



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMAZONAS

**GETRO FELIPE SIMÕES LÊDO**

**ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DE SOLDAS DE FILETE PRODUZIDAS PELO  
PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO**

**MANAUS - AM**

**2016**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMAZONAS

**GETRO FELIPE SIMÕES LÊDO**

**ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DE SOLDAS DE FILETEPRODUZIDAS PELO  
PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob a orientação do MSc. Sávio Raider Matos Sarkis.

**MANAUS - AM**

**2016**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



GETRO FELIPE SIMÕES LÊDO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do MSc. Sávio Raider Matos Sarkis.

Aprovado em 06 /12 /2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. MSc. Sávio Raider Matos Sarkis  
Instituto Federal do Amazonas - IFAM  
Presidente Banca Examinadora

---

Prof. MSc. Marcelo Martins da Gama  
Instituto Federal do Amazonas - IFAM  
Membro Examinador

---

Profª. MSc. Andréa Regina L. Nascimento  
Instituto Federal do Amazonas – IFAM  
Membro Examinador



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMAZONAS

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico à minha esposa Gabriela Lêdo, aos meus pais Waldemir e Georgete Lêdo, aos meus filhos Jhennifer e Giovanni Lêdo e às minhas afilhadas Eduarda e Juliane Melo, os quais sempre nos deram todo o apoio necessário durante esta longa jornada.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor Deus e a nosso Senhor Jesus Cristo pela saúde, sabedoria, motivação e pela oportunidade de escrever uma nova página da minha história.

Ao professor Sávio Raider Matos Sarkis pela orientação e enorme paciência.

À professora Andrea Regina pelos esclarecimentos durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Waldemir e Georgete, exemplos de fé, boa conduta e perseverança, os quais sempre me motivaram e tornaram este sonho possível.

À minha linda morena Gabriela por todo amor, carinho, paciência e compreensão durante este longo trajeto, a qual sempre se mostrou sábia, perseverante, alegre e motivada mesmo em meio a tantas batalhas e momentos difíceis.

Aos meus filhos Jhennifer e Giovanni, fontes de inspiração, amor, alegria e motivação.

À minha mãe do coração Yêda e minhas irmãs Grethienn e Gleicy por todo apoio, amor e carinho.

Aos meus colegas de curso, em especial aos amigos mais chegados que irmãos: Erico Drummond, Joel Sarmiento e Vitor Maia, por todo apoio e momentos grande alegria e descontração proporcionados.

Aos colegas de trabalho da FHAJ, Jéssica, Jésia, Keila, Paulo, Agemilson e Ely, por toda ajuda e companheirismo.

Aos professores do IFAM por sua dedicação e contribuição para minha formação profissional.

Muito obrigado a todos.

Toda honra, glória e louvor sejam dados a Deus!



## RESUMO

A enorme necessidade de redução de custos tem se mostrado um fator determinante para garantir a sobrevivência e competitividade de empresas de diversos ramos. A larga aplicação de soldas de filete, cerca de 80% de toda produção mundial, gerou a motivação para elaborar o presente estudo sobre o dimensionamento de soldas de filete produzidas pelo processo de soldagem a arco elétrico por eletrodo revestido. O presente estudo tem por objetivo permitir a avaliação da relação entre a resistência e o comprimento do cordão de solda, bem como discutir o comportamento da eficiência e da taxa de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 em função de valores ótimos de corrente, além de determinar os custos do metal de solda utilizando diferentes eletrodos. Isso nos permitiu efetuar uma avaliação quantitativa sobre cada um dos fatores considerados, além de possibilitar uma discussão qualitativa sobre a influência da corrente de soldagem, da taxa e eficiência de deposição dos eletrodos considerados e das discontinuidades na elevação dos custos de soldagem.

**Palavras-chave: Soldagem, Eletrodo Revestido, Custos.**



## ABSTRACT

The enormous need for cost reduction has proved to be a determining factor in ensuring the survival and competitiveness of companies in various industries. The wide application of fillet welds, about 80% of all world production, generated the motivation to elaborate the present study on the dimensioning of fillet welds produced by the process of welding to electric arc by coated electrode. The aim of the present study was to evaluate the relationship between the resistance and the length of the weld bead, as well as to discuss the behavior of the efficiency and deposition rate of the E6013 and E7018 electrodes as a function of optimum current values, as well as to determine the costs of welding metal using different electrodes. This allowed us to perform a quantitative evaluation on each of the factors considered, besides allowing a qualitative discussion on the influence of the welding current, the rate and efficiency of deposition of the electrodes considered and the discontinuities in the increase of the welding costs.

**Keywords:** Welding. Coated Electrode, Costs.



## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>OBJETIVOS</b> .....	16
<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	16
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	16
<b>1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
<b>1.1 Breve histórico sobre soldagem</b> .....	17
<b>1.2 Definição de soldagem</b> .....	20
<b>1.3 Classificação dos processos de soldagem</b> .....	20
<b>1.4 Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW)</b> .....	22
1.4.1 Funções do revestimento dos eletrodos. ....	24
1.4.2 Classes de revestimento dos eletrodos. ....	26
1.4.3 Classificação dos eletrodos revestidos conforme AWS .....	29
1.4.4 Características individuais dos eletrodos revestidos .....	33
<b>1.5 Terminologia em soldagem</b> .....	35
<b>1.6 Tipos de solda</b> .....	40
<b>1.7 Posições de soldagem com eletrodos</b> .....	43
<b>1.8 Simbologia de solda</b> .....	45
<b>1.9 Descontinuidades em juntas soldadas</b> .....	48
1.9.1 Descontinuidades dimensionais. ....	49
1.9.2 Descontinuidades estruturais .....	50
<b>1.10 Determinação dos custos em soldagem.</b> .....	58
<b>1.11 Dimensionamento de solda.</b> .....	62
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	68
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	69
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão conforme patente Bernardes. ....	18
Figura 2 – Evolução dos processos de soldagem. ....	19
Figura 3 – Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união. ....	21
Figura 4 – Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. ....	22
Figura 5 – Processo SMAW. ....	23
Figura 6 – Classificação de eletrodos revestidos para aço carbono. ....	29
Figura 7 – Classificação de eletrodos revestidos para aços de baixa liga. ....	32
Figura 8 – Tipos de junta. ....	35
Figura 9 – Tipos de chanfro. ....	35
Figura 10 – Chanfros usados geralmente com os diferentes tipos de junta. ....	36
Figura 11 – Características dimensionais de chanfros usados em soldagem. ....	37
Figura 12 – Dimensões e regiões de solda de topo. ....	37
Figura 13 – Dimensões e regiões de solda de filete. ....	37
Figura 14 - Seção transversal de uma solda de topo por fusão (esquemática). ....	38
Figura 15 – Efeito da excentricidade da alma do eletrodo. ....	39
Figura 16 – Excentricidade da alma do eletrodo. ....	39
Figura 17 – Taxa de deposição x Amperagem para vários eletrodos. ....	40
Figura 18 – Tipos de solda. ....	41
Figura 19 – Tipos de solda de entalhe. ....	42
Figura 20 – Uso típico de soldas de filete. ....	43
Figura 21 – Soldas tampão e de ranhura combinadas com soldas de filete. ....	43
Figura 22 – Posições de soldagem com eletrodos. ....	44
Figura 23 – Posições de soldagem para soldas de filete. ....	44
Figura 24 – Posições de soldagem para soldas em tubulações. ....	45
Figura 25 – Localização dos elementos de um símbolo de soldagem. ....	46
Figura 26 – Tipos básicos de soldas e seus símbolos. ....	46
Figura 27 – Sete variações de soldagem de chanfro e seus símbolos. ....	47
Figura 28 – Exemplos de soldas de filete e seus símbolos. ....	47
Figura 29 – Símbolos suplementares. ....	48
Figura 30 – Exemplos de símbolos em soldas de chanfro. ....	48
Figura 31 – Distorções. ....	49
Figura 32 – Junta incorreta. ....	49
Figura 33 – Dimensões incorretas das juntas. ....	50
Figura 34 – Falta de penetração. ....	50
Figura 35 – Falta de penetração em parte do cordão de solda. ....	50
Figura 36 – Falta de fusão em parte do cordão de solda. ....	51
Figura 37 – Excesso de respingos I. ....	52
Figura 38 – Excesso de respingos II. ....	52
Figura 39 – Mordeduras no cordão de solda. ....	53
Figura 40 – Trincas propagadas devido ao trabalho da peça. ....	54
Figura 41 – Porosidade alinhada. ....	55
Figura 42 – Porosidade agrupada. ....	56
Figura 43 – Porosidade vermiforme. ....	56
Figura 44 – Inclusão de escória. ....	57
Figura 45 – Cálculo da massa de metal depositado (m <sub>s</sub> ). ....	59



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMAZONAS

Figura 46 – Exemplo de cálculo de $A_s$ .....	59
Figura 47 – Garganta efetiva de solda. ....	62
Figura 48 – Filete de solda.....	65
Figura 49 – Dimensões máximas dos lados de solda de filete. ....	66
Figura 50 – Composição das forças de cisalhamento no filete de solda. ....	67



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Condições de emprego dos processos de soldagem. ....	19
Quadro 2 – Classificação dos processos de soldagem de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção. ....	21
Quadro 3 – Descrição dos consumíveis para soldagem de aços carbono, segundo a AWS. ...	31



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos eletrodos para aços carbono. ....	30
Tabela 2 – Requisitos químicos para eletrodos revestidos para aços carbono. ....	30
Tabela 3 – Códigos de composição química (válidos para aços liga). ....	32
Tabela 4 – Motivos e soluções para falta de fusão/penetração. ....	51
Tabela 5 – Motivos e soluções para excesso de respingos. ....	53
Tabela 6 – Motivos e soluções para mordeduras. ....	54
Tabela 7 – Possíveis motivos e soluções para trincas. ....	55
Tabela 8 – Motivos e soluções para evitar porosidade. ....	56
Tabela 9 – Motivos e soluções para evitar inclusão de escória. ....	57
Tabela 10 – Área da seção transversal. ....	59
Tabela 11 – Taxas máximas para depreciação estabelecidas pela SRF. ....	61
Tabela 12 – Dimensões mínimas da garganta de solda de entalhe com penetração parcial. ...	63
Tabela 13 – Dimensões mínimas da perna de solda de filete em mm. ....	64



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) – E6013. ....	69
Gráfico 2 – L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) – E6013. ....	70
Gráfico 3 – L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) – E7018. ....	71
Gráfico 4 – L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) – E7018. ....	72
Gráfico 5 – Eficiência do eletrodo (%) x Corrente ótima (A). ....	73
Gráfico 6 – Taxa de deposição do eletrodo (kg/h) x Corrente ótima (A) – E6013 e E7018. . .	73
Gráfico 7 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013. ....	75
Gráfico 8 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013. ....	75
Gráfico 9 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013. ....	76
Gráfico 10 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013. ....	76
Gráfico 11 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E7018. ....	77
Gráfico 12 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E7018. ....	78
Gráfico 13 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E7018. ....	78
Gráfico 14 – L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E7018. ....	79



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EUA – Estados Unidos da América  
SMAW – Shielded Metal ArcWelding  
ESAB – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget  
AWS – American Welding Society  
NBR 8800 – Norma Brasileira 8800  
ASME – American Society of Mechanical Engineers  
HIC – Hydrogen Induced Cracking  
ZF – Zona Fundida  
ZTA – Zona Termicamente Afetada  
ASM – American Society for Metals  
SRF – Secretaria da Receita Federal  
SEINF – Secretaria de Estado de Infraestrutura

## INTRODUÇÃO

Dos inúmeros processos de soldagem conhecidos, o de soldagem por eletrodo revestido é um dos mais utilizados na fabricação de estruturas metálicas e outros produtos no mundo. As soldas de filete correspondem a cerca 80% de todos os tipos de solda aplicados. Este relevante percentual de utilização em relação a outros tipos de soldas caracteriza-se por tratar-se de um processo muito versátil e de fácil adaptação a condições com certo grau de dificuldade, como aplicações em campo e locais de difícil acesso sujeitos à ação do vento.

Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011), soldagem é um processo utilizado para obter a união de materiais metálicos e não metálicos, com ou sem a aplicação de pressão ou materiais aditivos, cuja obtenção está sujeita ao aquecimento dos materiais até uma temperatura determinada.

As normas técnicas NBR 8800/08 e AWS D1.1 (2010) fornecem critérios de dimensionamento para que projetos de estruturas metálicas ligadas por soldagem atendam aos requisitos de segurança e qualidade desejados.

Diante da severa crise econômica que atualmente enfrentamos, a redução de custos tornou-se, dentre outros, um fator extremamente importante para que empresas de diversos setores se mantenham vivas e competitivas no mercado. Das muitas variáveis envolvidas no cálculo do custo de soldagem escolhemos a variável custo do metal de adição, devido aos diversos fatores que podem ser melhorados ou evitados para que se obtenha um custo mínimo com qualidade da solda dentro dos critérios de dimensionamento normatizados. Para simulações mais fiéis possíveis às situações reais, utilizaremos dados da SEINF – Secretaria de Estado de Infraestrutura do Amazonas e o software a ser utilizado para geração algoritmos para simulação será o Matlab.

Devido a todas as características apresentadas, surgiu a necessidade de se elaborar um estudo quantitativo sobre o dimensionamento de soldas de filetes fabricadas pelo processo de soldagem por eletrodo revestido.

Como objetivos específicos do presente trabalho temos: avaliar o comportamento da resistência do metal de solda em função da variação do comprimento do filete; discutir o comportamento da eficiência e da taxa de deposição em função de valores ótimos de corrente; determinar os custos do metal de solda utilizado os diferentes eletrodos.

Inicialmente é imprescindível efetuarmos uma revisão sobre o processo de soldagem por eletrodo revestido, suas características, propriedades, definições de termos básicos, tipos

de eletrodos, propriedades e funções de seus revestimentos, descontinuidades, dimensionamento de solda e cálculo de custos. É o que veremos nos tópicos posteriores.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GERAL**

Avaliar a quantidade e respectivo custo de solda de filete em ligações soldadas de estruturas metálicas de aço, com base no dimensionamento estabelecido por normas vigentes.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a relação da resistência do metal de solda versus comprimento do cordão de solda de filete.
- Discutir o comportamento da eficiência e da taxa de deposição de diferentes eletrodos na soldagem de filetes em função de valores ótimos de corrente elétrica.
- Determinar os custos do metal de solda utilizando diferentes eletrodos.

