

Sidnei Carraschi Rodrigues

Soldagem Fundamentos e Processos para Iniciantes

Descobrindo os Processos e Técnicas de Soldagem



**editora
VIENA**

1ª Edição
Bauru/SP
Editora Viena
2019

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	15
1. INTRODUÇÃO À SOLDAGEM	17
1.1. Processos de Soldagem	22
2. TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA	27
2.1. Definições de Soldagem.....	29
2.2. Simbologia da Soldagem.....	37
3. SEGURANÇA NA SOLDAGEM	45
4. ARCO ELÉTRICO.....	57
4.1. Poça de Fusão	66
4.2. Aporte Térmico.....	67
4.3. Ciclo Térmico	68
4.4. Partição Térmica	68
5. METALURGIA DA SOLDAGEM.....	73
5.1. Diagrama de Fases	78
5.1.1. Preaquecimento	83
5.1.1.1. Determinando a Temperatura de Preaquecimento.....	84
5.1.2. Pós-aquecimento.....	85
5.1.2.1. Alívio de Tensões	85
5.1.2.2. Recozimento.....	87
5.1.2.3. Normalização.....	87
5.1.2.4. Têmpera	88
5.1.2.5. Revenimento	89
6. FONTES DE SOLDAGEM.....	93
6.1. Requisitos para as Fontes de Soldagem.....	95
6.1.1. Tipos de Fontes	96
7. TENSÕES E DISTORÇÕES	101
8. AUTOMAÇÃO	109
9. NORMAS E QUALIFICAÇÃO	115
10. CUSTOS DE SOLDAGEM.....	127
10.1. Por que é Importante Estimar Custos	130
10.2. Metal de Solda Depositado	130
10.3. Tempo de Soldagem	131
10.4. Taxa de Deposição	131
10.5. Volume do Arame.....	132
10.6. Custos por Eletrodo.....	132
10.7. Gás de Proteção	133
10.8. Mão de Obra e Custos Fixos.....	134
10.9. Energia Elétrica	134
11. CORTE E SOLDAGEM A GÁS (OFW)	139
11.1. Corte a Gás.....	142

11.2.	Gases	143
11.2.1.	Oxigênio.....	143
11.2.2.	Acetileno	146
11.2.3.	Propano (GLP).....	147
11.2.4.	Gás Natural (Metano).....	147
11.2.5.	Vapor de Combustível Líquido.....	148
11.3.	Equipamentos.....	148
11.3.1.	Cilindros de Gases	149
11.3.2.	Periféricos	149
11.4.	Soldagem a Gás	150
11.4.1.	Chama.....	151
11.4.2.	Técnicas	152
12.	SOLDAGEM MANUAL COM ELETRODOS REVESTIDOS (SMAW)	155
12.1.	Eletrodos Revestidos	158
12.1.1.	Formas e Dimensões	158
12.1.2.	Identificação	159
12.2.	Descontinuidades Comuns e Soluções	161
12.2.1.	Porosidade	162
12.2.2.	Falta de Penetração	162
12.2.3.	Mordedura	163
12.2.4.	Trincas.....	164
12.2.5.	Início do Cordão Deficiente	165
12.2.6.	Respingos	166
12.2.7.	Perfuração.....	166
12.2.8.	Convexidade Excessiva.....	167
12.3.	Vantagens e Desvantagens.....	168
13.	SOLDAGEM TIG (GTAW)	171
13.1.	Variáveis	174
13.2.	Equipamentos.....	175
13.2.1.	Fontes.....	178
13.2.1.1.	Transformador	178
13.2.1.2.	Gerador	178
13.2.1.3.	Retificador.....	179
13.2.1.4.	Inversor	179
13.2.2.	Corrente Contínua	180
13.2.3.	Corrente Alternada	181
13.3.	Consumíveis	181
13.4.	Gás de Proteção	182
13.4.1.	Influência da Densidade do Gás	182
13.4.2.	Influência do Calor Específico	182
13.4.3.	Influência da Energia de Ionização.....	183
13.4.4.	Mistura Argônio/Hidrogênio (Ar/H_2)	183
13.5.	Vantagens do Processo GTAW	184
13.6.	Limitações e Potenciais Problemas	184
14.	SOLDAGEM E CORTE A PLASMA (PAW)	187
14.1.	Tipos de Arco	190
14.1.1.	Arco Transferido	190
14.1.2.	Arco Não Transferido.....	190
14.2.	Técnicas de Trabalho da Soldagem por Plasma	191
14.3.	Preparação da Junta	192

