



rede
e-Tec
Brasil

Soldagem

Arildomá Lobato Peixoto



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PARÁ
Campus Belém

Belém - PA
2012

Presidência da República Federativa do Brasil
Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

© Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Este caderno foi elaborado em parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém e a Universidade Federal de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – Rede e-Tec Brasil.

Equipe de Elaboração – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém

Reitor

Edson Ary de O. Fontes/IFPA-Belém

Coordenação Institucional

Erick Alexandre de Oliveira Fontes/IFPA-Belém

Coordenação de Curso

Oscar Jesus Choque Fernandez/IFPA-Belém

Professor-autor

Arildomá Lobato Peixoto/IFPA-Belém

Equipe Técnica

Carlos Lemos Barboza/IFPA-Belém

Fabiano Darlindo Veloso/IFPA-Belém

Gisely Regina Lima Rebelo/IFPA-Belém

Wuyllen Soares Pinheiro/IFPA-Belém

Comissão de Acompanhamento e Validação Colégio Industrial de Santa Maria/CTISM

Coordenação Institucional

Paulo Roberto Colusso/CTISM

Coordenação Técnica

Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

Coordenação de Design

Erika Goellner/CTISM

Revisão Pedagógica

Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM

Francine Netto Martins Tadielo/CTISM

Marcia Migliore Freo/CTISM

Revisão Textual

Eduardo Lehnhart Vargas/CTISM

Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM

Vera da Silva Oliveira/CTISM

Revisão Técnica

Valdir Bólico Araújo/CTISM

Ilustração

Marcel Santos Jacques/CTISM

Rafael Cavalli Viapiana/CTISM

Ricardo Antunes Machado/CTISM

Diagramação

Gustavo Schwendler/CTISM

Leandro Felipe Aguiar Freitas/CTISM

Máuren Fernandes Massia/CTISM

Setor de Processamento Técnico – Biblioteca IFPA – Campus Belém

P379s Peixoto, Arildomá Lobato.
Soldagem / Arildomá Lobato Peixoto. — Belém: IFPA; Santa
Maria: UFSM, 2012.
90p.

1. Soldagem. I. Escola Técnica Aberta do Brasil. II. Título.

CDD: 671.52

Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo ao e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional pública de ensino, a Escola Técnica Aberta do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.301, de 12 de dezembro 2007, com o objetivo de democratizar o acesso ao ensino técnico público, na modalidade a distância. O programa é resultado de uma parceria entre o Ministério da Educação, por meio das Secretarias de Educação a Distância (SEED) e de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), as universidades e escolas técnicas estaduais e federais.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade, e promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes dos grandes centros geograficamente ou economicamente.

O e-Tec Brasil leva os cursos técnicos a locais distantes das instituições de ensino e para a periferia das grandes cidades, incentivando os jovens a concluir o ensino médio. Os cursos são ofertados pelas instituições públicas de ensino e o atendimento ao estudante é realizado em escolas-polo integrantes das redes públicas municipais e estaduais.

O Ministério da Educação, as instituições públicas de ensino técnico, seus servidores técnicos e professores acreditam que uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!

Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação
Janeiro de 2010

Nosso contato
etecbrasil@mec.gov.br



Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



Atenção: indica pontos de maior relevância no texto.



Saiba mais: oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



Glossário: indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



Mídias integradas: sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



Atividades de aprendizagem: apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



Sumário

Palavra do professor-autor	9
Apresentação da disciplina	11
Projeto instrucional	13
Aula 1 – Soldagem	15
1.1 Conceito.....	15
1.2 Vantagem da soldagem.....	15
1.3 Desvantagem da soldagem.....	15
1.4 Barreira da soldagem (dificuldade na abertura do arco elétrico).....	16
1.5 Arco elétrico.....	16
Aula 2 – Princípios dos materiais consumíveis de soldagem	19
2.1 O consumível.....	19
Aula 3 – Processo de soldagem eletrodos revestidos	23
3.1 Conceito.....	23
3.2 Aplicação.....	24
3.3 Equipamentos.....	25
3.4 Eletrodo revestido.....	26
3.5 Tipos de revestimentos.....	26
Aula 4 – Processo de soldagem TIG	29
4.1 Fundamentos do processo.....	29
4.2 Equipamentos.....	30
Aula 5 – Processo de soldagem oxiacetilênico	35
5.1 Fundamentos do processo.....	35
5.2 Gases.....	37
5.3 Equipamentos.....	38
5.4 Fluxo.....	40

Aula 6 – Processos de soldagem MIG/MAG	43
6.1 Fundamentos do processo.....	43
6.2 Características do processo MIG/MAG.....	44
6.3 Consumíveis.....	44
6.4 Aplicações.....	45
Aula 7 – Processo de soldagem arame tubular	47
7.1 Princípio do processo.....	47
7.2 Equipamentos.....	48
7.3 Consumíveis para soldagem AT.....	49
Aula 8 – Metalurgia da soldagem	53
8.1 Importância do estudo da metalurgia da soldagem.....	53
8.2 Geometria da junta soldada.....	54
8.3 Influência térmica na soldagem.....	57
8.4 Reações na poça de fusão.....	64
8.5 Solidificação do metal.....	67
Aula 9 – Defeitos do metal de solda	79
9.1 Defeitos mais comuns.....	79
Referências	88
Currículo do professor-autor	90

Palavra do professor-autor

A modalidade de Ensino Técnico a Distância – e-Tec – é uma possibilidade para preenchimento da lacuna na capacitação do trabalhador brasileiro, oportunizando educação profissional à população menos favorecida. Educadores compromissados com a educação brasileira estão empenhados em oferecer conhecimentos profissionais que possibilitem melhores condições de emprego e renda a estudantes de municípios próximos de um parque industrial, porém distantes de um centro educacional formador. Essa modalidade de ensino além de elevar o nível educacional, poderá prover os municípios contemplados, de um leque maior de ofertas de emprego aos seus habitantes, visto que os avanços tecnológicos advindos da formação técnica qualificarão o local para expansão do seu parque industrial.

O curso de Metalurgia do IFPA está se adequando às mudanças no setor da indústria metal-mecânica e do ensino, tanto que se está implementando a modalidade de ensino a distância e, desenvolvendo metodologias capazes de atender a essas áreas. Essa evolução acompanha a necessidade proveniente do aumento, em muitos municípios, do número de indústrias no estado do Pará que trabalham com metalurgia, o que exige uma demanda cada vez maior de profissionais capacitados. Mas o curso de Metalurgia não só prepara o técnico para as empresas do ramo, mas oportuniza o desenvolvimento de atividades empreendedoras para profissionais autônomos.

As possibilidades referidas anteriormente só serão possíveis se você, não esmorecer diante das dificuldades. O mercado de trabalho não é fácil, tenha a certeza de que você é capaz de concluir não só a disciplina de Soldagem, mas o curso todo.

Um grande abraço
Prof. Arildomá Lobato Peixoto



Apresentação da disciplina

Esta é a disciplina de Soldagem. No curso teremos um bom material apostilado, além da ajuda de nosso instrutor e do professor-autor.

Entre as definições de Soldagem, há a que diz ser um procedimento que faz a união de uma ou mais peças com ou sem a utilização de calor.

Unir peças é uma necessidade em praticamente todas as áreas das indústrias existentes, ou seja, é uma excelente ferramenta de trabalho.

Essa disciplina apresentará conceitos, fundamentos e procedimentos de vários processos de soldagem, mas aprofundar-se-á nos processos de soldagem eletrodo revestido, MIG/MAG, arame tubular e soldagem oxiacetilênica que, inclusive, oportunizarão a execução (depois das aulas teóricas) de alguns procedimentos de soldagem no laboratório.

A disciplina de Soldagem está dividida em duas partes, uma teórica, e uma prática que será orientada por apostilas específicas para cada atividade, relativas às práticas de soldagem nos processos escolhidos que estão presentes no laboratório de soldagem (eletrodo revestido, MIG/MAG, arame tubular e soldagem oxiacetilênica).

Os conteúdos serão operacionalizados a partir do material didático apresentado, buscando associar os conceitos e os exercícios a realidades existentes no cotidiano, visando estabelecer uma linha interativa de diálogo que possibilite a montagem gradual dos conhecimentos. Nesse sentido esperamos juntar o aprendizado adquirido, as atividades executadas e o aproveitamento de outros saberes anteriores ou não à realização deste curso, de modo que seja possível rever o que foi anteriormente apresentado.

A avaliação será realizada continuamente através de atividades que serão apresentadas ao término das aulas e também na plataforma *moodle*. Todas serão comentadas e corrigidas, buscando incentivar a participação e a interação de todos, visando à construção coletiva do conhecimento.

Precisaremos de conhecimentos em Matemática, Física e Química, relativos aos ministrados no Ensino Fundamental e em algumas outras disciplinas do ensino técnico, como Ciências dos Materiais e Fundição.

O curso será dividido em 10 (dez) aulas, das quais, as 9 (nove) primeiras serão o embasamento teórico para a nossa 10ª (décima) aula que será prática, quando se utilizarão os equipamentos presentes no laboratório de soldagem.

Projeto instrucional

Disciplina: Soldagem (carga horária: 50h).

Ementa: Soldagem. Princípios dos materiais consumíveis de soldagem. Processos de soldagem (eletrodo revestido, TIG, oxiacetilênico, MIG/MAG, arame tubular). Metalurgia da soldagem. Defeitos do metal de solda. Técnicas de soldagem.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Soldagem	Apresentar a soldagem como método de união. Mostrar processos de união eficientes que são feitos por soldagem. Demonstrar que, pode haver desvantagens em processo de soldagem mal-empregado.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	02
2. Princípios dos materiais consumíveis de soldagem	Definir o que é consumível na soldagem. Entender a importância do consumível bem escolhido num processo de soldagem. Descrever as principais funções dos consumíveis de soldagem.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	02
3. Processo de soldagem com eletrodos revestidos	Definir o processo de soldagem eletrodo revestido. Descrever as vantagens e desvantagens no emprego do processo eletrodo revestido. Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem eletrodo revestido. Demonstrar as particularidades dos principais tipos de revestimentos utilizados no processo eletrodo revestido.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	04
4. Processos de soldagem TIG	Definir o processo de soldagem TIG. Descrever as vantagens e desvantagens do processo de soldagem TIG. Reconhecer os principais componentes em uma bancada de soldagem de TIG. Entender a importância de se manter a ponta do eletrodo na geometria recomendada.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	04
5. Processo de soldagem oxiacetilênico	Definir o processo de soldagem oxiacetilênico. Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem ou corte oxigás. Constatar a importância do triângulo do fogo (ar-combustível-calor) na soldagem ou corte a oxigás.	Ambiente virtual: Plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	03

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
6. Processo de soldagem MIG/MAG	<p>Definir o processo de soldagem MIG/MAG.</p> <p>Descrever as vantagens e desvantagens no emprego do processo de soldagem MIG/MAG.</p> <p>Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem MIG/MAG.</p>	<p>Ambiente virtual:</p> <p>Plataforma <i>moodle</i>.</p> <p>Apostila didática.</p> <p>Recursos de apoio: <i>links</i>, exercícios.</p>	03
7. Processo de soldagem arame tubular	<p>Definir o processo de soldagem arame tubular (AT).</p> <p>Descrever as vantagens e desvantagens no emprego do processo de soldagem arame tubular.</p> <p>Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem arame tubular.</p> <p>Reconhecer o tipo de consumível empregado no processo.</p>	<p>Ambiente virtual:</p> <p>Plataforma <i>moodle</i>.</p> <p>Apostila didática.</p> <p>Recursos de apoio: <i>links</i>, exercícios.</p>	03
8. Metalurgia da soldagem	<p>Reconhecer a qualidade de uma junta soldada, considerando outros aspectos que não sejam o aspecto visual do cordão de solda.</p> <p>Identificar os fenômenos físico-químicos e metalúrgicos responsáveis pela ocorrência de defeitos e sua relação de dependência com os procedimentos de soldagem.</p> <p>Explicar procedimentos utilizados antes, durante e após a soldagem, com a finalidade de evitar ou minimizar a ocorrência de defeitos em juntas soldadas.</p> <p>Justificar a seleção de materiais (metal base, consumíveis e equipamentos) visando eliminar ou reduzir a ocorrência de defeitos de soldagem.</p>	<p>Ambiente virtual:</p> <p>Plataforma <i>moodle</i>.</p> <p>Apostila didática.</p> <p>Recursos de apoio: <i>links</i>, exercícios.</p>	05
9. Defeitos do metal de solda	<p>Reconhecer defeitos visíveis numa soldagem.</p> <p>Descrever a aparência dos principais defeitos de soldagem.</p> <p>Entender os mecanismos de formação de defeitos.</p> <p>Reconhecer a importância de se evitarem defeitos na soldagem.</p>	<p>Ambiente virtual:</p> <p>Plataforma <i>moodle</i>.</p> <p>Apostila didática.</p> <p>Recursos de apoio: <i>links</i>, exercícios.</p>	04
10. Técnicas de soldagem	<p>Aplicar conhecimentos teóricos em situações reais de soldagem.</p> <p>Manipular os equipamentos de soldagem de maneira segura.</p> <p>Executar procedimentos de soldagem e obter, como resultado, soldas nos diversos processos de soldagem empregados.</p>	<p>Laboratório de solda.</p>	20

Aula 1 – Soldagem

Objetivos

Apresentar a soldagem como método de união.

Mostrar processos de união eficientes que são feitos por soldagem.

Demonstrar que, pode haver desvantagens em processo de soldagem mal-empregado.

1.1 Conceito

É o processo de união localizada de metais ou não-metais, por meio da fusão ou não das peças. (MACHADO, 1996).

É importante não confundir solda com soldagem. Soldagem é o processo pelo qual se consegue a união; solda é a zona de união onde houve solubilização.

1.2 Vantagem da soldagem

- Maior economia de tempo e de material.
- Redução do peso.
- Uniões mais estanques.
- Uniões mais resistentes.
- Uniões possíveis de serem usinadas.

1.3 Desvantagem da soldagem

- Dificuldade de desmontagem.
- Podem ocorrer tensões e deformações.

- Algumas soldas exigem acabamento posterior.
- Exige mão de obra especializada.

1.4 Barreira da soldagem (dificuldade na abertura do arco elétrico)

- Ferrugem (oxidação).
- Tinta.
- Umidade (água).
- Poeira.
- Gordura.

A-Z

plasma

A corrente elétrica que gera o arco elétrico, ao passar pelo gás que formará a proteção do arco, ioniza o gás, ou seja, separa os átomos do gás em íons positivos e negativos. Como a quantidade de íons positivos é igual a quantidade de íons negativos, a atmosfera do arco é eletricamente neutra.



K – Kelvin

Uma unidade de temperatura que tem a relação de 273 a mais do grau em Celsius. Ou seja, $0^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$
 Ex.: $30^{\circ}\text{C} = 30 + 273$
 $\Rightarrow 30^{\circ}\text{C} = 303\text{ K}$

Note que em Celsius utilizamos o grau ("°") e em Kelvin não tem o grau.
 Ex.: 30°C – lê-se trinta graus Celsius 303 K – lê-se trezentos e três Kelvin.

1.5 Arco elétrico

É a coluna formada entre o eletrodo e a peça (Figura 1.1). É considerado o quarto estado da matéria (**plasma**), com temperatura elevada (em torno de 6000°C). É característica de um condutor elétrico: (MACHADO, 1996).

- Conduz corrente.
- É quente (no arco elétrico são geradas temperaturas que oscilam entre 5000 e 30.000 K, excepcionalmente alcançando 50.000 K, dependendo do processo utilizado, das condições de soldagem e de outros fatores).
- É um plasma (quarto estado da matéria).
- Derrete (funde) o metal de base.
- Possui o formato de coluna.
- É composto por gás altamente ionizado e eletricamente neutro.

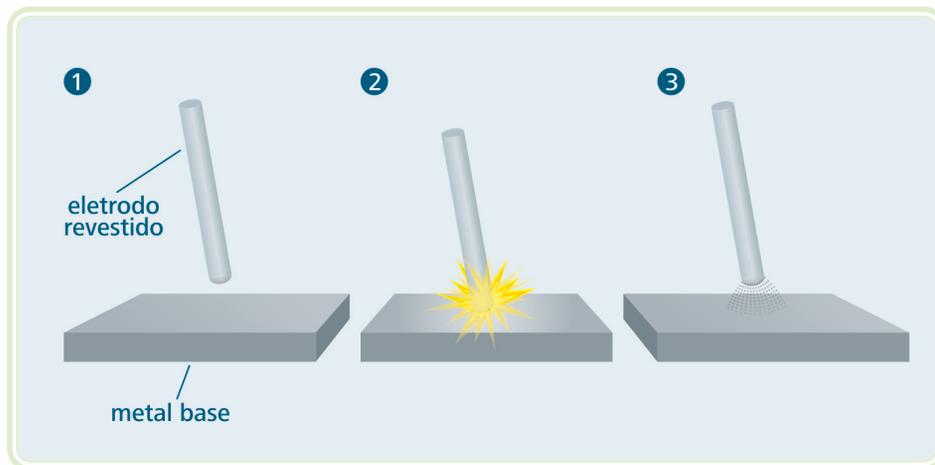


Figura 1.1: Representação esquemática de um eletrodo revestido tocando o metal de base na seqüência de 1 a 3. Observe que em 2 acontece um curto circuito e em 3 o arco é gerado
 Fonte: CTISM, adaptado do autor

Os processos de soldagem são utilizados nas mais diversas situações que vão desde um simples reparo, como o conserto de uma perna de cadeira metálica, até a construção de pontes e de super-petroleiros, ou seja, as aplicações práticas dependem do que se quer e são relacionadas diretamente ao que se precisa.

Na Figura 1.2 há um exemplo de aplicação prática dos processos de soldagem.



Figura 1.2: Autor deste trabalho posando para fotografia em frente da balsa graneleira Dona Gina Maçari recém-construída e posicionada no dique para inspeções finais antes da liberação

Foto: Antônio Carlos (amigo e companheiro de estágio do autor na época da foto) e com autorização do Estaleiro Rio Maguari, 2004

Resumo

A soldagem a arco elétrico é um método de união de um ou mais materiais com auxílio de calor e está condicionada a muitos fatores relativos ao meio no qual será empregada, pois apesar de ser um processo de união extremamente confiável e versátil, se o ambiente de trabalho estiver contaminado por sujeiras ou desorganização por parte dos trabalhadores, as inúmeras vantagens da soldagem podem ser eliminadas sobrando apenas desvantagens, gerando prejuízos. Uma soldagem empregada de modo correto contribui para a construção de pontes, petroleiros, balsas, veículos diversos que são essenciais à vida moderna.



Atividades de aprendizagem

1. O que é soldagem?
2. Cite pelo menos, três construções mecânicas onde a soldagem possibilita as vantagens indicadas no texto.
3. Cite, pelo menos, três locais onde, depois de empregar a soldagem, surgirão as desvantagens indicadas no texto.
4. Depois de revisar os princípios de corrente elétrica, explique o porquê de as barreiras de soldagem citadas no texto dificultarem a abertura do arco elétrico.

Aula 2 – Princípios dos materiais consumíveis de soldagem

Objetivos

Definir o que é consumível na soldagem.

Entender a importância do consumível bem escolhido num processo de soldagem.

Descrever as principais funções dos consumíveis de soldagem.

2.1 O consumível

O termo consumíveis é aplicado aos produtos que são consumidos durante a execução de uma soldagem. Por exemplo, na soldagem manual com eletrodos revestidos é o eletrodo empregado, e na soldagem por arco submerso são o arame e o fluxo. Na soldagem com gás de proteção incluem – a argônio, hélio, dióxido de carbono ou misturas de gases – bem como o arame. Também se incluem bocais, peças de reserva e a energia elétrica empregada na soldagem. Entretanto, usualmente o termo fica restrito aos itens controladores ou influentes nas propriedades mecânicas e na qualidade metalúrgica da junta soldada.

Uma função primária dos consumíveis é proteger o metal fundido e aquecido no arco e na poça de fusão da atmosfera cujo perigo provém do nitrogênio e do oxigênio que reagem com o metal fundido. Óxidos prejudicam o fluxo e a fusão do metal e influenciam na formação de inclusões; eles também consomem certos elementos de liga. O nitrogênio forma nitretos que podem ser uma causa de fragilidade, bem como de porosidade. Na soldagem com gás de proteção empregando um gás inerte, como o argônio, tanto o oxigênio como o nitrogênio são excluídos passivamente (sem reações). Alguns óxidos estão, no entanto, sempre presentes e por isso é necessário removê-los com agentes desoxidantes tais como silício, alumínio ou titânio em aços ou silício, zinco ou fósforo em ligas de cobre. A proteção com o dióxido de carbono, frequentemente utilizada na soldagem de aços, exclui o nitrogênio às custas da formação de óxidos, de modo que são normalmente adicionadas quantidades bem maiores de desoxidantes que o necessário. A proteção contra a atmosfera

A-Z

escória

É uma capa protetora que é formada na superfície do cordão de solda feito com o processo que usa revestimento no eletrodo e protegerá o cordão contra ataques da atmosfera e ajudará a diminuir, um pouco, a velocidade de resfriamento do cordão de solda.

originada por fluxos geradores de **escória** é mais eficaz, graças à camada protetora de fluxo fundido e aos gases formados a partir de componentes no fluxo que são decompostos pelo calor.