## 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1 Breve histórico sobre soldagem

A soldagem foi largamente utilizada na Antiguidade e na Idade Média para a fabricação de armas e outros instrumentos cortantes. O ferro, cuja fabricação iniciou-se por volta do ano de 1500 a. C., era produzido por redução direta, processo no qual o minério de ferro é misturado com carvão em brasa e soprado com ar, provocando a redução do óxido de ferro pelo carbono e produzindo ferro metálico sem a fusão do material. Devido ao baixo teor de carbono do ferro obtido por redução (inferior a 0,1%) e ao alto custo do aço, ferramentas eram fabricadas com tiras de aço soldadas nos locais de corte e endurecidas por têmpera. Assim a soldagem foi um processo muito importante na metalurgia durante este período (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Essa importância começou a decair nos séculos XII e XIII, com o desenvolvimento da tecnologia para obtenção de grandes quantidades, no estado fundido, de ferro fundido com a energia gerada por rodas d'água e, nos séculos XIV e XV, com o desenvolvimento do alto forno. As bases do processo de soldagem começaram a mudar, principalmente, a partir dos experimentos de Sir Humphrey Davy (1801 a 1806) com o arco elétrico, da descoberta do acetileno por Edmund Davye do desenvolvimento de fontes de energia elétrica, o que possibilitou a criação dos processos de soldagem por fusão (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Ainda segundo os mesmos autores o início da fabricação e utilização do aço na forma de chapas tornou necessário o desenvolvimento de novos processos de união para a fabricação de equipamentos e estruturas. A primeira patente de um processo de soldagem, obtida na Inglaterra por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky em 1885, a qual foi baseada em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada. Em torno de 1890 N. G. Slavianoff, na Rússia, e Charles Coffin, nos EUA, desenvolveram a soldagem a arco elétrico com eletrodo metálico nú. Em 1907 Oscar Kjelberg (Suécia) patenteia o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido, que originalmente possuía revestimento constituído de uma camada de cal com o objetivo de estabilizar o arco. Avanços subsequentes transformaram este processo no mais utilizado do mundo.

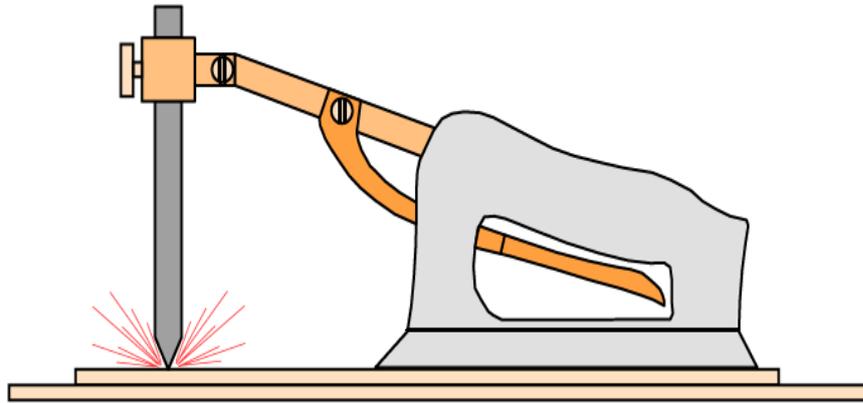


Figura 1 – Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão conforme patente Bernardes.  
Fonte: MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2011.

Antes dos trabalhos de Slavianiff e Kjellberg destacamos algumas outras criações que possuem grande importância. Em 1886, Thompson inventou o processo de soldagem por resistência elétrica; em 1895, Goldschmitt desenvolveu a solda térmite e, em 1901, a chama oxiacetilênica foi empregada com absoluto sucesso na união de materiais metálicos por Fouché e Piccard. Pode-se afirmar que os anos compreendidos entre 1885 e 1901 constituíram a primeira fase áurea da Engenharia de Soldagem (OKUMURA e TANIGUSH, 1982).

Em 1926 temos o começo da segunda fase áurea da Engenharia de soldagem, graças ao trabalho de desenvolvimento do processo de soldagem por hidrogênio atômico, idealizado por Lungumir. Em seguida, Horbart e Denver patentearam o processo de soldagem em atmosfera de gás inerte, cujo emprego é largamente difundido nos dias atuais. Em 1935 Kennedy apresentava seus trabalhos sobre um método automatizado de soldagem, cujo deu origem à soldagem por arco submerso. Imediatamente a automatização do processo de soldagem teve seus reflexos na qualidade das juntas soldadas, as quais experimentaram uma melhoria considerável (OKUMURA e TANIGUSH, 1982).

O processo de soldagem teve o seu ápice durante a II Guerra Mundial, por conta da fabricação de navios e aviões soldados (WAINER, BRANDI e MELLO, 2009). O rápido progresso da ciência e da tecnologia, a partir dos anos 50, permitiu um novo impulso à Engenharia de Soldagem. Durante esta terceira fase áurea, vários processos foram patenteados, dentre os quais podemos destacar os métodos de soldagem por pressão a frio, por atrito, em atmosfera de gás ativo ou CO<sub>2</sub>, por eletroescória, a ultrassônica, por feixe de elétrons, a plasma, por laser e outros mais (OKUMURA e TANIGUSH, 1982).

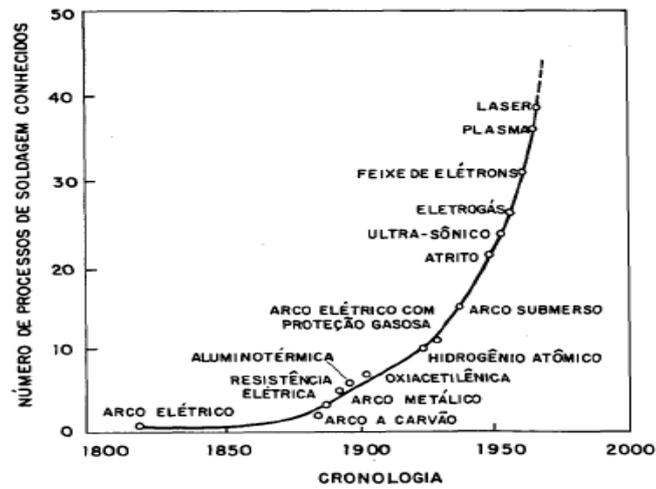


Figura 2 – Evolução dos processos de soldagem.  
 Fonte: OKUMURA E TANIGUSH, 1982.

Os diversos processos de soldagem são utilizados para fabricar produtos e estruturas metálicas, aviões e veículos espaciais, navios, locomotivas, veículos ferroviários e rodoviários, pontes, prédios, oleodutos, gasodutos, plataformas marítimas, reatores nucleares e periféricos, trocadores de calor, utilidades domésticas, componentes eletrônicos e inúmeros outros produtos. É praticamente impossível não encontrarmos em nosso cotidiano uma parte soldada ou colada (WAINNER, BRANDI e MELLO, 1992).

Materiais e espessuras	Processos de soldagem														
	Eletrodo revestido	Arco submerso	MIG ou MAG	Elet. tubular	TIG	Plasma	Eletroscófia	Resistência	Oxigás	Feixe de elétrons	Laser	Brasagem	Soldagem branca	Difusão	Atrito
Aço-carbono	F	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x
	M	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x
Aço de baixa liga	F	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
Aço inoxidável	F	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
Ferro fundido	I	x	x	x	x							x			
	M	x	x	x	x							x			
Níquel e suas ligas	F	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x
	M	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x
Alumínio e suas ligas	F			x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	M			x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
Titânio e suas ligas	F			x	x			x	x	x	x			x	x
	M			x	x			x	x	x	x			x	x
Cobre e suas ligas	F			x	x				x	x		x	x		x
	M			x	x				x	x		x	x		x

Espessuras: F = até 3 mm I = de 3 a 6 mm M = de 6 a 19 mm G = acima de 19 mm

Quadro 1 – Condições de emprego dos processos de soldagem.  
 Fonte: WAINNER, BRANDI e MELLO, 1992.

## 1.2 Definição de soldagem

Na literatura encontramos várias maneiras para definir soldagem, mas as diferentes definições podem ser consideradas praticamente equivalentes. A norma alemã define a soldagem como sendo um processo metalúrgico de união de metais ou ligas metálicas, devendo os materiais se encontrar em seu estado fundido ou pastoso (OKUMURA E TANIGUSH, 1982). PFEIL e PFEIL (2009) assinalam que a solda é um tipo de união por coalescência do material, cuja obtenção é dada por fusão das partes adjacentes. PINHEIRO (2005) considera que a solda é a união de materiais, a qual é obtida por fusão das partes adjacentes.

Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011) podem ser encontradas na literatura as seguintes definições para soldagem:

- Processo de união de materiais metálicos por fusão.
- Operação que tem o objetivo de obter a união de duas ou mais peças, garantindo na junta a continuidade das propriedades físico-químicas.
- Processo de união de materiais, usado para obter a coalescência (união) local de materiais metálicos e não metálicos, podendo ou não haver aplicação de pressão ou material de adição, cuja obtenção é dada por aquecimento até uma temperatura determinada.
- Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza semelhante às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.

## 1.3 Classificação dos processos de soldagem

Segundo Okumura e Tanigush (1982), os processos de soldagem são divididos em 3 grandes classes:

- Soldagem por fusão: Processo no qual as partes são levadas ao estado de fusão por meio de energia elétrica ou química, não havendo a aplicação de pressão.
- Soldagem por pressão: Processo no qual as partes são coalescidas e pressionadas uma contra a outra.

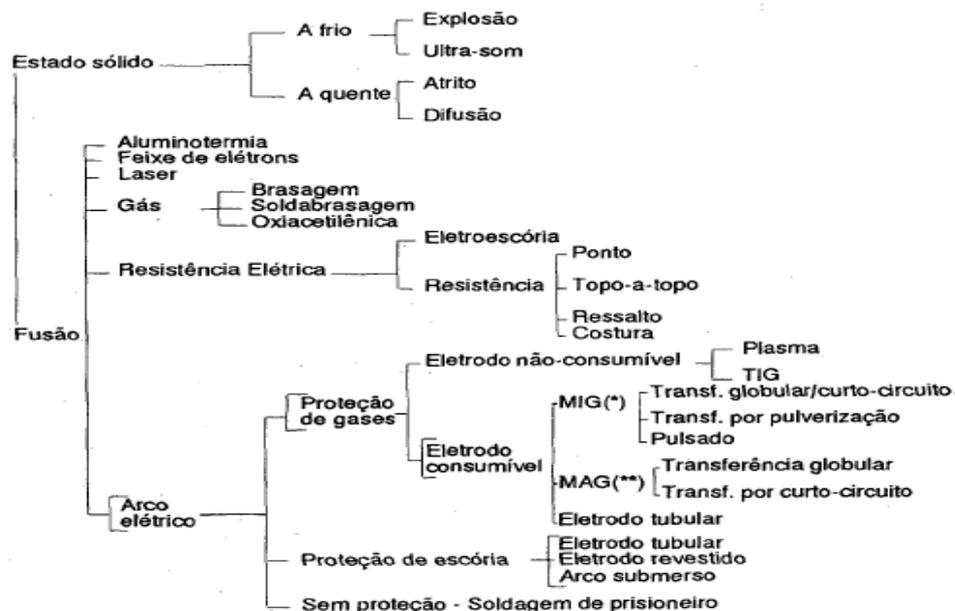
- Brasagem: Processo no qual as partes são unidas por meio de uma liga metálica de baixo ponto de fusão. Por este método o metal de base não sofre fusão.

Segundo WAINER, BRANDI E MELLO (1992) os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte de energia ou pela natureza da união, conforme quadro 2 e figura 3:

Fonte de Energia		Tipo de proteção					
		Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo (escória)	Sem proteção	
Mecânica					N	Explosão Atrito Ultra-som	
Química	Chama	N		Oxiacetilênica			
	Reação exotérmica	N			Aluminotermia		
Elétrica	Resistência elétrica	N	N	N	Eletroescória	Topo-a-topo Ponto Ressalto Costura	
	Arco elétrico	Eletrodo consumível	N	MIG	MAG	Eletrodo revestido Arco submerso	Soldagem de prisioneiros
		Eletrodo não consumível	N	TIG			
Energia radiante	Eletromagnética		Laser		N	N	
	Partículas	Feixe de elétrons		N	N	N	

Quadro 2 – Classificação dos processos de soldagem de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção.

Fonte: WAINNER, BRANDI e MELLO, 1992.



Observ.: (\*) com argônio ou hélio.

(\*\*) com argônio, oxigênio, CO<sub>2</sub> ou misturas desses gases.

Figura 3 – Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.

Fonte: WAINNER, BRANDI e MELLO, 1992.

#### 1.4 Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW)

O processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding - SMAW), também conhecido como soldagem manual a arco elétrico, é o mais largamente utilizado dos vários processos de soldagem. A soldagem é realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de eletrodo metálico revestido e a mesa de trabalho. O calor produzido pelo arco causa a fusão do metal de base, da alma do eletrodo e do revestimento. As gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão e protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flui em direção à superfície da poça de fusão, evitando a contaminação do metal de solda pela atmosfera durante a solidificação (ESAB – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget, empresa multinacional fabricante de máquinas e equipamentos para soldagem, 2005).



Figura 4 – Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.  
Fonte: ESAB, 2005.

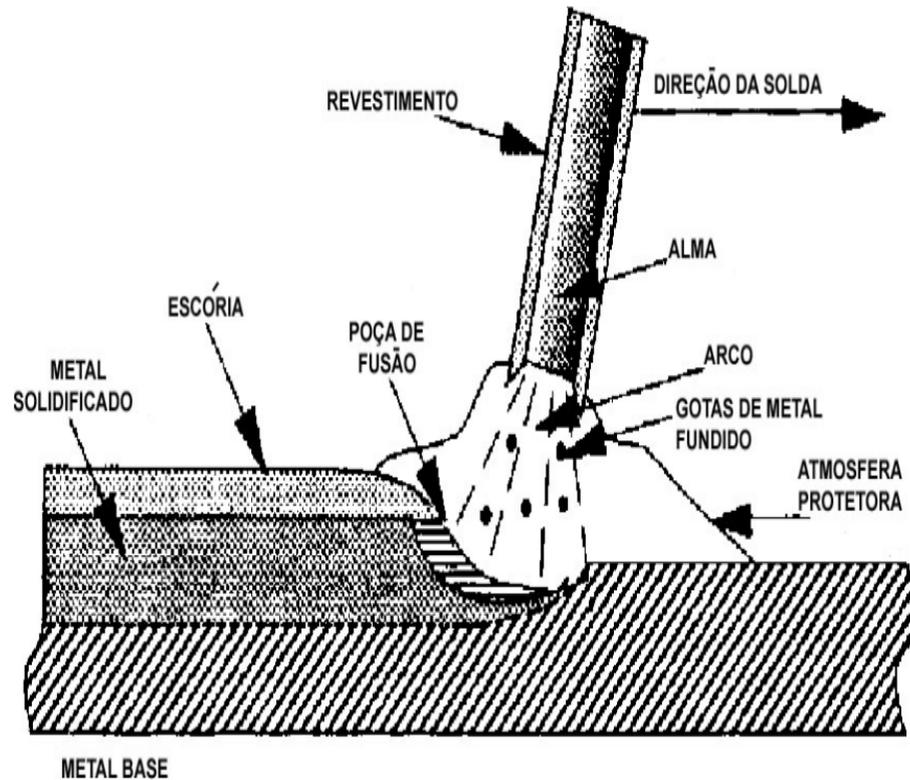


Figura 5 – Processo SMAW.  
Fonte: NERIS, 2012.

