistema ajusta automaticamente o comprimento do arco através de variações da corrente, sendo mais simples do que sistemas alternativos. Na soldagem GMAW, utiliza-se, em praticamente todas as aplicações, corrente contínua com o eletrodo ligado ao polo positivo (CC+). Recentemente, o processo tem sido utilizado com corrente alternada (CA) para a soldagem de juntas de pequena espessura principalmente de alumínio.

A tocha possui um contato elétrico deslizante (bico de contato), que transmite a corrente elétrica ao arame, orifícios para passagem de gás de proteção, bocal para dirigir o fluxo de gás e interruptor para acionamento do processo. O alimentador de arame é composto basicamente de um motor, sistema de controle da velocidade do motor e rolos para impulsão do arame.

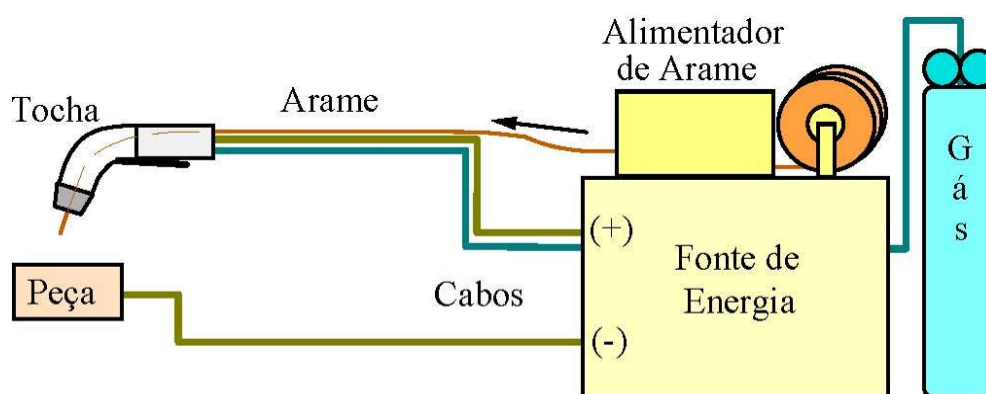


Figura 2.7 – Equipamento para a soldagem GMAW (Modenesi e Marques, 2006).

Neste processo de soldagem, mais do que em qualquer outro, a forma como o metal de adição se transfere do eletrodo para a poça de fusão pode ser controlada através do ajuste dos parâmetros de soldagem e determina várias de suas características operacionais. A transferência de metal através do arco se dá, basicamente, por três mecanismos: aerossol (spray ou goticular), globular e curto-circuito, dependendo do ajuste dos parâmetros operacionais, tais como o nível de corrente, sua polaridade, diâmetro e composição do eletrodo e a composição do gás de proteção. Uma quarta forma de transferência (pulsada) é possível com equipamentos especiais.

Na transferência por spray, o metal se transfere como finas gotas sob a ação de forças eletromagnéticas do arco e independentemente da ação da gravidade. Esta forma de transferência ocorre na soldagem em CC+ com misturas de proteção ricas em argônio e com valores elevados de corrente. Ela é muito estável e livre de respingos. Infelizmente, a necessidade de correntes elevadas torna difícil, ou impossível, a sua aplicação na soldagem fora da posição plana (a poça de fusão tende a ser muito grande e de difícil controle) ou de peças de pequena espessura (excesso de penetração).

Na transferência globular, o metal de adição se destaca do eletrodo basicamente por ação de seu peso (gravidade), sendo, portanto, similar a uma torneira gotejando. É típica da soldagem com proteção de CO_2 para tensões mais elevadas e uma ampla faixa de correntes. Na soldagem com misturas ricas em Ar, a transferência globular ocorre com corrente baixa e tensão elevada. Com esta forma de transferência, um elevado nível de respingos e grande flutuação da corrente e tensão de soldagem são comuns e a operação está restrita à posição plana.

Na transferência por curto circuito, o eletrodo toca a poça de fusão periodicamente (de 20 a 200 vezes por segundo), ocorrendo a transferência de metal de adição durante estes curtos por ação da tensão superficial e das forças eletromagnéticas. É a forma de transferência mais usada na soldagem de aços (particularmente com proteção de CO_2) fora

da posição plana e de peças de pequena espessura (até 6 mm) devido às pequenas correntes de operação e à sua independência da ação da gravidade. Elevado nível de respingos e uma tendência à falta de fusão da junta (principalmente para juntas de grande espessura) são problemas típicos desta forma de operação.

A transferência pulsada é conseguida com fontes especiais que impõem uma forma especial à corrente de soldagem, caracterizada por pulsos periódicos de alta corrente. Esta pulsação permite uma transferência spray com valores médios de corrente inferiores aos valores nos quais esta forma de transferência ocorre normalmente. Assim, obtêm-se as vantagens desta transferência com baixos valores médios de corrente o que permite a sua aplicação na soldagem de juntas de pequena espessura e, também, fora da posição plana. As maiores limitações desta forma de operação são a sua maior complexidade de operação e a necessidade de equipamentos especiais (de maior custo e mais complexos) (Modenesi e Marques, 2006).

Tabela 2.1 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo GMAW.

Vantagens e limitações	Aplicações
Processo com eletrodo contínuo	
Permite soldagem em qualquer posição	Soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas
Elevada taxa de deposição	
Elevada penetração	
Pode soldar diferentes ligas metálicas	Soldagem de carrocerias e estruturas de veículos
Exige pouca limpeza após a soldagem	
Equipamento relativamente caro e complexo	Soldagem de tubulações
Pode apresentar dificuldade para soldar juntas de acesso restrito	
Proteção do arco é sensível a correntes de ar	
Pode gerar elevada quantidade de respingos	

2.1.4 Soldagem ao Arco Submerso

A Soldagem ao Arco Submerso (Submerged Arc Welding, SAW) é um processo no qual a coalescência dos metais é produzida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo e a peça. O arco é protegido por uma camada de material fusível granulado (fluxo) que é colocado sobre a peça enquanto o eletrodo, na forma de arame, é alimentado continuamente. O fluxo na região próxima ao arco é fundido, protegendo o arco e a poça de fusão e formando, posteriormente, uma camada sólida de escória sobre o cordão. Este material pode também ajudar a estabilizar o arco e

desempenhar uma função purificadora sobre o metal fundido. Como o arco ocorre sob a camada de fluxo, ele não é visível, daí o nome do processo. A figura 2.8 ilustra o processo.

Este processo é muito usado na soldagem de estruturas de aço, na fabricação de tubulações e na deposição de camadas de revestimento tanto na fabricação como na recuperação de peças desgastadas. Trabalha frequentemente com correntes de soldagem elevadas, que podem ser superiores a 1000A, o que pode levar a taxas de deposição de até 45kg/h. Sua maior utilização é na forma mecanizada ou automática, existindo equipamentos para soldagem semi-automática. Devido à camada de fluxo e às elevadas correntes de soldagem, este processo tem de ser utilizado na posição plana ou horizontal (para soldas de filete), o que torna importante o seu uso conjunto com dispositivos para o deslocamento e posicionamento das peças. A tabela 2.2 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações do processo SAW.