O modo como o desoxidante é usado depende do processo de soldagem. Como exemplos, na soldagem com gás de proteção é um elemento metálico no arame ou no fluxo, porém nos eletrodos revestidos os desoxidantes localizam-se no revestimento.

Frequentemente elementos de liga presentes no metal de base atuam como desoxidantes como em ligas de cobre com pequenos teores de zinco ou silício. Mesmo em metais ferrosos onde não é usual contar com elementos de liga para atender a uma função de desoxidante, ocorrem reações complexas entre esses elementos de liga e os consumíveis ou com a atmosfera acima do metal fundido.

Elementos como carbono, silício, manganês, titânio, alumínio e cromo são prontamente oxidados, perdendo-se uma parcela de seus teores iniciais durante a soldagem, se o metal de adição e o fluxo não fornecerem uma compensação.

Os consumíveis possuem um efeito poderoso no modo como o metal é transferido do eletrodo para a poça de fusão. Na soldagem manual com eletrodo revestido, a presença de uma grande quantidade de rutilo (óxido de titânio – TiO_2) no revestimento promove uma transferência suave de pequenas gotas de metal fundido, mas com alto teor de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) a transferência ocorre em grandes glóbulos que fazem curto-circuito com a poça de fusão.

Quando se utilizam gases de proteção como argônio ou hélio na soldagem de aços é necessário adicionar pequenas quantidades de oxigênio (O_2) ou de dióxido de carbono (CO_2) para resultar em uma transferência suave e sem respingos de pequenas gotas de metal fundido. Tais adições são prejudiciais quando se soldam ligas de alumínio, mas com esses metais a suavidade de transferência de metal e o perfil do cordão de solda podem ser modificados empregando-se misturas de argônio e hélio.

Num processo de soldagem que faz uso de um fluxo, formar-se-á um resíduo do fluxo denominado escória, que permanece sobre a superfície da poça de fusão. A viscosidade, a tensão superficial, o ponto de fusão e outras características dessa escória influenciam na forma final da superfície do cordão de solda, na

sua **molhabilidade** com o metal de base (o modo como o metal de solda se mistura com o metal de base) e na facilidade com que a soldagem pode ser executada em outras posições diferentes da plana. Também é importante que, quando as soldas forem realizadas em chanfros profundos, a escória seja facilmente removível para permitir que os cordões de solda posteriores sejam depositados sem causar problemas.

As considerações de transferência de metal, facilidade de soldagem, controle da composição do cordão de solda, propriedades da solda e, naturalmente, custos, são importantes na seleção de consumíveis.

Resumo

Os consumíveis de soldagem são os materiais consumidos no ato da soldagem, como arame eletrodo, gases de proteção, fluxos internos de arames tubulares e fluxos como o arco submerso, além de partes dos equipamentos que são, praticamente, considerados como **sacrifício**, que podem ser bocais, bicos de contato, etc. Usualmente o termo fica restrito aos itens controladores ou influentes nas propriedades mecânicas e na qualidade metalúrgica da junta soldada.

Os consumíveis terão inúmeras funções. Dentre elas, transferência de metal à poça de fusão, a geração da poça de fusão, a proteção do metal fundido do eletrodo e da poça, do arco elétrico, contra agentes nocivos da atmosfera ou do meio em que a soldagem está sendo executada e assim, gerando o melhoramento da liga metálica da junta soldada.

As considerações de transferência de metal, facilidade de soldagem, controle da composição do cordão de solda, propriedades da solda e, naturalmente, custos, são importantes na seleção de consumíveis.

Atividades de aprendizagem

1. O que é consumível de soldagem?
2. Cite pelo menos, duas funções do consumível de soldagem.
3. O que você entende por elementos desoxidantes?
4. O que é a escória na soldagem?

A-Z

molhabilidade

Quando um líquido (nesse caso metal líquido) ao encostar em outro (sólido ou não) adere-se a esse outro; diz-se, então, que molhou este último, ou seja, molhabilidade é o quanto um corpo consegue "molhar" o outro ao tocá-lo.

A-Z

sacrifício

São os materiais que serão "destruídos" no ato de cada atividade ou grupo de atividades de soldagem, os consumíveis de soldagem são aqueles que serão consumidos, ou seja, "destruídos" na soldagem.



Aula 3 – Processo de soldagem eletrodos revestidos

Objetivos

Definir o processo de soldagem eletrodo revestido.

Descrever as vantagens e desvantagens no emprego do processo eletrodo revestido.

Reconhecer os principais componentes de uma **bancada** de soldagem eletrodo revestido.

Demonstrar as particularidades dos principais tipos de revestimentos utilizados no processo eletrodo revestido.

A-Z

bancada

É o termo técnico para retratar o local onde os equipamentos específicos e/ou necessários para soldagem estão dispostos para serem utilizados em um ou mais processos de soldagem.

3.1 Conceito

É um processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido que consiste na abertura e na manutenção de um arco elétrico entre o eletrodo revestido e a peça a ser soldada, de modo a fundir simultaneamente o eletrodo e a peça. O metal fundido do eletrodo é transferido para a peça, formando uma poça de metal fundido que é protegida da atmosfera pelos gases de combustão do eletrodo e elementos geradores de escória presentes no revestimento e que são incorporados ao metal fundido no ato da combustão do revestimento exemplificado, de modo esquemático na Figura 3.1.

Existem várias entidades que classificam os eletrodos para soldagem a arco. No Brasil, as classificações mais adotadas são da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da *American Welding Society (AWS)* – Associação Americana de Soldagem.

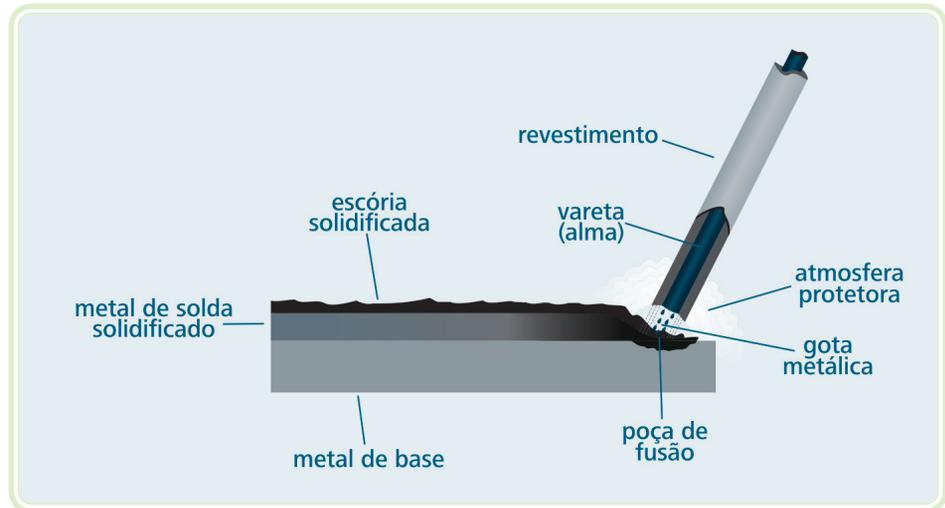


Figura 3.1: Soldagem eletrodo revestido mostrando seus principais elementos

Fonte: CTISM, adaptado de Nascimento, 2009

3.2 Aplicação

O eletrodo revestido é utilizado na soldagem de estruturas metálicas e montagem de vários equipamentos, tanto na oficina quanto no campo e até de baixo d'água para materiais de espessuras entre 1,5 mm a 50 mm e em qualquer posição. É um processo predominantemente manual, porém pode admitir alguma variação mecanizada. Os materiais soldados por esse processo são variados, como aço ao carbono, aço de baixa liga, média e alta ligas, aços inoxidáveis, ferros fundidos, alumínio, cobre, níquel e liga destes materiais.

3.2.1 Vantagens da utilização do processo de soldagem eletrodo revestido

- É bastante simples e versátil.
- Possui grande variedade de eletrodos, desde os tecnologicamente mais simples, até os eletrodos especiais para ligas específicas.
- Possui uma gama abrangente de bitolas para comportar igualmente uma faixa ampla de corrente e, possibilitar soldagens em espessuras próximas a 1,5 mm até espessuras que excedem os 50 mm sendo que a partir dos 4 mm utilizam-se passes múltiplos.

3.2.2 Desvantagens da utilização do processo de soldagem eletrodo revestido

- Em razão de ser um processo eminentemente manual, depende muito da habilidade do soldador.
- Não se aplica a materiais de baixo ponto de fusão como chumbo, estanho, zinco e metais muito reativos, como titânio, zircônio, molibdênio e nióbio.
- Possui baixa produtividade, devido principalmente a necessidade de reposição de eletrodos em tempos relativamente curto.

3.3 Equipamentos

- Fonte de energia.
- Alicates de fixação dos eletrodos.
- Cabos de interligação.
- Pinça para ligação à peça.
- Equipamentos de proteção individual.
- Equipamentos para limpeza da solda.

A Figura 3.2 mostra um esquema de disposição do equipamento de soldagem do processo eletrodo revestido.

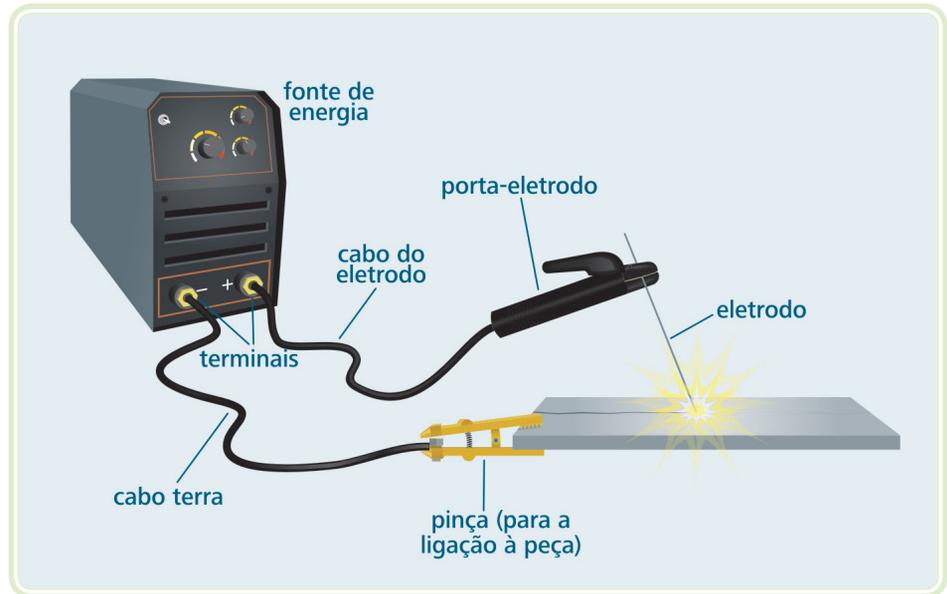


Figura 3.2: Bancada que mostra o equipamento para soldagem através do processo de soldagem eletrodo revestido

Fonte: CTISM, adaptado do autor

A-Z

responsabilidade

Esse termo, na soldagem, é relativo ao local onde as soldagens serão empregadas, ou seja, uma soldagem pode ser “sem responsabilidade” ou de “grande responsabilidade”.

Exemplo: soldagem sem responsabilidade – soldagem sem grandes cuidados com sua execução como grades de proteção feitas em pequenas oficinas. Soldagem de grande responsabilidade – soldagem que precisam de cuidados severos e alta qualidade na execução e manutenção da mesma, pois se não houver esses cuidados poderão surgir sérios problemas – construção de pontes, automóveis, aviões, móveis de salas cirúrgicas, etc., onde, geralmente, os custos material e pessoal inseridos são muito elevados.

CC+

Corrente contínua eletrodo positivo.

CA

Corrente alternada.

3.4 Eletrodo revestido

É um condutor metálico que permite a passagem de corrente elétrica. É constituído por um núcleo metálico chamado alma, envolvido por um revestimento composto de materiais orgânicos e/ou minerais, Figura 3.3.

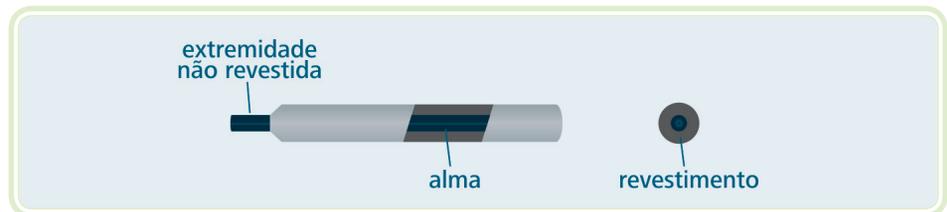


Figura 3.3: Visão geral de um eletrodo revestido

Fonte: CTISM, adaptado do autor

3.5 Tipos de revestimentos

- **Revestimento oxidante** – revestimento normalmente espesso, composto principalmente de óxido de ferro e manganês. Produz escória espessa, compacta e facilmente destacável. Possibilita a inclusão de óxido, mas produz cordão de belo aspecto. Só é usado para soldas sem **responsabilidade**. Recomenda-se utilizar **CC+** ou **CA**. Obtém-se pequena penetração.

- **Revestimento ácido** – revestimento médio ou espesso; produz uma escória abundante e de muito fácil remoção à base de óxido de ferro, óxido de manganês e sílica. Só é indicado para a posição plana. Recomenda-se utilizar CC⁻ ou CA. Obtém-se média penetração.

Observação

Os revestimentos oxidante e ácido não são muito utilizados hoje em dia.

- **Revestimento rutilico** – revestimento com grande quantidade de rutilo (TiO₂). Pode-se soldar em todas as posições. Pela sua versatilidade é chamado de eletrodo universal. Produz escória espessa, compacta, facilmente destacável e cordões de bom aspecto. Pode-se usar qualquer tipo de corrente e polaridade. Obtém-se média ou pequena penetração.
- **Revestimento básico** – revestimento espesso, contendo grande quantidade de carbonato de cálcio. Produz pouca escória e com aspecto vítreo. O metal depositado possui muito boas características mecânicas. É aplicado em soldagem de grande responsabilidade, de grandes espessuras e em estruturas rígidas, por possuir mínimo risco de fissuração a frio e a quente. É um revestimento de baixo teor de hidrogênio e por isso altamente higroscópico (facilidade de absorver umidade). Trabalha-se com CC⁺ ou CA. Obtém-se média penetração.
- **Revestimento celulósico** – revestimento que contém grandes quantidades de substâncias orgânicas combustíveis; produz grande quantidade de gases protetores e pouca escória. Produzem-se muitos salpico e a solda apresenta mau aspecto. Recomenda-se trabalhar com CC⁺, sendo, que em alguns tipos pode-se usar CA. Obtém-se alta penetração e bastante utilizada para passe de raiz, na soldagem fora de posição e na soldagem de tubulações.

Resumo

O processo de soldagem que gera arco elétrico com ajuda de um eletrodo revestido. O arco elétrico decompõe esse revestimento do eletrodo gerando, assim, uma coluna de gases entre a ponta do eletrodo e a peça. O metal fundido do eletrodo é transferido para a peça, formando uma poça de metal fundido que é protegida da atmosfera pelos gases de combustão do eletrodo.

O processo de soldagem eletrodo revestido pode ser considerado um dos mais versáteis dos processos de soldagem, pois possui uma variedade muito grande de tipos de eletrodos que vão desde os tecnologicamente mais simples até os eletrodos especiais para ligas específicas, além de abranger faixas de bitolas que podem ir de 1,5 mm até espessuras que excedem 50 mm e somado a tudo isso, podemos, inclusive, dizer que suas fontes de energia podem ser bem mais simples e robustas que a maioria das fontes de energia dos demais processos de soldagem a arco elétrico de materiais metálicos.



Atividades de aprendizagem

1. Explique os itens indicados na Figura 3.1.
2. Observe a Figura 3.3 e explique por que em uma das extremidades do eletrodo não existe revestimento.
3. O tipo de revestimento e dimensões do eletrodo revestido determina o tipo e a intensidade de corrente de soldagem a serem utilizados. Utilizando-se, em CA (corrente alternada), um eletrodo recomendado para CC⁺ (corrente contínua eletrodo positivo), o que acontecerá?
4. O revestimento básico tem facilidade em absorver umidade. Isso é ruim ou bom para o revestimento? Justifique.

Aula 4 – Processo de soldagem TIG

Objetivos

Definir o processo de soldagem TIG.

Descrever as vantagens e desvantagens no emprego do processo de soldagem TIG.

Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem TIG.

Entender a importância de se manter a ponta do eletrodo na geometria recomendada.

4.1 Fundamentos do processo

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (TIG – *Tungstem Inert Gas*) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas peças através de um arco elétrico estabelecido entre um **eletrodo** de tungstênio **não consumível** e as peças a unir, sendo que a proteção da poça de fusão e do arco elétrico contra a contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de **gases inertes**, Figura 4.1. A soldagem pode ou não ser feita com adição de metal que, quando usada, é feita diretamente na poça de fusão. (NASCIMENTO, 2010a).

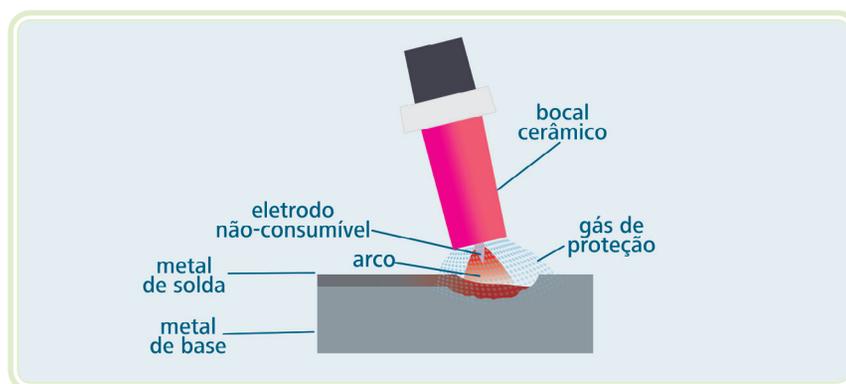


Figura 4.1: Visão esquemática de uma soldagem TIG apresentando os principais componentes

Fonte: CTISM, adaptado de Modenesi, 2003a

A-Z

eletrodo não consumível

É um eletrodo para soldagem que não é fundido pela ação do arco elétrico, ou seja, ele só proverá a condução da corrente que passará pelo arco elétrico.

gases inertes

São os gases da família 8A, ou coluna 0 (zero), da tabela periódica, conhecidos gases nobres. Em soldagem os gases que são mais utilizados são o argônio (Ar) e o hélio (He). Os demais gases inertes dificilmente serão utilizados, pois são muito caros e raros de se conseguir.

Apresenta excelente controle do calor cedido à peça, devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento, semelhante ao que ocorre na soldagem oxiacetilênica. (NASCIMENTO, 2010a).

É um processo bastante adequado à soldagem de peças de pequena espessura e, aliado à eficiente proteção contra contaminação e à soldagem de materiais de difícil soldabilidade, apresentando ótimos resultados.

O fato de o eletrodo ser não consumível possibilita a soldagem sem metal de adição (chapas finas).



Os custos relativamente altos são devido ao calor perdido no eletrodo, que no MIG, por exemplo, ajudaria a fundir o arame e outro fator, por exemplo, poderia ser a necessidade de soldadores experientes para operar esse processo e/ou o fato do processo ser essencialmente manual.

O custo dos equipamentos e consumíveis é relativamente alto, e a produtividade ou rendimento do processo relativamente baixos. Sendo assim, o processo é aplicado em situações em que a qualidade da solda produzida é mais importante que a produtividade ou custo da operação.

O arco elétrico TIG é bastante estável, suave e produz soldas com boa aparência e acabamento, exigindo pouca ou nenhuma limpeza após a operação.

A operação normalmente é manual, em qualquer posição, mas a mecanização do processo é comum e fácil de ser implementada. Usam-se dispositivos auxiliares de soldagem adequados.

É aplicável à maioria dos metais e suas ligas, numa ampla faixa de espessuras, mas devido a seu alto custo é usado principalmente na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, na soldagem de peças de pequena espessura (da ordem de poucos milímetros de espessura, como 1 (um) mm, por exemplo) e no passe de raiz na soldagem de tubulações.

Outra característica típica da soldagem TIG é a possibilidade de se usar o próprio metal de base como metal de adição, quando este não estiver disponível no mercado (solda manual).