Uma pequena depressão no metal de base é formada pelo sopro das forças do arco e pelo impacto dos glóbulos de metal fundido, a qual recebe o nome de cratera. A distância medida no centro do arco, da extremidade do eletrodo até o fundo da cratera é chamada comprimento do arco. O comprimento do arco deve ser mínimo (variando na faixa entre 3 e 4 mm ou ainda de 0,5 a 1,1 mm o diâmetro da alma do eletrodo), com o objetivo de reduzir a chance de os glóbulos do metal em fusão entrarem em contato com a atmosfera, absorvendo oxigênio e nitrogênio, os quais tem efeito bastante adverso nas propriedades do metal depositado (NERIS, 2012).

A coluna do arco compreende desde fundo da cratera até o glóbulo em fusão da ponta do eletrodo. Alguns pesquisadores afirmam que a temperatura do gás no centro do arco ao longo de seu eixo é de 6000 °C, a temperatura do catodo é de 3200 °C e a do anodo de 3400 °C (NERIS, 2012).

Dentre as principais vantagens deste processo podemos citar a possibilidade de diversas formulações para o revestimento, o que implica em uma grande versatilidade em termos de ligas soldáveis, a operacionalidade e características mecânicas e metalúrgicas do metal depositado, o custo relativamente baixo e a simplicidade do equipamento necessário,

comparados com outros processos e a possibilidade do uso em locais de difícil acesso ou abertos, submetidos à ação do vento (NERIS, 2012).

#### 1.4.1 Funções do revestimento dos eletrodos.

Segundo NERIS (2012), os eletrodos revestidos são constituídos basicamente por uma alma metálica coberta por um revestimento composto por matérias orgânicas e ou minerais com percentuais característicos. As principais funções do revestimento do eletrodo, segundo a empresa ESAB – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget (2005), são:

- Proteção do metal de solda – esta é a função mais importante do revestimento, cujo protege o metal de solda do nitrogênio e do oxigênio presentes no ar quando ele está sendo transferido através do arco, e enquanto está no estado líquido. A proteção é necessária para assegurar que o metal de solda seja livre de bolhas de gás e tenha a resistência e a ductilidade desejadas. Graças às altas temperaturas do arco o nitrogênio e o oxigênio se combinam com o ferro e formam nitretos de ferro e óxidos de ferro, os quais causarão fragilidade e porosidade, caso estejam presentes no metal de solda acima de certos valores mínimos. O nitrogênio é o mais relevante, visto que é difícil controlar o seu efeito após sua entrada no depósito de solda. O oxigênio pode ser removido com a utilização de desoxidantes adequados. A contaminação pela atmosfera é evitada utilizando-se no revestimento do eletrodo materiais que se decomponham e gerem gases que expulsem a atmosfera ao redor do arco e do metal de solda fundidos, produzindo a atmosfera protetora.
- Estabilização do arco – um arco estabilizado abre facilmente, queima suavemente mesmo a baixas correntes e pode ser mantido aplicando-se indiferentemente um arco longo ou curto.
- Adições de elementos de liga aos metais de solda – Diversos elementos tais como cromo, níquel, molibdênio, vanádio e cobre podem ser adicionados ao metal de solda incluindo-os na composição do revestimento. É constantemente necessário adicionar elementos de liga ao revestimento para equilibrar a perda desses elementos da vareta durante a atividade de soldagem devido à volatilização e às reações químicas. Eletrodos de aço doce necessitam de pequenas quantidades de carbono, manganês e silício no depósito de solda para que se obtenha soldas íntegras com a resistência desejada. Uma parte do

carbono e do manganês provém da vareta, porém é necessária a combinação com ligas ferro-manganês e em alguns casos com ligas ferro-silício no revestimento.

- Direcionamento do arco – a cratera que se forma na ponta dos eletrodos possibilita o direcionamento do fluxo do arco elétrico. O uso de aglomerantes adequados garante um revestimento consistente que manterá a cratera e dará uma penetração adicional, possibilitando o melhor direcionamento do arco elétrico.
- Escória como agente fluxante – basicamente as 3 funções da escória são (I) fornecer proteção adicional contra os elementos contaminantes presentes na atmosfera, (II) agir como purificadora e absorver impurezas que são levadas à superfície e são aprisionadas pela escória e, (III) reduzir a velocidade de resfriamento do metal fundido para possibilitar o escape dos gases. A escória também controla o contorno, a integridade e a aparência geral do cordão de solda. Isso é extremamente importante nas juntas em ângulo.
- Características da posição de soldagem – determinados ingredientes são adicionados ao revestimento, principalmente compostos de titânio, para possibilitar a soldagem fora de posição (posição vertical e sobrecabeça). As características da escória determinam a capacidade de um eletrodo ser empregado fora de posição.
- Controle da integridade do metal de solda – a porosidade ou os gases aprisionados no metal de solda podem ser controlados de uma maneira geral pela composição revestimento. É o balanço de certos ingredientes no revestimento que tem um efeito marcante na presença de gases aprisionados no metal de solda. O ferro-manganês é provavelmente o ingrediente mais utilizado para se conseguir a fórmula corretamente balanceada.
- Propriedades mecânicas específicas do metal de solda – algumas propriedades mecânicas desejadas podem ser incorporadas ao metal de solda através do revestimento. Elevados valores de impacto a baixas temperaturas, alta ductilidade e o aumento nas propriedades de escoamento e resistência mecânica podem ser obtidos pelas adições de elementos liga ao revestimento.
- Isolamento da alma de aço – o revestimento age como um isolante elétrico, não permitindo que a alma provoque curto-circuito durante a soldagem de chanfros

profundos ou de aberturas estreitas; o revestimento também protege o operador dos efeitos da elétrica quando os eletrodos são trocados.

Idealmente os revestimentos devem possuir um certo número de propriedades simultâneas (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992):

- O metal de solda deve possuir algumas propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas, condicionadas à adequada proteção gasosa, desoxidação e adição de liga.
- A composição química deve ser uniforme ao longo do cordão.
- O controle e a remoção da escória devem ser fáceis.
- Os depósitos devem ser livres de quaisquer defeitos.
- A quantidade de respingos deve ser a menor possível.
- O arco deve ser estável.
- A abertura e reabertura de arco devem ser de fácil execução.
- A penetração deve ser ter o dimensionamento adequado.
- A taxa de deposição deve ser elevada.
- O acabamento superficial e o formato do cordão devem possuir boa aparência.
- O eletrodo não deve aquecer demasiadamente.
- O revestimento não deve absorver umidade do ar (eletrodo higroscópico).
- A geração de odores e fumos deve ser a menor possível.
- O revestimento deve estar firmemente aderente à alma e ser flexível.

#### 1.4.2 Classes de revestimento dos eletrodos.

Segundo OKUMURA e TANIGUSH (1982), é possível agrupar genericamente os eletrodos em uma das seguintes classes de revestimento:

1. Eletrodo do tipo celulósico: São eletrodos que contém aproximadamente 30% de materiais orgânicos e geram grande volume de gases para proteger a poça de fusão. O arco é muito potente e permite uma grande penetração. A escória é fina e facilmente destacável, o que permite a soldagem vertical descendente. Entretanto, o eletrodo produz muitos respingos, dando uma aparência ruim ao cordão. Segundo WAINER, BRANDI e MELLO (1992), dependendo da composição do revestimento, a quantidade de hidrogênio dissolvido no banho

pode ser alta, aumentando a tendência à fissuração à frio e seu uso é geralmente restrito à soldagem com corrente contínua e polaridade reversa, devido à difícil estabilidade do arco.

2. Eletrodo do tipo rutilico: Possui um alto conteúdo de óxido de titânio ( $TiO_2$ ), ou rutilo, fato que dá origem ao seu nome. O arco gerado por este tipo de eletrodo é muito suave e sua penetração é relativamente baixa. A aparência do cordão é muito boa e por isso, este é utilizado como passe de acabamento na união de chapas grossas. O eletrodo do tipo rutilico é recomendado para soldagem de chapas de pequena espessura. Segundo WAINER, BRANDI e MELLO (1992), a resistência mecânica e a ductilidade obtida são boas, a adição de pó de ferro ao revestimento possibilita elevadas taxas de deposição e pode-se utilizar a corrente contínua ou alternada.
3. Eletrodo do tipo básico: Também é denominado de baixo hidrogênio, pois fornece um metal depositado com baixo teor  $H_2$ . Seu revestimento contém principalmente cal e fluorita. Por conta do baixo teor de hidrogênio, o metal depositado apresenta uma pequena sensibilidade ao trincamento e à fissuração. Devido a tais características, a junta soldada apresenta excelentes propriedades mecânicas, exibindo boa tenacidade e boa ductilidade. No entanto, o arco gerado pelos eletrodos básicos é consideravelmente instável e as gotas que se transferem ao metal-base são ligeiramente maiores do que as dos outros tipos de eletrodo, o que exige uma mão-de-obra especializada, pois o soldador deve possuir habilidade no manuseio deste tipo de eletrodo. Pelo fato de apresentar excelentes características de soldabilidade, os eletrodos básicos são utilizados em juntas de alta responsabilidade, principalmente naquelas estruturas constituídas de chapas grossas, como no caso de vasos de pressão, caldeiras e outros sistemas similares. Segundo WAINER, BRANDI e MELLO (1992), apesar de fornecer depósitos de boa aparência superficial, é necessária muita prática do operador para evitar defeitos como porosidade e inclusão de escória. Ainda segundo os mesmos autores, sendo o revestimento higroscópico (revestimento que absorve umidade do ar), é necessária a secagem e manutenção cuidadosas para garantir baixo teor de hidrogênio no metal depositado é possível utilizar correntes contínuas com polaridade reversa e alternada, condicionadas a adição de elementos estabilizadores de arco.

4. Eletrodo do tipo ácido com pó de ferro: Possui como principais ingredientes do revestimento o silicato e o pó de ferro, em percentagens que variam de 15 a 50%. As gotículas de metal de adição são transferidas em forma de névoa e a escória é facilmente removível devido à baixa quantidade de respingos produzida. A eficiência do eletrodo é muito elevada, o que implica em uma alta velocidade de deposição. Este tipo de eletrodo é muito utilizado em soldas de canto horizontais e na soldagem por gravidade, processo largamente utilizado na construção naval.
5. Eletrodo do tipo ácido com alto conteúdo de óxido de ferro: Possui como principal ingrediente o óxido de ferro, que proporciona um arco concentrado com uma penetração profunda. Já foi muito utilizado na execução de filetes de solda na posição horizontal; seu uso decaiu progressivamente ao longo dos anos.
6. Eletrodo do tipo rutilico com pó de ferro: Possui um arco suave e boa aparência superficial do cordão de solda, características comuns aos eletrodos com alto conteúdo de óxido de ferro. Contendo pó de ferro, o eletrodo permite uma alta eficiência de soldagem. É muito aplicado na execução de soldas de canto horizontais, em um só passe, assim como na soldagem em posição plana.
7. Eletrodo do tipo ilmenítico: Basicamente seu revestimento contém ilmenita, que é um aglomerado com óxidos de titânio, ferro e manganês. O arco elétrico produzido pelo eletrodo é consideravelmente potente, possibilitando uma penetração muito elevada. A escória formada é muito fluida e as propriedades mecânicas do metal depositado, tanto quanto o índice de aprovação em exames radiográficos são bastante elevados. Por tais características, este tipo de eletrodo é também denominado eletrodo de múltiplas finalidades. Foi massivamente utilizado na indústria naval japonesa.
8. Eletrodo do tipo cal titânio: Este contém cale rutilo em seu revestimento. Ele deposita um metal com excelentes propriedades mecânicas e só é superado pelos eletrodos de baixo hidrogênio. Sua penetração não é tão profunda, mas apresenta algumas características dos eletrodos rutilicos, principalmente com relação à aparência final do cordão depositado. É indicado para aplicação em todas as posições de soldagem, tendo especial recomendação para as posições horizontal e sobrecabeça.

### 1.4.3 Classificação dos eletrodos revestidos conforme AWS

A base de classificação dos eletrodos são as propriedades mecânicas e químicas do metal depositado, o tipo de revestimento, a posição de soldagem e tipo de corrente. A classificação da AWS (American Welding Society) compreende a utilização de uma série de números e letras que fornecem todas as informações necessárias a respeito dos eletrodos (NERIS, 2012).

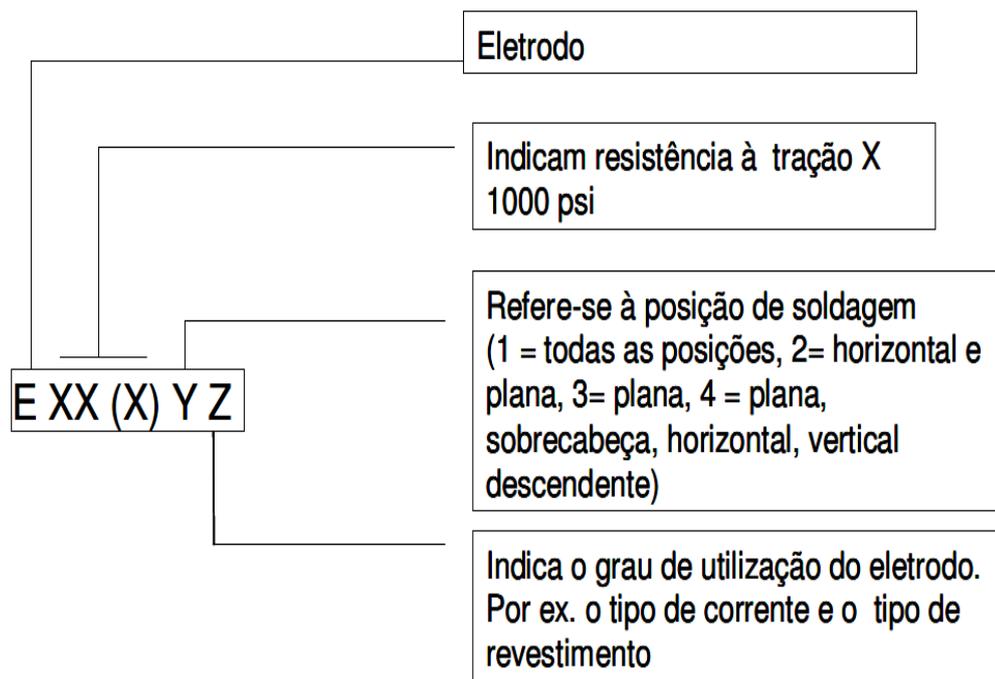


Figura 6 – Classificação de eletrodos revestidos para aço carbono.  
Fonte: ESAB, 2005.