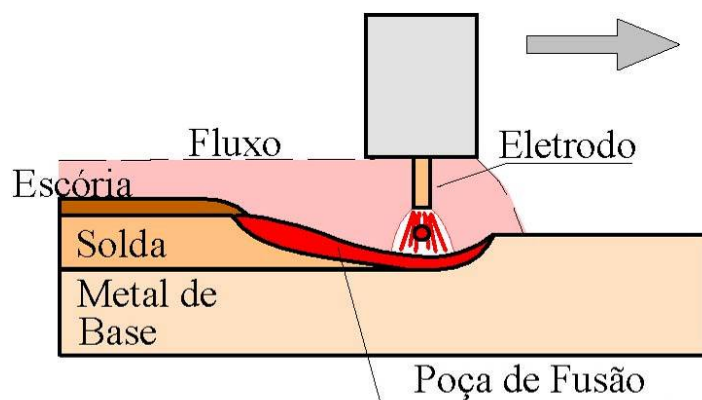


Figura 2.8 – Esquema da soldagem ao arco submerso (Modenesi e Marque, 2006).

O equipamento necessário consiste normalmente de fonte de energia do tipo tensão constante, alimentador de arame e sistema de controle, tocha de soldagem, porta fluxo e sistema de deslocamento da tocha (figura 2.9) (Modenesi e Marques, 2006).

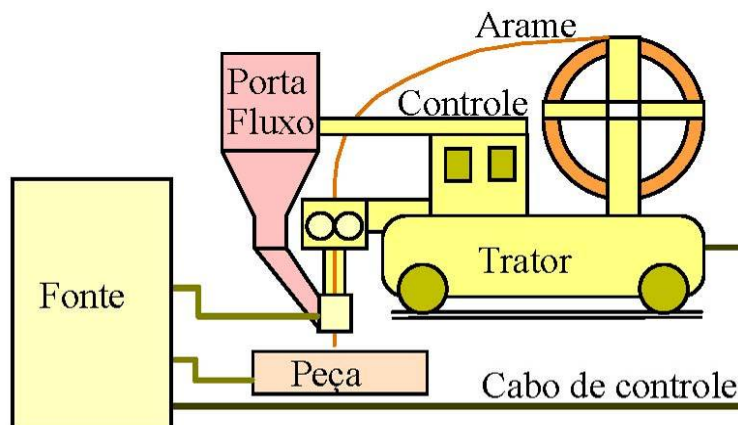


Figura 2.9 – Esquema do equipamento para soldagem a arco submerso

Tabela 2.2 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo arco submerso.

Vantagens e limitações	Aplicações
Altas velocidades de soldagem e taxas de posição	
Produz soldas uniformes e de bom acabamento superficial	Soldagem de aços carbono e ligados
Ausência de respingos	Soldagem de níquel e suas ligas
Dispensa proteção contra radiação devido ao arco não visível	Soldagem de membros estruturais e tubos de grande diâmetro
Facilmente mecanizado	
Elevada produtividade	Soldagem em fabricação de peças pesadas de aço
Soldagem limitada as posições plana e filete horizontal	
Aporte térmico elevado pode prejudicar propriedades da junta em alguns casos	Recobrimento, manutenção e reparo
Necessário retirar a escoria entre passes	

2.1.5 Soldagem com Eletrodos Revestidos

A Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos (Shielded Metal Arc Welding -SMAW) é um processo no qual a coalescência (união) dos metais é obtida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo especial revestido e a peça. O eletrodo é formado por um núcleo metálico ("alma"), com 250 a 500mm de comprimento, revestido por uma camada de minerais (argila, fluoretos, carbonatos, etc) e/ou outros materiais (celulose, ferro ligas, etc), com um diâmetro total típico entre 2 e 8mm. A alma do eletrodo conduz a corrente elétrica e serve como metal de adição. O revestimento gera escória e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada e estabilizam o arco. O revestimento pode ainda conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas. A figura 2.10 ilustra o processo.

O seu equipamento usual consiste de fonte de energia (ou máquina de soldagem), porta-eletrodo e cabos, além de equipamentos de segurança para o soldador (máscara, luvas, avental, etc.) e para a limpeza do cordão e remoção de escória (picadeira e escova de aço). Para soldagem, a parte não revestida do eletrodo é fixada no porta eletrodo e o arco é iniciado tocando-se rapidamente a ponta do eletrodo na peça (que estão conectados, por cabos, aos terminais da máquina de soldagem). O calor do arco funde a ponta do eletrodo e um pequeno volume do metal de base formando a poça de fusão. A soldagem é realizada manualmente, com o soldador controlando o comprimento do arco e a poça de fusão (pela manipulação do eletrodo) e deslocando o eletrodo ao longo da junta. Quando o eletrodo é quase todo

consumido, o processo é interrompido para troca do eletrodo e remoção de escória da região onde a soldagem será continuada. A figura 2.11 ilustra o equipamento e o processo de soldagem e a tabela 2.3 apresenta as suas vantagens, limitações e aplicações principais (Modenesi e Marques, 2006).

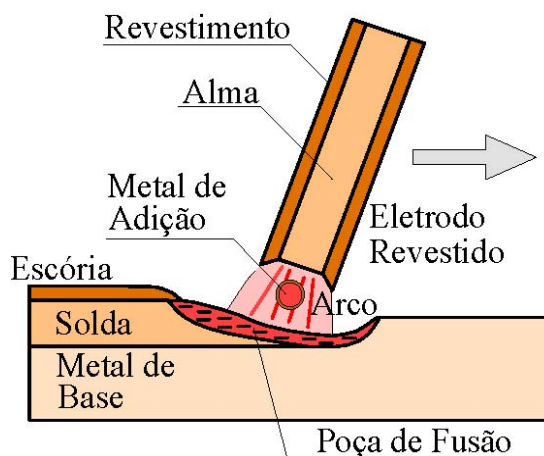


Figura 2.10 – Região do arco na soldagem com eletrodos revestidos (Modenesi e Marques, 2006).

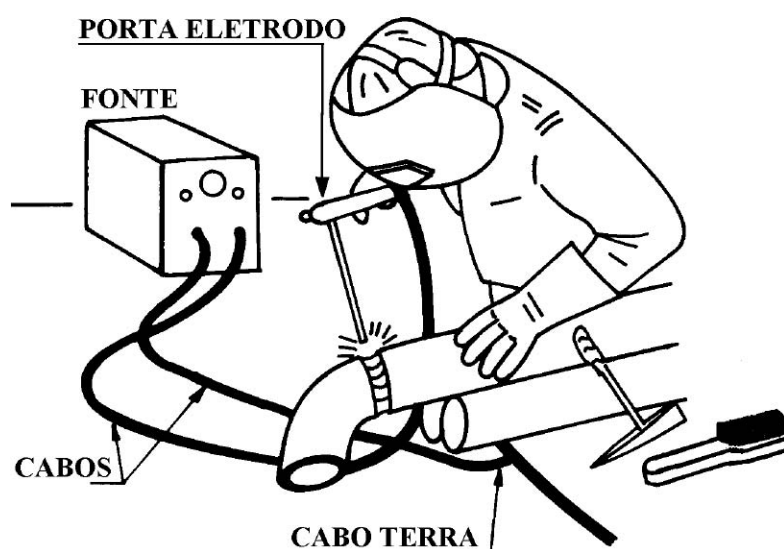


Figura 2.10 – Equipamento para soldagem SMAW (Modenesi e Marques, 2006).

Tabela 2.3 - Vantagens, limitações e aplicações principais do processo SMAW.