14.4.	Parâmetros de Soldagem	192
14.4.1.	Comprimento e Tensão do Arco	192
14.4.2.	Orifício Constrictor	192
14.4.3.	Stick-out.....	193
14.4.4.	Consumíveis.....	193
14.4.5.	Metal de Adição.....	193
14.4.6.	Gás de Proteção	193
14.5.	Eletrodo.....	194
14.6.	Vantagens do Processo PAW	195
14.7.	Limitações e Potenciais Problemas	195
15.	SOLDAGEM MIG/MAG E ARAME TUBULAR (GMAW E FCAW)..	199
15.1.	Transferência Metálica nos Processos GMAW e FCAW.....	205
15.1.1.	Curto-circuito.....	206
15.1.2.	Globular.....	206
15.1.3.	Spray	206
15.2.	Equipamentos.....	207
15.2.1.	Fontes de Energia	207
15.2.2.	Tocha, Bicos de Contato e Bocais	208
15.2.3.	Alimentador de Arame.....	209
15.2.4.	Sistema de Controle.....	209
15.2.5.	Cabos Elétricos e Garras de Fixação	210
15.2.6.	Canalizações e Válvulas Redutoras	210
15.2.7.	Fonte de Gás.....	210
15.2.8.	Consumíveis	211
15.3.	Vantagens dos Processos GMAW e FCAW	213
15.4.	Limitações nos Processos GMAW e FCAW.....	213
16.	SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO (SAW)	217
16.1.	Fontes de Soldagem	221
16.2.	Fluxos	222
16.3.	Arames	223
16.4.	Principais Descontinuidades	224
17.	SOLDAGEM POR ELETROGÁS E ELETROESCÓRIA (EGW E ESW)	227
17.1.	Vantagens e Desvantagens.....	231
17.2.	Campos de Atuação	232
17.3.	Tecnologia do Processo	233
18.	SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA (RW)	237
18.1.	Princípios de Solda por Resistência	240
18.1.1.	Aquecimento	240
18.1.2.	Tempo	240
18.1.3.	Pressão	240
19.	OUTROS PROCESSOS DE SOLDAGEM	243
19.1.	Solda por Ultrassom	245
19.1.1.	Aplicação	246
19.1.2.	Fundamentos do Processo	247
19.1.3.	Tipos de Soldagem por Ultrassom	247
19.1.3.1.	Soldagem de Metais	248
19.1.3.2.	Soldagem de Termoplásticos	248
19.1.3.3.	Soldagem Próxima	248
19.1.3.4.	Soldagem Afastada.....	249