Essas classificações – em conformidade com a especificação AWS A5.1 – são determinadas pelos fabricantes dos eletrodos de acordo com os resultados dos testes. A American Welding Society - AWS não aprova nem reprova eletrodos (ESAB, 2005).

A American Society of Mechanical Engineers (ASME) usa integralmente a especificação de eletrodos da AWS aplicando as letras SF antes do número da especificação. Logo a especificação AWS A5.1 transforma-se na ASME SFA5.1. Tanto a classificação quanto os requisitos são os iguais (ESAB, 2005).

Tabela I - Classificação dos eletrodos para aços carbono

Classe	Corrente	Arco	Penetração	Revestimento/Escória	Pó de ferro
EXX10	CC+	agressivo	Profunda	Celulósico – sódio	0-10%
EXX11	CA/CC+	agressivo	Profunda	Celulósico – potássio	0
EXX12	CA/CC-	médio	Média	Rútilico – sódio	0-10%
EXX13	CA/CC- /CC+	suave	Leve	Rútilico – potássio	0-10%
EXX14	CA/CC- /CC+	suave	Leve	rútilico – pó de ferro	25-40%
EXX15	CC+	médio	Média	Baixo hidrogênio – sódio	0
EXX16	CA/CC+	médio	Média	Baixo hidrogênio – potássio	0
EXX18	CA/CC+	médio	Média	Baixo hidrogênio – pó de ferro	25-40%
EXX20	CA/CC-	médio	Média	Óxido de ferro sódio	0
EXX22	CA/CC- /CC+	médio	Média	Óxido de ferro sódio	0
EXX24	CA/CC- /CC+	suave	Leve	Rútilico – pó de ferro	50%
EXX27	CA/CC- /CC+	médio	Média	Óxido de ferro – pó de ferro	50%
EXX28	CA/CC+	médio	Média	Baixo hidrogênio – pó de ferro	50%
EXX48	CA/CC+	médio	Média	Baixo hidrogênio – pó de ferro	25-40%

O percentual de pó de ferro é baseado na massa do eletrodo

Fonte: Adaptado de ESAB, 2005.

Tabela II - Requisitos químicos para eletrodos revestidos para aços carbono

Classe	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Mn+Ni+Cr+Mo+V
E6010	-	-	-	-	-	-	-
E6011	-	-	-	-	-	-	-
E6012	-	-	-	-	-	-	-
E6013	-	-	-	-	-	-	-
E6020	-	-	-	-	-	-	-
E6022	-	-	-	-	-	-	-
E6027	-	-	-	-	-	-	-
E7014	≤ 1,25	≤ 0,90	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 1,50
E7015	≤ 1,25	≤ 0,90	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 1,50
E7016	≤ 1,60	≤ 0,75	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 1,75
E7018	≤ 1,60	≤ 0,75	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 1,75
E7024	≤ 1,25	≤ 0,90	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 1,50
E7027	≤ 1,60	≤ 0,75	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 1,75
E7028	≤ 1,60	≤ 0,90	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 1,75

Fonte: Adaptado de ESAB, 2005.

Classificação	Posições (1)	Corrente	Propriedades Mecânicas (2)			Revestimentos / Características
			L.R. (3)	L.E (4)	$\lambda$ (5)	
E-6010	P, V, S, H	CC+	430	340	22	Altamente celulósico, com silicato de sódio. Alta penetração. Aspecto superficial pobre. Uso geral em tanques, tubulações, navios, etc.
E-6011	P, V, S, H	CC+,CA	430	340	22	Altamente celulósico, com silicato de potássio. Características semelhantes ao E-6010, com penetração inferior.
E-6012	P, V, S, H	CC-,CA	460	380	17	Rutílico com silicato de sódio. Média penetração, densa escória, bom aspecto superficial. Uso geral.
E-6013	P, V, S, H	CC+,CC-,CA	460	380	17	Rutílico com silicato de potássio. Semelhante ao E-6012, com penetração tendendo a ser inferior. Em pequenos diâmetros é especificamente recomendado para chapas finas.
E-6020	HF	CC-,CA	430	340	22	À base de óxido de ferro, com compostos de manganês e silício. Penetração média/alta. Aspecto superficial razoável. Uso em vasos de pressão, bases de máquinas e estruturas.
E-6022	P	CC-,CC+,CA	460	NE	NE	Semelhante ao E-6020, indicado para soldas monopasse, com aspecto superficial inferior.
E-6027	P, HF	CC-,CA	430	340	22	Semelhante ao E-6020, com adição de pó de ferro, média penetração, bom aspecto superficial, qualidade radiográfica levemente inferior. Uso em seções espessas.
E-7014	P, V, S, H	CC-,CC+,CA	500	420	17	Semelhante ao E-6012 e E-6013, com adição de pó de ferro.
E-7015	P, V, S, H	CC+	500	420	22	Básico com silicato de sódio. Moderada penetração, aspecto razoável, p/ pobre, dependendo da qualidade do metal base. Requer maior habilidade. Uso onde propriedades mecânicas e qualidade do depósito são essenciais.
E-7016	P, V, S, H	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7015, com silicato de potássio e pó de ferro.
E-7018	P, V, S, H	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7016, com alta adição de pó de ferro.
E-7024	P, HF	CC-,CC+,CA	500	420	17	Semelhante ao E-6012 e E-6013, com grande adição de pó de ferro. Alta taxa de deposição; uso geralmente em soldas de filete.
E-7027	P, HF	CC-,CA	500	420	22	Semelhante ao E-6027. Uso onde propriedades mecânicas superiores são necessárias.
E-7028	P, HF	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7018, com maior adição de pó de ferro.
E-7048	P, S, H, VD	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7018. Uso especificamente para soldagem na posição vertical descendente.

## NOTAS:

- (1) P=Plana, V=Vertical, S=Sobrecabeça, H=Horizontal, HF=Horizontal (Filetes)  
VD=Vertical descendente.
- (2) NE=Não especificado
- (3) Limite de resistência, MPa
- (4) Limite de elasticidade, MPa
- (5) Alongamento %

Quadro 3 – Descrição dos consumíveis para soldagem de aços carbono, segundo a AWS.  
Fonte: WAINER, BRANDI e MELLO, 1992.

No caso dos aços baixa liga, a classificação AWS utiliza após o último algarismo um hífen, seguido de um conjunto de letras e números que indicam as classes de composição química relativas aos variados tipos de ligas (NERIS, 2012).

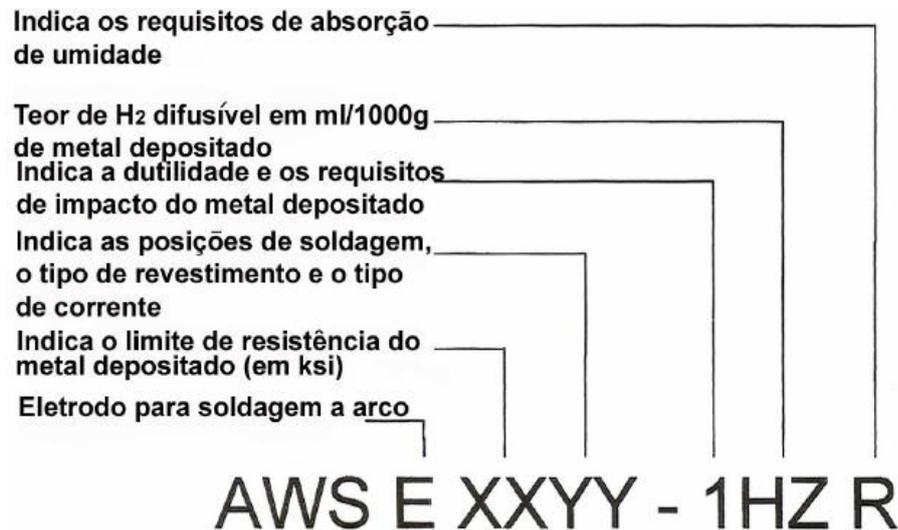


Figura 7 – Classificação de eletrodos revestidos para aços de baixa liga.  
Fonte: NERIS, 2012.

Tabela III - Códigos de composição química (Válido para aços liga)

<b>Código</b>	<b>Significado</b>
A1	Eletrodo de aço carbono-molibidênio (0.40-0.65% Mo)
B1	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (0.40-0.65% Cr e Mo)
B2	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (1.00-1.50% Cr e 0.4-0.65 Mo)
B2L	Idem ao acima, com baixo teor de Carbono (0.005%)
B3	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (2.5% Cr e 1% Mo)
B4L	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (2.25% Cr e 0.65 Mo, baixo Carbono)
B5	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (0.6% Cr e 1.25% Mo, traços V)
C1	Eletrodo de aço Níquel (2.00-2.75% Ni)
C2	Eletrodo de aço Níquel (3.00-3.75% Ni)
C3	Eletrodo de aço Níquel (1.10% Ni, Cr<0.15%, Mo<0.35%, V<0.05%)
D1	Eletrodo de aço manganês-molibidênio (1.75% Mn e 0.45% Mo)
D2	Eletrodo de aço manganês-molibidênio (2.00% Mn e 0.45% Mo)
G	Outros tipos de eletrodos de aço baixa liga
M	Especificações militares americanas
P	Eletrodos para soldagem de tubulações
W	Eletrodos resistentes à corrosão atmosférica

Fonte: Adaptado de NERIS, 2012.

#### 1.4.4 Características individuais dos eletrodos revestidos

Segundo o manual do fabricante ESAB (2005), individualmente os eletrodos revestidos apresentam as seguintes características:

- E6010: Inicialmente foram desenvolvidos com o objetivo de proporcionar facilitação na atividade de soldagem e um metal de solda melhor. O revestimento é em grande parte constituído por uma pasta de celulose modificada com silicatos minerais, desoxidantes e silicato de sódio. A quantidade de revestimento desses eletrodos é pequena, cerca de 10-12% em peso. A escória é mínima e é normalmente de fácil remoção. O arco tem uma penetração profunda e cordões de solda de boa qualidade podem ser depositados em todas as direções. Grande parte dos navios construídos nos EUA no período da II Guerra Mundial foi soldada com esses eletrodos.
- E6011: São similares aos E6010 tendo como diferença compostos de potássio adicionados ao revestimento para estabilizar o arco e permitir a utilização de corrente alternada. A penetração é um pouco menor que a do eletrodo E6010.
- E6012: Na Europa são conhecidos por eletrodos rutilicos. O revestimento possui elevadas quantidades do mineral rutilo (dióxido de titânio,  $TiO_2$ ). O arco possui baixa penetração mas permite o fechamento de grandes aberturas de raiz com a devida manipulação. Quando utilizada corrente contínua o arco é mais suave e a quantidade de respingos é menor.
- E6013: Possui uma grande quantidade de dióxido de titânio (rutilo –  $TiO_2$ ) em seu revestimento. O arco possui baixa penetração, possibilitando que materiais de pequena espessura sejam soldados sem furar a peça. Os compostos de potássio presentes no revestimento proporcionam a estabilização do arco na soldagem com corrente alternada (CA).
- E7014: São parecidos com os eletrodos E6013, tendo como diferencial a adição de pó de ferro à alma do eletrodo e um revestimento mais espesso. O resultado são taxas de deposição mais altas com o eletrodo E7014 que com o E6013.
- E7015: Foram desenvolvidos na década de 1940 para soldar aços temperáveis, sendo os primeiros eletrodos de baixo hidrogênio. Todos os eletrodos analisados anteriormente possuem quantidades relativamente

elevadas de hidrogênio em seus revestimentos na forma de água ou H<sub>2</sub> quimicamente combinado em compostos químicos. Aços temperados soldados com eletrodos com elevadas taxas de hidrogênio ficam sujeitos à fissuração a frio. Tal ocorrência é caracterizada por trincas que aparecem no metal de base bem abaixo do cordão de solda e paralelas a ele. O calcário e outros ingredientes eliminam esse hidrogênio que induz à fissuração (trincas ou fissuração induzida pelo hidrogênio – hydrogen induced cracking – HIC). O revestimento é à base de sódio, o que limita o uso seu uso a CC+. Os eletrodos E7015 foram substituídos pelos tipos E7016 e E7018.

- E7016: São semelhantes ao tipo E7015, com a sutil diferença de que o uso do potássio no revestimento permite que esses eletrodos possam ser utilizados tanto com CA como com CC+.
- E7018: Representam a versão mais moderna do eletrodo de baixo hidrogênio. Com a adição de quantidades elevadas de pó de ferro ao revestimento o resultado é um arco mais suave e com menor quantidade de respingos. Isso melhora a estabilidade do arco na direção do arco e facilita o manuseio em todas as posições.
- E6020: Contêm um revestimento constituído em sua maior parte por óxido de ferro, compostos de manganês e sílica. O arco é do tipo spray, o que resulta em uma escória pesada, proporcionando proteção extra ao metal de solda fundido, o qual é muito fluido e seu uso é limitado às juntas em ângulo nas posições plana ou horizontal.
- E6022: São empregados na soldagem de chapas finas sob altas correntes e altas velocidades de soldagem. Não estão mais disponíveis no mercado.
- E7024: Apresentam revestimento similar aos tipos E6012 e E6013, porém este é muito pesado e contém 50% de pó de ferro em peso. Sob correntes relativamente altas apresenta altas taxas de deposição. Seu uso é limitado às posições plana e horizontal em ângulo. A penetração é relativamente baixa. Podem ser usadas as correntes CA, CC+ e CC-.
- E6027: Possuem alto teor de pó de ferro, consistindo o revestimento de 50% de pó de ferro em peso. Podem ser usadas correntes do tipo CA, CC+ ou CC-. Possuem média penetração e os cordões de solda são suavemente côncavos

com boa fusão nas paredes laterais do chanfro. A taxa de deposição desses eletrodos é elevada.

- E7028: São similares ao do tipo E7018, indicados apenas para posições plana e horizontal em ângulo. A taxa de deposição é muito elevada.
- E7048: Também são similares aos do tipo E7018, com o diferencial de terem sido projetados condições de soldagem boas na progressão vertical descendente.

### 1.5 Terminologia em soldagem

Conforme dissemos anteriormente, segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011), a **soldagem** é um processo que visa a obtenção da união de peças e **solda** é o resultado deste processo. O **metal de base** é constituído pelo material das peças que estão sendo unidas. O material que será adicionado para a formação da solda é o **metal de adição**. A **poça de fusão** é formada pelo metal de adição e por parte do metal de base, ambos no estado de fusão. Denomina-se **junta** a região onde as peças serão unidas pelo processo de soldagem. O **chanfro** é o espaço caracterizado por aberturas ou sulcos na superfície das peças, cujo conterá a solda.