Vantagens e limitações	Aplicações
Equipamentos simples, portátil e barato	Soldagem de produção, manutenção e em montagens no campo
Não necessita fluxos ou gases externos	
Pouco sensível a presença de correntes de ar (trabalho em campo)	
Processo muito versátil em termos de materiais soldáveis	Soldagem de acos carbono ligados
Facilidade para atingir áreas de acesso restrito	Soldagem de ferro fundido
Aplicação difícil para matérias reativos	Soldagem de alumínio, níquel e suas ligas
Produtividade relativamente baixa	
Exige limpeza após cada passe	

No Brasil, normas da AWS são amplamente utilizadas para a especificação de consumíveis de soldagem. Eletrodos para a soldagem de aços de baixo carbono são, em geral, especificados com base nas propriedades mecânicas do metal depositado, no tipo de revestimento e em suas características operacionais. A especificação da AWS para estes aços é feita através de um conjunto de letras e dígitos (figura 2.12). Por exemplo, de acordo com a norma AWS A5.1, uma classificação do tipo E6010 indica um eletrodo capaz de depositar material com um limite de resistência de 60.000psi (420 MPa) e que possui um revestimento celulósico, com ligante a base de silicato de sódio, indicado para soldagem em todas as posições com corrente contínua e o eletrodo no polo positivo. Para os aços carbono, os eletrodos podem ser separados em diferentes tipos em função das características de seu revestimento, destacando-se:

- Eletrodos Celulósicos (EXX10 e EXXX1): Possuem elevada quantidade de material orgânico (celulose) no revestimento, cuja decomposição pelo arco gera gases que protegem o metal líquido. A quantidade de escória produzida é pequena, o arco é muito violento, causando grande volume de respingos e alta penetração em comparação com outros tipos de eletrodo. O cordão tende a apresentar escamas irregulares. A solda apresenta propriedades mecânicas adequadas para várias aplicações, contudo, não devem ser usados na soldagem de aços de teor elevado de carbono, de aços ligados e na soldagem de peças de maior espessura devido à possibilidade de fragilização pelo hidrogênio proveniente do revestimento. São particularmente adequados para soldagem fora da posição plana, tendo grande aplicação na soldagem circunferencial de tubulações e na execução de passes de raiz em geral. Devido à sua grande penetração e perda por respingos não são adequados para o enchimento de chanfros.
- Eletrodos Rutílicos (EXXX2, EXXX3 e EXXX4): Contém quantidades significativas de rutilo (TiO_2) no revestimento e produz uma escória abundante, densa e de fácil destacabilidade. São eletrodos de fácil uso, que podem ser usados em qualquer posição exceto quando têm uma elevada quantidade de pó de ferro no revestimento (para aumentar a produtividade). Podem operar tanto em CA como em CC e produzem um cordão com bom aspecto visual e de penetração baixa ou média. Sua resistência à formação de trincas na solidificação da poça de fusão é relativamente pequena o que pode ser um problema na soldagem de peça contaminadas com óleo. São eletrodos de grande versatilidade e de uso geral.
- Eletrodos Básicos (EXXX5, EXXX6 e EXXX8): Possuem quantidades apreciáveis de carbonatos (de cálcio e de outros elementos) e de fluorita, formam uma escória básica que, juntamente com o CO_2 gerado da decomposição dos carbonatos, protege o metal líquido. Esta escória exerce uma ação metalúrgica benéfica sobre a solda, dessulfurando-

a e reduzindo o risco de formação de trincas de solidificação. Não possui substâncias orgânicas em sua formulação e, se manuseado corretamente, produz soldas com baixo teor de hidrogênio, minimizando os riscos de fragilização e fissuração por este elemento. A penetração é média e o cordão apresenta boas propriedades mecânicas, particularmente quanto à tenacidade. É indicado para aplicações de grande responsabilidade, na soldagem de juntas de grande espessura ou de grande rigidez e na soldagem de aços de maior teor de carbono, de aços de maior resistência mecânica e de aços de composição química desconhecida. Este tipo de eletrodo é altamente hidrocópico, requerendo cuidados especiais na sua armazenagem.

- Eletrodos Oxidantes (EXX20 e EXX27): Possuem revestimento constituído principalmente de óxidos de ferro e manganês que produz escória oxidante, abundante e de fácil destacamento. O metal depositado possui baixos teores de carbono e manganês e grande quantidade de inclusões. Este tipo de eletrodo é pouco utilizado atualmente, embora exista em certo interesse na sua utilização como eletrodo para a soldagem subaquática.

O processo é adequado para unir materiais em uma ampla faixa de espessura, sendo mais utilizado para juntas de 3 a 20mm. Encontra, também, grande aplicação em juntas de maior espessura, quando a soldagem precisa ser realizada fora da posição plana, particularmente para a soldagem no campo.

Trabalha, tipicamente, com uma corrente entre 50 e 600A (os maiores valores sendo usados com eletrodos de maior diâmetro), resultando em uma taxa de deposição (de metal de adição) de 1 a 8kg/h. Para a soldagem de peças finas ou fora da posição plana é necessário usar eletrodos de menor diâmetro, corrente baixa e, assim, uma baixa taxa de deposição. Ainda, a necessidade de interrupção periódica do arco para a troca de eletrodo e remoção de escória, faz com que, neste processo, a proporção do tempo gasto pelo soldador efetivamente soldando (fator de ocupação) seja, em geral, inferior a outros processos de soldagem a arco. Assim, o processo SMAW tende apresentar uma menor produtividade e uma maior dependência de mão de obra que outros processos a arco. Estes fatores têm levado a uma substituição desse processo por outros em muitas aplicações, particularmente nos países mais desenvolvidos (Modenesi e Marques, 2006).

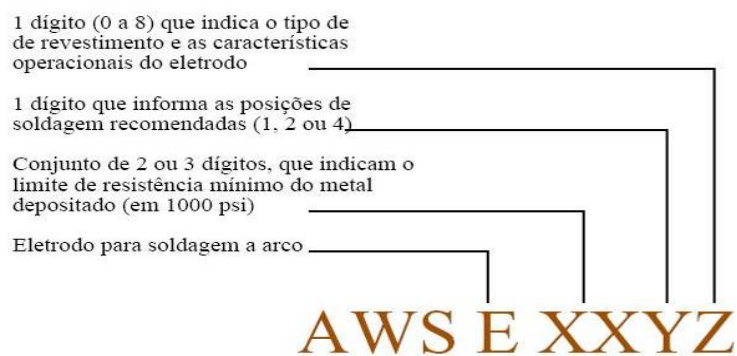


Figura 2.11 – Esquema de classificação de eletrodos de aço carbono de acordo com a AWS (Modenesi e Marques, 2006).

CAPÍTULO III

3 A IMPORTÂNCIA DO PROCESSO NA SOLDAGEM DE CAMPO

A construção e montagem de campo de pontes metálicas apresenta na soldagem um dos maiores desafios. Na fase de fabricação das peças, o processo é realizado em fábrica, onde o ambiente de trabalho permite mecanização e melhor controle de qualidade das soldas executadas. Já na montagem de campo, a infra-estrutura tem que ser montada no local onde a ponte será construída, fazendo com que as condições de trabalho não sejam as mesmas que encontramos nas fábricas.