19.1.4.	Parâmetros de Soldagem	249
19.1.5.	Equipamento	249
19.2.	Soldagem por Fricção	250
19.3.	Soldagem a Laser	251
19.4.	Soldagem com Feixe de Elétrons	253
19.5.	Soldagem por Explosão	254
19.5.1.	Fundamentos do Processo	255
19.5.2.	Explosivos	255
19.5.3.	Parâmetros de Soldagem	256
20.	BRASAGEM	259
20.1.	Capilaridade	262
20.2.	Molhagem	262
20.3.	Metal de Base	262
20.4.	Aplicação	263
21.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	269
21.1.	Ensaio de Tração	272
21.2.	Ensaio de Dobramento	275
21.3.	Ensaio de Dureza	276
21.3.1.	Primeira Técnica	276
21.3.2.	Segunda Técnica	277
21.3.3.	Terceira Técnica	278
21.3.4.	Quarta Técnica	278
21.3.5.	Quinta Técnica	279
21.3.6.	Sexta Técnica	279
21.4.	Ensaio de Impacto Charpy	280
22.	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	283
22.1.	Ensaio Visual e Dimensional de Solda	286
22.2.	Ensaio de Líquidos Penetrantes	286
22.3.	Ensaio de Partículas Magnéticas	289
22.4.	Ensaio de Ultrassom	290
22.4.1.	Aplicação	291
22.4.2.	Princípios do Ensaio	292
22.4.3.	Equipamento	292
22.4.4.	Cristais	292
22.4.5.	Transdutor	292
22.5.	Ensaio de Radiografia Industrial	293
22.5.1.	Aplicação	294
22.5.2.	Equipamento de Raio X	295
22.5.3.	Equipamento de Raios Gama	295
22.6.	Ensaio de Emissão Acústica	295
22.7.	Ensaio de Correntes Parasitas	296
22.8.	Ensaio de Estanqueidade	296
22.9.	Ensaio de Termografia	297
REFERÊNCIAS	299	
GLOSSÁRIO	303	

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>EPS</i>	<i>Especificação de Procedimento de Soldagem.</i>
<i>EGW</i>	<i>Electrogas Welding.</i>
<i>ESW</i>	<i>Eletroslag Welding.</i>
<i>EXW</i>	<i>Explosion Welding.</i>
<i>FCAW</i>	<i>Flux-Cored Arc Welding.</i>
<i>FOW</i>	<i>Forge Welding.</i>
<i>FSW</i>	<i>Friction Stir Welding.</i>
<i>GMAW</i>	<i>Gas Metal Arc Welding.</i>
<i>GTAW</i>	<i>Gas Tungsten Arc Welding.</i>
<i>IEIS</i>	<i>Instrução de Especificação e Inspeção de Soldagem.</i>
<i>LBW</i>	<i>Laser Beam Welding.</i>
<i>MAG</i>	<i>Metal Active Gas.</i>
<i>MIG</i>	<i>Metal Inert Gas.</i>
<i>OAW</i>	<i>OxyAcetylene Welding.</i>
<i>PAW</i>	<i>Plasma Arc Welding.</i>
<i>RQPS</i>	<i>Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem.</i>
<i>RQS</i>	<i>Registro de Qualificação de Soldador.</i>
<i>RSQ</i>	<i>Relação de Soldadores Qualificados.</i>
<i>RW</i>	<i>Resistance Welding.</i>
<i>SAW</i>	<i>Submerged Arc Welding.</i>
<i>SMAW</i>	<i>Shielded Metal Arc Welding.</i>
<i>SW</i>	<i>Stud Welding.</i>
<i>TIG</i>	<i>Tungsten Inert Gas.</i>
<i>TW</i>	<i>Thermite Welding.</i>

C A P Í T U L O

1

INTRODUÇÃO À SOLDAGEM

PROCESSOS DE SOLDAGEM



INTRODUÇÃO À SOLDAGEM

1

CAPÍTULO

Produzir peças completas por soldagem pode ser realizado quando se trata de peças simples ou de pouca complexidade.



© Stockphoto.com/SueBurtonPhotography

Foto da Iron Bridge em Wales na Inglaterra.

É impraticável que peças com elevada complexidade sejam feitas de peça única. Tomemos o exemplo de um carro. É impensável que um carro seja feito de uma única peça, pois é um conjunto de diversas partes (em geral, mais de quinze mil). A própria carroceria é feita em várias placas e chapas que sofrem união para fazer o monobloco ou a carroceria e o chassi.

Mas qual é o melhor método de união?

Desde a idade do bronze, usava-se o forjamento, ou seja, o processo de aquecimento até a obtenção de metal rubro e martelamento até que as partes se unam e formem uma única peça. Esse processo tem limitações, como a necessidade de todas as partes estarem aquecidas, sendo necessário reaquecer sempre que a temperatura diminuir, além do deslocamento do local de martelamento até a forja e desta até a bigorna novamente.