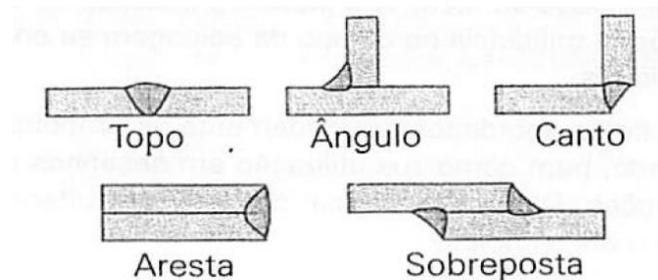


Figura 8 – Tipos de junta.

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

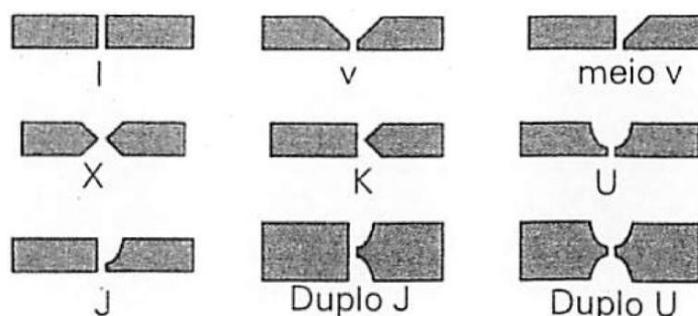


Figura 9 – Tipos de chanfro.

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

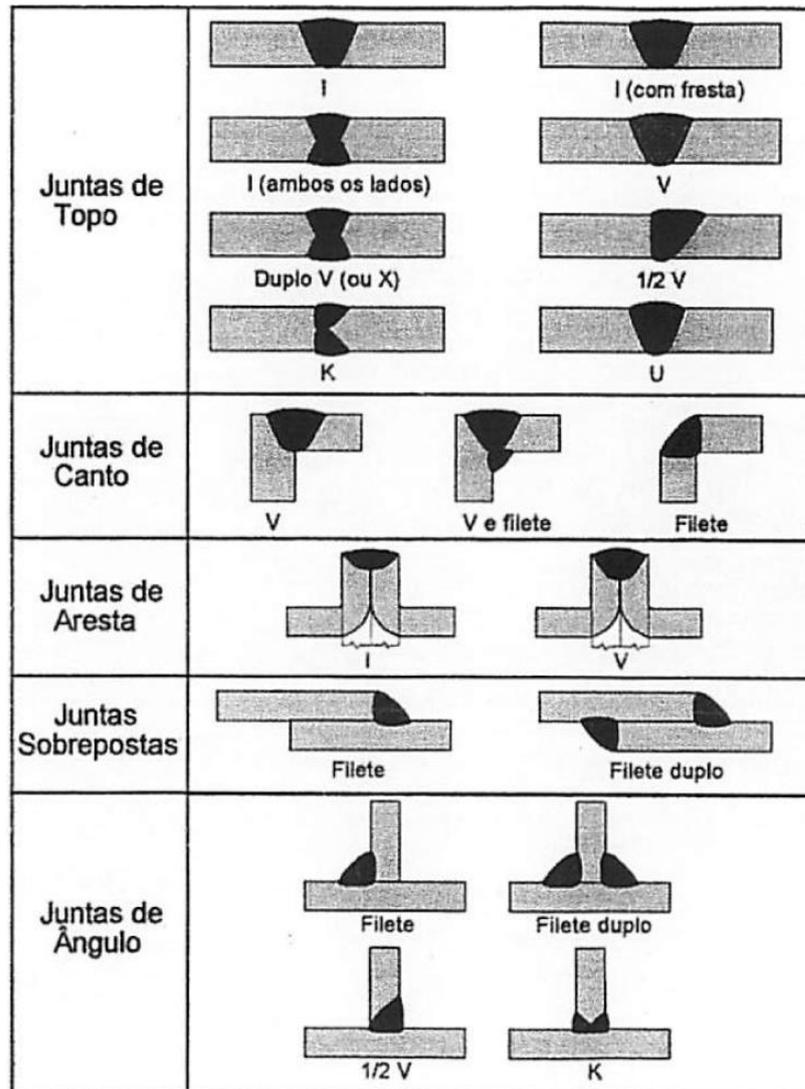


Figura 10 – Chanfros usados geralmente com os diferentes tipos de junta.  
 Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

Um chanfro é caracterizado por seus elementos dimensionais. Como principais elementos de um chanfro citamos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011):

- **Face da raiz (s):** Parte não chanfrada de um componente da junta.
- **Abertura da raiz, folga ou fresta (f):** Menor distância entre as peças a serem unidas.
- **Ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel( $\beta$ ):** Ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta.
- **Ângulo de chanfro ( $\alpha$ ):** Soma dos ângulos de bisel dos componentes da junta.

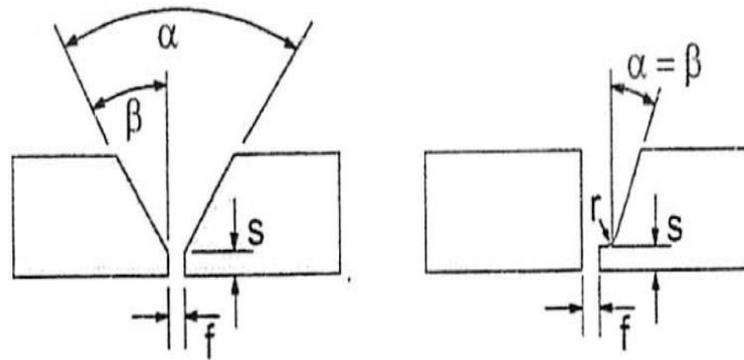


Figura 11 – Características dimensionais de chanfros usados em soldagem.  
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

Nas figuras 12 e 13 temos outros termos para uma solda de topo e uma solda em ângulo (filete):

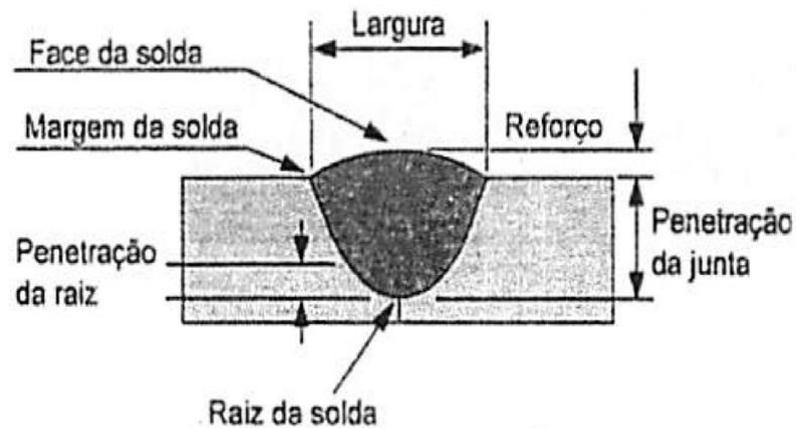


Figura 12 – Dimensões e regiões de solda de topo.  
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

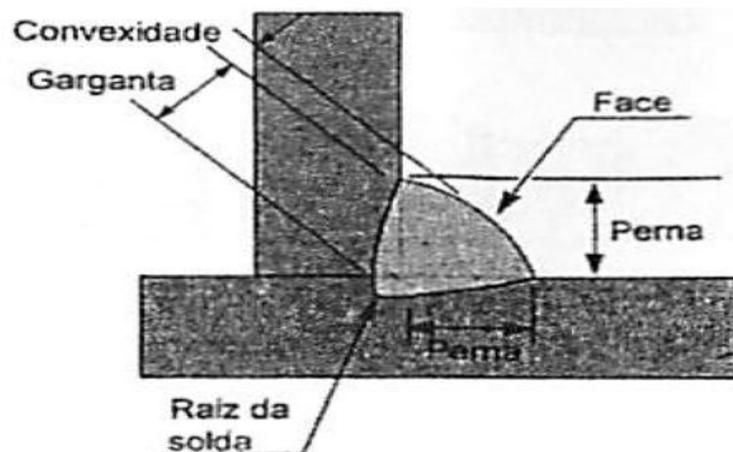


Figura 13 – Dimensões e regiões de solda de filete.  
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

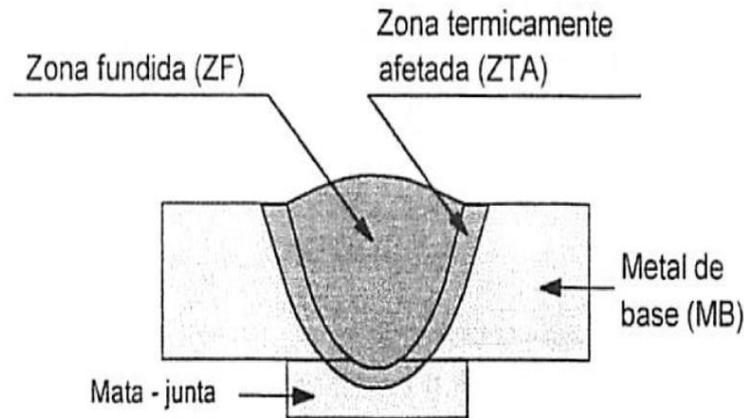


Figura 14 - Seção transversal de uma solda de topo por fusão (esquemática).  
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

A peça colocada na parte inferior da solda, com o objetivo de conter o metal fundido durante a realização da soldagem é denominada **cobre-junta** ou **mata-junta**, a qual pode ou não ser removida da junta ao término da soldagem. A **zona fundida** de uma solda (ZF) é formada pelo metal de solda, o qual é a soma das partes fundidas do metal de base e do metal de adição. A **zona termicamente afetada** (ZTA) é a região do metal de base que tem a sua estrutura microscópica ou propriedades alteradas pelo efeito do calor de soldagem. A zona fundida pode ser formada por um ou mais passes, depositados obedecendo a uma sequência de deposição e organizados em **camadas**. Cada **passo de solda** é resultante de um deslocamento da poça de fusão na região da junta. Em vários casos o termo **cordão** é usado, podendo significar a solda ou o passo, o que poderá ser identificado pelo contexto (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Quando soldamos com corrente contínua, encontramos por vezes o arco tendendo a passear e tornar-se bastante incontrolável, como se estivesse sendo soprado para lá e para cá. Isto é conhecido como **golpe de arco** (**arc blow**) e é mais experimentado quando se usa correntes acima de 200 ou inferiores a 40 A, podendo ser bastante prejudicial especialmente em soldagem de canto. Isto ocorre devido à interação do campo magnético da corrente do arco com o campo magnético gerado pelas correntes no metal de trabalho ou nos cabos de suprimento. Os melhores métodos de correção são: soldar longe da conexão terra; mudar a posição do fio terra no trabalho; enrolar o cabo de soldagem algumas voltas, se possível, em torno de vigas; mudar a posição de trabalho sobre a mesa de trabalho (DAVIES, 1993).

Se o fio de núcleo de um eletrodo revestido é deslocado excessivamente a partir do centro do revestimento (**excêntrico**) devido a erros de fabricação, o arco pode não apresentar comportamento satisfatório. O arco tende a ser direcionado para um lado, como se

influenciado por “golpe de arco” e a colocação precisa do metal depositado fica impossibilitada (DAVIES, 1993).

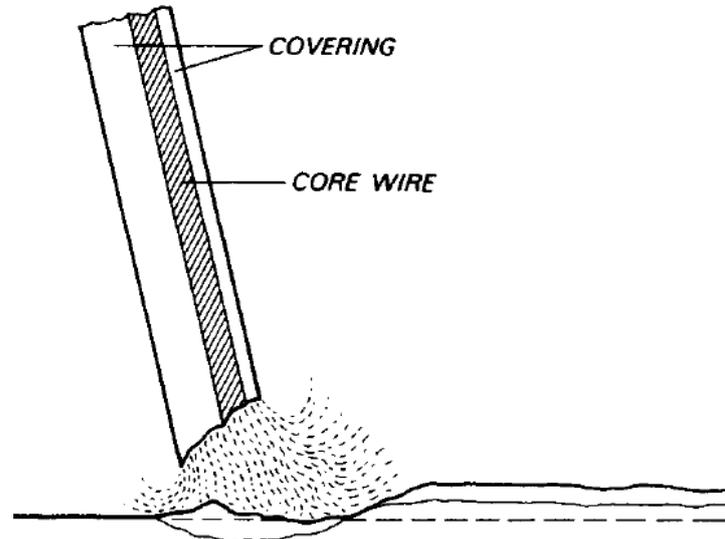


Figura 15 – Efeito da excentricidade da alma do eletrodo.  
Fonte: DAVIES, 1993.

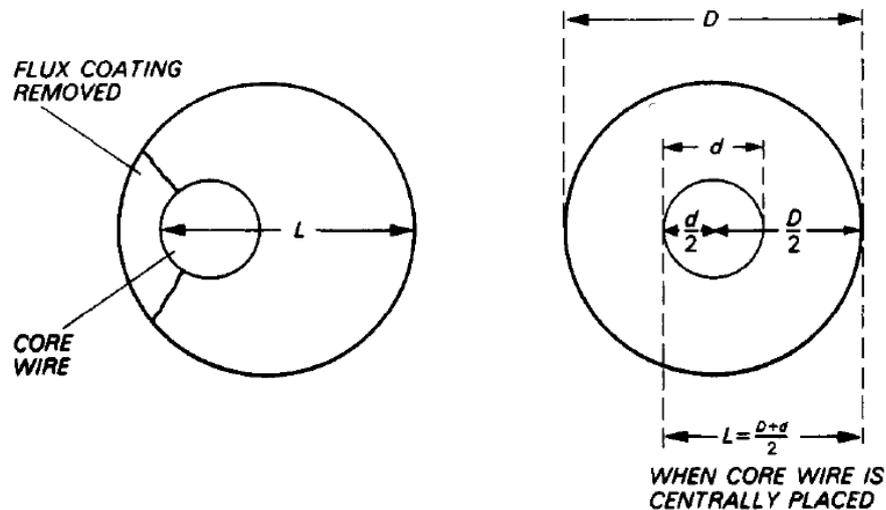


Figura 16 – Excentricidade da alma do eletrodo.  
Fonte: DAVIES, 1993.

Definimos a **eficiência de um eletrodo** (**electrode efficiency**) como a razão entre a massa do metal realmente depositado e a massa do eletrodo realmente consumida. Matematicamente podemos expressar como uma percentagem da seguinte forma:

$$\eta = \frac{\text{mass of metal deposited}}{\text{mass of metal of electrode consumed}} \times 100 \quad (I)$$

Fonte: DAVIES, 1993 (adaptado).