4.2 Equipamentos

Básicos – fonte de energia elétrica, tocha de soldagem apropriada, fonte de gás protetor, dispositivo para abertura do arco, cabos e mangueiras.

Auxiliares – posicionadores, dispositivos de deslocamento, controladores automáticos de comprimento de arco, alimentadores de arame, osciladores do arco de soldagem, temporizadores, afiadores de eletrodos, orbitais.

EPI's – máscara para solda elétrica, avental, luvas e perneira de raspa de couro, calçado de segurança com biqueira de aço ou de resina, blusão de raspa de couro para soldas e capuz de brim sobre a cabeça.

A Figura 4.2 apresenta o esquema com os equipamentos presentes em uma soldagem TIG.

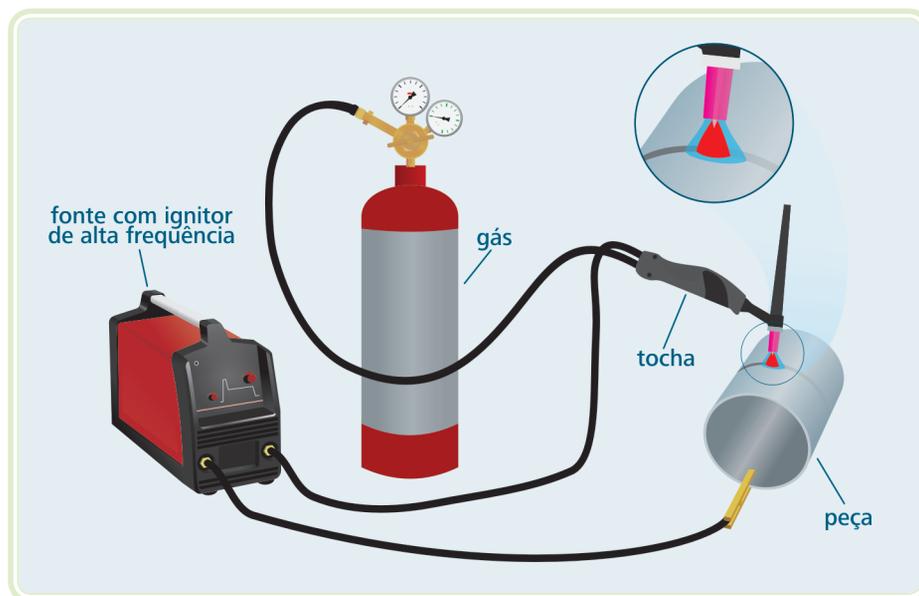


Figura 4.2: Esquema que apresenta os equipamentos presentes em uma soldagem TIG
Fonte: CTISM, adaptado de Modenesi, 2003a

4.2.1 Tochas de soldagem

Manuais – eletrodo e cabo em ângulo de 90° a 120°, com interruptor para acionar ignitor, corrente e vazão de gás.

Automáticas – retas para montagem em suportes posicionadores.

Refrigerada a água ou a gás – o cabo de corrente geralmente é embutido no conduto de refrigeração (tochas refrigeradas a água geralmente são mais leves, devido aos menores diâmetros possíveis para o condutor de cobre que fica por dentro da mangueira de refrigeração, mas são menos silenciosas).

Bicos de contato e fixadores de eletrodos – em pares (função do diâmetro do eletrodo) e feitos de liga de cobre.

Bocais – diferentes formas e tamanhos; tem a função de direcionar o gás em regime laminar; os mais usados são os cerâmicos (mais baratos, porém quebradiços) e os de metal refrigerados a água (para altas correntes, vida longa). (Figura 4.3).

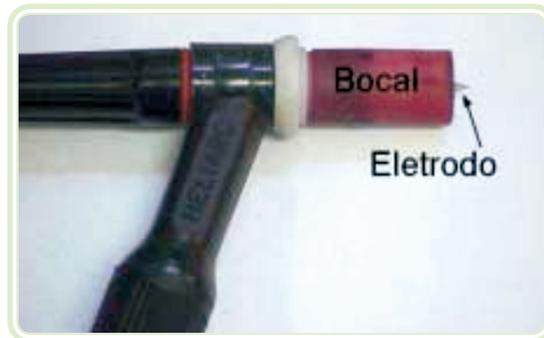


Figura 4.3: Detalhe de uma tocha para a soldagem TIG

Fonte: Modenesi, 2003a

4.2.2 Eletrodos

O eletrodo não consumível utilizado para soldagem é constituído de tungstênio puro ou ligado a diversos elementos químicos, pois a presença desses elementos de liga aumenta a capacidade de emissão de elétrons, além de permitir uma maior vida útil ao eletrodo. A classificação AWS A 5.12-92 (Tabela 4.1) apresenta os valores máximos de cada elemento químico:

Tabela 4.1: Alguns eletrodos TIG, segundo a norma AWS A 5.12-92							
Classe AWS	W %	CeO ₂ %	La ₂ O ₃ %	ThO ₂ %	ZrO ₂ %	Outros % max	Cor da ponta
EWP	99,5			1960	5,18	0,5	Verde
EWCe-2	97,5	1,8-2,2		1970	5,02	0,5	Laranja
EWLa-1	98,3		0,9-1,2	1980	4,44	0,5	Preta
EWTh-1	98,5			0,8-1,2	3,92	0,5	Amarela
EWTh-2	97,5			1,7-2,2		0,5	Vermelha
EWZr-1	99,1				0,15-0,4	0,5	Marrom
EWG	94,5			2000	3,52	0,5	Cinza

Fonte: Fonseca, 2004

4.2.3 Gases

Os gases de proteção usados na soldagem TIG são inertes, principalmente o argônio, o hélio e a mistura destes. Em alguns casos são usadas misturas especiais como as que contêm hidrogênio que podem ser usadas na soldagem de aços inoxidáveis, e as que contêm nitrogênio, opcionais na soldagem de cobre e suas ligas. O Quadro 4.1 apresenta o demonstrativo das características dos gases argônio e hélio.

Quadro 4.1: Demonstrativo das características dos gases Argônio (Ar) e Hélio (He) como gases de proteção no processo de soldagem TIG

Argônio	Hélio
Baixa tensão de arco	Elevada tensão de arco
Menor penetração	Maior penetração
Adequado à soldagem de chapas finas	Adequado à soldagem de grandes espessuras e materiais de condutibilidade térmica elevada
Soldagem manual devido ao pequeno gradiente de tensão na coluna do arco (6 V/cm)	Soldagem automática
Maior ação de limpeza	Menor ação de limpeza
Arco mais estável	Arco menos estável
Fácil abertura do arco	Dificuldade na abertura do arco
Utilizado em CC e CA	Geralmente CCPD com eletrodo de tungstênio toriado
Custo reduzido	Custo elevado
Vazão para proteção pequena	Vazão para proteção de 2 a 3 vezes maior que a de argônio
Maior resistência à corrente de ar lateral	Menor resistência à corrente de vento

Fonte: Nascimento, 2010a

4.2.4 Técnica operatória

- a) Remoção de óleos, graxas, sujeira, tinta, ferrugem ou qualquer outra contaminação no metal de base.
- b) Início da vazão de gás inerte segundos antes da abertura do arco.
- c) Tocha inicialmente parada para formação da poça de fusão.
- d) Adição de metal feita na poça de fusão.
- e) Permanência do fluxo de gás por 30 segundos no final da junta.
- f) Interferência na operação de circuitos eletrônicos no uso de ignitor de alta frequência.
- g) Variação da tensão com variação da **DBCP**.

Se o soldador não verificar o correto preparo da ponta do eletrodo, mesmo seguindo todas as recomendações, não conseguirá executar um bom trabalho ou, dependendo das condições da ponta do eletrodo, o processo de soldagem poderá até ser inviabilizado.

A-Z

DBCP

Distância bocal-peça.

A Figura 4.4 mostra-nos, esquematicamente, a preparação correta da ponta do eletrodo a ser utilizado no processo de soldagem TIG.



Figura 4.4: Importância de uma correta preparação da ponta do eletrodo

Fonte: CTISM, adaptado de Nascimento, 2010a

Resumo

A soldagem TIG é bastante versátil quanto às ligas soldáveis e espessuras de material (a partir de 0,3 mm), podendo ser usada em todas as posições. Possui uma vasta gama de aplicações na soldagem de não ferrosos e aços inoxidáveis.

Esse método se caracteriza pela ausência de respingos e escórias, o que evita trabalhos posteriores de limpeza e, também, pela possibilidade de ser utilizado com ou sem material de adição.



Atividades de aprendizagem

1. O que é o processo de soldagem TIG?
2. O que é uma soldagem manual?
3. Explique os itens da Figura 4.1.
4. Para que serve o gás de adição no processo de soldagem TIG?

Aula 5 – Processo de soldagem oxiacetilênico

Objetivos

Definir o processo de soldagem oxiacetilênico.

Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem ou corte oxigás.

Constatar a importância do triângulo do fogo (ar-combustível-calor) na soldagem ou corte a oxigás.

5.1 Fundamentos do processo

As operações de solda e corte pelo processo oxiacetilênico (Figura 5.1), são realizadas através da queima da mistura de oxigênio e acetileno nas proporções corretas em um maçarico. A chama resultante dessa queima pode chegar a temperaturas ao redor dos 3.200°C. O processo de soldagem a gás é na realidade uma fusão parcial onde as duas partes do material que deve ser soldado são aquecidas até o seu ponto de fusão e depois unidas. Essa fusão pode ser feita sem adição ou com a adição de um material (eletrodo) similar ao que está sendo trabalhado.

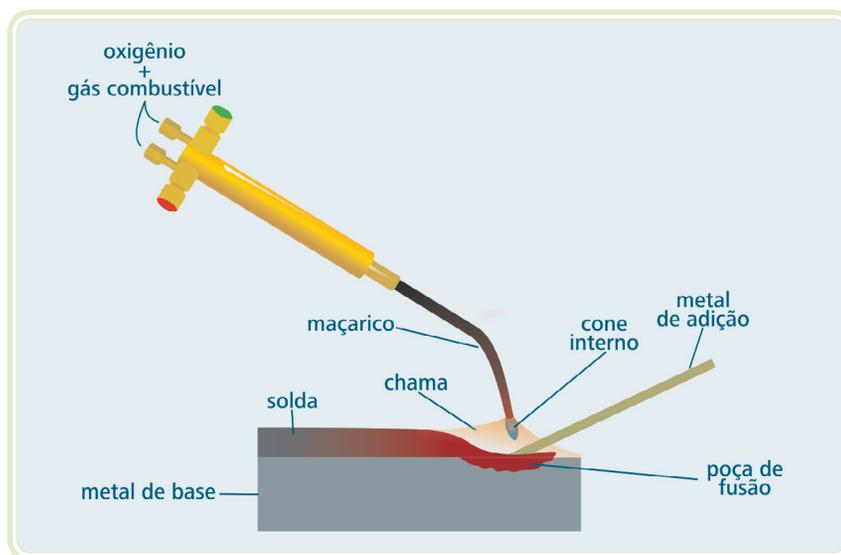


Figura 5.1: Esquema de uma soldagem oxiacetilênica

Fonte: CTISM, adaptado de Modenesi & Marques, 2000

No corte, basicamente a mistura oxigênio/gás combustível serve para preaquecer o material a ser cortado até a temperatura de reação do metal (ignição). No caso das chapas de aço, entre 700°C e 900°C, quando o aço toma a coloração vermelho cereja, mas ainda não atingiu a temperatura de fusão. Nesse ponto, o jato de oxigênio puro é acionado, incidindo diretamente sobre a área preaquecida, o que desencadeia uma violenta reação química exotérmica entre o oxigênio e o metal aquecido, formando óxido de ferro (escória) que se desloca pela força do jato de gás e abre espaço para a penetração da chama, produzindo o corte no metal.

A Figura 5.2 mostra-nos um operário utilizando um maçarico de corte a oxiacetileno.



Figura 5.2: Corte oxiacetilênico (oxicorte)

Fonte: http://i.ytimg.com/vi/mn_deQd8ZEs/0.jpg

A-Z

gás oxicom bustível

Para que aconteça a soldagem ou corte no processo oxigás é necessário que exista o triângulo de fogo: combustível, oxigênio e calor. Na falta de qualquer um desses não existirá a chama (fogo), ou seja, quando utilizamos o termo técnico oxicom bustível, referimo-nos ao oxigênio e ao gás combustível misturados entre si e que serão utilizados no processo oxigás. As fontes de calor podem ser as mais diversas que vão, desde centelhas geradas por faíscas, (isqueiros) até peças superaquecidas.

A intensidade do calor gerado na chama depende da mistura **gás oxicom bustível** a uma determinada pressão dos gases. O oxigênio é utilizado para proporcionar combustão do gás, mas pode ser usado ar comprimido em seu lugar. Isso proporciona uma baixa eficiência térmica e, conseqüentemente, redução na velocidade de soldagem; a qualidade da solda também é afetada.

A escolha do gás é importante, pois permite obter uma velocidade de soldagem e uma qualidade desejada no cordão de solda. A Figura 5.3 nos mostra um soldador executando uma soldagem oxiacetilênica.



Figura 5.3: Soldagem oxiacetilênica

Fonte: http://arquivo.oficinabrasil.com.br/edicoes/Mar_2002/Carrocaria_soldagem1.jpg

5.2 Gases

O gás geralmente empregado nessa soldagem é o acetileno. Outros gases além do acetileno podem ser empregados, embora forneçam menos intensidade de calor e, conseqüentemente, uma menor temperatura. Esses gases podem utilizar o oxigênio e o ar para manter a combustão (Tabela 5.1).

Algumas vezes o gás de carvão, vapor de querosene e de petróleo são também usados como gás combustível.

Tabela 5.1: Temperatura máxima de combustão com diferentes gases

Gás combustível	Temperatura de combustão	
	Com oxigênio	Com ar
Acetileno – (C ₂ H ₂)	3480	2650
Hidrogênio – (H ₂)	2980	2200
Propano – (C ₃ H ₈)	2925	2090
Butano – (C ₄ H ₁₀)	2980	2150
MAPP (<i>Methyl acetylene propadiene</i>) – (C ₃ H ₄)	2925	1470
Gás natural – (CH ₄ e H ₂)	2775	2090

Fonte: Modenesi & Marques, 2000

5.3 Equipamentos

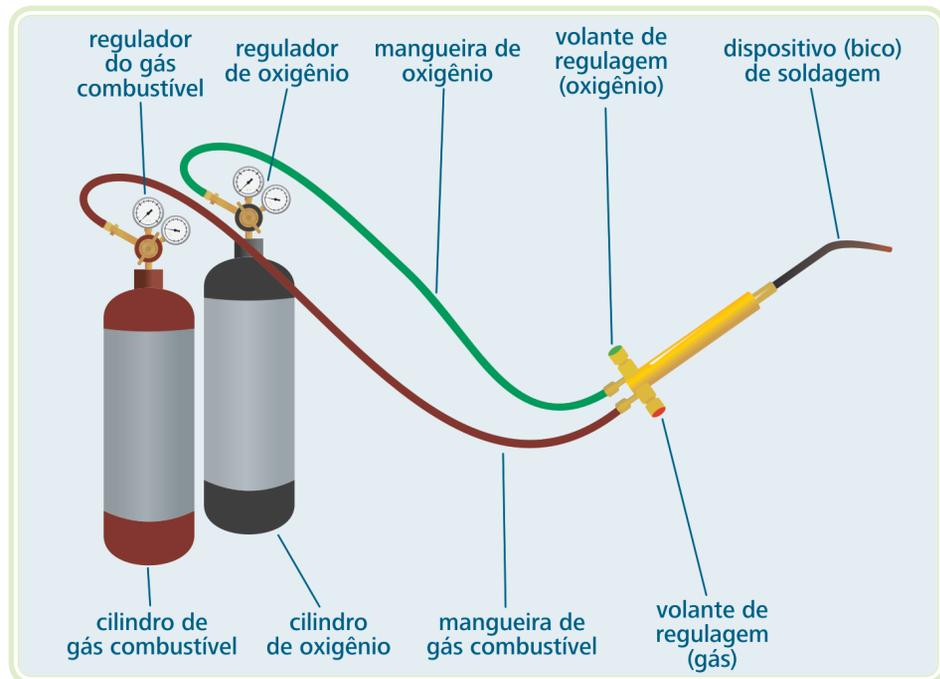


Figura 5.4: Equipamentos normalmente usados no processo oxiacetilênico

Fonte: CTISM, adaptado do autor

Os equipamentos de solda/corte oxiacetilênica são portáteis e de fácil manuseio. Compõem-se de:

5.3.1 Maçarico

O equipamento básico é formado por:

- Corpo do maçarico.
- Dois tubos separados para passagem dos gases.
- Válvulas separadas de controle dos gases.
- Câmara de mistura dos gases.
- Tubo de chama.
- Extensão de solda ou bico de corte.



Figura 5.5: (a) Maçarico de soldagem e (b) maçarico de corte

Fonte: <http://www.tecnimig.com.br/img/produtos/FMC-531.jpg>

Nota

Os maçaricos de corte necessitam de duas entradas de oxigênio, uma para fazer a mistura com o acetileno (preaquecimento) e a outra para formar o fluxo de corte.

5.3.2 Cilindros com gases

O oxigênio é acondicionado em cilindros metálicos (Figura 5.6) de alta pressão (200 bar), pintados na cor preta (para uso industrial) ou verde (para uso medicinal) e o acetileno, que por ser um gás instável, vem dissolvido em acetona e acondicionado em cilindros metálicos pintados na cor bordô, cheios de uma massa porosa. A pressão dos cilindros é baixa, ao redor de 15 bar.



Figura 5.6: Cilindros de gases

Fonte: http://3.bp.blogspot.com/_KTrKbAbsnQE/SmD1FSYDb2I/AAAAAAAAAAM/X2A55-lhX_Y/s320/gas_cylinders.jpg

5.4 Fluxo

Um fluxo ou pasta de solda é necessário para remover o filme de óxido e manter uma superfície limpa.

O fluxo funde no ponto de fusão do metal de base e promove uma camada protetora contra reações com os gases atmosféricos.

O fluxo normalmente penetra, sob o filme de óxido. Fluxos são comercializados na forma de pó seco, pasta ou soluções espessas.

Fluxos na forma de pó são frequentemente usados para mergulhar a vareta de adição. Na forma de pasta são normalmente pincelados sobre a vareta ou sobre as peças a serem soldadas. Varetas comercialmente pré-revestidas estão também disponíveis para alguns metais. Fluxos são normalmente empregadas para soldagem de alumínio, aço inoxidável, ferro fundido e latão.

O Quadro 5.1 dá uma orientação em relação a material de adição, chama e tipos de fluxo recomendados para soldar diferentes metais e ligas.

Quadro 5.1: Material de adição e fluxo para diferentes materiais			
Metal	Material de adição	Tipo de chama	Fluxo
Alumínio	Fósforo	Levemente redutora	Fluxo de alumínio
Latão	Latão amarelo	Levemente oxidante	Fluxo de bórax
Bronze	Cobre-estanho	Levemente oxidante	Fluxo de bórax
Cobre	Cobre	Neutra	–
Níquel-cobre	Níquel-cobre	Redutora	–
“inconel” 76% Ni + 15% Cr + 9% Fe	Fósforo	Levemente redutora	Fluxo de flúor
Ferro-fundido	Ferro-fundido	Neutra	Fluxo de bórax
Ferro trabalhado	Aço	Neutra	–
Chumbo	Chumbo	Levemente redutora	–
“Monel” 60-70% Ni, 25-35% Cu, Fe, C	Fósforo	Levemente redutora	Fluxo de Monel
Níquel	Níquel	Levemente redutora	–
Níquel-prata	Níquel-prata	Redutora	–
Aço baixa liga	Aço	Levemente redutora	–
Aço de alto carbono	Aço	Redutora	–
Aço de baixo carbono	Aço	Neutra	–
Aço de médio carbono	Aço	Levemente redutora	–
Aço inoxidável	Fósforo	Levemente redutora	Fluxo de aço inoxidável

Fonte: Modenesi & Marques, 2000

Resumo

O processo de soldagem a gás é, na realidade, uma fusão onde as duas partes do material que deve ser soldado são aquecidas até o seu ponto de fusão e depois unidas. Essa fusão pode ser feita sem adição ou com a adição de um material (eletrodo) similar ao que está sendo trabalhado. Diferentes gases combustíveis podem ser utilizados, mas o mais comum para a soldagem dos aços e de outras ligas metálicas é o acetileno C_2H_2 . Durante a operação, a chama resultante da mistura gás-oxigênio na ponta do maçarico é usada para a fusão localizada do metal de base e para a formação da poça de fusão. O equipamento básico para soldagem manual consiste de fontes de oxigênio e gás combustível, reguladores de vazão, mangueiras e maçarico.