Algumas peculiaridades da construção e montagem de campo de pontes metálicas são determinantes para a escolha do processo de solda a ser utilizado, como as listadas abaixo:

- Presenças de correntes de ar: podem ocorrer no local da implantação da ponte, muitas vezes sob influência das intempéries;
- Acesso ao local da obra: muitas vezes o acesso à obra ou ao local da solda é restrito, impossibilitando a utilização de equipamentos complexos;
- Solda executada em várias posições: devido à complexidade da estrutura são exigidas soldas em várias posições (horizontal, vertical ou sobre-cabeça);
- Solda de grande responsabilidade: qualquer falha na junta soldada pode causar a ruína da estrutura;
- Custo compatível com a obra: alto valor de equipamentos ou material pode inviabilizar a obra.

Estas limitações fazem com que a utilização de métodos mais modernos, mecanizados, altamente produtivos e confiáveis como Arco Submerso e MIG/MAG, não ocorra. Restando então o Eletrodo Revestido como sendo o método de solda mais utilizado na construção e montagem de campo de uma ponte metálica.

O método do eletrodo revestido apresenta vantagens como simplicidade e portabilidade dos equipamentos, a pouca sensibilidade à presença de correntes de ar e à facilidade para atingir áreas de acesso restrito. Entretanto este método de solda apresenta baixa produtividade. Além disso a qualidade e confiabilidade da soldagem pelo método do eletrodo revestido está diretamente relacionada ao profissional que a executou, tornando o processo de controle de qualidade extremamente importante e indispensável.

CAPITULO IV

4 CONTROLE DE QUALIDADE NA SOLDADA POR ELETRODO REVESTIDO

4.1 Normas e Qualificação dos Procedimentos

No caso específico das operações de soldagem, a realização de soldas inadequadas durante a fabricação de certos tipos de estruturas ou equipamentos, tais como navios, pontes, oleodutos, componentes automotivos e vasos de pressão, pode resultar em sérios acidentes com grandes perdas materiais e, eventualmente, humanas e danos ao meio ambiente. Como consequência, as operações de soldagem para diversas aplicações são reguladas por diferentes códigos segundo a aplicação específica. Como exemplo de códigos e especificações importantes ligados à soldagem pode-se citar:

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code (vasos de pressão);
- API STD 1104, Standard for Welding Pipelines and Related Facilities (tubulações e dutos na área de petróleo);
- AWS D1.1, Structural Welding Code (estruturas soldadas de aço carbono e de baixa liga);
- DNV, Rules for Design, Construction and Inspection of Offshore Structures (estruturas marítimas de aço);
- Especificações diferentes de associações como a International Organization for Standardization (ISO), American Welding Society (AWS), British Standard Society (BS), Deustches Institute fur Normung (DIN), Association Francaise de Normalisation (NF), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), etc (Hayes e Modenesi, 2000).

Estes códigos e especificações podem cobrir as mais diferentes etapas de soldagem incluindo, por exemplo, a especificação de material (metal de base e consumíveis), projeto e preparação da junta, qualificações de procedimento e de operador e procedimento de inspeção.

Para diversas aplicações, as normas relevantes exigem que, antes da execução da soldagem de produção, especificações dos procedimentos que serão adotados para a sua execução sejam preparadas e qualificadas. Este processo visa demonstrar que, através do procedimento proposto, soldas adequadas, de acordo com os requisitos colocados pela norma ou estabelecidos em contrato, possam ser obtidas. Além disto, ele permite uniformizar e manter registro das condições especificadas de soldagem para controle do processo e eventual determinação de causas de falha. A **Especificação de Procedimento de Soldagem** (EPS) é um documento no qual os valores permitidos de diversas variáveis do processo estão

registrados para serem adotados, pelo soldador ou operador de soldagem, durante a fabricação de uma dada junta soldada. Variáveis importantes de um procedimento de soldagem e que, portanto, podem fazer parte de uma EPS incluem, por exemplo, a composição, classe e espessura do(s) metal(is) de base, processo(s) de soldagem, tipos de consumíveis e suas características, projeto da junta, posição de soldagem, temperatura de pré-aquecimento e entre passes, corrente, tensão e velocidade de soldagem, aporte térmico, número aproximado de passes e técnica operatória. Naturalmente, a forma exata de uma dada Especificação de Procedimento de Soldagem e as variáveis por ela consideradas dependem da norma técnica que está sendo aplicada. Para que possa ser utilizada na produção, uma EPS deve ser antes qualificada (Hayes e Modenesi, 2000)..

Para isto, amostras adequadas devem ser preparadas e soldadas de acordo com a EPS. Corpos de prova devem ser retirados destas amostras e testados ou examinados, os resultados destes devem avaliados e, com base nos requerimentos estabelecidos pela norma, projeto ou contrato, o procedimento deve ser aprovado ou rejeitado (neste caso podendo ser convenientemente modificado e testado novamente). Os testes que serão realizados na qualificação de uma EPS, assim como o seu número, dimensões e posição no corpo de prova, dependem da aplicação e da norma considerada. Como testes, que podem ser requeridos, pode-se citar:

- Ensaio de dobramento,
- Ensaio de tração,
- Ensaio de impacto (ou outro ensaio para determinação de tenacidade),
- Ensaio de dureza,
- Macrografia,
- Ensaios não destrutivos (por exemplo, radiografia), e
- Testes de corrosão.

Os resultados dos testes devem ser colocados em um **Registro de Qualificação de Procedimento** (RQP) o qual deve ser referido pela EPS, servindo como um atestado de sua adequação aos critérios de aceitação estabelecidos. Enquanto os originais da EPS e RQP devem permanecer guardados, cópias da EPS já qualificada devem ser encaminhadas para o setor de produção e colocadas próximas das juntas que serão fabricadas de acordo com a EPS. Durante a fabricação, os valores indicados na EPS deverão ser seguidos. Inspeções periódicas são realizadas para verificar que o mesmo está ocorrendo.

Dependendo do serviço a ser executado, um grande número de juntas soldadas pode vir a exigir qualificação. Nestas condições, o processo de qualificação poderá ter um custo relativamente elevado e demandar um longo tempo para a sua execução. Assim, a utilização,

quando possível, de procedimentos de soldagem previamente qualificados, juntamente com a facilidade de acessar estes procedimentos (em um banco de dados) e selecioná-los de acordo com os critérios dos códigos que estão sendo usados, é uma importante estratégia para manter a própria competitividade da empresa. Existem disponíveis atualmente programas de computador específicos para o armazenamento e seleção de procedimento de soldagem.

Para diversas aplicações, o soldador (ou operador) precisa demonstrar, antes de poder realizar um dado tipo de soldagem na produção, que possui a habilidade necessária para executar aquele serviço, isto é, ele precisa ser qualificado de acordo com os requisitos de um dado código. Para isto, ele deverá soldar corpos de prova específicos, sob condições preestabelecidas e baseadas em uma EPS qualificada ou em dados de produção. Estes corpos de prova serão examinados para se determinar sua integridade e, desta forma, a habilidade de quem o soldou. Como é impossível avaliar o soldador em todas as situações possíveis de serem encontradas na produção, o exame de qualificação geralmente engloba uma determinada condição de soldagem e não uma situação específica (tal como a qualificação para a soldagem em uma determinada posição com um dado processo). Segundo o código ASME, as variáveis que determinam a qualificação de um soldador são:

- Processo de soldagem,
- Tipo de junta,
- Posição de soldagem,
- Tipo de eletrodo,
- Espessura da junta, e
- Situação da raiz.