Para eletrodos comuns a eficiência varia de 75% a 95%, mas eletrodos contendo elementos metálicos no revestimento a eficiência pode se aproximar de 200% (por exemplo, em eletrodos contendo pó de ferro). A **taxa de deposição** (taxa com que o metal de solda é depositado) de um determinado eletrodo é dependente da corrente de soldagem utilizada, e para a taxa máxima de deposição, a corrente máxima deve ser utilizada. Esta corrente máxima depende do diâmetro do arame de núcleo e, para um dado diâmetro de fio, há uma corrente máxima além da qual o aumento da corrente acabará por deixar o fio quente e avermelhado, provocando um sobreaquecimento e a consequente deterioração do revestimento. Para permitir correntes mais elevadas deve ser utilizado um eletrodo com diâmetro do fio de núcleo maior (DAVIES, 1993).

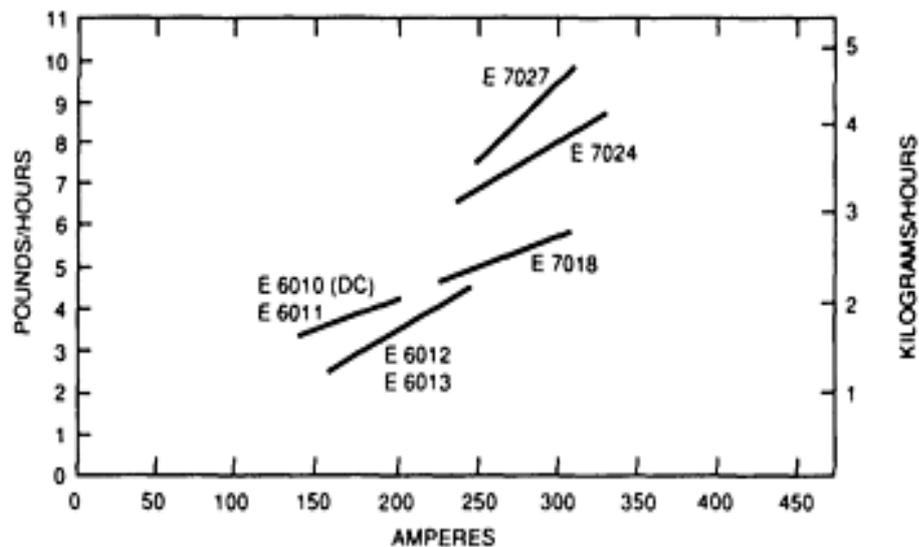


Figura 17 – Taxa de deposição x Amperagem para vários eletrodos.  
Fonte: ASM, 1993.

## 1.6 Tipos de solda

Basicamente temos quatro tipos de solda, as quais são as soldas de entalhe, filete, ranhura e tampão. Cada uma delas possui vantagens específicas que determinam a extensão de uso. Em termos de aplicação, os quatro tipos representam as seguintes percentagens de ligações soldadas: soldas de entalhe, 15%; soldas de filete, 80%; os 5% restantes são constituídos pela solda de ranhura, tampão e outros tipos de soldas especiais (SALMON e JHONSON, 1996).

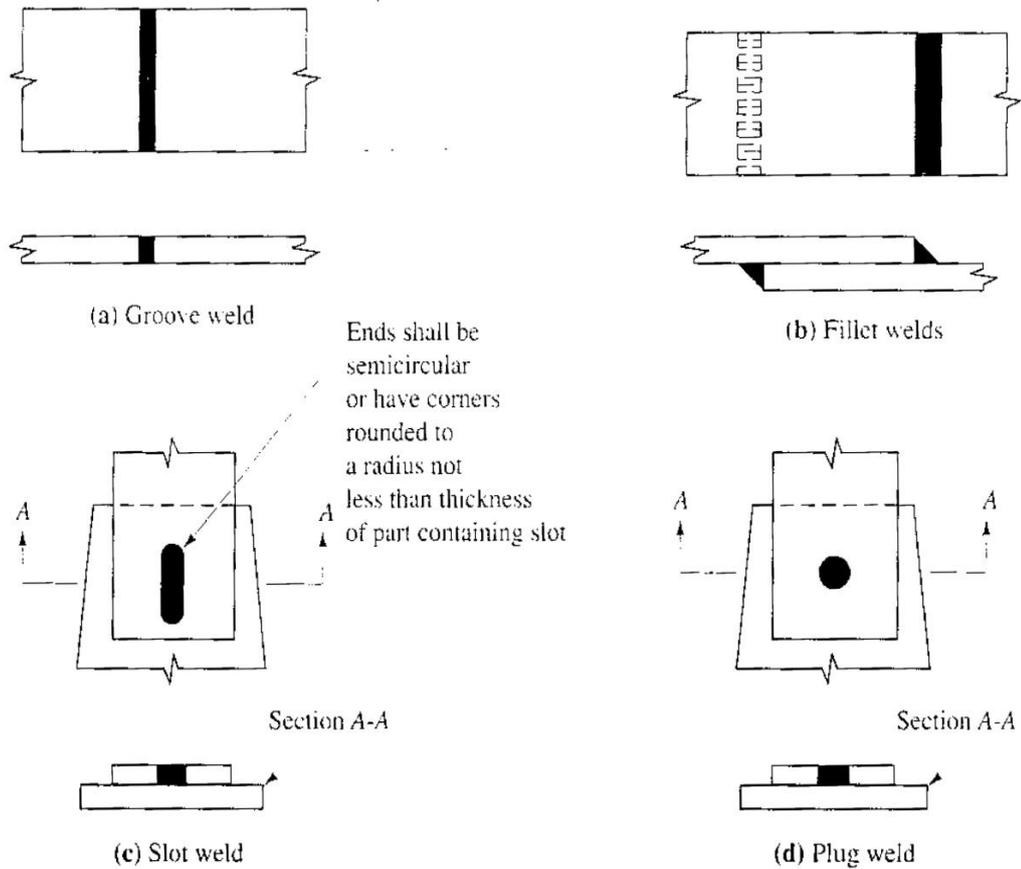


Figura 18 – Tipos de solda.  
 Fonte: SALMON e JHONSON, 1996.

As soldas de entalhe são usadas principalmente para conectar membros estruturais que estão no mesmo plano (SALMON e JHONSON, 1996). Neste tipo de solda, o metal de solda é colocado diretamente entre as peças metálicas, em geral dentro de chanfros. A solda pode ser de penetração total ou parcial e os chanfros podem apresentar diversas formas, como indicado na figura 19 (PFEIL e PFEIL, 2009).

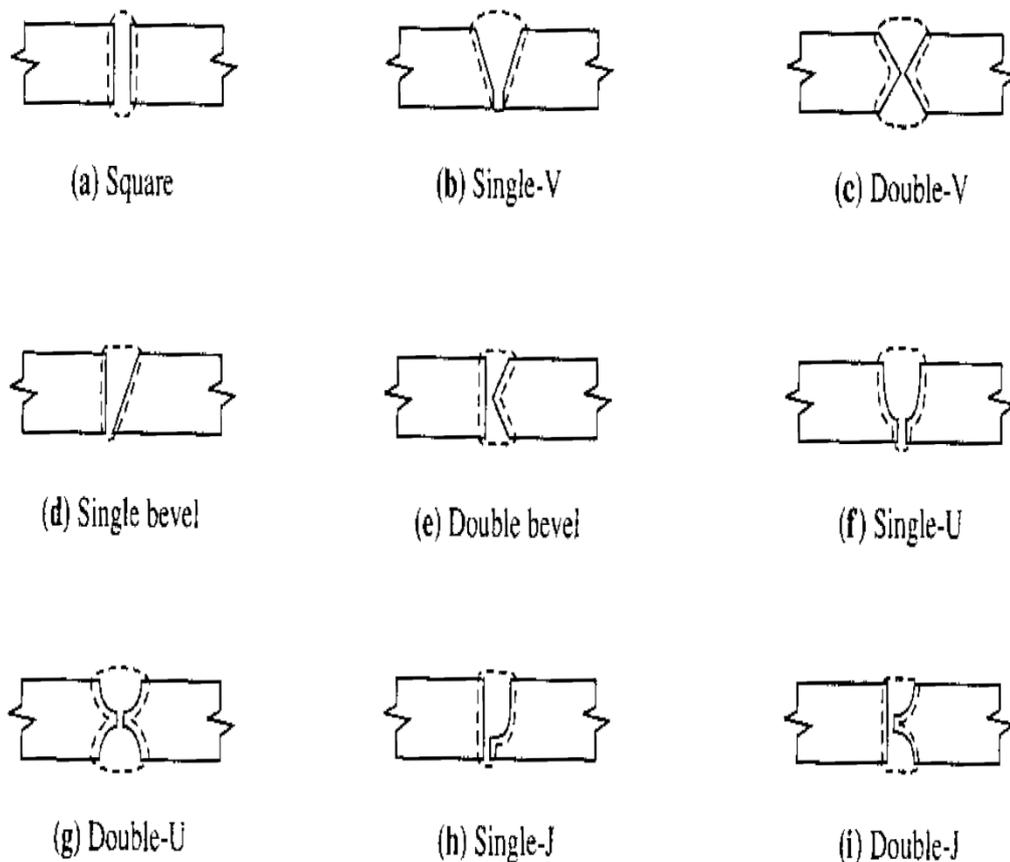


Figura 19 – Tipos de solda de entalhe.  
 Fonte: SALMON e JHONSON, 1996.

As soldas de filete devido à sua economia global, facilidade de fabricação e adaptabilidade são as mais utilizadas. Soldas deste tipo exigem menos precisão na “montagem” devido à sobreposição de peças, enquanto a solda de entalhe exige o alinhamento cuidadoso com o espaço especificado (abertura de raiz) entre as peças. A soldagem de filetes é particularmente vantajosa para soldagem em campo ou para realinhar membros ou conexões que foram fabricadas dentro de tolerâncias permitidas, mas que não cabem tão precisamente quanto desejado (SALMON e JHONSON, 1996). Em soldas de filete, o metal de solda é depositado nas faces laterais dos elementos que estão sendo unidos (PFEIL e PFEIL, 2009).

Na utilização de soldas de tampão e de ranhura, o material é depositado em orifícios circulares ou alongados (rasgos) feitos em uma das chapas do metal de base (PFEIL e PFEIL, 2009). A principal aplicabilidade para solda de ranhura ou tampão é transmitir cisalhamento em uma junta sobreposta quando o tamanho da conexão limita o comprimento disponível para solda de filete ou outro tipo de solda de aresta (SALMON e JHONSON, 1996).

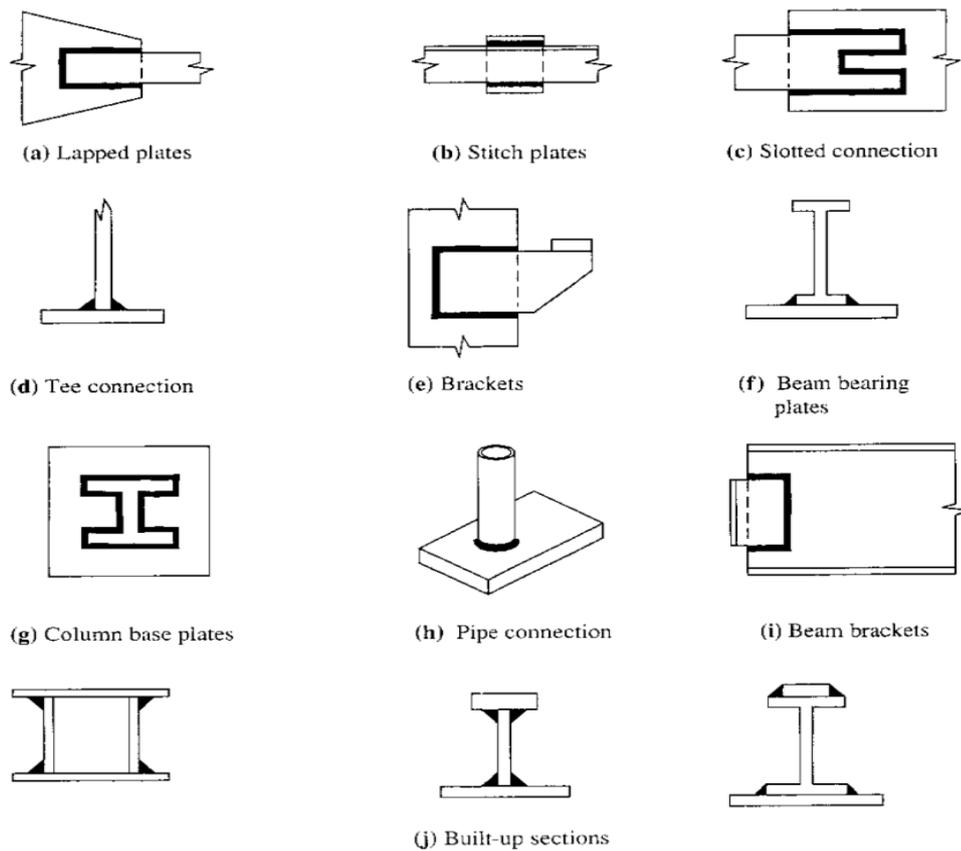


Figura 20 – Uso típico de soldas de filete.  
Fonte: SALMON e JHONSON, 1996.

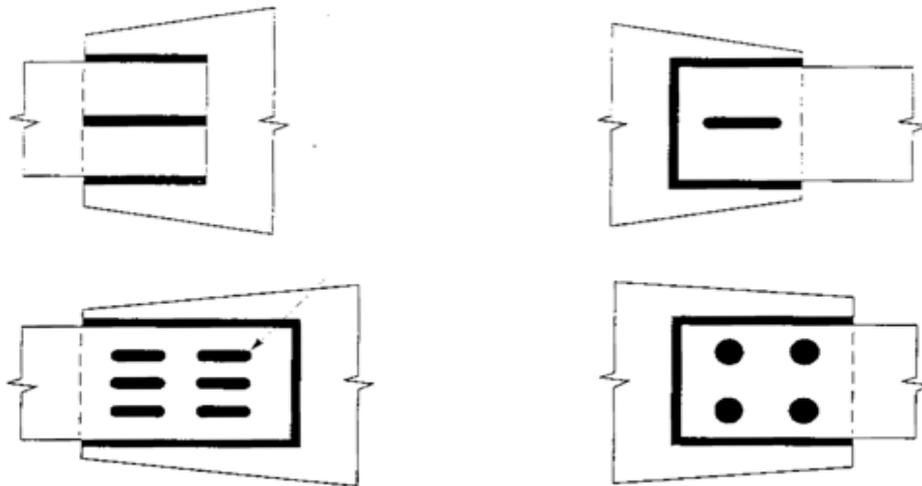


Figura 21 – Soldas tampão e de ranhura combinadas com soldas de filete.  
Fonte: SALMON e JHONSON, 1996.