Atividades de aprendizagem

1. Qual a diferença entre soldagem e corte oxiacetilênico?
2. Para que a chama aconteça é preciso combustível, oxigênio e calor. O que aconteceria se a quantidade de combustível fosse maior do que a quantidade de oxigênio necessária? Explique.
3. E no caso do excesso de oxigênio, o que aconteceria? Explique.
4. A função básica do fluxo é a remoção da camada de oxidação do metal a ser soldado. Explique por que é tão importante a remoção dessa oxidação.



Aula 6 – Processo de soldagem MIG/MAG

Objetivos

Definir o processo de soldagem MIG/MAG.

Descrever as vantagens e desvantagens no emprego do processo de soldagem MIG/MAG.

Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem MIG/MAG.

6.1 Fundamentos do processo

MIG/MAG é um processo de soldagem a arco voltaico que utiliza um arco elétrico entre um arame alimentado continuamente e a poça de fusão. Esse processo utiliza uma fonte externa de gás como proteção para a poça de soldagem contra contaminação do ar externo. (PEIXOTO, 2003).

Não é possível executar soldagens autógenas com o MIG/MAG em razão de a alimentação do metal de adição ser feita automática e continuamente. A corrente de soldagem, o comprimento do arco e a velocidade de alimentação do eletrodo são controlados pela fonte de potência, de modo que, uma vez ajustados para um dado procedimento de soldagem, um novo ajuste não é mais necessário, dando um caráter semiautomático ao processo no chamado MIG/MAG “manual”. O processo MIG/MAG, utilizando gás inerte, também é muito aplicável à soldagem automatizada, tanto nesta como na soldagem semiautomática, é possível soldar chapas de aço inoxidável desde espessuras muito finas, isto é, cerca de 1,0 mm, até espessuras sem limite. (POVOA, 1993).

A Figura 6.1 ilustra um esquema dos principais equipamentos de uma bancada de soldagem MIG/MAG.



Figura 6.1: Esquema dos principais equipamentos de uma bancada de soldagem MIG/MAG

Fonte: Nascimento, 2010b

6.2 Características do processo MIG/MAG

A soldagem MIG/MAG possui as mesmas vantagens que o processo TIG, ou seja, não usa fluxo, respinga pouco, é aplicável a todas as posições de soldagem e consegue remover o filme de óxido através do arco elétrico, para permitir a coalescência das bordas da junta e do metal de enchimento. (POVOA, 1993).

Esse processo apresenta algumas vantagens ausentes no processo TIG, tais como: velocidade de soldagem elevada, profundidade maior de penetração e zonas termicamente afetadas mais estreitas. Na versão semiautomática o soldador, para conseguir os resultados desejados, precisa ter coordenação motora apenas em uma das mãos, enquanto na soldagem TIG ele precisa ter nas duas mãos. (POVOA, 1993).

6.3 Consumíveis

6.3.1 Arames eletrodos

Os arames (eletrodos) utilizados são maciços e seus diâmetros disponíveis são geralmente de 0,8 - 1,0 - 1,2 e 1,6 mm, mas existem outras bitolas, assim gerando a possibilidade de soldagem de praticamente todas as ligas ferrosas e muitas das não-ferrosas, normalmente as ligas de alumínio e cobre, além de outras como titânio, magnésio, etc.

Existem 5 (cinco) fatores que influenciam na escolha do arame:

- A composição química do metal de base.
- As propriedades mecânicas do metal de base.
- O gás de proteção empregado.
- O tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável.
- O tipo de projeto de junta.

6.3.2 Gases de proteção

São empregados como gases de proteção gases nobres, geralmente argônio ou hélio, e alguns gases ativos, além de existir a possibilidade da mistura desses.

Os principais gases de proteção utilizados são:

- Argônio.
- Hélio.
- Misturas de argônio e hélio.
- Adições de CO_2 e oxigênio ao Ar e ao He.
- Argônio – oxigênio – CO_2 .
- Argônio – hélio – CO_2 .
- Argônio – hélio – CO_2 – oxigênio.
- CO_2 puro.

6.4 Aplicações

Aplicável à soldagem de todos os metais comercialmente importantes como os aços, o alumínio, os aços inoxidáveis, o cobre e vários outros.

Materiais com espessura acima de 0,76 mm podem ser soldados em todas as posições.

Resumo

A soldagem MIG/MAG é bastante versátil quanto às ligas soldáveis e espessuras de material, podendo ser usada em todas as posições. Possui uma gama de aplicações na soldagem de não ferrosos e aços inoxidáveis.

Como num processo semiautomático, sua produtividade é bastante elevada. Quando o material é de boa soldabilidade, o processo MIG/MAG é sempre uma alternativa viável, vantajosa com relação à soldagem com eletrodos revestidos.



Atividades de aprendizagem

1. O que quer dizer a abreviatura MIG/MAG?
2. O que é uma soldagem autógena?
3. Por que não se pode fazer uma soldagem autógena com processo de soldagem MIG/MAG?
4. Explique os itens mostrados na Figura 6.1?

Aula 7 – Processo de soldagem arame tubular

Objetivos

Definir o processo de soldagem Arame Tubular (AT).

Descrever as vantagens e desvantagens no emprego do processo de soldagem arame tubular.

Reconhecer os principais componentes de uma bancada de soldagem arame tubular.

Reconhecer o tipo de consumível empregado no processo.

7.1 Princípio do processo

Nesse processo, o arco elétrico se forma entre a peça e um tubo metálico cujo interior é preenchido por fluxo fusível continuamente alimentado a partir de uma bobina. A poça de fusão assim produzida é envolvida por escória e gases resultantes da decomposição do fluxo. A Figura 7.1 ilustra esquematicamente esse conjunto. Adicionalmente, pode ser empregado gás de proteção o qual flui pelo bocal da tocha. (MODENESI, 2003b).

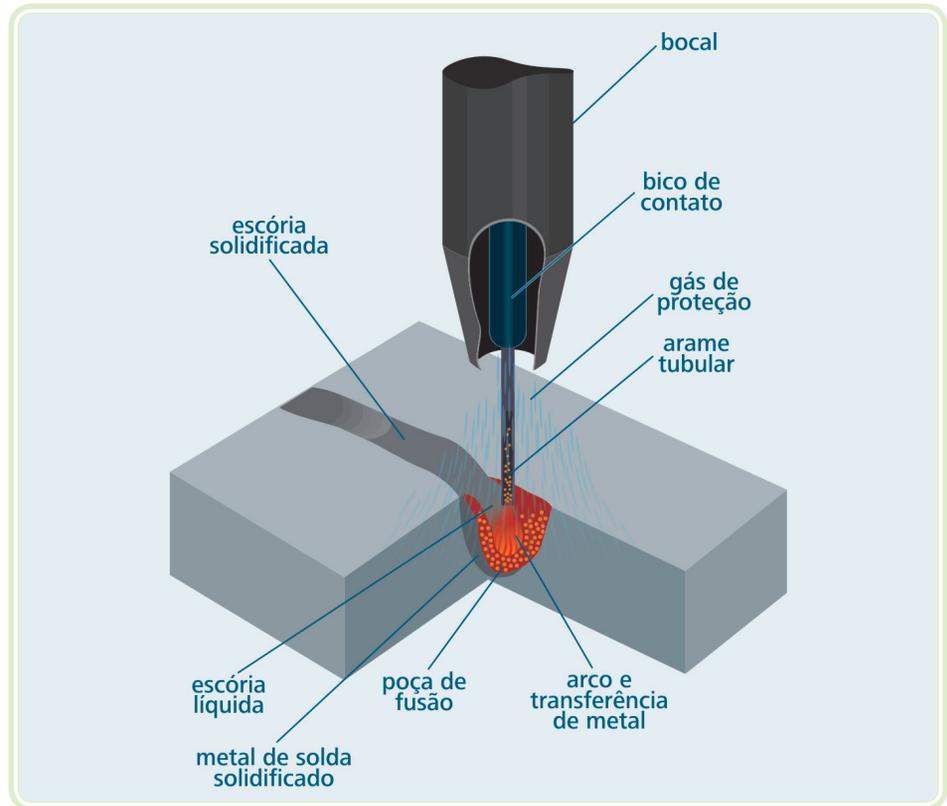


Figura 7.1: Imagem ilustrativa mostrando diversas partes que caracterizam a soldagem Arame Tubular (AT)

Fonte: CTISM, adaptado de Fortes & Araújo, 2004

7.2 Equipamentos

Existem duas opções básicas para soldar com arame tubular. No modo denominado autoprotegido, somente a escória e os gases produzidos pela decomposição de alguns dos seus compostos protegem o metal de solda da atmosfera (principalmente do O_2 e N_2). O outro método utiliza um gás de proteção adicional, geralmente CO_2 puro, ou misturas desse gás com argônio e, algumas vezes com oxigênio.

Existem muito poucas diferenças entre os equipamentos utilizados no processo de soldagem MIG/MAG e os do arame tubular, tanto que se o processo for do tipo semiprotegido (que precisa de gás de proteção), o equipamento será o mesmo, mas se for do tipo autoprotegido, a diferença estará no tipo de tocha e no fato de não utilizar cilindros de gases.

O eletrodo tubular autoprotegido (Figura 7.2) utiliza uma tocha mais simples. Isto é devido ao fato de a penetração ser normalmente reduzida, quando comparado com aquele que utiliza CO_2 como gás auxiliar. Entretanto, esse

método apresenta a vantagem adicional de poder operar em local com deslocamento de ar sobre juntas mal posicionadas e é possível, também, soldar em todas as posições, quando um arame fino for utilizado.

O comprimento do eletrodo após o bico de contato deve ser maior no autoprotegido, do que naquele com proteção por gás. A tocha utilizada neste processo é similar à do MIG, entretanto mais robusta, porque, em geral, a intensidade de corrente empregada é maior, podendo ser resfriada por ar, ou água.

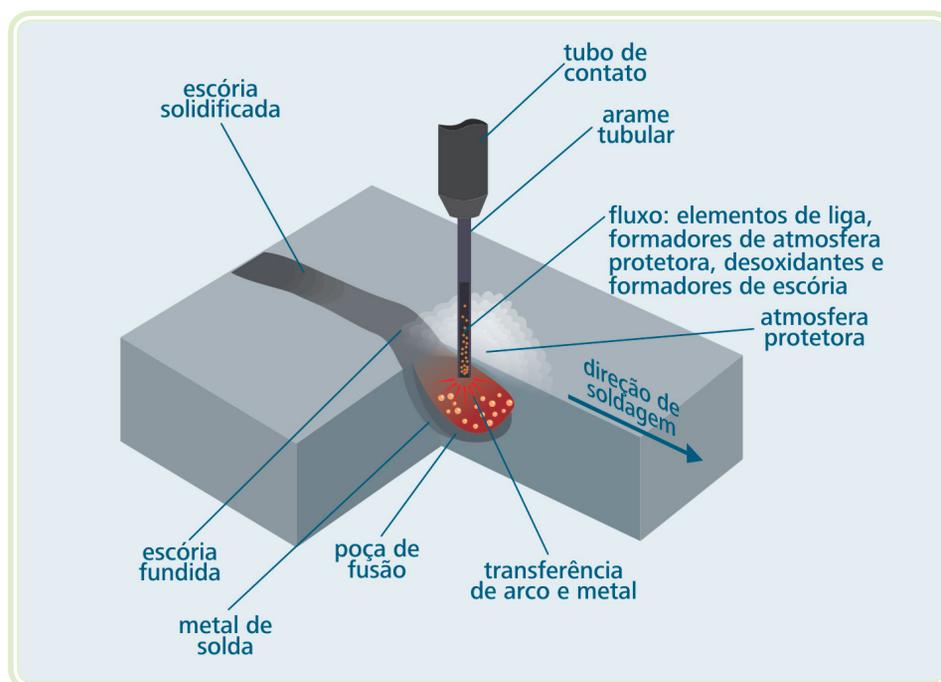


Figura 7.2: Processo de soldagem com arames tubulares autoprotetidos

Fonte: CTISM, adaptado de Fortes & Araújo, 2004

7.3 Consumíveis para soldagem AT

Esses eletrodos podem ser fabricados com uma fita de aço baixo carbono conformado em torno do fluxo, nas geometrias mostradas na Figura 7.3. Note-se que o tipo 1 (sem costura) é fabricado através do preenchimento com fluxo de um tubo de diâmetro bem maior que é, então, trefilado para a bitola desejada. O mesmo apresenta a vantagem de minimizar o contato de umidade com o fluxo e, portanto, deposita metal de solda com muito baixo hidrogênio. (MACHADO, 1996).

tipo	seção	símbolo
1		
2		
3		
4		
5		
6		



Figura 7.3: Diversas geometrias de arames eletrodos tubulares

Fonte: CTISM, adaptado de Machado, 1996

Os tubos com formas mais complexas apresentam efeitos secundários, ou seja, provocam início do arco em vários pontos e preaquecem mais efetivamente o fluxo, de forma a fundi-lo numa maior taxa, sendo o arco mais suave. Esses consumíveis geralmente são encontrados em bitolas de 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,6 - 2,0 - 2,4 - 3,2 e 4,0 mm. Os de menores diâmetros são mais difíceis de fabricar.

Nesse processo, o fluxo tem funções similares as que possui nos eletrodos revestidos, ou seja:

- Desoxidar o metal de solda.
- Transferir elementos de liga.
- Aumentar a taxa de deposição, através do pó de ferro.
- Formar escória e gás de proteção produzido pela decomposição de alguns dos seus compostos.

- Estabilizar o arco.
- Estabelecer uma conveniente geometria para o cordão.

Os eletrodos tubulares autoprotetidos não podem utilizar tão efetivamente a decomposição do fluxo para formar gás de proteção, como no caso dos eletrodos revestidos. Se assim fosse, como o fluxo se encontra no interior do tubo, seria provocada alta produção de salpicos, além do metal fundido manter contato com a atmosfera. Como é inevitável alguma absorção de oxigênio e nitrogênio do ambiente, torna-se necessário que o fluxo contenha fortes desoxidantes e formadores de nitretos, como alumínio.

Resumo

A soldagem com o processo arame tubular produz a coalescência de metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo metálico tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão de solda pode ser feita adicionalmente por uma atmosfera de gás fornecida por uma fonte externa (cilindros de gás) ou pela escória gerada pela fusão do fluxo contido no núcleo do arame. Além da proteção, o fluxo pode ter outras funções semelhantes às dos revestimentos dos eletrodos, como por exemplo: desoxidar e refinar o metal de solda, adicionar elementos de liga e fornecer elementos que estabilizam o arco.

Os equipamentos utilizados nesse processo são basicamente os mesmos utilizados em outros processos de soldagem semiautomatizados como o MIG/MAG, consistindo em uma bancada de soldagem formada por uma fonte de energia, tocha de soldagem, bocal alimentador e, dependendo do tipo (auto-protetido ou não), poderá possuir ou não fonte externa de gás de proteção.

Pelo fato de possuir um fluxo interno e ser tubo fino, conservado em bobinas, o processo arame tubular alia a alta produtividade inerente a processos semiautomatizados como o MIG/MAG com a versatilidade da proteção da poça de fusão dos processos eletrodos revestidos.



Atividades de aprendizagem

1. Por que o nome do processo de soldagem é AT (Arame Tubular)?
2. Cite no mínimo duas semelhanças entre os processos de soldagem AT e ER (Eletrodo Revestido).
3. Existem diferenças entre o equipamento utilizado no processo de soldagem AT em relação ao processo de soldagem MIG/MAG? Justifique.
4. Explique o que se deve entender por processo de soldagem AT autoprotegido e processo de soldagem AT semiprotégido.

Aula 8 – Metalurgia da soldagem

Objetivos

Reconhecer a qualidade de uma junta soldada, considerando outros aspectos que não sejam o aspecto visual do cordão de solda.

Identificar os fenômenos físico-químicos e metalúrgicos responsáveis pela ocorrência de defeitos e sua relação de dependência com os procedimentos de soldagem.

Explicar procedimentos utilizados antes, durante e após a soldagem, com a finalidade de evitar ou minimizar a ocorrência de defeitos em juntas soldadas.

Justificar a seleção de materiais (metal base, consumíveis e equipamentos) visando eliminar ou reduzir a ocorrência de defeitos de soldagem.

8.1 Importância do estudo da metalurgia da soldagem

Metalurgia da soldagem é um conteúdo ligado à área de materiais e processos cujo estudo irá preocupar-se em:

- Entender os fenômenos físico-químicos e metalúrgicos recorrentes em processos de soldagem e suas relações com a ocorrência de defeitos nas juntas soldadas.
- Reduzir custos de fabricação de estruturas metálicas no sentido de que prevenindo a ocorrência de defeitos, evita-se a reconstrução de juntas soldadas.
- Aumentar a confiabilidade das estruturas, através da especificação correta de materiais, procedimentos e técnicas de controle adequados, reduzindo a margem de ocorrências imprevistas que podem levar ao colapso das estruturas.

8.2 Geometria da junta soldada

Uma junta soldada não é constituída unicamente pelo que se convencionou chamar de cordão de solda, Figura 8.1.



Al-Mg 5083 é a designação de liga metálica alumínio e magnésio.

Figura 8.1: Cordão de solda aplicado na liga Al-Mg 5083

Fonte: Silva Filho, 2003

Do ponto de vista da metalurgia da soldagem, qualquer região na qual, em decorrência dos efeitos da soldagem, tenham ocorrido consideráveis alterações em suas condições iniciais, é constituinte da junta soldada. (SILVA FILHO, 2003).

A Figura 8.2 apresentada a seguir indica de forma esquemática as diferentes regiões que constituem uma junta soldada.

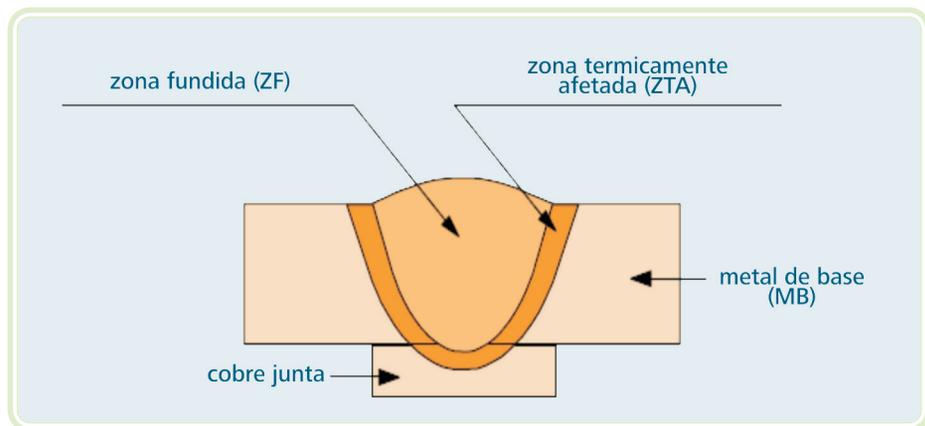


Figura 8.2: Regiões da junta soldada

Fonte: CTISM, adaptado de Silva Filho, 2009

As principais particularidades relacionadas às regiões indicadas são:

a) Metal de base (MB)

É a região constituinte da junta soldada que não sofreu qualquer alteração em suas características físicas, químicas ou metalúrgicas, ou seja, o material utilizado para a construção da estrutura metálica nessa região não sofreu qualquer influência do processo de soldagem.

ZTA

(Zona termicamente afetada)
É uma zona que foi afetada pelo calor gerado pelo arco elétrico, mas não fundiu que nem a poça de fusão. O termo "afetada" vem do fato de que, apesar de não ter sido fundida pelo calor do arco foi, no entanto, afetada por esse calor, ou seja, as estruturas metálicas presentes na ZTA são diferentes do metal de base que não foi afetado.

b) Zona termicamente afetada (ZTA)

Nessa região, de grande interesse no campo da metalurgia da soldagem, embora a temperatura de processamento não tenha sido suficiente para modificar o estado físico dos materiais envolvidos, ocorrem importantes transformações metalúrgicas no estado sólido, ou seja, são registradas importantes alterações nas propriedades iniciais do metal de base.

Entre as transformações citadas, encontram-se principalmente o crescimento de grãos (aços e outros), dissolução ou coalescimento de precipitados (ligas de alumínio cobre) e o recozimento (ligas alumínio magnésio).

c) Zona fundida (ZF)

É a região na qual a temperatura de processamento é suficiente para fundir os materiais envolvidos, ou seja, parte de metal de base juntamente com parte do metal de adição passam para a forma líquida formando a denominada poça de fusão.

Nessa região, diversos fenômenos ligados à metalurgia física manifestam-se simultaneamente, dando origem a uma série de transformações, não só de origem metalúrgica, como química e física.

A forma como ocorre à solidificação da zona fundida após o resfriamento da região tem grande influência na qualidade final da junta soldada com influência direta na susceptibilidade a defeitos, assim como no comportamento mecânico da junta soldada.