Dos processos aqui descritos, o forjamento é o mais usual. Existem processos de forjamento em que não há aquecimento, porém, apenas para peças em metais não ferrosos ou para ferrosos de pequenas dimensões.

Há mais ou menos 2.500 anos apareceram os parafusos, que servem para a realização da união. Essa opção cria a necessidade de apertos após algum tempo de uso. Essa condição inviabiliza seu uso para peças muito complexas e que sofram vibração ou impacto.



©iStockphoto.com/saravutpo0

Ligaçāo por parafusos em estrutura metálica.

O uso de peças parafusadas em carrocerias de avião, por exemplo, é possível devido à constante rotina de intervenções de manutenção para a avaliação de necessidades de apertos, coisa não comum em outras estruturas.

Há cerca de 300 anos apareceram os rebites. Estes apresentam vantagens sobre o parafuso, porém uma desvantagem óbvia é a necessidade de cerca de 30% da área total estar destinada a uso por rebites. Um prédio feito com rebites possui cerca de 70% mais vigas do que um mesmo prédio feito por processo de soldagem.



©iStockphoto.com/Norasit Kaevalai

Rebites em nó de estrutura metálica.

A Torre Eiffel em Paris possui estrutura constituída por rebites, mas, se fosse de solda, a estrutura seria, pelo menos, 35% mais leve, segundo o ITA (JANUCKAITIS, 2011).

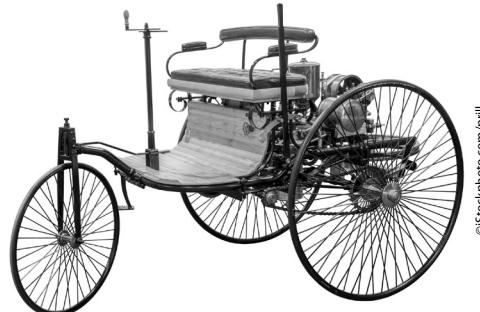
A soldagem elétrica apareceu no final do século XIX decorrente do aperfeiçoamento de diversas técnicas desde Humphry Davy até Oscar Kjellberg, passando por Nikolay Bernardos e Nikolay Slavyanov.

A soldagem por arco elétrico possui algumas vantagens óbvias, como a elevada produtividade, a redução de retrabalho e a possibilidade de trabalho em diversos materiais. Porém, as principais desvantagens são a necessidade de energia elétrica no ponto de soldagem; a capacitação e a qualificação de profissionais, onerosa e

lenta; os consumíveis de soldagem, como gases, arames, varetas, eletrodos, fluxos e outros, nem sempre disponíveis em todos os locais de trabalho.

A soldagem nasceu da necessidade de avanços tecnológicos, militares e industriais. A economia e a globalização atuais apenas foram possíveis devido aos avanços na produção, na produtividade e nos desenvolvimentos de processos e tecnologias associados à soldagem.

Vejamos o seguinte exemplo: um veículo produzido pelo Sr. Benz em 1885 levava alguns dias ou até semanas para ficar pronto, pois a produção era total e integralmente dependente dele.



Veículo Karl Benz.

©iStockphoto.com/pill

Atualmente um veículo leva menos de 24 horas para ser produzido. Os avanços na distribuição de tarefas e na montagem seriada, além da criação de robôs de soldagem e pintura, e de processos mais eficientes, desenvolveram esse mercado.



Linha montagem Automobilística.

©Stockphoto.com/tranino

Antigamente se pegava uma charrete, carroça ou outra estrutura preexistente e se colocava um motor com o intuito de aumentar a velocidade e garantir a possibilidade de andar por várias horas sem a necessidade de paradas para alimentar ou cuidar dos animais de tração.

Atualmente um veículo pode andar com conforto, silêncio e até mesmo sem a necessidade de um condutor, pois os avanços tecnológicos assim o permitem.