Ensaio comumente usados na qualificação de soldador (ou operador) incluem, por exemplo, a inspeção visual da junta, ensaio de dobramento, macrografia, radiografia e ensaios práticos de fratura. Os resultados dos testes de qualificação são colocados em um documento chamado **Registro de Teste de Qualificação de Soldador**.

Como no caso de procedimentos de soldagem, a manutenção de uma equipe de soldadores devidamente qualificada para os tipos de serviços que a empresa realiza, é um importante fator para manter a competitividade desta. Portanto, o desenvolvimento de programas para o treinamento e aperfeiçoamento constante da equipe de forma a atender as demandas dos diferentes códigos e clientes não deve relegado a um segundo plano de prioridades.

As qualificações de procedimento de soldagem e de soldador (ou operador) fazem parte do sistema de garantia da qualidade em soldagem. Este controle engloba diversas

outras atividades apresentando uma maior ou menor complexidade em função de cada empresa, seus objetivos e clientes e do serviço particular (Hayes e Modenesi, 2000).

4.2 – Controle durante a soldagem

4.2.1 – Armazenamento dos Eletrodos

Caso não sejam tomados os adequados cuidados no armazenamento e manuseio, os eletrodos revestidos podem se danificar. Parte ou todo o revestimento pode se danificar, principalmente nos casos de dobra ou choque do eletrodo. Sempre que se observar qualquer alteração no estado do eletrodo, este não deve ser utilizado.

A umidade em excesso no revestimento dos eletrodos, é de uma forma geral, prejudicial a soldagem. Ela pode levar a instabilidade do arco, formação de respingos e porosidades principalmente no início do cordão e a fragilização e fissuração pelo Hidrogênio.

Devido aos problemas causados pela umidade, os eletrodos devem ser adquiridos em embalagens hermeticamente fechadas e armazenados em ambientes controlados, de modo a serem evitados danos e contatos com a umidade do ar. As embalagens dos eletrodos são consideradas totalmente estanques enquanto fechadas. Após abertas, perdem a capacidade de executar uma adequada armazenagem, e os eletrodos devem ser mantidos em estufas.

O período máximo que se recomenda para que um eletrodo permaneça fora da estufa é duas horas. Após este tempo, há o risco de ocorrer absorção excessiva de umidade. Caso isto venha a acontecer, os eletrodos básicos devem ser recondicionados por um tratamento de ressecagem, devendo em seguida retornarem as estufas (Joaquim e Ramalho, 2002).

4.2.2 – Procedimento de soldagem

Como este processo depende em grande parte da habilidade do soldador, é importante observar as seguintes técnicas operatórias:

- **Ponteamto:** A finalidade do ponteamto é permitir uma fácil, correta e econômica fixação das peças a soldar. Ele consiste em executar cordões curtos e distribuídos ao longo da junta, sendo sua função básica manter a posição relativa entre as peças, garantindo a manutenção de uma folga adequada. O ponteamto pode ser aplicado diretamente na junta, nos casos em que é prevista a remoção da raiz. A geometria da peça e a sequência de pontos devem ser estudados de forma a evitar ,ou minimizar, as

distorções ou o fechamento das bordas. Se isto não for evitado, viria a prejudicar a penetração e precisaria uma remoção excessiva de raiz, sob risco de vir a causar a inclusão de escória.

- Execução de raiz: A folga na montagem é fator determinante para a boa penetração do primeiro passe. Ela é diretamente ligada ao diâmetro do eletrodo utilizado.
- Execução dos passes de enchimento: Enchimento por filetes, passes largos ou passes triangulares (Joaquim e Ramalho, 2002).

4.3 – Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. No processo de soldagem os ensaios não destrutivos ocupam um papel muito importante na detecção de defeitos que ocorrem antes, durante e após a execução da soldagem. Os principais ensaios não destrutivos no controle de qualidade de juntas soldadas são:

- Ensaio visual;
- Ensaio radiográfico.
- Ensaio por líquidos penetrantes;
- Ensaio por ultra-som (Tiburi, 2007).;

4.3.1 – Inspeção Visual

A inspeção visual é o primeiro passo a ser tomado para se verificar a qualidade de uma junta soldada. Todos os outros exames não-destrutivos devem ser executados após um bom exame visual, que pode ser feito à vista desarmada ou com o auxílio de lupa. A inspeção visual é utilizada antes e após a soldagem. Antes, para detectar defeitos de geometria da junta (ângulo do bisei, ângulo do chanfro, nariz do bisei e abertura das partes a serem soldadas) e descontinuidades do metal base. Após a operação de soldagem, o exame visual tem por finalidade detectar possíveis defeitos induzidos durante a soldagem, tais como: perfil ou tamanho de solda incorreto, irregularidade na aparência do cordão, poros superficiais, falta de penetração em soldas topo feita de um só lado, trincas superficiais no metal de solda e na zona termicamente afetada, mordeduras e outros. (Alcam, 2001).

4.3.2 Inspeção Radiográfica

O exame radiográfico é de grande aplicação industrial, sendo utilizado para determinar a presença e a natureza de defeitos ou descontinuidades estruturais no interior das soldas. O equipamento é relativamente caro, bem como é necessário que o pessoal de operação e interpretação dos resultados seja qualificado. Recomenda-se o uso de penetrômetros em todas as radiografias para indicar o nível de qualidade radiográfica (sensibilidade). Além daqueles defeitos listados na inspeção visual, o exame radiográfico revela também: porosidade, inclusões, trincas internas e falta de fusão. A inspeção radiográfica não revela defeitos planares que estejam orientados paralelamente ao feixe, por exemplo, estrutura lamelar, assim como pode não revelar outros defeitos orientados segundo ângulos bem próximos de 00 com o feixe, por exemplo, falta de fusão. Todavia, a confiabilidade da inspeção pode ser aumentada por meio de radiografias tiradas da solda de dois ou mais ângulos (Alcam, 2001).

4.3.3 Inspeção por Líquido Penetrante

A inspeção por meio de líquido penetrante é um exame relativamente simples, rápido e de fácil execução. É utilizado para detectar trincas e porosidade superficial e falta de fusão que se estende até a superfície da solda. O líquido penetrante quanto à sua visibilidade pode ser: fluorescente e não-fluorescente. O penetrante fluorescente é utilizado em locais escuros, sendo visível com luz ultravioleta ("luz negra"), e o penetrante visível (não-fluorescente) é utilizado em locais claros, sendo visível com luz natural. Os penetrantes visíveis são empregados para detectar defeitos superficiais grosseiros, enquanto os penetrantes fluorescentes para detectar defeitos muito pequenos. Nos dois tipos, penetrante visível e fluorescente, a superfície a ser examinada e todas as áreas ao redor de pelo menos 25 mm devem ser limpas (eliminar graxa, óleo e outras sujidades). Após a limpeza inicial, aplica-se o líquido penetrante por meio de pincel, pulverização ou derramamento sobre toda área da solda a ser examinada, onde, por ação capilar, o penetrante migra para dentro de possíveis defeitos superficiais. Decorrido o tempo de penetração, o excesso de penetrante é removido com água, no caso de penetrantes fluorescentes solúveis em água; ou com um solvente, no caso de penetrantes à base de óleo. Depois que o produto utilizado na remoção do excesso de penetrante estiver seco, aplica-se o revelador na superfície a se examinada. Por fim, o inspetor realiza a inspeção visual da solda à procura de possíveis defeitos. A inspeção por líquido penetrante, além de utilizada para detectar defeitos superficiais, é muito comum ser empregada, também, para verificar a existência de defeitos na raiz das soldas após a operação de goivagem do lado reverso da junta aquele já soldado. E, no caso de existir algum defeito, o mesmo deve ser removido para, em seguida, a soldagem da junta ser completada (Alcam, 2001).