A massa metálica resultante na zona fundida é denominada de metal de solda. É constituída de parte de metal de base e parte de metal de adição. A relação entre as quantidades presentes desses elementos no metal de solda é definida pela grandeza denominada de diluição.

8.2.1 Diluição

É a quantidade percentual de metal de base que entra na composição do metal de solda, podendo variar, desde valores muito baixos, como na solda brasagem, chegando a valores extremos (100%) no caso da soldagem autógena (sem metal de adição).

A Figura 8.3 ilustra esta condição, considerando um esquema de seção transversal de uma junta soldada.

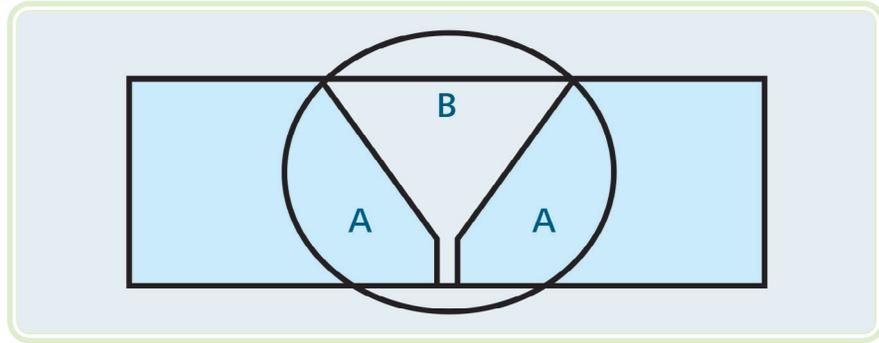


Figura 8.3: Diluição da junta soldada

Fonte: CTISM, adaptado de Silva Filho, 2009

Em linguagem matemática a diluição pode ser apresentada como:

Equação 8.1

$$\text{diluição (\%)} = \frac{\text{área A}}{\text{áreas A + B}}$$

Ou seja, quanto maior for a quantidade de metal de base no cordão de solda, maior será a diluição.

O controle da diluição em uma junta soldada é um importante fator a ser considerado no controle da qualidade na soldagem.

Por exemplo: caso o metal de base apresentar elevado teor de algum elemento considerado nocivo à junta, menor deverá ser a diluição.

Em condições práticas, nem sempre é tarefa fácil identificar o início e o fim de cada região, havendo em alguns casos a necessidade de recorrer a ensaios, como o de microdureza.

Na Figura 8.4 é mostrado um exemplo prático onde é indicada a linha central do cordão e metal de base, além de uma indicação mostrando onde se localiza a ZTA.

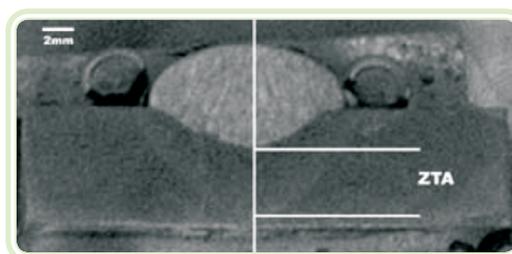


Figura 8.4: ZTA em um corte transversal de cordão de solda. Aumento nominal: 12X. Ataque: nital 2%

Fonte: Silva Filho, 2009

8.3 Influência térmica na soldagem

A quantidade de calor ou energia térmica inserida em uma junta soldada é sem dúvida, o principal fator a ser controlado visando reduzir a possibilidade de ocorrência de defeitos na soldagem.

O ponto de partida para este controle é entender como o calor é gerado a partir das fontes de energia utilizadas nos processos de soldagem por fusão.

8.3.1 Energia na soldagem

Define-se a energia nominal de soldagem como a quantidade de energia térmica inserida na junta soldada por unidade linear de cordão de solda.

A energia de soldagem também é conhecida como aporte de calor, ou aporte térmico, sendo comum a utilização do termo na língua inglesa "heat input" (calor de entrada).

Cálculo da energia nominal de soldagem:

Equação 8.2

$$Apt = \frac{P}{v}$$

Onde: Apt = aporte térmico nominal

P = potência da fonte de soldagem

v = velocidade de soldagem

No sistema internacional, a potência é dada em Watt (W); a velocidade de soldagem em m/s e o aporte térmico nominal em **joule/metro (J/m)**.

Equação 8.3

$$Apt = V \times \frac{I}{v}$$

Onde: V = tensão de soldagem em volts (V)

I = intensidade de corrente em ampères (A)

v = velocidade de soldagem em m/min

Para os processos de soldagem que utilizam como fonte de calor o arco elétrico, o aporte térmico nominal é dado por:

Cálculo do aporte térmico líquido:

A-Z

joule/metro (J/m)

Lê-se joule por metro.

Joule é unidade de calor no Sistema Internacional, ou seja, o aporte térmico de soldagem é a quantidade de calor por unidade métrica.

Para o cálculo do aporte térmico líquido, devem ser consideradas as perdas de energia inerentes a cada processo.

A equação torna-se:

Equação 8.4

$$Apt' = \eta \times \frac{V \times I}{v}$$

Onde o fator η é rendimento térmico do processo, conforme é mostrado na Figura 8.4.

A-Z
GTAW TIG
SMAW Eletrodo revestido
GMAW MIG/MAG
SAW Arco submerso

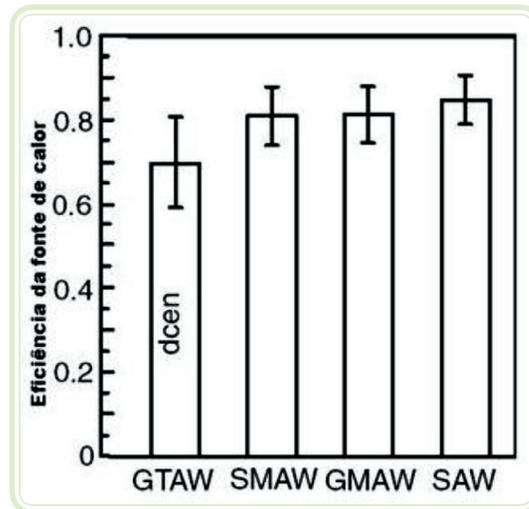


Figura 8.4: Eficiência energética dos processos de soldagem ao arco elétrico

Fonte: Silva Filho, 2009

Quanto mais alto for o aporte de calor (energia de soldagem) inserido na junta soldada, maior será a quantidade de energia calorífica transferida à peça, maior a poça de fusão, mais larga a zona termicamente afetada entre outros efeitos. (SILVA FILHO, 2009).

Por outro lado, a utilização de baixos valores de aporte térmico pode provocar falhas de penetração na junta soldada, assim como elevadas velocidades de resfriamento, o que, em certas ocasiões, pode ser prejudicial à junta soldada. (SILVA FILHO, 2009).

8.3.2 Ciclo térmico de soldagem

Considerando um ponto qualquer da região de soldagem, define-se ciclo térmico como a curva que relaciona a variação da temperatura desse ponto (durante a soldagem e posterior resfriamento) com o passar do tempo.

A Figura 8.5 mostra um ponto "A" qualquer escolhido na periferia de uma soldagem. O ciclo térmico desse ponto é representado na Figura 8.6.

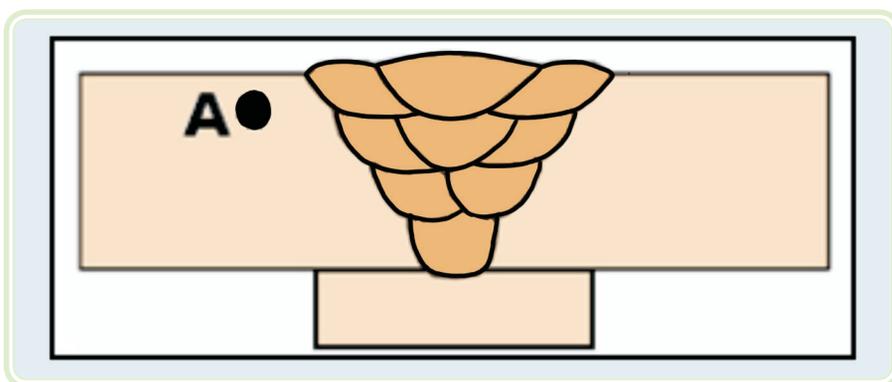


Figura 8.5: Junta soldada (esquemática)

Fonte: CTISM, adaptado de Silva Filho, 2009

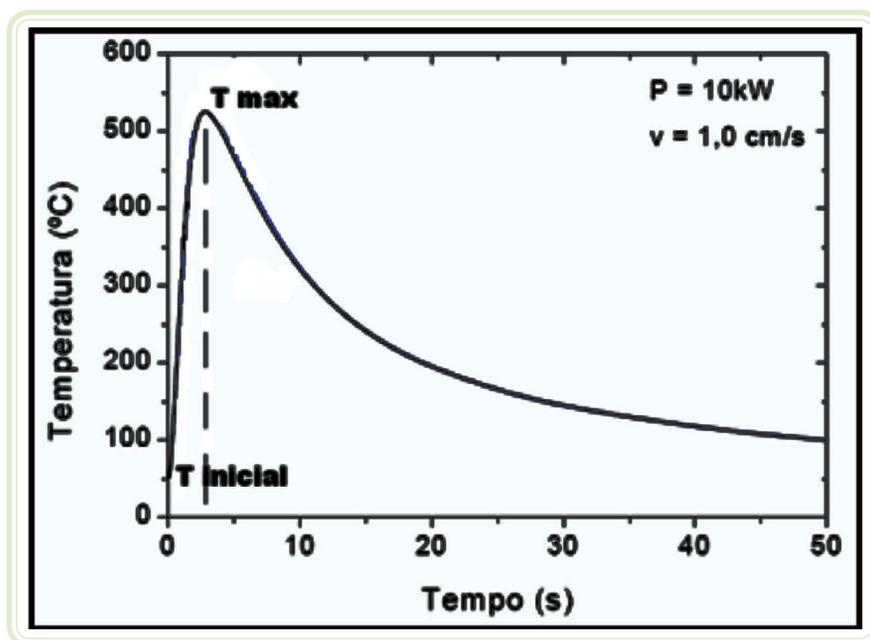


Figura 8.6: Ciclo térmico do ponto A

Fonte: Silva Filho, 2009

A Figura 8.6 mostra a curva representativa do ciclo térmico do referido ponto. Como pode ser verificado entre a temperatura inicial do processo em torno de 50°C e a temperatura máxima alcançada pelo ponto A transcorrem somente em torno de 4 segundos. Embora o exemplo apresentado seja meramente ilustrativo, essa severidade (intensas variações de temperatura) é característica da grande maioria dos processos de soldagem ao arco elétrico e constitui-se em um dos principais fatores indutores de problemas na soldagem.

Como a junta soldada é formada por vários pontos consecutivos em diferentes condições térmicas, uma caracterização completa da região soldada é apresentada por várias curvas de ciclos térmicos sobrepostas, como mostradas na Figura 8.7.

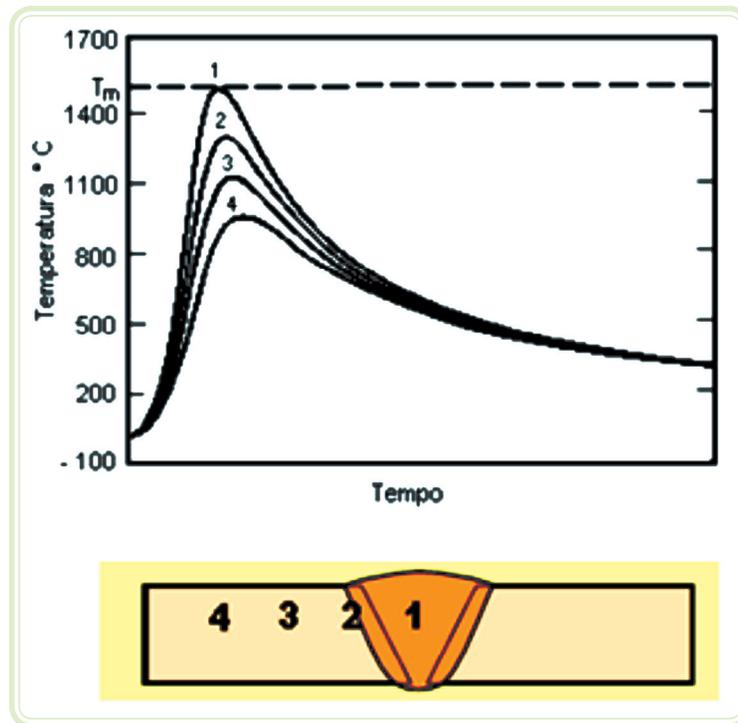


Figura 8.7: Curvas de ciclo térmico

Fonte: Silva Filho, 2009

Como se espera a Figura 8.7 mostra que quanto maior o afastamento dos pontos em relação ao centro do cordão, menores são as temperaturas máximas alcançadas pelos pontos.

8.3.2.1 Fatores definidores das características do ciclo térmico

Fatores como o tipo de processo, utilização ou não de pré ou pós-aquecimento, aporte térmico, soldagem multipasses, são capazes de estabelecer diferenças na forma de uma curva de ciclo térmico. As diferenças obtidas em função de alterações de um ou mais fatores podem tornar a característica do ciclo térmico mais ou menos favorável para o desenvolvimento de defeitos de soldagem. (SILVA FILHO, 2009).

Os principais fatores a serem observados na definição dos ciclos térmicos dos pontos constituintes de uma região soldada são mostrados na Figura 8.8.

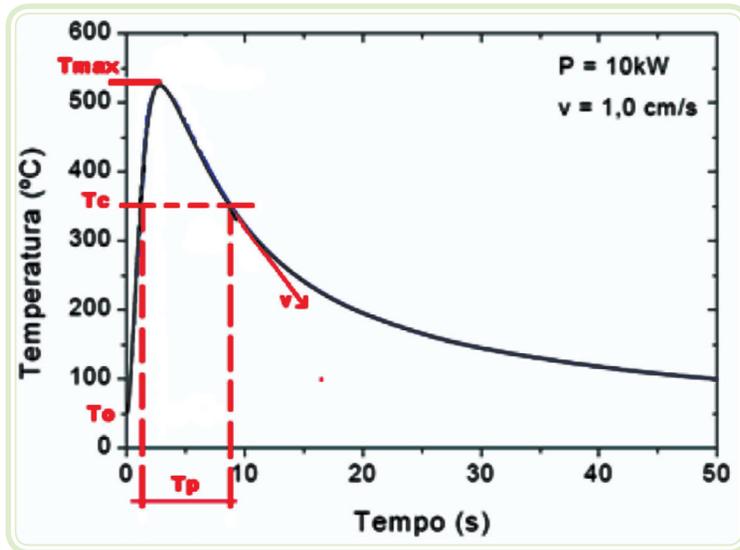


Figura 8.8: Fatores definidores do ciclo térmico

Fonte: Silva Filho, 2009

Temperatura inicial (T_o) – é a temperatura de início de processamento que nem sempre é a temperatura ambiente. Em alguns casos, determinados procedimentos de soldagem utilizam preaquecimento no material a ser soldado, visando minimizar a ocorrência de defeitos.

Temperatura máxima (T_{max}) – é a maior temperatura a que determinado ponto esteve sujeito durante o processo de soldagem. Se a temperatura máxima ultrapassar a temperatura de fusão dos materiais envolvidos, então o ponto pertence à zona fundida. Caso contrário, esse pertencerá ou não a ZTA. Para esta comprovação, é necessário verificar se a temperatura máxima ultrapassou a zona de temperatura crítica, o que vai depender das características do material processado.

A temperatura máxima atingida por um ponto da junta soldada é diretamente proporcional ao aporte líquido de calor, ou seja, elevados valores de aporte térmico implicam a elevação da temperatura máxima no ponto considerado.

Temperatura crítica (T_c) – é a temperatura a partir da qual o material processado tem a possibilidade de sofrer transformações metalúrgicas no estado sólido. Essas transformações podem alterar propriedades importantes do material ou aumentar a possibilidade de ocorrência de defeitos. O valor da temperatura crítica vai depender do material sujeito à soldagem. No caso de algumas ligas de alumínio, essa temperatura é em torno de 380°C.

Velocidade de resfriamento (v) – é a velocidade de resfriamento entre duas faixas de temperaturas consideradas importantes para ocorrência de transformações. O aço com teor de carbono acima de 0,3% se resfriado muito rapidamente, a partir da forma austenítica, pode resultar em estrutura martensítica altamente nociva na soldagem.

Tempo de permanência (Tp) – o tempo de permanência em determinada temperatura indica a possibilidade de ocorrência das transformações que necessitam de tempo para sua efetivação.

Em algumas situações práticas, embora a temperatura crítica tenha sido alcançada, o tempo de permanência nessa temperatura não foi o bastante para a ocorrência das transformações. Entre essas transformações, encontra-se o crescimento de grãos metálicos.

A equação abaixo (obtida a partir de análises matemáticas e simulação computacional) relaciona, para diferentes condições de soldagem, a velocidade de resfriamento com as demais condições de soldagem.

Equação 8.5

$$v = 2 \cdot k \cdot \pi \cdot \rho c \left(\frac{e}{Apt'} \right)^2 \times (T_c - T_0)^3$$

Onde: v = velocidade de resfriamento a partir de qualquer temperatura, normalmente a temperatura crítica (°C)

k = condutividade térmica do metal (J/mm.s °C)

ρc = calor específico volumétrico (J/mm³)

e = espessura da peça (mm)

Apt' = aporte térmico líquido (J/mm)

T_c = temperatura qualquer de interesse (°C)

Para o caso de chapas muito espessas, a equação anterior adapta-se para a forma apresentada na equação abaixo. A análise é a mesma apresentada anteriormente.

Equação 8.6

$$v = \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{Apt'} \times (T_c - T_0)^2$$

Principais observações obtidas a partir das duas equações anteriores:

- a) A temperatura máxima atingida a cada ponto e a velocidade de resfriamento dependem das propriedades físicas do material processado. Ligas com maior condutibilidade térmica, como ligas à base de cobre e de alumínio, apresentam maiores velocidades de resfriamento, o que pode causar, entre outros, problemas de falta de fusão devido ao rápido escoamento de calor.
- b) A velocidade de resfriamento varia inversamente com a temperatura inicial da peça sendo soldada. Isso justifica em alguns casos a utilização de preaquecimento na soldagem. Quanto maior a temperatura de preaquecimento da peça, menor será a velocidade de resfriamento. Por outro lado, quanto mais elevada for a temperatura inicial de processamento, maior será a temperatura máxima do ciclo térmico.
- c) A velocidade de resfriamento varia diretamente com a espessura da peça sendo soldada, isto é, quanto maior a espessura, maior a velocidade de resfriamento. Entretanto, a variação tem um limite: a partir de uma determinada velocidade de resfriamento, por mais que se aumente a espessura, a velocidade de resfriamento não se altera.
- d) A velocidade de resfriamento varia inversamente com a energia de soldagem, isto é, quanto menor a energia de soldagem, maior a velocidade de resfriamento. A influência da energia de soldagem na velocidade de resfriamento é maior em espessuras mais finas.

8.3.3 Partição térmica

Define-se como partição térmica a curva que estabelece a variação de temperatura na região soldada, em função da distância a partir do centro do cordão. Enquanto a análise do ciclo térmico possibilita a previsão da ocorrência ou não de transformações metalúrgicas, a partição térmica possibilita estimar a extensão das transformações.

A Figura 8.9 apresenta curvas de partições térmicas para duas condições de aporte térmico.

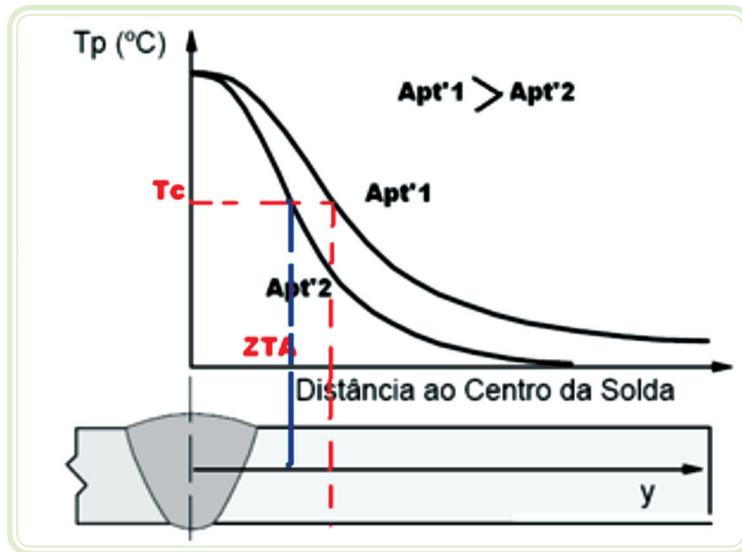


Figura 8.9: Partição térmica

Fonte: Silva Filho, 2009

Nota-se pela análise da figura que o maior aporte térmico implica a ampliação da ZTA medida a partir do centro do cordão.