### 1.7 Posições de soldagem com eletrodos

Em termos práticos podemos dizer que o processo de soldagem pode ser realizado em 4 posições, no caso de perfis não tubulares. A posição plana produz os melhores resultados

sendo utilizada preferencialmente nos trabalhos de oficina, nos casos em que é possível posicionar as peças adequadamente, as posições horizontal e vertical são empregadas constantemente em trabalhos de oficina e de campo. A posição sobrecabeça é a que exige mais habilidade por parte do soldador, tendo sua aplicação restrita a casos especiais. Este tipo de soldagem possui uma maior tendência a defeitos, como inclusão de escória, devido a sua menor densidade em relação ao metal de solda (PFEIL e PFEIL, 2009).

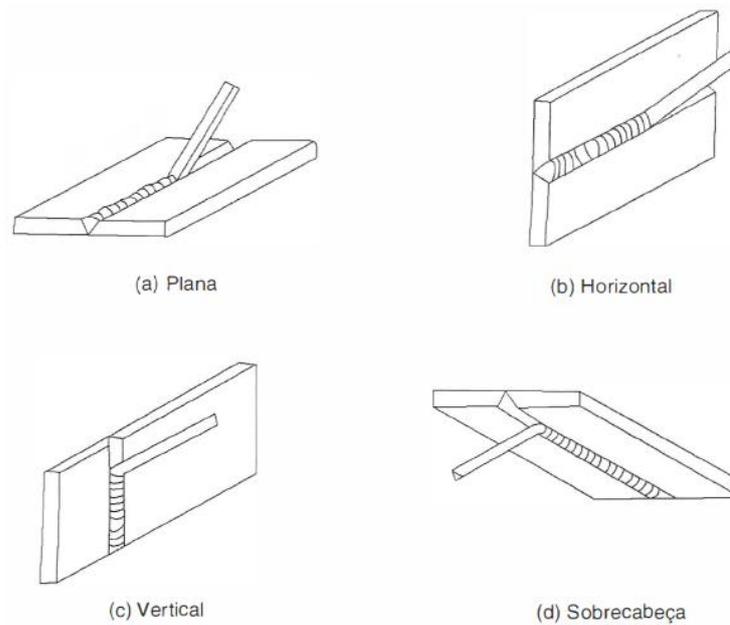


Figura 22 – Posições de soldagem com eletrodos.  
Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

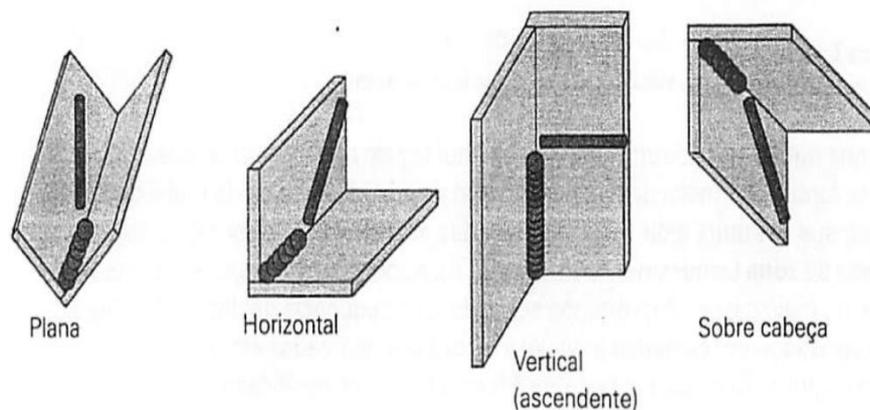


Figura 23 – Posições de soldagem para soldas de filete.  
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

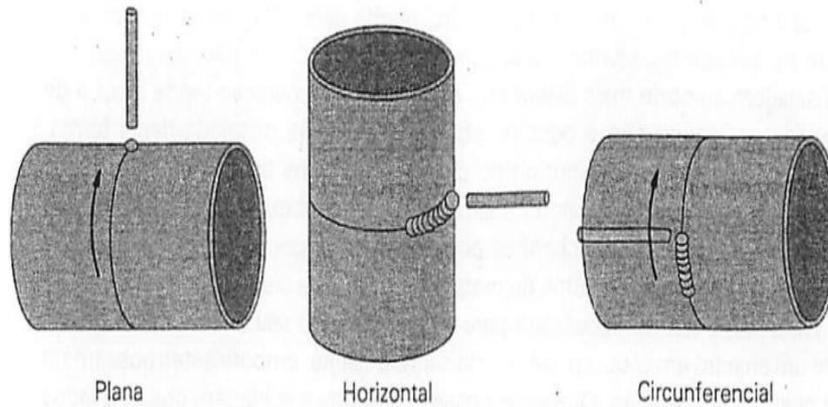


Figura 24 – Posições de soldagem para soldas em tubulações.  
 Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

As posições de soldagem são definidas pela ASME – American Society of Mechanical Engineers por um dígito seguido de uma letra. Segundo esta convenção, as posições plana, horizontal, vertical e sobrecabeça são designadas, respectivamente por 1G, 2G, 3G e 4G para juntas da figura 22 e, por 1F, 2F, 3F e 4F nas juntas da figura 23. No caso de soldagem em tubulações (figura 23) as designações seriam dadas por 1G, 2G e 5G (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

### 1.8 Simbologia de solda

A simbologia de soldagem consiste de uma série de símbolos, sinais e números, dispostos de uma forma particular, que nos dão informações detalhadas sobre uma dada solda e/ou operação de soldagem. Segundo a norma AWS A2.4 (apud MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011) esses símbolos são os seguintes:

1. Linha horizontal de referência.
2. Seta.
3. Símbolo básico de solda.
4. Dimensões e outros dados.
5. Cauda – Especificação do processo de soldagem ou outra referência.

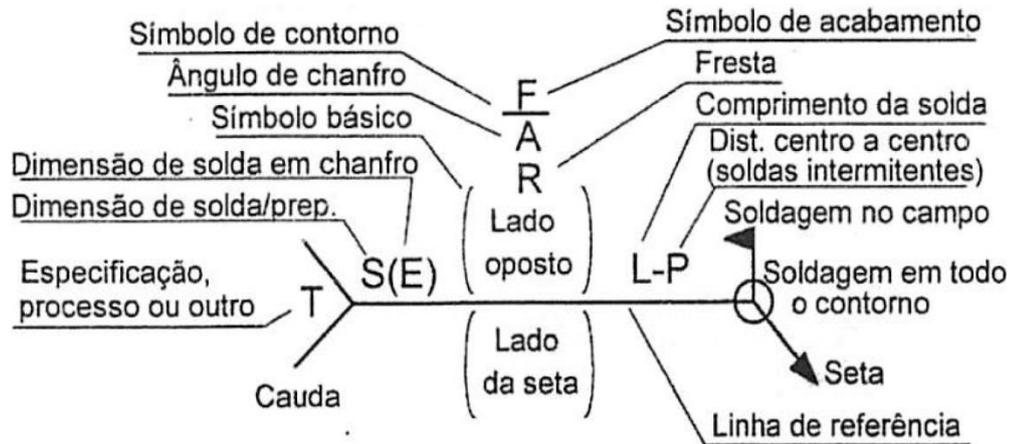


Figura 25 – Localização dos elementos de um símbolo de soldagem.

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

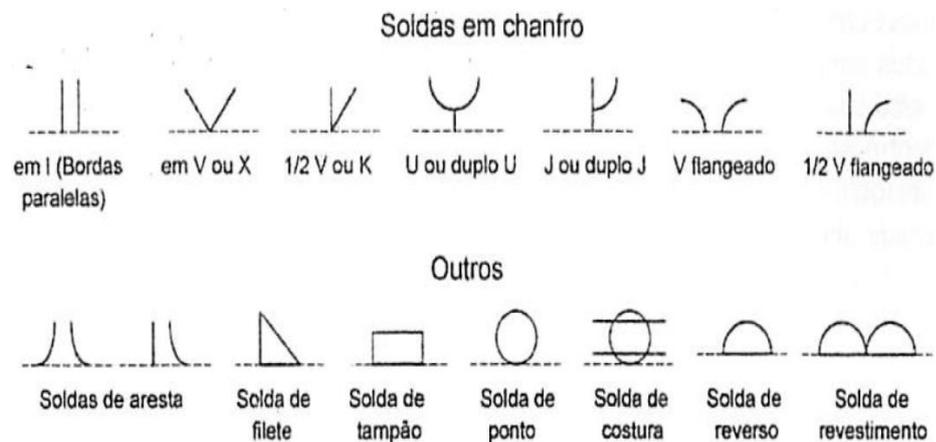


Figura 26 – Tipos básicos de soldas e seus símbolos.

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

O símbolo básico indica o tipo de solda que se deseja fabricar. Cada símbolo básico representa esquematicamente a seção transversal da solda a qual faz referência. Quando o símbolo básico é colocado sob a linha de referência, a solda deve ser feita do mesmo lado em que se encontra a seta. Nos casos em que o símbolo básico esteja sobre a linha de referência, a solda deve ser executada do lado oposto à seta. Vários números correspondentes às dimensões ou outros dados da solda são colocados em posições previamente determinadas em relação ao símbolo básico. O tamanho da solda e/ou sua garganta efetiva são colocados à esquerda do símbolo. Tratando-se de soldas de chanfro, quando esses números não são colocados, entende-se que a solda deve ser executada com penetração total. A abertura de raiz ou profundidade do tipo de solda “plug” (ranhura) ou “slot” (tampão) são inseridos diretamente no interior do símbolo básico de solda. Do lado direito do símbolo podem ser identificados o comprimento da solda e a distância entre os centros dos cordões, em casos de fabricação de soldas intermitentes (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

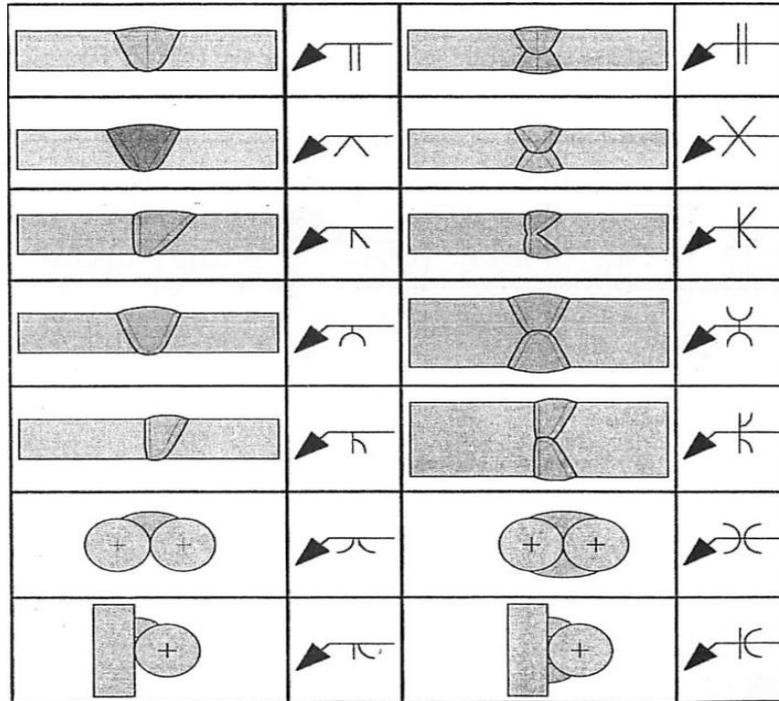


Figura 27 – Sete variações de soldagem de chanfro e seus símbolos.  
 Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

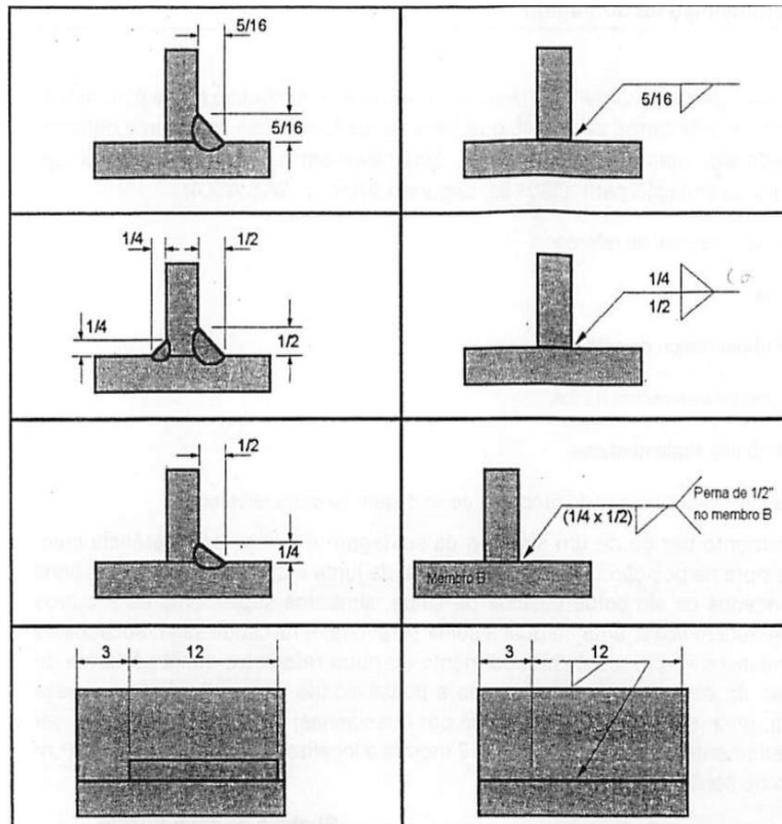


Figura 28 – Exemplos de soldas de filete e seus símbolos.  
 Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

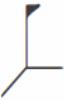
Chapa de espera	Solda em toda a volta	Solda de campo	Acabamento	
			Plano	Convexo
				

Figura 29 – Símbolos suplementares.  
Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

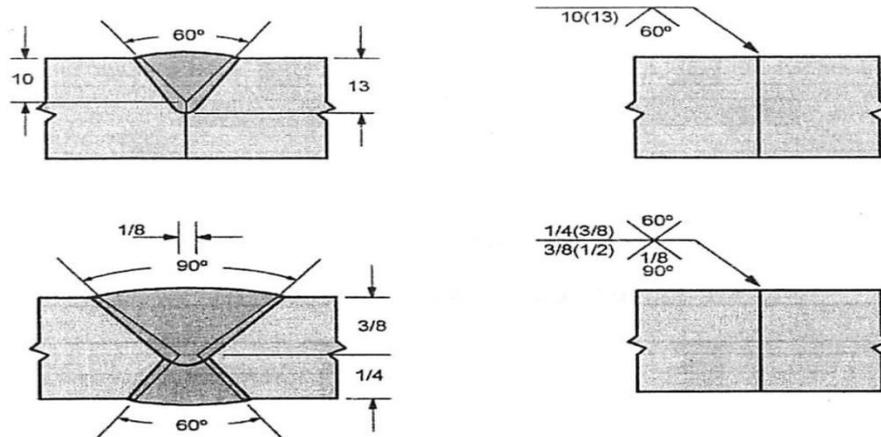


Figura 30 – Exemplos de símbolos em soldas de chanfro.  
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

## 1.9 Descontinuidades em juntas soldadas

Segundo WAINER, BRANDI e MELLO (1992), podemos definir o termo descontinuidade como a interrupção da composição estrutural característica de uma peça, no que se tange à uniformidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Não se trata necessariamente de um defeito. O termo descontinuidade só deve ser considerado como defeito, quando sua natureza, dimensões ou efeito tornarem a peça inaceitável, por não satisfazer aos requisitos mínimos da norma técnica utilizada como referência no projeto.