A principal vantagem do método é a sua simplicidade. É fácil de fazer de interpretar os resultados. O aprendizado é simples, requer pouco tempo de treinamento do inspetor. Como a indicação assemelha-se a uma fotografia do defeito, é muito fácil de avaliar os resultados. Em contrapartida o inspetor deve estar ciente dos cuidados básicos a serem tomados (limpeza, tempo de penetração, etc), pois a simplicidade pode se tornar uma faca de dois gumes. Não há limitação para o tamanho e forma das peças a ensaiar, nem tipo de material; por outro lado, as peças devem ser susceptíveis à limpeza e sua superfície não pode ser muito rugosa e nem porosa. O método pode revelar descontinuidades (trincas) extremamente finas (da ordem de 0,001 mm de abertura).

Entretando este tipo de ensaio só detecta descontinuidades abertas para a superfície, já que o penetrante tem que entrar na descontinuidade para ser posteriormente revelado. Por esta razão, a descontinuidade não deve estar preenchida com material estranho. A superfície do material não pode ser porosa ou absorvente já que não haveria possibilidade de remover totalmente o excesso de penetrante, causando mascaramento de resultados. A aplicação do penetrante deve ser feita numa determinada faixa de temperatura. permita ou recomendada pelo fabricante dos produtos. Superfícies muito frias (abaixo de 5 °C) ou muito quentes (acima de 52 °C) não são recomendáveis ao ensaio. Algumas aplicações das peças em inspeção fazem com que a limpeza seja efetuada da maneira mais completa possível após o ensaio (caso de maquinaria para indústria alimentícia, material a ser soldado posteriormente, etc). Este fato pode tornar-se limitativo ao exame, especialmente quando esta limpeza for difícil de fazer (Andreucci, 2008).

4.3.4 *Inspeção por Ultra-som*

O ensaio por ultra-som, caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinada como por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros. Portanto, o exame ultra-sônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades (Andreucci, 2008).

Vantagens em relação a outros ensaios:

- O método ultra-sônico possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, por exemplo, trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia):

- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção.
- No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo do informe de resultados.
- Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o ensaio ultra-sônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação.
- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultra-sônico, enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho mas não sua profundidade e em muitos casos este é um fator importante para proceder um reparo.

Limitações em relação a outros ensaios:

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor. · O registro permanente do teste não é facilmente obtido.
- Faixas de espessuras muito finas, constituem uma dificuldade para aplicação do método (Andreucci, 2008).

CAPITULO V

5 ESTUDO DE CASO

5.1 – Objetivo

Este estudo de caso tem como objetivo o acompanhamento do processo de soldagem, bem como seu controle de qualidade de uma obra de construção e montagem de campo de uma ponte metálica.

5.2 – Informações da Obra

Para trafego de veículos existem 02 (duas) pontes paralelas isoladas distantes 20 metros entre si, de eixo a eixo da pista, cada uma com 03 (três) faixas de trafego perfazendo uma largura útil de 11 metros. A pista esquerda terá comprimento total de 312 metros, sendo 88 metros de encontros. A pista direita terá comprimento total de 298 metros, sendo 65 metros de encontros. Os vãos vencidos têm entre 25 e 35 metros (próximo aos encontros) e o vão central tem 85 metros de comprimento e um gabarito náutico de 8 metros.

As estruturas metálicas da ponte foram projetadas como estruturas mistas, composta por duas longarinas em forma de perfil I soldados, interligadas transversalmente por transversinas, também em perfis I soldados, formando uma grelha metálica.

O aço usado como matéria prima para construção das estruturas metálicas da ponte é o aço de alta resistência estrutural, soldável e resistente à corrosão atmosférica, USI SAC 350.



Figura 5.1 – Vista geral da estrutura metálica da ponte.

5.3 Soldagem

A construção da ponte contempla as etapas de fábrica e de campo. Na fábrica as unidades da ponte foram construídas com comprimento em torno de 11,8 m, compatíveis com as dimensões de gabarito de carga para transporte rodoviário convencional e maximizando o comprimento das chapas comerciais (figura 5.2). No local de construção da ponte, o canteiro de obra, as unidades (longarinas e transversinas) foram soldadas para formarem a estrutura metálica da ponte.



Figura 5.2 – Longarinas e transversinas sendo transportadas da fábrica até o local da obra

O processo usado para soldagem de campo foi o do eletrodo revestido. Este processo foi utilizado devido às diversas vantagens já apresentadas e também devido às limitações que este ambiente de trabalho apresenta.

5.3.1 – Equipamentos

Para soldagem com eletrodos revestidos os equipamentos necessários são: máquina de soldagem (Figura 5.3), porta-eletrodo e cabos, além de equipamentos de segurança para o soldador (máscara, luvas, avental, etc.) e para a limpeza do cordão e remoção de escória (picadeira e escova de aço). Para construção da ponte foi usado um gerador elétrico 281CV-440V-60Hz (Figura 5.4), com capacidade para 30 soldadores trabalhando simultaneamente.



Figura 5.3 – Equipamentos utilizados no processo de soldagem (quadro de distribuição e maquinas de solda).



Figura 5.4 – Gerador utilizado como fonte de energia para soldagem.

5.3.2 – Eletrodos

Os eletrodos utilizados são do tipo básico que possuem quantidades apreciáveis de carbonatos (de cálcio e de outros elementos) e de fluorita, formam uma escória básica que, juntamente com o CO₂ gerado da decomposição dos carbonatos, protege o metal líquido. Esta escória exerce uma ação metalúrgica benéfica sobre a solda, dessulfurando-a e reduzindo o risco de formação de trincas de solidificação. Não possui substâncias orgânicas em sua formulação e, se manuseado corretamente, produz soldas com baixo teor de hidrogênio, minimizando os riscos de fragilização e fissuração por este elemento. A penetração é média e o cordão apresenta boas propriedades mecânicas, particularmente quanto à tenacidade. É indicado para aplicações de grande responsabilidade, na soldagem de juntas de grande espessura ou de grande rigidez e na soldagem de aços de maior teor de carbono, de aços de maior resistência mecânica e de aços de composição química

desconhecida. Este tipo de eletrodo é altamente hidrocópico, requerendo cuidados especiais na sua armazenagem.

Os eletrodos atendem a classificação AWS-E7018-G, conforme especificação do fabricante (figura 5.5).