Considerando que a temperatura T_c seja a temperatura de início da transformação do material processado, então as linhas tracejadas na figura, mostram que para a condição de maior aporte térmico, a ZTA teria maior extensão.

8.4 Reações na poça de fusão

Na maioria dos processos de soldagem, o tempo de permanência da poça de fusão no estado líquido é apenas de alguns segundos, entretanto é suficiente para que uma série de reações simultâneas de origem químico-físicas e metalúrgicas se manifestem com influência direta na qualidade da junta produzida. (SILVA FILHO, 2009). As principais reações são:

8.4.1 Absorção gasosa na poça de fusão

Os gases nitrogênio, oxigênio e hidrogênio são os mais frequentes contaminantes gasosos presentes na poça de fusão. Esses elementos frequentemente provêm do ar atmosférico, de consumíveis como fluxos e gases de proteção ou de contaminantes presentes no metal de base.

Tanto nitrogênio, oxigênio e hidrogênio podem se dissolver na poça de fusão durante a soldagem e afetar de forma significativa a qualidade do metal de solda.

O acentuado aumento na solubilidade gasosa experimentado pelos metais na passagem do estado sólido para o líquido é o principal responsável pela presença de gases no metal de solda.

A Figura 8.10 ilustra essa condição para o caso do alumínio e hidrogênio. Pela análise da figura, nota-se que a solubilidade do hidrogênio no alumínio aumenta aproximadamente 50 vezes, ao atingir a temperatura de fusão.

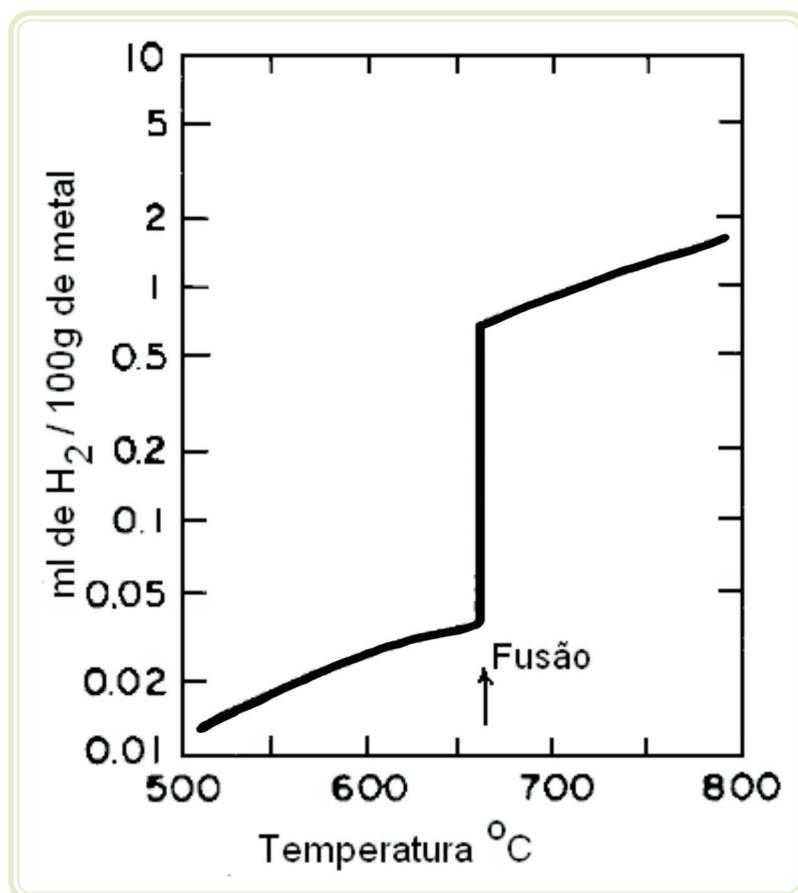


Figura 8.10: Solubilidade de H₂ no alumínio

Fonte: Silva Filho, 2009

Para o caso do ferro e, conseqüentemente, do aço, além da mudança de estado, devem ser consideradas as mudanças alotrópicas, conforme é mostrado na Figura 8.11.

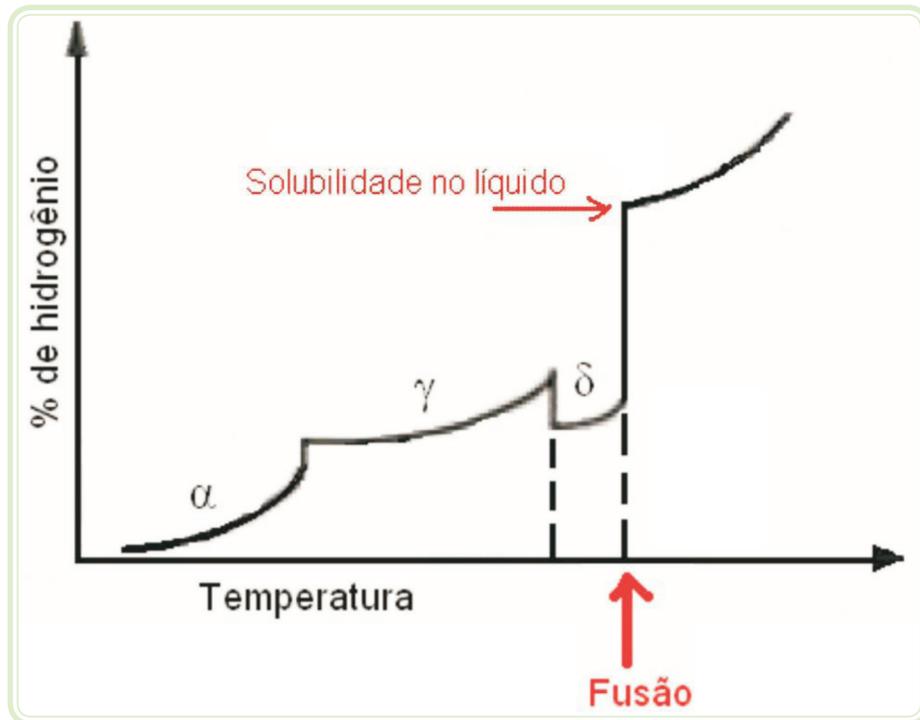


Figura 8.11: Solubilidade do alumínio no aço

Fonte: Silva Filho, 2009

Oxigênio – na soldagem do aço, reduz a tenacidade da junta soldada. Em níveis controlados, favorece a formação de ferrita acicular (estrutura desejável na soldagem). Na soldagem do alumínio, pode formar óxidos de alto ponto de fusão que podem tornar-se inclusões na junta soldada.

Nitrogênio – na soldagem do aço, em determinados níveis, aumenta a resistência mecânica, porém, reduz a tenacidade. Na soldagem do aço inoxidável austenítico, reduz a ferrita e favorece a formação de trincas de solidificação. Quando presente em quantidades elevadas, o nitrogênio pode causar porosidade em soldas. Este é o caso, por exemplo, de soldas realizadas pelo processo MAG com comprimento de arco excessivo ou com elevada quantidade de nitrogênio (cerca de 1%) no gás de proteção.

Hidrogênio – na soldagem do alumínio, é o principal responsável para formação de porosidades. Na soldagem do aço, tem importante participação no mecanismo de formação das trincas a frio.

8.4.2 Vaporização metálica

O principal problema associado à vaporização metálica é a perda de elementos de liga na forma de vapores metálicos devido ao intenso aquecimento da poça de fusão. Em alguns casos, como na soldagem das ligas de alumínio magnésio,

a perda é significativa, podendo levar à perda pontual de resistência devido à redução no teor de magnésio.

Os principais fatores que influenciam na vaporização metálica são a temperatura da poça de fusão e a propriedade física dos metais envolvidos denominada de pressão de vapor.

No primeiro caso, quanto maior for o valor da temperatura máxima e o tempo de permanência nesta temperatura, mais intensa será a vaporização metálica.

Com relação à pressão de vapor, quanto maior for esta propriedade em determinado metal, maior será a possibilidade de vaporização a partir da poça de fusão.

8.5 Solidificação do metal

Um importante ponto de estudo no campo da metalurgia da soldagem é a estrutura resultante do resfriamento seguido da solidificação do metal de solda.

Tal interesse justifica-se pelo fato de que a característica predominante da estrutura solidificada vai influenciar diretamente em importantes fatores definidores da qualidade da junta, como a capacidade de transmitir esforços mecânicos e a maior ou menor facilidade de propagar defeitos.

A Figura 8.12 apresenta uma estrutura clássica formada a partir de processo de solidificação em **lingoteiras**.

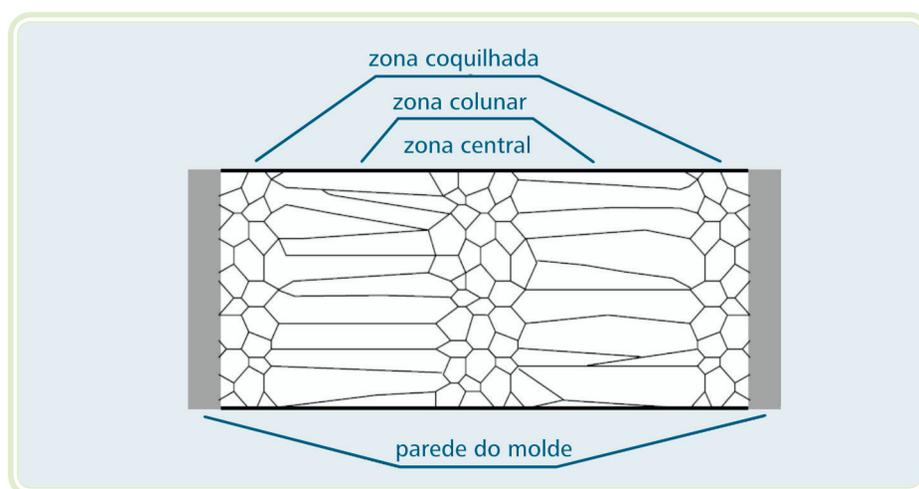


Figura 8.12: Morfologia de grãos

Fonte: CTISM, adaptado de Silva Filho, 2009

A-Z

lingoteiras

Nome dado aos recipientes onde se faz o "derramamento" (lingotamento) do metal líquido que depois de solidificado será chamado de lingote.

As diferentes regiões, caracterizadas por particularidades na forma dos grãos metálicos resultantes são as seguintes:

Zona coquilhada – forma-se junto da parede da lingoteira ou molde e é constituída por pequenos grãos orientados ao acaso. A região coquilhada é constituída por grãos finos formados devido à elevada taxa de nucleação que ocorre no metal líquido em contato com a parede do molde.

Zona colunar – forma-se após a anterior e apresenta grãos alongados e dispostos paralelamente à direção do fluxo de calor durante a solidificação. A região colunar é formada a partir de grãos do lado interno da região coquilhada que crescem no sentido oposto ao de extração de calor pelo molde, ou seja, com direção de crescimento preferencial.

Como resultado, os grãos melhores orientados crescem à frente dos demais, aprisionando e impedindo o crescimento destes. A estrutura final passa a ser caracterizada por grãos grosseiros, colunares ou alongados.

Zona equiaxial central – a região colunar persiste até que as condições de solidificação se modifiquem e favoreçam à nucleação de novos grãos na região central do lingote. Os grãos dessa região são uniformes e normalmente maiores que os da zona coquilhada.

Diversos mecanismos ligados ao processo de solidificação contribuem para a formação da estrutura resultante apresentada. A forma granular colunar é a menos desejável principalmente por sua facilidade em propagar defeitos e redução da resistência mecânica e tenacidade dos materiais.

8.5.1 Solidificação do metal na soldagem

Embora as formas granulares apresentadas sejam também encontradas em cordões de solda, existem diferenças fundamentais entre as condições de solidificação nas condições normais ou em lingoteiras, e entre aquelas encontradas na soldagem. Os principais pontos a serem considerados são:

- a) Na soldagem por fusão ao arco elétrico, o metal de adição e o metal base são fundidos pelo calor de uma fonte móvel, o arco elétrico. Esta fusão é seguida por um superaquecimento considerável, particularmente na gota de metal de adição transferida da extremidade do consumível para a poça de fusão.

- b) Na soldagem, o início da solidificação não ocorre com a formação de um elevado número de núcleos sólidos como na região coquilhada de uma peça fundida. Na poça de fusão, o metal líquido molha perfeitamente os grãos do metal de base que formam a parede da poça (zona de ligação) e estes estão aquecidos a temperaturas muito próximas de seu ponto de fusão. Dessa forma, uma região coquilhada raramente é formada.
- c) A área específica de contato para interação entre metal fundido, gases e escórias é muito grande, se comparada a outros processos metalúrgicos, implicando velocidades de resfriamento e solidificação extremamente elevadas e dependentes de velocidade de soldagem que, em alguns casos, como na soldagem automatizada, pode ser muito elevada.

Principais mecanismos recorrentes na solidificação de uma junta soldada:

8.5.1.1 Crescimento epitaxial

Determinadas condições existentes na poça de fusão como elevados gradientes térmicos e como o contato direto entre metal líquido e metal sólido facilitam o crescimento direto do novo grão sólido sem a nucleação de novos grãos. Como resultado disso, os grãos da ZF apresentam uma largura semelhante e a mesma orientação cristalina dos grãos do metal de base dos quais são prolongamento.

Assim, os grãos da ZF localizados junto à linha de fusão são uma continuação dos grãos adjacentes da ZTA. Como o tamanho de grão na ZTA depende das características metalúrgicas do metal de base e do ciclo térmico, pode-se esperar que o tamanho de grão primário na ZF dependa também dos parâmetros de soldagem que afetam o ciclo térmico, particularmente aporte térmico líquido. A Figura 8.13 ilustra o esquema da solidificação no modelo epitaxial.

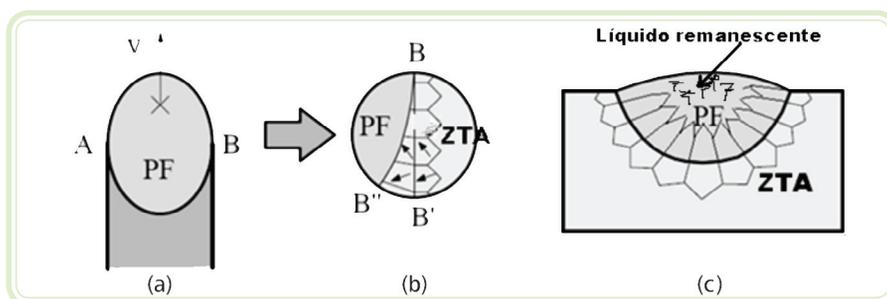


Figura 8.13: Modelo de solidificação epitaxial

Fonte: Silva Filho, 2009

Na Figura 8.13a é mostrada a vista superior da poça de fusão (PF), indicando a direção de velocidade de soldagem (v).

Na Figura 8.13b é destacada a poça de fusão (PF) já parcialmente solidificada, mostrando que os grãos se formam a partir dos grãos da ZTA. A curva (B''B) é conhecida como frente de solidificação, e a linha (B'B) é conhecida como linha ou zona de ligação.

A Figura 8.13c mostra um corte transversal da junta soldada e o metal de solda parcialmente formado, indicando que os grãos solidificados da ZF têm a mesma tendência ao tamanho dos grãos da ZTA.

A Figura 8.14 representa uma ilustração metalográfica do crescimento epitaxial na soldagem do aço inoxidável.

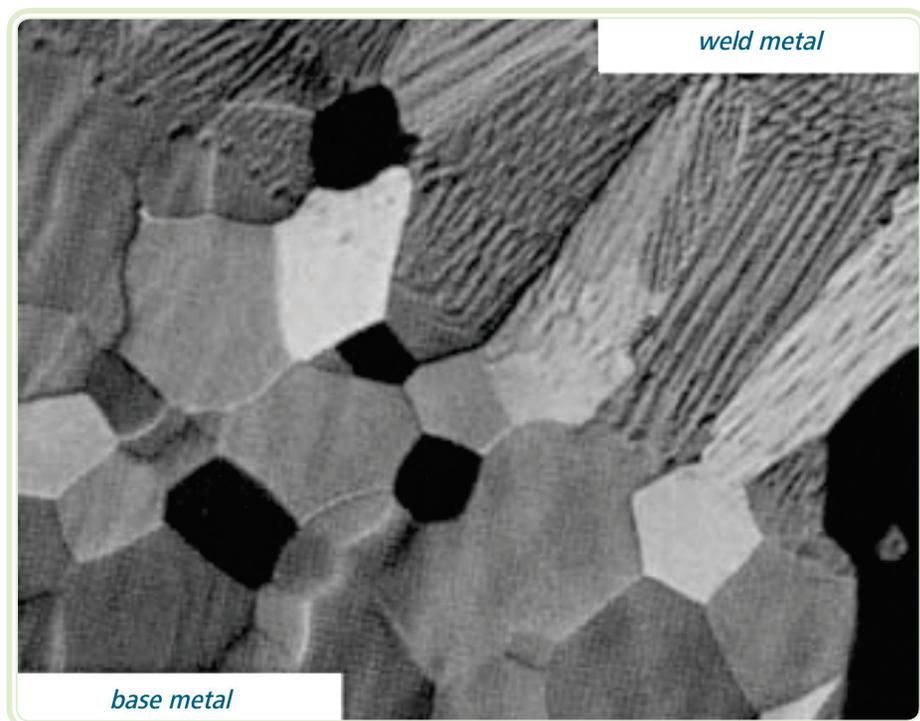


Figura 8.14: Crescimento epitaxial na soldagem do aço inoxidável

Fonte: Silva Filho, 2009

O modelo de solidificação não epitaxial, ao contrário do modelo descrito, pode ocorrer em condições nas quais o metal de solda resultante tem a composição química muito diferente do metal de base (devido à natureza do metal de adição) ou na soldagem de materiais diferentes (soldagem dissimilar).

8.5.1.2 Crescimento competitivo

A facilidade de crescimento de um grão depende de sua orientação em relação ao fluxo de calor estar alinhada com sua direção preferencial de crescimento cristalino. A solidificação de vários cristais aleatoriamente orientados causa uma

seleção, isto é, os grãos melhor orientados em relação à direção de extração de calor tendem a crescer à frente dos demais grãos, que são bloqueados e impedidos de crescer.

A direção de extração de calor corresponde à normal à frente de solidificação em cada ponto na poça de fusão. Esse fenômeno que ocorre em soldagem tem uma grande importância nas propriedades finais e pode ser responsável por certo grau de anisotropia (não uniformidade das propriedades) do metal de solda ou da zona fundida.

A Figura 8.15 ilustra de forma esquemática a formação de grãos segundo o modelo de crescimento competitivo.

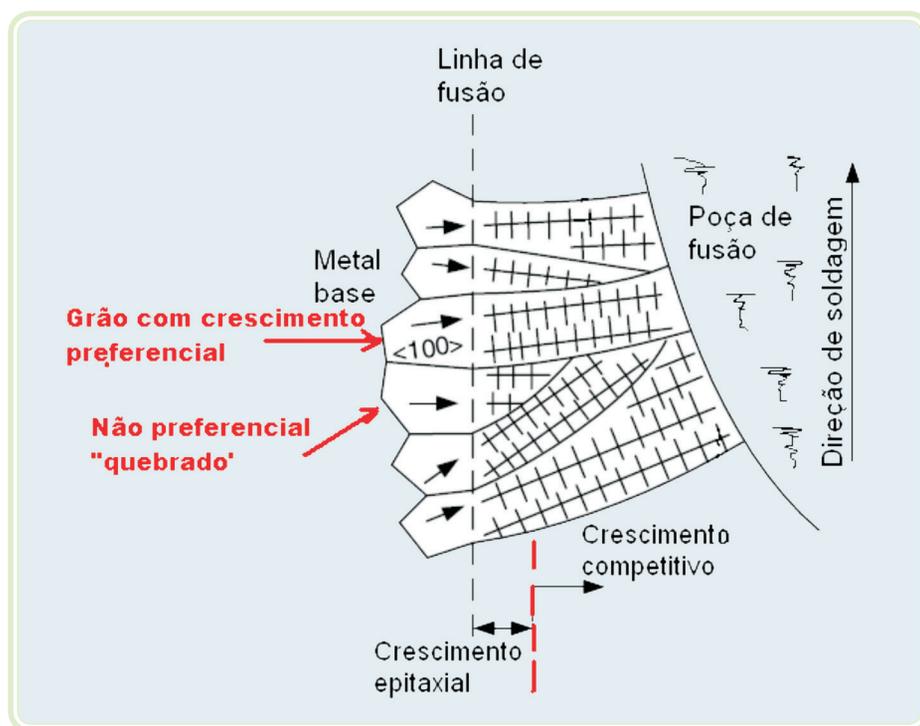


Figura 8.15: Esquema de crescimento preferencial
Fonte: Silva Filho, 2009

8.5.2 Efeito do formato da poça de fusão nas condições de solidificação

a) Poça de fusão tipo gota alongada

Essa formação de poça, demonstrada na Figura 8.16, ocorre quando a velocidade de soldagem é muito elevada e maior que a velocidade de solidificação.