1.1. PROCESSOS DE SOLDAGEM

Há muitas formas de dividir os processos de soldagem, usamos aqui a divisão em processos por meios com ou sem pressão:

- » Processos de soldagem com pressão por fonte mecânica:
 - » Soldagem a frio (CW).
 - » Soldagem por pressão a quente (HPW).
 - » Soldagem por forjamento (FOW).
 - » Colaminação (ROW).
 - » Soldagem por fricção (FRW).
 - » Soldagem por ultrassom (USW).
 - » Soldagem por explosão (EXW).
 - » Soldagem por difusão (DFW).
- » Processos de soldagem com pressão por fonte química:
 - » Soldagem a gás com pressão (PGW).
 - » Soldagem por forjamento (FOW).
- » Processos de soldagem com pressão por fonte elétrica:
 - » Soldagem de prisioneiros (SW).
 - » Soldagem com arco magneticamente impelido (MIAB).
 - » Soldagem por resistência a ponto(RSW).
 - » Soldagem por resistência de costura (RSEW).
 - » Soldagem por projeção (PW).
 - » Soldagem por centelhamento (FW).
 - » Soldagem por resistência de topo (UW).
 - » Soldagem por indução (HFRW).
- » Processos de soldagem com fusão por fonte química:
 - » Soldagem a gás (OFW).
 - » Brasagem com tocha (TB).
 - » Soldagem aluminotérmica (TW).
 - » Brasagem reativa/união com fase líquida transiente (TLPB).
- » Processos de soldagem com fusão por energia radiante:
 - » Soldagem a laser (LBW).
 - » Soldagem por feixe de elétrons (EBW).
 - » Soldagem ou brasagem com infravermelho (IB).
 - » Soldagem com micro-ondas.
 - » Brasagem em forno (FB).
 - » Brasagem por imersão (DB).
- » Processos de soldagem com fusão por arco elétrico não consumível:
 - » Soldagem a gás com eletrodo de tungstênio (GTAW ou TIG).
 - » Soldagem a plasma (PAW).
 - » Soldagem com eletrodo de carvão (CAW).
 - » Soldagem de prisioneiros (SW).
 - » Soldagem com hidrogênio atômico (AHW).

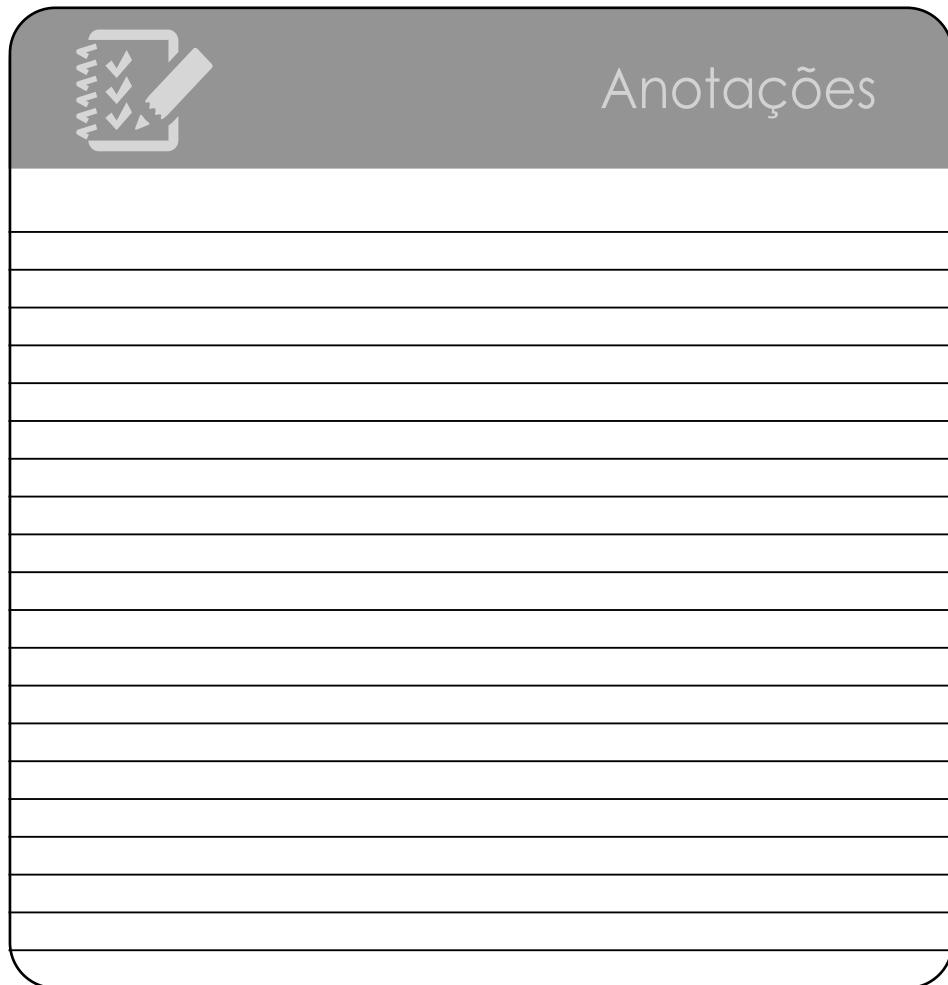
- » Soldagem com arco magneticamente impelido (MIAB).
- » Processos de soldagem com fusão por arco elétrico com eletrodo consumível:
 - » Soldagem a gás com eletrodo metálico (GMAW ou MIG/MAG).
 - » Soldagem com eletrodos revestidos (SMAW).
 - » Soldagem com arame tubular (FCAW).
 - » Soldagem ao arco submerso (SAW).
 - » Soldagem eletrogás (EGW).
- » Processos de soldagem com fusão por resistência elétrica:
 - » Soldagem a ponto (RSW).
 - » Soldagem de costura (RSEW).
 - » Soldagem de projeção (RPW).
 - » Soldagem por centelhamento (FW).
 - » Soldagem de topo (UW).
 - » Soldagem por percussão (PEW).
 - » Soldagem/brasagem por indução (HFRW/IB).
 - » Soldagem por eletroescória (ESW).