ELETRODO OK	METAL DEPOSITADO	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS	POSIÇÃO SOLDAGEM	TENSÃO/ TIPO CORR.	DIÂM. (mm)	COMPR. (mm)	FAIXA DE CORRENTE (A)
55.00 básico AWS / ASME SFA 5.1 E7018-1 AWS / ASME SFA 5.5 E7018-G	C 0,06	Soldagem de grande responsabilidade, depositando metal de altíssima qualidade; usado em todos os tipos de juntas; não é sensível à composição do metal base; para estruturas muito rígidas, vasos de pressão, construções navais, aços fundidos, etc. ELEVADA TENACIDADE NUCLEAR. HOMOLOGAÇÕES: ABS, BV, DNV, LR, FBTS	T560-600 MPa A 29-31% Ch V (-45° C) 70-90 J		21 - 32 V CA ≥ 70 V CC+	2,5	350	85 - 105
	Si 0,50					3,25	350	100 - 150
	Mn 1,45					4	450	130 - 200
						5	450	195 - 265
						6	450	220 - 310

Figura 5.5 – Especificação do eletrodo utilizado.

5.3.3 – Procedimento de soldagem

Para os procedimentos de solda foi adotado a AWS – American Welding Society. Será detalhado abaixo as principais recomendações quanto a armazenamento de eletrodos e os procedimentos de solda a serem adotados.

5.3.3.1 – Recebimento e armazenamento dos eletrodos

O eletrodo recebido no almoxarifado deverá ser examinado rigorosamente quanto ao aspecto da embalagem. Não abrir a embalagem para exame do conteúdo. Se a embalagem estiver danificada, aberta, pondo em dúvida a qualidade do conteúdo, deve ser recusada ou excluída daquelas cujos eletrodos serão empregados nas diversas operações, podendo contudo, ser utilizados em operação de ultima categoria. Para estocagem das embalagens fechadas deve-se seguir a seguintes orientações:

- Lugares secos (50% de umidade), aquecer 5° C acima da temperatura ambiente > 18° C;
- Estocar as latas na vertical com as pontas de pega voltadas para baixo;
- Empilhar no máximo sete latas
- Evitar quedas e choques
- Estocagem por períodos máximos de 12 meses.

A figura 5.6 ilustra a utilização do ambiente adequado para o armazenamento das embalagens dos eletrodos.



Figura 5.6 – Armazenamento das embalagens dos eletrodos

Após a retirada da embalagem deve-se evitar o contato prolongado do eletrodo com o ar atmosférico independente do tipo de revestimento. Os eletrodos revestidos do tipo básico absorvem uma quantidade de água maior devido às propriedades higroscópicas dos constituintes dos revestimentos. Segue abaixo as orientações para eletrodos com revestimento básico:

- Abrir a embalagem;
- Colocar os eletrodos em estufas de ressecagem com temperaturas entre 260 a 315° C e tempo > 1 hora;
- Colocar em estufa a 120° C (figura 5.7);
- Retirar somente as quantidades que serão usadas por turno;
- Colocá-los na estufa portátil a 70° C (figura 5.8).

Cuidados na ressecagem:

- Temperatura máxima de 400° C;
- Tempo máximo de 2 horas;
- Evitar a ressecagem de grandes quantidades;
- Evitar mais de duas ressecagem por eletrodo.



Figura 5.7 – Estufa para ressecagem dos eletrodos



Figura 5.8 – Estufa portátil para armazenamento dos eletrodos (“cochichos”)

5.3.3.2 – Preparação das juntas

Para início do processo de solda deve observar cuidadosamente as peças quanto ao aspecto de deformação total ou parcial. Tais deformações devem ser corrigidas antes de se processar a soldagem, evitando-se com isso tentativas inúteis, onerosa e prejudiciais de correção de peça pronta.

Examinar cuidadosamente quanto ao aspecto de limpeza. Tintas, óleos, graxas, carepa de laminação ou corrosão, escoria proveniente de corte são elementos prejudiciais a qualidade da solda. As juntas não devem conter estrias profundas geradas nos cortes, elas podem possuir escorias ou material fundido que irá afetar a qualidade da solda. Conferir a planicidade das superfícies geradas dos cortes e a exatidão do chanfro.

É necessário limpar, com auxílio de lixadeira, as superfícies dos chanfros feitos por corte autógeno. Esta limpeza tem a finalidade de evitar inclusão de escoria ou descontinuidade de material.

Quando a chapa levar tratamento superficial (primer) antes da composição da peça, é necessário limpar a região a ser soldada antes do início da operação, evitando-se o aparecimento de poros. O processo de limpeza pode ser queima total de pintura de proteção com escovamento ou esmerilhamento. Figura 5.9.

As regiões adjacentes as juntas a serem soldadas, devem ser limpas dentro de uma faixa de aproximadamente 30mm, para cada lado.



Figura 5.9 – Remoção da pintura por esmerilhamento para execução da solda.

5.3.3.3 – A soldagem

A soldagem por eletrodo revestido é um processo extremamente dependente do soldador que a executou, por isso é indispensável que os soldadores envolvidos nestes serviços estejam previamente qualificados por entidades oficialmente reconhecidas, conforme previsto pela PMB-262 da ABNT.

O apoio correto das peças a serem soldadas (pré-montagem) é importante para evitar distorções desnecessárias e minimizar as tensões geradas pela retração da solda, quando do resfriamento. Colocar as peças nas posições mais precisas possíveis para se obter maior penetração possível de solda. Devido à complexidade da estrutura da ponte se fez necessário a soldagem em várias posições, conforme figura 5.10.



Figura 5.10 – Soldagem das juntas entre as longarinas.

As operações de “ponteamento” durante a montagem dos sub-cunjos deverão ser executados por soldadores qualificados, caso contrario os pontos deverão ser integralmente removidos.

É importante garantir que nenhuma operação de soldagem seja executada sobre superfícies exposta ao vento, chuva ou coberturas de orvalho. Em horas muito frias ou em que houver grande umidade do ar, é conveniente pré-aquecer, de forma controlada as superfícies a serem soldadas (até 100° C), para espessuras menores ou iguais a 30mm e 150° C para espessuras maiores.

Os eventuais respingos de solda, e pontos acidentalmente riscados por eletrodos deverão ser esmerilhados. Nas soldas compostas por vários passes, retirar cuidadosamente a escória depositada no passe anterior. Não soldar sobre fissuras, poros ou falhas de fusão. Para execução da solda é necessária a inexistência de qualquer fonte de vibração (martelamento ou movimentação brusca da peça). Figura 5.11.



Figura 5.11 – Remoção de escoria após a finalização da solda.

Nas soldas de penetração total é necessária a limpeza da raiz. Esta limpeza devera ser cuidadosa, garantindo uma boa qualidade da solda. Quando a limpeza da raiz não for suficiente a solda deve ser recusada. A solda de penetração total é quase sempre seguida de grandes deformações nas peças em razão da quantidade de calor induzida, para corrigir tais deformações é recomendado o pré-aquecimento da peça. Para limpeza da raiz ou extração de solda é recomendado o uso de disco de corte ou outra ferramenta mecânica que não afete o estado inicial do material base. Permite-se o uso de eletrodos de carvão desde que seja removido, por esmeril, a região afetada do total da camada dura criada pelo excesso de carbono.

5.4 – Controle de qualidade da solda

Para garantia da qualidade da solda executada na estrutura metálica da ponte, o controle da solda foi feito antes, durante e após a soldagem.

5.4.1 – Controle antes da soldagem

Certificar-se que todos os soldadores e operadores de solda envolvidos estejam qualificados para as operações de solda por eles executados, inclusive as de ponteameto.

Certificar-se de que todos os eletrodos, em utilização, estejam dentro da especificação recomendada, exigindo certificados antes da utilização de cada novo lote ou remessa.