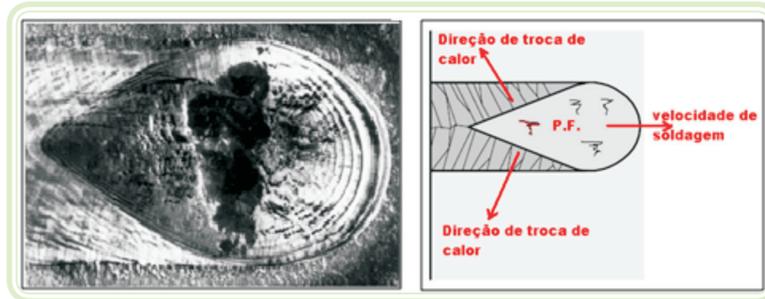


Figura 8.16: Poça de fusão em formato de gota alongada

Fonte: Silva Filho, 2009

A-Z

colunar

Que tem forma de coluna.

Esse formato favorece a formação **colunar** dos grãos, em decorrência da frente de troca de calor da poça de fusão permanecer praticamente inalterada, dando a frente de solidificação uma orientação relativamente constante em relação à direção de soldagem, o que favorece o crescimento desde a linha de fusão até o centro da solda.

b) Poça de fusão com formato elíptico

Ocorre com menores velocidades de soldagem. Como na velocidade normal, a frente de solidificação muda constantemente em função do perfil elíptico da superfície da poça de fusão, os grãos não encontram direção ideal de crescimento, favorecendo a formação de maior número de grãos com menor tamanho e aspecto menos colunar, dando origem a uma estrutura mais favorável à qualidade da junta soldada. A Figura 8.17 ilustra esta condição.

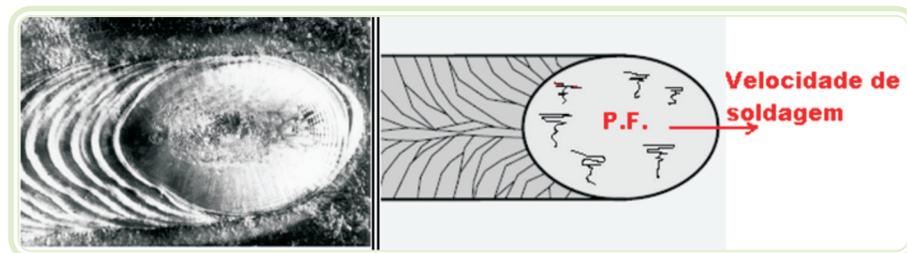


Figura 8.17: Poça de fusão formato elíptico

Fonte: Silva Filho, 2009

A-Z

Al 1xxx

Alumínio da série 1000 e alguma coisa, ou seja, relativo a ligas de alumínio comercialmente puro.

A Figura 8.18 compara as condições de solidificação obtidas para dois níveis de velocidades utilizadas na soldagem TIG do **Al 1xxx**.

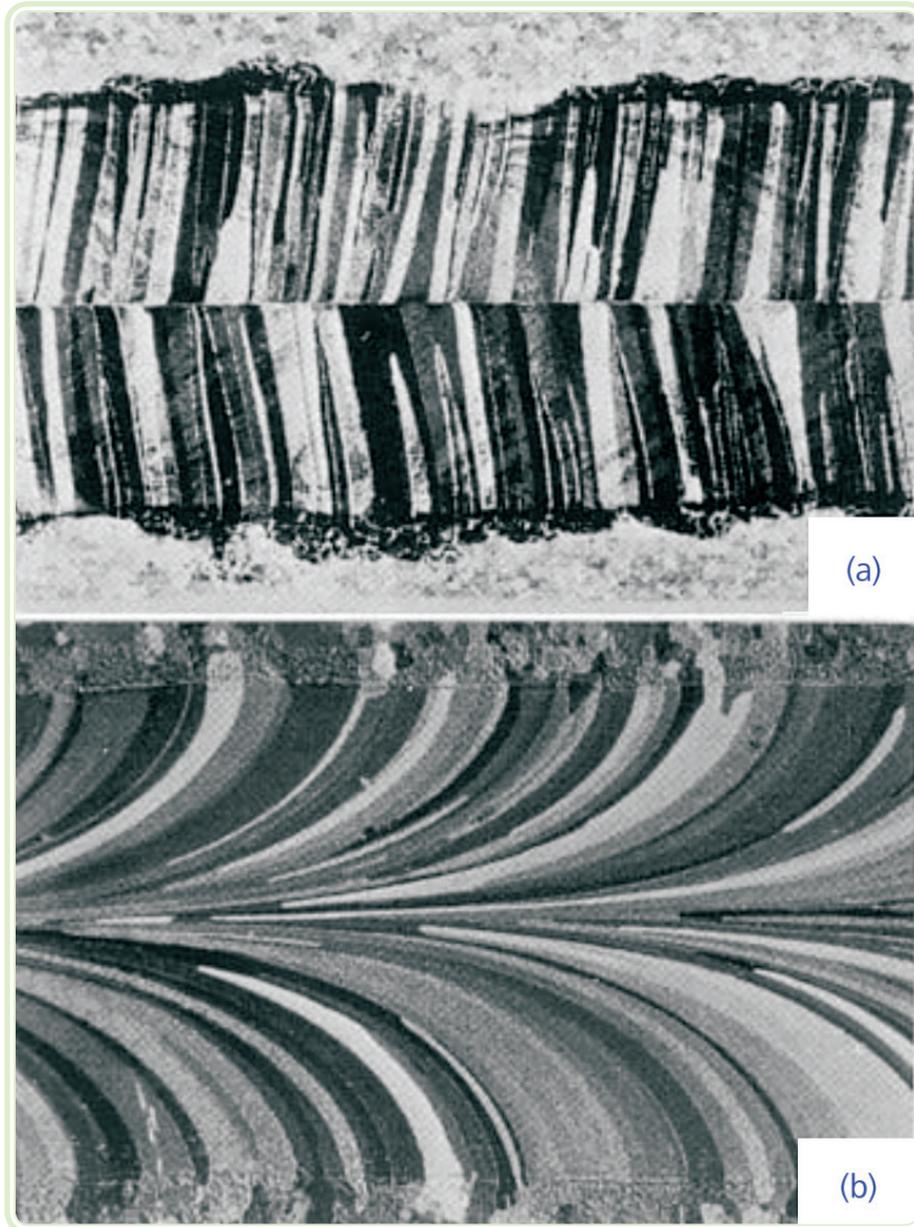


Figura 8.18: Para o resultado ilustrado na (a), a velocidade de soldagem foi de 1000 mm/min, enquanto para a (b), a velocidade foi de 250 mm/min

Fonte: Silva Filho, 2009

Qual condição é mais favorável das duas mostradas na Figura 8.18?

Na Figura 1.18a observa-se que os grão formados na soldagem estão tão direcionados, que no centro do cordão forma-se uma linha que segue por toda a imagem, diferente do que vemos na Figura 1.18b, onde os grãos “seguem” a linha central, mas não mais “casados”.

A Figura 1.18a é muito mais desfavorável, pois se houver solitação no cordão, o mesmo romperá bem no centro do mesmo, diferente do cordão mostrado na Figura 1.18b que se houver solitações, não terá como romper no centro do cordão, pois o próprio jeito como os grãos estão dispostos irão impedir que a trinca se propague e cresça no centro do cordão.

8.5.3 Microestrutura da zona fundida

Após a solidificação, a ZF (metal de solda) pode sofrer ainda alterações até o resfriamento final em temperatura ambiente. Estas alterações podem incluir, por exemplo, o crescimento do grão, a formação de carbonetos, nitretos, fases intermetálicas além da transformação de uma fase em outra(s).

Nos aços doces e aços de baixa liga, por exemplo, a poça de fusão normalmente se solidifica como ferrita delta que logo se transforma em austenita. Por sua vez, esta pode se transformar em uma única fase ou em uma mistura complexa de constituintes, em função de fatores como o tamanho do grão austenítico, composição química, velocidade de resfriamento e quantidade de inclusões.

Em soldagem com vários passes, a microestrutura é mais complexa devido ao efeito refinador (em aços transformáveis) de um passe sobre os imediatamente anteriores. As propriedades finais da ZF dependerão de sua estrutura final, incluindo as microestruturas de solidificação e a secundária, e a presença de descontinuidades e defeitos de soldagem.

8.5.4 Os principais constituintes do metal de solda na soldagem dos aços

Ferrita primária – ocorre tanto na forma **intergranular** (ferrita de contorno de grão) quanto no interior dos grãos (ferrita poligonal). Essas duas morfologias de ferrita (Figura 8.19) são características de soldas com baixa velocidade de resfriamento e/ou baixo teor de elementos de liga. Por apresentarem quase sempre grande tamanho de grãos, entremeados de carbono e impurezas, uma grande quantidade de ferrita de contorno de grão é indesejável em soldas que devem apresentar uma elevada resistência à fratura por clivagem (fratura frágil).

A-Z

intergranular

É o mesmo que “entre os grãos”, termo utilizado para explicar a formação de precipitados na interface entre dois ou mais grãos da estrutura.

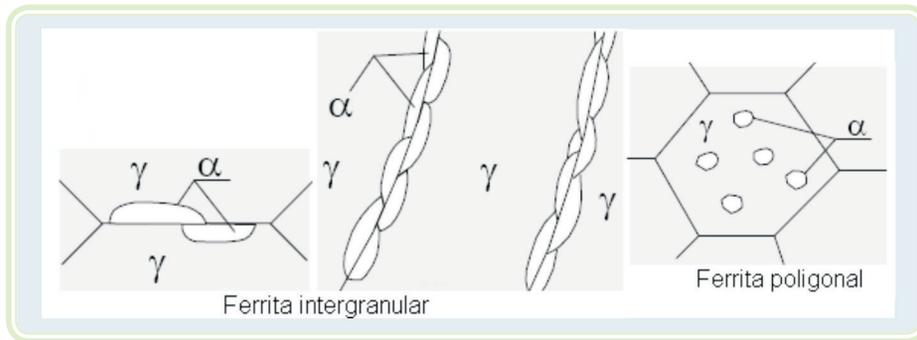


Figura 8.19: Formação, esquemática, da ferrita intergranular e poligonal

Fonte: Silva Filho, 2009

Ferrita acicular – corresponde ao tipo mais frequente de ferrita nucleada no interior dos grãos austeníticos. A ferrita acicular forma-se intragranularmente, nucleando-se de forma heterogênea em sítios como inclusões (ou próxima a estas), precipitados e outras irregularidades nos grãos austeníticos. Na ZF, a sua formação é favorecida pela presença de precipitados e, particularmente, de numerosas inclusões resultantes da presença de oxigênio, em geral, em teores superiores aos do metal de base. Este constituinte é considerado o melhor para garantir uma tenacidade elevada para o metal de solda de aço.

A Figura 8.20 apresenta o esquema de formação da ferrita acicular e a imagem de micrografia do aço respectivamente.

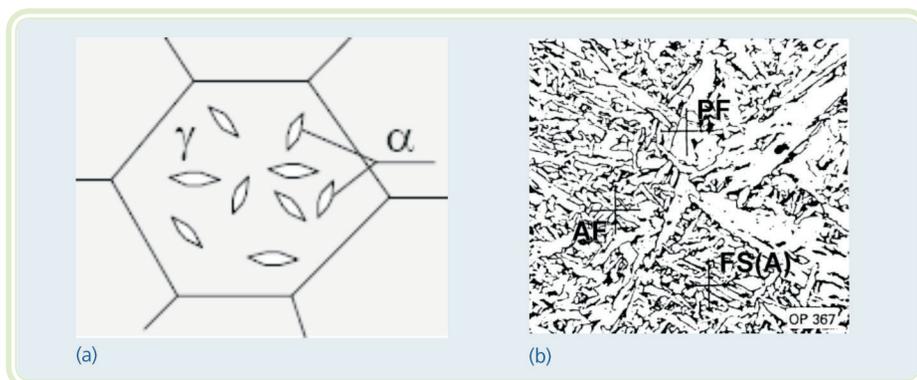


Figura 8.20: (a) Desenho esquemático mostrando o aspecto da ferrita acicular numa matriz austenítica e (b) micrografia do aço. PF – ferrita primária; AF – ferrita acicular; FS – ferrita de segunda fase

Fonte: Silva Filho, 2009

Martensita – em aços com maior teor de carbono ou de outros elementos de liga e em soldagens com maior velocidade de resfriamento, a formação de ferrita pode ser parcial ou completamente suprimida, havendo a formação de uma estrutura predominantemente martensítica na zona fundida. Esta estrutura apresenta geralmente alta dureza, baixa tenacidade, particularmente

em aços com teor de carbono mais alto. É altamente indesejável na soldagem, haja vista que é a estrutura preferencial para a formação das trincas a frio.

8.5.5 Influência da composição e da velocidade de resfriamento

A influência da composição química e da velocidade de resfriamento na formação dos diferentes constituintes descritos anteriormente é complexa. Diferentes elementos podem influenciar nos detalhes da reação de decomposição da austenita. A seguir, a apresentação, de forma resumida, do efeito de alguns elementos químicos na formação da microestrutura da zona fundida.

Carbono – é possivelmente o mais importante elemento se considerarmos sua influência na microestrutura da solda dos aços. Teores elevados desse elemento não são usualmente usados para se evitar a formação de martensita. Em geral, o seu teor fica entre 0,05 e 0,15%. Nessa faixa, o carbono controla principalmente a quantidade de carbonetos formados, mas também favorece a formação de ferrita acicular em lugar da ferrita primária de contorno de grão.

Manganês – promove um refinamento da microestrutura. Um aumento de seu teor até cerca de 1,5% leva à formação de ferrita acicular em lugar de ferrita primária de contorno de grão. É utilizado como desoxidante e desulfurante. A Figura 8.21 mostra a microestrutura a ZF obtida em função do teor de manganês.

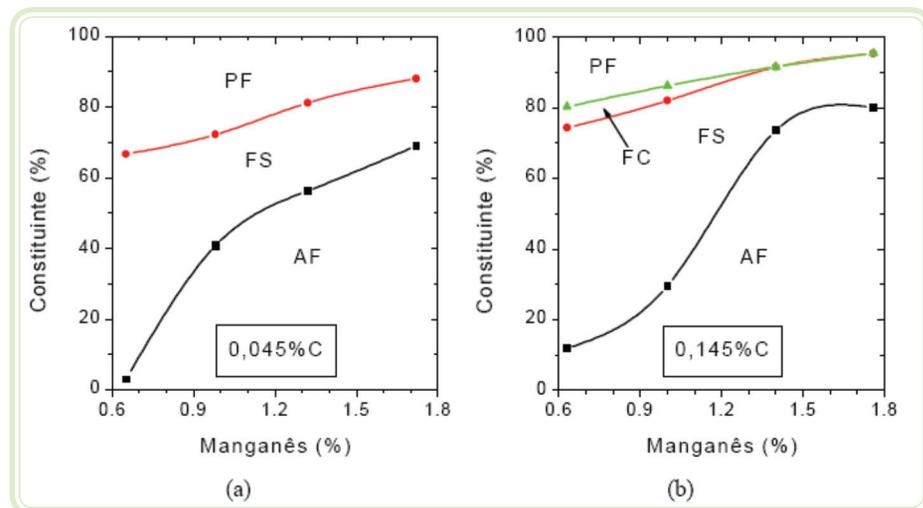


Figura 8.21: Microestrutura da ZF obtida na soldagem eletrodo revestido em função do teor de Mn para (a) 0,045% C e (b) 0,145% C

Fonte: Silva Filho, 2009

Silício – é o principal desoxidante do metal de solda. Neste aspecto, é cerca de quatro vezes mais efetivo que o manganês. Não é muito efetivo para promover a formação de ferrita acicular.

Níquel – influencia a microestrutura de forma similar, mas menos intensa do que o Mn, favorecendo o refinamento da estrutura e a formação de ferrita acicular. Em termos de propriedades mecânicas, o Ni tem um importante efeito benéfico na tenacidade da solda.

Molibdênio e cromo – estabilizam a ferrita e aumentam a temperabilidade. Tendem a reduzir a quantidade de ferrita de contorno de grão, favorecendo a formação de ferrita acicular e principalmente de bainita superior.

8.5.6 Características da zona termicamente afetada

As características da ZTA dependem fundamentalmente do tipo de metal de base, do processo e do procedimento de soldagem, isto é, do ciclo térmico e da repartição térmica.

De acordo com o tipo de metal que está sendo soldado, os efeitos do ciclo térmico poderão ser os mais variados. No caso de metais não transformáveis (por exemplo, alumínio), a mudança estrutural mais marcante será o crescimento de grãos ou o recozimento. Em metais transformáveis, como os aços carbono e aços baixa liga, a ZTA será mais complexa. As regiões características são apresentadas a seguir.

Região de crescimento de grão – compreende a região do metal de base mais próxima da solda que foi submetida a temperaturas próximas da temperatura de fusão. Nessa situação, a estrutura austenítica sofre um grande crescimento de grão. Esse crescimento dependerá do tipo de aço e da energia de soldagem (processos de maior energia resultarão em granulação mais grosseira), o que é um fator agravante em decorrência da **epitaxia**.

A estrutura final de transformação dependerá do teor de carbono, do teor de elementos de liga, do tamanho de grão austenítico e da velocidade de resfriamento. De um modo geral, essa região é caracterizada por uma estrutura grosseira com placas de ferrita, podendo conter perlita, bainita ou martensita. Essa região é a mais problemática da ZTA de um aço, podendo ter menor tenacidade e até apresentar problemas de fissuração a frio.

A-Z

epitaxia

A direção que o calor sai (frente de solidificação) não tem direção preferencial, ou seja, sai em todas as direções.

Região de refino de grão – compreende a porção de junta aquecida a temperaturas comumente utilizadas na normalização dos aços (900 a 1000°C). Após o processo de soldagem, essa região é caracterizada, geralmente, por uma estrutura fina de ferrita não apresentando problemas na maioria dos casos.

Região intercrítica – é a região mais afastada do cordão de solda. Nessa região, a temperatura de pico oscila em torno de 727°C, e é caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal de base, e apresenta mudanças microestruturais cada vez mais imperceptíveis.

Resumo

Metalurgia da soldagem está ligada à área de materiais e processos cujo estudo tem como objetivo principal o entendimento dos fenômenos físicos, químicos e metalúrgicos recorrentes em processos de soldagem e suas relações com a ocorrência de defeitos nas juntas soldadas.

E o estudo dessa área da ciência ajudará a redução de custos, simultaneamente com o aumento da qualidade da fabricação de estruturas metálicas no sentido de que prevenindo a ocorrência de defeitos e evitar a reconstrução de juntas soldadas, assim, aumentando a confiabilidade das estruturas, através da especificação correta de materiais, procedimentos e técnicas de controle mais adequados reduzindo a margem de ocorrências imprevistas que podem levar ao colapso das estruturas.



Atividades de aprendizagem

1. O que é metalurgia?
2. Por que a zona termicamente afetada (ZTA) é tão problemática na soldagem?
3. Qual a importância do estudo dos ciclos térmicos de soldagem?
4. Explique, o que se entende pelo que é mostrado na Figura 8.18.

Aula 9 – Defeitos do metal de solda

Objetivos

- Reconhecer defeitos visíveis numa soldagem.
- Descrever a aparência dos principais defeitos de soldagem.
- Entender os mecanismos de formação de defeitos.
- Reconhecer a importância de se evitar defeitos na soldagem.

9.1 Defeitos mais comuns

No que concerne ao estudo de descontinuidades em regiões soldadas, consideram-se os fatores segurança e desempenho (*performance*), intimamente relacionados, como chaves à obtenção de uniões ou revestimentos aceitáveis dentro de determinados padrões normalizados. Essas considerações, no entanto, apresentam distintas características no que tange aos anseios do executante (fabricante) e do solicitante (cliente), isto é, do lado do fabricante, esperam-se depósitos que satisfaçam as normas vigentes (aspecto superficial e nível de descontinuidades presentes) e, pelo lado do cliente, satisfação quanto à resistência dos componentes às solicitações de operação para as quais foi projetado.

O grande problema normalmente enfrentado deve-se ao fato do aparecimento inesperado de condições adversas (ex.: erro de procedimento durante a operação de soldagem, aparentemente sem influência, gerando descontinuidades como concentradoras de tensões) que culminam na redução da vida útil do componente, além da possibilidade de falhas.