Os processos de soldagem assim divididos ficam mais facilmente compreendidos por seus princípios de funcionamento, suas características térmicas ou suas características de máquinas, fontes ou acessórios utilizados.

Exercícios

1. A soldagem é um processo recente e, portanto, não existem evidências de processos de união anteriores a 1800.
 - a) Verdadeiro.
 - b) Falso.
2. O processo de soldagem elétrica foi desenvolvido por Oscar Kjelberg e melhorado por Humphry Davy.
 - a) Verdadeiro.
 - b) Falso.
3. As adaptações nos processos de soldagem possibilitaram desenvolvimento de novas técnicas, entre elas o processo GTAW.
 - a) Verdadeiro.
 - b) Falso.

4. Metais não ferrosos são soldados apenas por processos laser e plasma, ou seja, antes desses processos a soldagem desses materiais era impossível.
 - a) Verdadeiro.
 - b) Falso.
5. Exemplos de estruturas soldadas:
 - a) Máquinas e equipamentos agrícolas.
 - b) Estruturas metálicas para prédios e construção civil.
 - c) Navios e demais embarcações.
 - d) Todos os descritos acima.
 - e) Nenhuma das alternativas.





Anotações



Anotações

C A P Í T U L O

2

TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA

DEFINIÇÕES DE SOLDAGEM

•
SIMBOLOGIA DA SOLDAGEM



TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA

2

CAPÍTULO

A simbologia de soldagem foi desenvolvida para facilitar desenhos, projetos ou outras formas de representação gráfica. Ela atende a grande parte das necessidades de informação de preparação, execução, inspeção e controles que a junta soldada pode ter. O mesmo pensamento pode-se ter com relação à terminologia da soldagem, pois o vernáculo usado em soldagem é próprio e deve ser usado em conformidade com as expectativas do projeto.

Ao usar termos e símbolos próprios, todos os envolvidos, desde projetistas, soldadores, montadores, inspetores e engenheiros, podem ter certeza de que o previsto será realizado e serão facilmente identificados os desvios e não conformidades ocorridas.