Verificar, sistematicamente, as condições de armazenamento dos eletrodos (umidade e temperatura), inclusive condições de re-utilização.

Certificar-se da utilização sistemática dos “cochichos” do perfeito funcionamento dos mesmos, bem como das estufas.

Fazer um controle da qualidade das juntas a serem soldadas, através de inspeções sistemáticas (visual e dimensional) dos chanfros, os quais devem estar completamente isentos de rebarbas, graxas, tintas e outros resíduos.

Cuidar para que os locais a soldar estejam limpos e isentos de óleos, tintas, carepas de laminação, ferrugem, escorias e etc. Figura 5.12.



Figura 5.12 – Junta preparada para início da solda.

5.4.2 Controle durante a soldagem

Verificar e registrar controle sistemático das características elétricas das operações de solda, as quais devem estar em conformidade com o processo pré-estabelecido (EPS) e qualificado (RQPS), bem como manter controle das condições operacionais das fontes de solda (regulagem e manutenção).

Não permitir soldas dobre fissuras, poros, falhas de fusão ou inclusão de escorias.

Não permitir a remoção de escoria, proveniente do revestimento dos eletrodos, antes da completa solidificação da peça do metal depositado.

Não permitir a soldagem de quaisquer peças auxiliares para posicionamento, montagem ou içamento, nos componentes da ponte, sem a autorização da projetista

Em caso de dúvida, quanto a qualidade da solda, esta deverá ser examinada através do teste de líquido penetrante, antes de se proceder a execução do passe seguinte.

5.4.3 Controle após a soldagem - END

Os ENDs (ensaios não destrutivos) são indispensáveis para o controle de qualidade das soldas. Para a obra em questão os ENDs utilizados foram a Inspeção Visual, o Líquido Penetrante e o ensaio de Ultra-Som. O ensaio de Líquido Penetrante é um método simples e de baixo custo. Foi utilizado para detecção de defeitos na execução da raiz ou entre passes de solda. O ensaio de Ultra-Som é vantajoso porque possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, seu resultado é imediato e não é necessário isolamento da região para execução do ensaio.

5.4.3.1 – Inspeção Visual

Após a soldagem, fez-se a inspeção visual (figura 5.13 e 5.14) para se identificar e solicitar as devidas correções dos defeitos ocorridos durante ou após a soldagem. Tais como:

- Falta de penetração
- Excesso de penetração
- Desnivelamento das bordas
- Superfície irregular
- Cordão transbordante
- Mordeduras
- Respingos/salpicos
- Poros
- Trincas



Figura 5.13 – Inspeção visual após a soldagem.



Figura 5.14 – Inspeção visual após a soldagem.

5.4.3.2 – Líquido Penetrante

Durante a soldagem, sempre que ocorrer dúvida quanto à qualidade da solda executada, o ensaio de líquido penetrante deve ser utilizado. Este tipo de ensaio pode ser utilizado tanto para verificação da qualidade da raiz como para verificar a qualidade entre os passes da solda de enchimento. Este ensaio é utilizado para detectar descontinuidades abertas para a superfície do tipo:

- Trincas
- Poros

A detecção e correção das descontinuidades precocemente (antes da finalização da solda) evita que a solda seja removida quando estiver concluída. Figura 5.15



Figura 5.15 – Realização do ensaio de líquido penetrante entre os passes de solda.

5.4.3.3 – Ultra-Som

Devido à confiabilidade deste tipo de ensaio, seu resultado foi usado como critério para liberação das juntas soldadas. Este ensaio é utilizado para detectar descontinuidades como:

- Trinca longitudinal;
- Trinca transversal;
- Falta de penetração;

- Falta de fusão;
- Porosidade;
- Mordedura;
- Inclusão de escória.



Figura 5.16 – Remoção do revestimento para realização do ensaio de Ultra-Som

Para execução do ensaio de Ultra-Som, é necessária a realização a limpeza mecânica nas proximidades da emenda soldada, conforme figura 5.16.

Para cada junta ensaia foi emitido um relatório de inspeção baseado na norma AWS D1.5, contendo:

- Informações da obra;
- Equipamentos utilizados no teste;
- Condições superficiais da junta ensaiada;
- Identificação da junta;
- Croqui de localização da junta;
- Resultado do teste;
- Resultado do teste após o reparo (quando necessário);
- Profissional responsável.

Para todas as juntas soldadas na montagem de campo da ponte metálica em estudo foi emitido um relatório de inspeção de Ultra-Som com as características acima.

As soldas que apresentaram algum defeito foram removidas. Após a remoção, a solda foi reconstruída e um novo teste foi realizado para liberação da junta. Figuras 5.17, 5.18, 5.19



Figura 5.17 – Realização do ensaio de Ultra-Som



Figura 5.18 – Indicação das descontinuidades encontradas na solda.



Figura 5.19 – Remoção da solda para reparo dos defeitos encontrados.



Figura 5.20 – Remoção da solda para reparo dos defeitos encontrados.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÃO

Foi possível verificar neste estudo de caso que as soldas executadas para a construção e montagem desta ponte metálica seguiram as metodologias dos procedimentos especificados. Dentre eles destacam-se: o controle do recebimento e armazenamento dos materiais, a qualificação dos procedimentos de soldagem e a qualificação dos soldadores. Percebeu-se que estes procedimentos são essenciais para garantir a qualidade da solda executada em campo.

Além disso, as soldas foram executadas seguindo os procedimentos especificados e apresentaram um índice de reparo baixo, o que reduz o custo e o tempo de execução da obra.

A realização de ensaios não destrutivos, como o ensaio de Líquido Penetrante e o ensaio de Ultra-Son, bem como a emissão de relatórios de inspeção se mostraram indispensáveis para a garantia da qualidade das soldas executadas na montagem de uma ponte metálica.

CAPITULO VII

7 BIBLIOGRAFIA

1. ALCAN, Soldagem do alumínio e ligas, Livro, 1ª edição, São Paulo, Alcan S/A, 2001.
2. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME Boiler and Pressure Vessel Code , Section V – Ed. 2007
3. ANDREUCCI, R.; Ensaio por Líquidos Penetrantes, ABENDE, 2008
4. ANDREUCCI, R.; Ensaio por Ultra-Son, ABENDE, 2008
5. BRINCK, F.M.; Efeito da corrosão na integridade da ponte metálica Marechal Hermes, Ouro Preto, 2004.
6. MARQUES, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.C. Soldagem – Fundamentos e Tecnologia. UFMG, 2005.
7. MODENESI, P. J.; MARQUES P.V.: Introdução aos processos de soldagem, UFMG, 2006.
8. MODENESI, P. J.; Normas e Qualificação em soldagem, UFMG, 2000.
9. PETROBRAS, Norma N-1596 ,” Ensaio Não Destrutivo – Líquido Penetrante” Revisão
10. E , Nov./ 2003
11. QUITES, A.M.. Introdução à Soldagem a Arco Voltáico. Soldasoft, Florianópolis, 2002,
12. TIBURI, F.; Qualidade em soldagem, Centro Tecnológico de Mecânica, SENAI-RS, 2007.
13. JOAQUIM, R.; RAMALHO J.: Soldagem: Eletrodo Revestido, Infosolda. Disponível em: http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=714 acesso em: 13 jan. 2009.