O termo descontinuidade em soldagem denota uma interrupção ou violação estrutural na região soldada, tal como falta de homogeneidade nas características mecânicas, físicas ou metalúrgicas do depósito. A descontinuidade será considerada um defeito quando o efeito isolado ou múltiplo deste, originar uma incapacidade parcial ou total em relação às mínimas exigências padrões.

Desse modo, o conhecimento dos tipos de descontinuidades relacionadas à operação de soldagem e seus mecanismos de formação e controle representarão a diferença entre a operação esperada do componente ou a sua indesejada falha. A presença de descontinuidades exige a aplicação de medidas corretivas que acarretam uma elevação no tempo e no valor final da obra além, logicamente, da insatisfação do cliente.

Alguns defeitos que podem ocorrer no metal de solda:

- Trincas de solidificação ou trincas a quente.
- Porosidade.
- Inclusões de escória ou outras inclusões.
- Trincas de cratera.
- Falta de fusão.
- Perfil do cordão desfavorável.
- Trincas induzidas por hidrogênio no metal de solda.

9.1.1 Trincas de solidificação

A maioria dos aços pode ser soldada com um metal de solda de composição similar à do metal de base. Muitos aços com alto teor de liga e a maioria das ligas não ferrosas requerem eletrodos ou metal de adição diferentes do metal de base, porque possuem uma faixa de temperatura de solidificação maior do que outras ligas. Isso torna essas ligas suscetíveis à fissuração de solidificação ou a quente, que pode ser evitada mediante a escolha de consumíveis especiais que proporcionam a adição de elementos que reduzem a faixa de temperatura de solidificação. (BRAGA, 2004).

A fissuração a quente também é fortemente influenciada pela direção de solidificação dos grãos na solda (veja a Figura 9.1). Quando grãos de lados opostos crescem juntos numa forma colunar, impurezas e constituintes de baixo ponto de fusão podem ser empurrados na frente de solidificação para formar uma linha fraca no centro da solda. Soldas em aços de baixo carbono que porventura possam conter alto teor de enxofre, podem se comportar dessa forma, de modo que pode ocorrer fissuração no centro da solda.

Mesmo com teores normais de enxofre pode ainda existir a linha fraca no centro da solda que pode se romper sob as deformações de soldagem. É por esse motivo que cordões de penetração muito profundo são normalmente evitados.

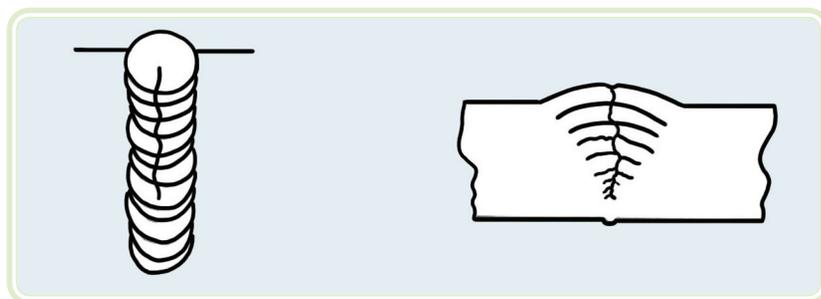


Figura 9.1: Fissuração no centro do cordão em um passe único de alta penetração

Fonte: Silva Filho, 2009

9.1.2 Porosidade

A porosidade (Figura 9.2) pode ocorrer de três modos, segundo Silva Filho (2009):

Primeiro, como resultado de reações químicas na poça de fusão, isto é, se uma poça de fusão de aço for inadequadamente desoxidada, os óxidos de ferro poderão reagir com o carbono presente para liberar monóxido de carbono (CO). A porosidade pode ocorrer no início do cordão de solda na soldagem manual com eletrodo revestido, porque nesse ponto a proteção não é totalmente efetiva.

Segundo, pela expulsão de gás de solução à medida que a solda solidifica, como acontece na soldagem de ligas de alumínio quando o hidrogênio originado da umidade é absorvido pela poça e mais tarde liberado.

Terceiro, pelo aprisionamento de gases na base de poças de fusão turbulentas na soldagem com gás de proteção, ou o gás evoluído durante a soldagem do outro lado de uma junta em "T" numa chapa com tinta de fundo. A maioria desses efeitos pode ser facilmente evitada, embora a porosidade não seja um defeito excessivamente danoso às propriedades mecânicas, exceto quando aflora à superfície. Quando isso acontece, pode favorecer a formação de entalhes que poderão causar falha prematura por fadiga, por exemplo.

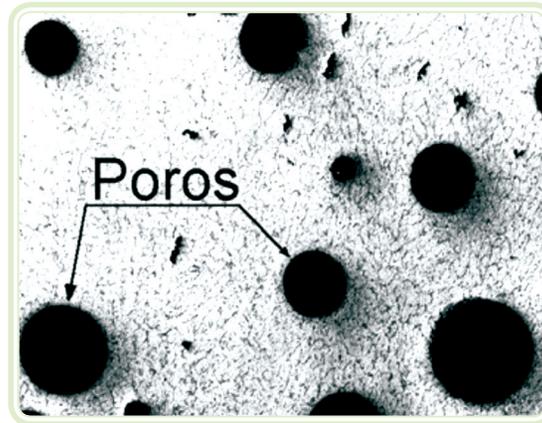


Figura 9.2: Aspecto de porosidades esféricas na micrografia de uma soldagem MIG do Al
Fonte: Silva Filho, 2009

9.1.3 Inclusões

Com processos que utilizam fluxo, é possível que algumas partículas desse fluxo sejam deixadas para trás, formando inclusões no cordão de solda (Figura 9.3). É mais provável de as inclusões ocorrerem entre passes subsequentes ou entre o metal de solda e o chanfro do metal de base. A causa mais comum é a limpeza inadequada entre passes agravada por uma técnica de soldagem ruim, com cordões de solda sem concordância entre si ou com o metal de base. Assim como na porosidade, inclusões isoladas não são muito danosas às propriedades mecânicas, porém inclusões alinhadas em certas posições críticas como na direção transversal à tensão aplicada, podem iniciar o processo de fratura. Há outras formas de inclusões que são mais comuns em soldas de ligas não ferrosas ou de aços inoxidáveis do que em aços estruturais. Inclusões de óxidos podem ser encontradas em soldas com gás de proteção onde o gás foi inadequadamente escolhido, ou inclusões de tungstênio na soldagem GTAW (TIG) com correntes muito altas para o diâmetro do eletrodo de tungstênio ou quando este toca a peça de trabalho.

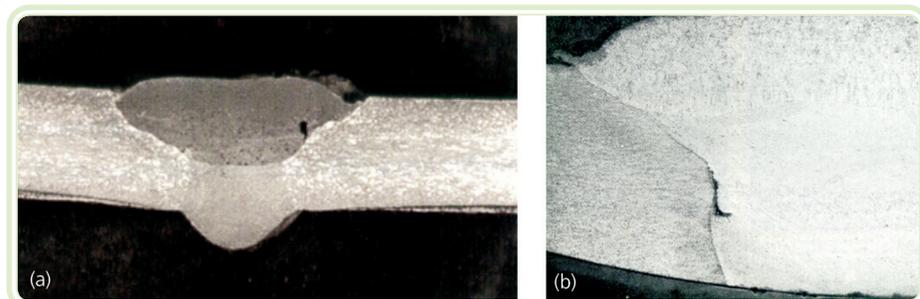


Figura 9.3: Macrografias mostrando a presença de (a) uma inclusão na interface zona fundida/metal de base e (b) uma inclusão na zona fundida

Fonte: Marqueze & Quites, 1995

9.1.4 Defeitos de cratera

Já foi mencionado que a granulação no metal de solda é geralmente colunar. Esses grãos tendem a crescer a partir dos grãos presentes nos contornos de fusão e crescem afastando-se da interface entre o metal líquido e o metal de base na direção oposta ao escoamento de calor. Um ponto fundido estacionário teria naturalmente um contorno aproximado no formato circular, porém o movimento da fonte de calor produz um contorno em forma de lágrima com a cauda na direção oposta ao movimento.

Quanto maior for a velocidade de soldagem, mais alongado será o formato da cauda. Se a fonte de calor for repentinamente removida, a poça fundida solidifica com um vazio que é denominado cratera. A cratera está sujeita a conter trincas de solidificação na forma de estrela. As técnicas de soldagem ao final do cordão de solda são desenvolvidas para corrigir esse fenômeno voltando o arco por alguns momentos para preencher a poça de fusão ou até mesmo, reduzindo gradualmente a corrente enquanto se mantém o arco estático. (BRAGA, 2004).

9.1.5 Falta de fusão e perfil do cordão desfavorável

Esses são defeitos comuns fáceis de evitar. A causa pode ser uma corrente de soldagem muito baixa ou uma velocidade de soldagem inadequada.

Essa descontinuidade caracteriza-se por uma falta de fusão localizada, isto é, uma ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou entre dois cordões adjacentes. (BRAGA, 2004).

A falta de fusão atua como um concentrador de tensão severo, podendo facilitar a nucleação e propagação de trincas. Além disso, pode reduzir a seção efetiva da junta.

Na Figura 9.4 podemos ver, esquematicamente, onde se localiza esse tipo de defeito de soldagem.

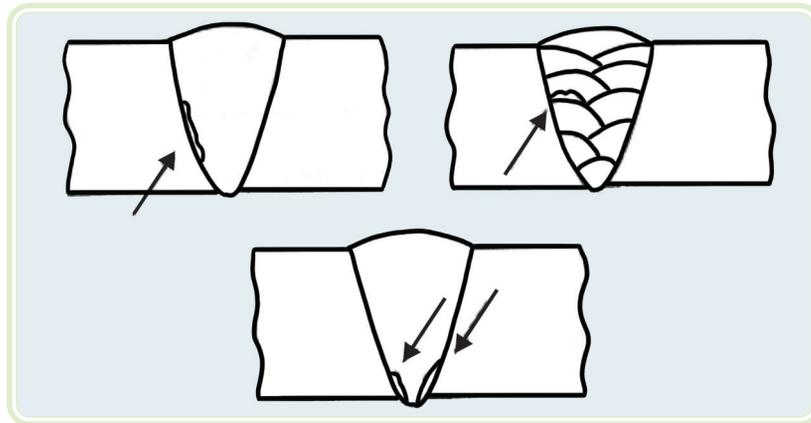


Figura 9.4: Localizações comuns para a ocorrência de falta de fusão

Fonte: Marqueze & Quites, 1995

9.1.6 Trincas induzidas por hidrogênio difusível ou trincas a frio

Essa forma de fissuração é considerada um dos maiores problemas de soldabilidade dos aços estruturais comuns, particularmente para processos de baixa energia de soldagem.

A sua formação ocorre após um período inicial, tendendo a crescer de forma lenta e descontínua, levando até 48 horas após soldagem para a sua completa formação.

Esse modo de fissuração acontece a temperaturas próximas da ambiente, sendo mais comumente observada na zona termicamente afetada. O hidrogênio é introduzido na poça de fusão através da umidade ou do hidrogênio contido nos compostos dos fluxos ou nas superfícies dos arames ou do metal de base, resultando em que a poça de fusão e o cordão de solda já solidificado tornem-se um reservatório de hidrogênio dissolvido. Numa poça de fusão de aço, o hidrogênio se difunde do cordão de solda para as regiões adjacentes da zona termicamente afetada que foram reaquecidas suficientemente para formar austenita. À medida que a solda se resfria a austenita se transforma e dificulta a difusão posterior do hidrogênio. O hidrogênio retido nessa região adjacente ao cordão de solda pode causar fissuração. (BRAGA, 2004; SILVA FILHO, 2009).

Essa fissuração tem sido associada muitas vezes com a falha prematura de componentes soldados, ajudando a iniciação de fratura frágil (sem qualquer indicativo anterior de falha) ou por fadiga. A fissuração pelo hidrogênio é muitas vezes citada na literatura técnica com diferentes nomes: *cold cracking* (fissuração a frio), *delayed cracking* (fissuração retardada), *underbead cracking* (fissuração sob o cordão).

As trincas a frio podem ser longitudinais, transversais, superficiais ou sub-superficiais, se originando, frequentemente, a partir de concentradores de tensão, como a margem ou a raiz da solda. Ocorrem principalmente na ZTA, na região de crescimento de grão, mas podem também ocorrer na zona fundida. A Figura 9.5 mostra o aspecto típico de uma trinca provocada pelo hidrogênio difusível.

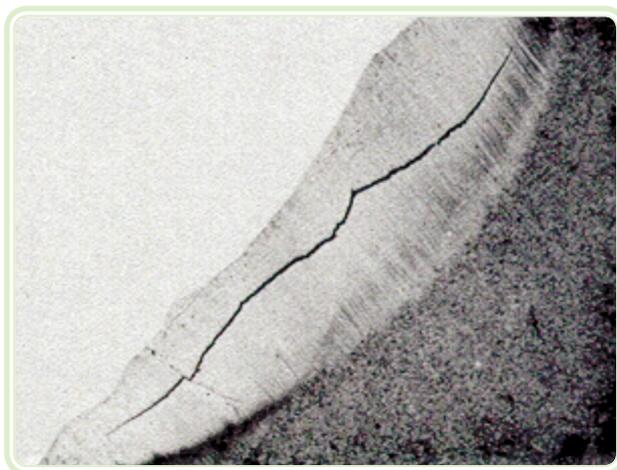


Figura 9.5: Trinca a frio sob o cordão na soldagem de aço baixa liga

Fonte: Braga, 2004

As trincas a frio ou induzidas por hidrogênio ocorrem pela presença simultânea de três fatores:

- Contaminação do metal de solda por hidrogênio.
- Estado de tensão residual.
- Microestrutura susceptível no metal de solda ou zona termicamente afetada.

Contaminação do metal de solda por hidrogênio – o denominado hidrogênio difusível (H^+) advém da dissociação no arco elétrico das moléculas de gás hidrogênio (H_2) introduzidas na região de soldagem a partir do ar atmosférico ou demais fontes de contaminação, tais como, fluxos de soldagem mal acondicionados, hidrocarbonetos (óleos, graxas e similares), fluxos celulósicos entre outras.

Como a solubilidade gasosa do aço no estado líquido é elevada, o hidrogênio é facilmente absorvido pela poça de fusão, permanecendo no metal de solda em condições de saturação após o processo de solidificação.

O nome hidrogênio difusível deve-se à facilidade de o átomo H^+ movimentar-se (difundir) na estrutura cristalina do aço, em função, principalmente, do seu raio atômico ser bem menor que o raio atômico do ferro. Essa condição permite ao hidrogênio difusível atingir diferentes regiões da zona fundida e da zona termicamente afetada.

Estado de tensão residual – na prática, tensão residual de soldagem é um fator praticamente presente em todos os processos de soldagem por fusão. É induzida pelas dilatações e contrações devidas ao ciclo térmico, assim como pelo “enrugamento” (redução de volume) provocado pela solidificação. As tensões residuais de soldagem serão tão mais intensas quanto maior for o grau de restrição da junta soldada.



Caso queira se aprofundar no assunto, consulte bibliografias que tratem dos mecanismos de formação das trincas induzidas por hidrogênio.

Microestrutura susceptível no metal de solda ou zona termicamente afetada – particularmente a martensita é, em geral, a microestrutura mais sensível à fissuração pelo hidrogênio. Martensita é a microestrutura formada a partir do resfriamento rápido do aço com teor de carbono acima de 0,3% a partir da estrutura austenítica. É uma estrutura típica dos aços temperados e tem como principais propriedades elevada dureza e fragilidade.

Além desses fatores discutidos, ainda existem os fatores físico-químicos e metalúrgicos de influência que, devido a sua complexidade, não serão abordados nessa disciplina.

Resumo

A soldagem é um processo de fabricação que utilizará fontes intensas de calor localizado, o que ocasionará na fusão localizada do local conhecido como junta a ser soldada e isso provocará mudanças severas no material, inclusive de fases, pois haverá fusão (se for o caso) e, logo em seguida, solidificação, o que incorrerá em descontinuidades e, quiçá, defeitos.

A descontinuidade é qualquer interrupção ou violação estrutural na região soldada, tal como falta de homogeneidade nas características mecânicas, físicas ou metalúrgicas do material ou da solda e será considerado um defeito quando, o efeito isolado ou múltiplo deste, originar uma incapacidade parcial ou total em relação às mínimas exigências padrões. Assim, considera-se uma junta soldada contém defeitos quando esta apresenta descontinuidades ou propriedades (neste caso, defeitos) que não atendam ao exigido. Juntas defeituosas precisam, em geral, ser reparadas ou, mesmo, substituídas.

Para evitar esses problemas torna-se necessário o conhecimento dos tipos de descontinuidades relacionadas à operação de soldagem e seus mecanismos de formação e controle, o que representarão a diferença entre a operação esperada do componente ou a sua indesejada falha. A presença de descontinuidades exige a aplicação de medidas corretivas que acarretam uma elevação no tempo e no valor final da obra além, logicamente, da insatisfação do cliente.

Atividades de aprendizagem



1. O que é um defeito no metal de solda?
2. Por que a porosidade pode gerar problemas para o cordão de solda?
3. Descreva um procedimento de soldagem que pode culminar na presença de inclusões no interior do cordão de solda.
4. O que é trinca a frio e como ela pode ocorrer?

Referências

BRAGA, Eduardo de Magalhães. Aspectos Sobre Descontinuidades em Regiões Soldadas - Disciplina: Tópicos Especiais em Processos de Fabricação (Soldagem de Aço Inoxidável). Universidade Federal do Pará, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico. Belém, PA. 2004.

FONSECA, Ademir Soares da. **Soldagem TIG**. SENAI – Centro de Formação Profissional “Aloysio Ribeiro de Almeida”. Varginha - Minas Gerais. 2004.

FORTES, Cleber & ARAÚJO, Welerson. **Arames Tubulares OK**. ESAB BR. 7 de maio, 2004.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas**: processo. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MARQUEZE, C. M. & QUITES, A. M. **Descontinuidades em Soldas**. 1. ed. Florianópolis: editado pelos autores, 1995.

MODENESI, Paulo José (2003a). **Técnica Operatória da Soldagem GTAW** - Trabalho Prático. Disponível em: <www.infosolda.com.br>. Acesso em: 2005.

MODENESI, Paulo José (2003b). **Classificação e Utilização de Processos de Soldagem**. Disponível em: <www.infosolda.com.br>. Acesso em: 15 out. 2004.

MODENESI, Paulo José & MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem I** – Introdução aos Processos de Soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte, Minas Gerais. Novembro, 2000.

NASCIMENTO, Alexandre Saldanha do. **Fontes de Soldagem** – Notas de Aula da Disciplina Processos de Soldagem. Escola Técnica Estadual do Município de Belém – ETEMB, Mecânica. Belém, PA. Abril, 2009.

NASCIMENTO, Alexandre Saldanha do. **Soldagem pelo processo TIG** – Notas de Aula da Disciplina Processos de Soldagem. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA, Coordenação de Mecânica. Belém, PA. 2010a.

NASCIMENTO, Alexandre Saldanha do. **Soldagem MIG/MAG (GMAW)** – Notas de Aula da Disciplina Processos de Soldagem. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA, Coordenação de Mecânica. Belém, PA. 2010b.

PEIXOTO, Arildomá Lobato. **Estudo da Microestrutura de Soldas AlMg – 5083 depositado pelo Processo MIG Pulsado**. Relatório Técnico Científico – Projeto: Soldagem MIG do Alumínio em Corrente Pulsada. Universidade Federal do Pará – UFPA. Belém, PA. 2003.

POVOA, A. A. Ficha Técnica da Alcan. Alumínio do Brasil S/A. 1ª. Brasil. 1993.

SILVA FILHO, Carlos Benedito Abreu da. **Uma Contribuição ao Estudo de Soldagem MIG Duplamente Pulsada da Liga Al 5053**: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Belém, PA. Fevereiro, 2003.

SILVA FILHO, Carlos Benedito Abreu da. **Metalurgia da soldagem** - Notas de Aula da Disciplina Metalurgia da Soldagem. Centro Ensino Federal e Tecnológico do Pará – CEFET-PA, Área da Indústria – Coordenação de Mecânica. Belém, PA. Fevereiro, 2009.

Currículo do professor-autor



Arildomá Lobato Peixoto é professor do curso Técnico em Mecânica, além de participar do curso de Metalurgia do e-Tec IFPA e já ministrou disciplina no curso Engenharia de Materiais, todos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). É graduado em Engenharia Mecânica e mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (UFPA). No curso Técnico em Mecânica, ministra as disciplinas de Desenho Mecânico, Processos de Usinagem II – Fresagem, Processos de Usinagem III – Ajustagem, Processos de Soldagem, Técnicas de Soldagem, Metalurgia da Soldagem, Motores de Combustão Interna; no curso de Metalurgia e-Tec ministra a disciplina Soldagem e no curso de Engenharia de Materiais ministrou a disciplina Tratamento Térmico II.