2.1. DEFINIÇÕES DE SOLDAGEM

Um número elevado de processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é classificado como soldagem, porém o uso de processos de revestimentos, deposição de materiais e outras aplicações, como enchimento de cavidades, não podem ser classificados como soldagem.

As definições usadas neste material estão estabelecidas pela NBR 10474 de 2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015):

- » **Abertura de raiz:** Mínima distância que separa os componentes a serem unidos por soldagem ou processos afins.
- » **Alma do eletrodo:** Núcleo metálico de um eletrodo revestido, cuja seção transversal apresenta uma forma circular maciça.
- » **Alicate porta eletrodo:** Dispositivo utilizado para prender mecanicamente o eletrodo enquanto este conduz corrente elétrica na soldagem.
- » **Atmosfera protetora:** Envoltória de gás que circunda a parte a ser soldada, sendo esse gás com composição controlada com relação à sua composição química, pressão, vazão etc.
- » **Atmosfera redutora:** Atmosfera protetora quimicamente ativa que, a temperaturas elevadas, reduz óxidos de metais ao seu estado metálico.
- » **Brasagem:** Processo de soldagem em que o metal de adição tem sua temperatura (ou faixa) de fusão compreendida entre as temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal de base e acima de, aproximadamente, 450 °C.

Nesse processo, o metal de base não se funde, apenas o metal de adição se funde e entra na junta por capilaridade.

- » **Diluição:** Modificação na composição química de um metal de adição causado pela mistura do metal base ou do metal de solda anterior. É medido em porcentagem do metal de base ou do metal de solda anterior no cordão de solda.
- » **Eletrodo de carvão:** Eletrodo não consumível usado em corte ou soldagem a arco elétrico, consistindo de uma vareta de carbono ou grafite, que pode ser revestida com cobre ou outros revestimentos.
- » **Eletrodo revestido:** Eletrodo metálico consumível, revestido por um composto de matérias orgânicas e/ou minerais, com dosagens bem definidas.
- » **Eletrodo de tungstênio:** Eletrodo metálico não consumível, usado em soldagem ou corte a arco elétrico, feito principalmente de tungstênio.
- » **Eletrodo tubular:** Metal de adição composto, consistindo de um tubo de metal ou outra configuração oca, contendo produtos químicos que formam uma atmosfera protetora, desoxidam o banho, estabilizam o arco, formam escória ou que contribuem com elementos de liga para o metal de solda. Proteção adicional externa pode ou não ser usada. Ensaios que, quando realizados sobre peças acabadas ou semiacabadas, não prejudicam nem interferem com o futuro delas.
- » **Escória:** Resíduo não metálico proveniente da dissolução do fluxo ou revestimento e impurezas não metálicas na soldagem e brasagem.
- » **Face da raiz:** Parte da face do chanfro adjacente à raiz da junta soldada.
- » **Face da solda:** Superfície exposta da solda, pelo lado por onde a solda foi executada.
- » **Fluxo de soldagem:** Composto mineral granular cujo objetivo é proteger a poça de fusão, purificar a zona fundida, modificar a composição química do metal de solda e influenciar as propriedades mecânicas.
- » **Garganta de solda:** Dimensão em ângulo determinada de três modos:
 - » **Teórica:** Dimensão de uma solda em ângulo que determina a distância entre a face da solda sem o reforço e a raiz da junta sem a penetração.
 - » **Efetiva:** Dimensão de uma solda em ângulo que determina a distância entre a raiz da junta até a solda sem o reforço.
 - » **Real:** Dimensão de uma solda em ângulo que determina a distância entre a raiz da solda até a face desta, inclusive o reforço.
- » **Gás de proteção:** Gás utilizado para prevenir contaminação indesejada pela atmosfera.
- » **Gás ativo:** Gás que faz a proteção da soldagem, porém participa metalurgicamente da poça de fusão, podendo ser ativo redutor ou ativo oxidante.
- » **Gás inerte:** Gás que faz somente a proteção da soldagem, não participando metalurgicamente da poça de fusão.