Segundo SANCHES (2010) as descontinuidades podem ser classificadas em três tipos:

- Dimensionais;
- Estruturais;
- Descontinuidades relacionadas com as propriedades indesejáveis da região de solda.

### 1.9.1 Descontinuidades dimensionais.

As mais relevantes descontinuidades estruturais são as seguintes (SANCHES, 2010):

- Distorção: Caracteriza-se pela mudança de forma da peça devido às deformações pelo efeito do calor sobre o material durante a soldagem (figura 31).

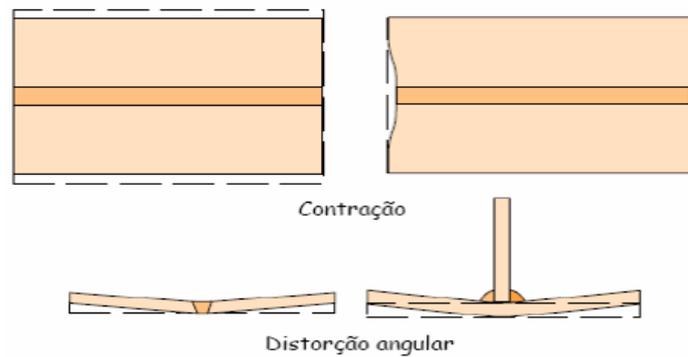


Figura 31 – Distorções.  
Fonte: SANCHES, 2010.

- Preparação incorreta da junta: Descontinuidade resultante da produção de um chanfro com dimensões ou forma em desacordo com as especificações (figura 32).



Figura 32 – Junta incorreta.  
Fonte: SANCHES, 2010.

- Dimensão incorreta da solda (cordão de solda): Resultam no aparecimento de trincas devido ao aumento da probabilidade de inclusão de escória.

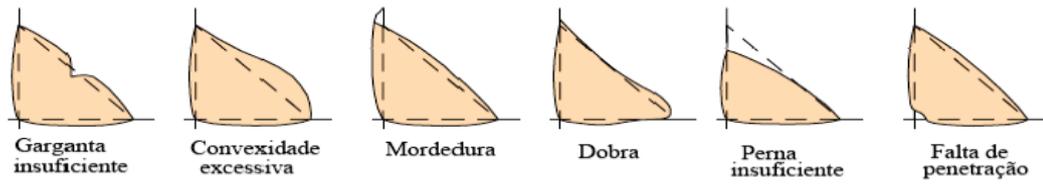


Figura 33 – Dimensões incorretas das juntas.  
Fonte: SANCHES, 2010.

### 1.9.2 Descontinuidades estruturais

- Falta de fusão ou penetração: Pode ser identificada por uma falta de fusão local, ou seja, ausência de continuidade entre o metal depositado e o metal de base ou entre os dois cordões adjacentes.

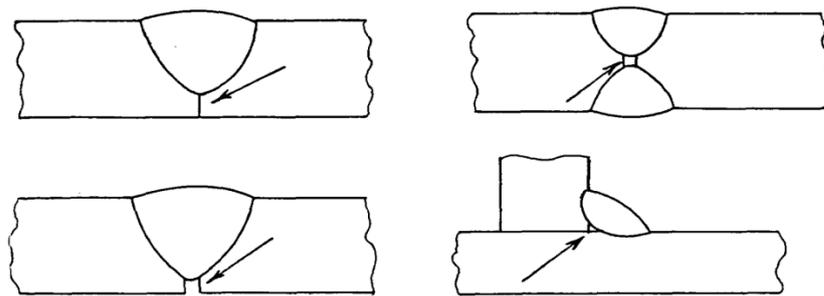


Figura 34 – Falta de penetração.  
Fonte: WAINER, BRANDI e MELLO, 1992.



Figura 35 – Falta de penetração em parte do cordão de solda.  
Fonte: SANCHES, 2010.



Figura 36 – Falta de fusão em parte do cordão de solda.  
Fonte: SANCHES, 2010.

Segundo o manual da empresa GERDAU (2014), uma siderúrgica brasileira que dentre seus vários produtos, fabrica eletrodos e outros materiais para soldagem, tal descontinuidade pode reduzir a resistência da solda e atuar como pontos de início de trincas quando a peça está em serviço. Na tabela IV listamos temos os motivos e as soluções para que se evite este tipo de descontinuidade:

Motivos	Soluções
Corrente de soldagem (amperagem) muito baixa.	Verificar a faixa de corrente adequada para a bitola que está usando. Devemos utilizar do meio da faixa para cima.
Bitola do eletrodo muito grossa ou chanfro muito apertado.	Reduzir a velocidade de soldagem para um enchimento correto no centro e nas laterais da junta. Cordões retos, sem tecimento devem ser priorizados.
Velocidade de soldagem muito alta.	Usar a menor bitola do eletrodo. Aumentar o ângulo do chanfro para permitir a facilitação o acesso do eletrodo. Soldar na posição plana, para facilitar o acesso ao chanfro.
Abertura excessiva da junta.	Procurar reduzir a abertura da junta, ou usar uma técnica de tecimento adequada para encher a abertura.
Em peças espessas, ocorre falta de penetração na raiz da solda	Montar melhor a peça para possibilitar uma pequena abertura entre as chapas no fundo da junta.
Ângulo de eletrodo ou movimentação do eletrodo (tecimento) inadequados.	Mudar o ângulo do eletrodo para que a força do arco segure o metal nas laterais. Manter a velocidade de soldagem adequada e evitar um tecimento excessivo.
Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo).	Soldar com o eletrodo mais próximo à peça, proporcionando um arco curto.

Fonte: GERDAU, 2014 (adaptada).

- Excesso de respingos: Não afetam a resistência da solda, mas deixam o cordão irregular, o que aumenta o custo de limpeza da solda (GERDAU, 2014).



Figura 37 – Excesso de respingos I.  
Fonte: SANCHES, 2010.



Figura 38 – Excesso de respingos II.  
Fonte: SANCHES, 2010.

Tabela V - Motivos e soluções para excesso de respingos

Motivos	Soluções
Corrente de soldagem (amperagem) muito alta.	Verificar a faixa de corrente adequada para a bitola que está usando. Devemos utilizar do meio da faixa para cima.
Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo).	Soldar com o eletrodo mais próximo à peça, proporcionando um arco curto.
Sopro magnético: o arco se desvia sem que você mova o eletrodo.	Mude a posição do cabo terra; melhore o contato elétrico do cabo com a peça; não deixe os cabos enrolados; isole a peça.
Peça suja, enferrujada ou úmida.	Limpar bem as superfícies a serem soldadas. Usar lixadeira ou escova de aço para remover ferrugem e solventes para remover óleo ou graxa. Aquecer com maçarico para remover a umidade da peça.
Possibilidade de o eletrodo estar úmido.	Secar os eletrodos em estufa ou forno apropriado.

Fonte: GERDAU, 2014 (adaptada).

- Mordedura: Caracteriza-se por uma depressão sob a forma de entalhe no metal de base, acompanhando a margem da solda (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992). A presença de mordeduras é um fator preponderante para a redução da seção resistente provoca um enfraquecimento da junta soldada (SANCHES, 2010). Segundo a GERDAU (2014), tal descontinuidade prejudica a resistência da solda e pode passar a ser um ponto para início de trincas quando a peça estiver em serviço, além de caracterizar um ponto preferencial para início de corrosão.



Figura 39 – Mordeduras no cordão de solda.  
Fonte: SANCHES, 2010.

Tabela VI - Motivos e soluções para mordeduras

Motivos	Soluções
Corrente de soldagem (amperagem) muito alta.	Verificar a faixa de corrente adequada para a bitola que está usando. Devemos utilizar do meio da faixa para cima.
Velocidade de soldagem muito alta.	Reduzir a velocidade de soldagem para um enchimento correto das laterais da junta.
Bitola do eletrodo muito grossa ou chanfro muito apertado.	Usar uma menor bitola do eletrodo. Aumentar o ângulo do chanfro para proporcionar a facilitação de acesso do eletrodo.
Ângulo de eletrodo ou movimentação do eletrodo (tecimento) inadequada.	Mudar o ângulo do eletrodo para que a força do arco segure o metal nas laterais. Manter a velocidade de soldagem adequada e evitar tecimento excessivo.
Sopro magnético: o arco se desvia sem que você mova o eletrodo.	Mudara posição do cabo terra; melhorar o contato elétrico do cabo com a peça; não deixar os cabos enrolados; isolar a peça.
Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo).	Soldar com o eletrodo mais próximo à peça, mantendo um arco curto.
Possibilidade de o eletrodo estar úmido.	Acondicionar os eletrodos conforme especificações do fabricante.

Fonte: GERDAU, 2014 (adaptada).

- Trincas: Pode ser definida como o resultado da ruptura localizada do material (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992). SANCHES (2010) considera que estes são os tipos de descontinuidades mais graves em uma junta soldada por serem potenciais concentradores de tensão, podendo haver ocorrência de ruptura durante, logo após a soldagem ou em operações posteriores de soldagem, com probabilidade de ocorrer a quente ou a frio.



Figura 40 – Trincas propagadas devido ao trabalho da peça.  
Fonte: SANCHES, 2010.

Tabela VII - Possíveis motivos e soluções para trincas

Possíveis motivos	Soluções
Trinca de cratera: no final do cordão o arco é fechado muito rápido.	No final do cordão encher adequadamente a cratera de solda.
Teor de carbono ou enxofre elevado no metal de base.	Use eletrodo tipo E-7018 devidamente seco. Pré-aquecer a peça. Reduzir a penetração, usando baixa corrente de solda e eletrodos de menor bitola.
Peça muito espessa ou junta muito rígida.	Usar eletrodo tipo E-7018 devidamente seco. Pré-aquecer a peça. Reduzir a penetração, usando baixa corrente de solda e eletrodos de menor bitola.
Cordão de solda muito côncavo ou muito convexo.	Priorizar cordões planos ou ligeiramente convexos.
Possibilidade de o eletrodo estar úmido.	Acondicionar os eletrodos conforme especificações do fabricante.
Junta ou chanfro incorreto em peças espessas ou com vários passes.	Melhorar a montagem de forma a permitir que o metal de base dilate e contraia livremente. Usar um chanfro mais aberto. Pré-aquecer a peça.

Fonte: GERDAU, 2014.

- Porosidade: São causadas principalmente por contaminações de sujeira, oxidação e umidade, na superfície do metal de base e consumíveis de soldagem (SANCHES, 2010). Segundo WAINER, BRANDI e MELLO (1992) porosidade é um conjunto de poros regularmente distribuídos e poro é um vazio arredondado, isolado e interior à solda. Segundo os autores a porosidade pode ser alinhada, agrupada ou vermiforme, conforme figuras 41, 42 e 43, respectivamente:



Figura 41 – Porosidade alinhada.

Fonte: SANCHES, 2010.

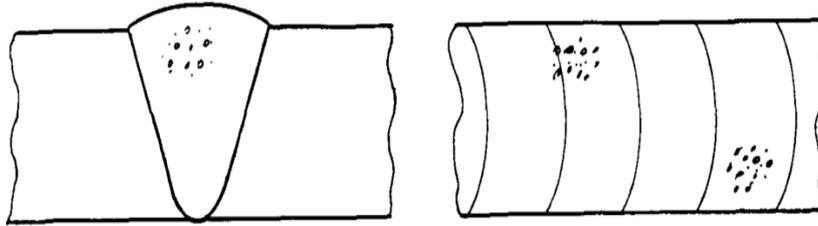


Figura 42 – Porosidade agrupada.  
Fonte: WAINER, BRANDI e MELLO, 1992.

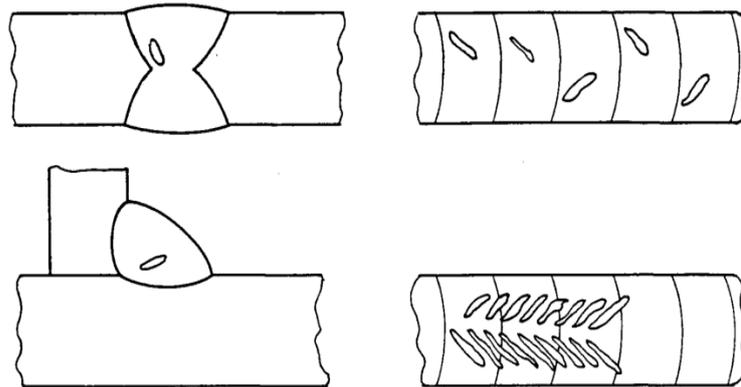


Figura 43 – Porosidade vermiforme.  
Fonte: WAINER, BRANDI e MELLO, 1992.

Tabela VIII - Motivos e soluções para evitar porosidade.

Motivos	Soluções
Peça suja, enferrujada ou úmida.	Manter as superfícies a serem soldadas limpas. Usar lixadeira ou escova de aço para remover ferrugem e solventes para remover óleo ou graxa. Aquecer com maçarico para remover a umidade da peça.
Corrente de soldagem (amperagem) incorreta.	Verificar junto ao fabricante do eletrodo a faixa de corrente adequada para a bitola em uso, geralmente esta informação está presente na embalagem.
Velocidade de soldagem muito alta.	Manter a poça de solda fundida por mais tempo, permitindo que os gases escapem antes que a solda solidifique.
Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo).	Soldar com o eletrodo mais próximo à peça, proporcionando um arco curto.
Polaridade incorreta.	Verificar a polaridade indicada para ser usada com aquele eletrodo.
Possibilidade de o eletrodo estar úmido.	Acondicionar os eletrodos conforme especificações do fabricante.

Fonte: GERDAU, 2014.

- Inclusão de escória: Ocorre pela retenção de pedaços de escória na solda, o que reduz a resistência da solda e serve como ponto de início de trincas quando a peça está em uso.



Figura 44 – Inclusão de escória.  
Fonte: SANCHES, 2010.

Tabela IX - Motivos e soluções para evitar inclusão de escória.

Motivos	Soluções
Entre um cordão e outro, a escória não foi removida corretamente.	Remover integralmente a escória antes de aplicar outro cordão de solda. Usar picadeira e escova de aço.
Na troca de eletrodo, a escória não foi removida adequadamente no final da solda.	Ao substituir um eletrodo, limpar o final da solda para começar a soldagem em uma superfície limpa, sem escória.
A escória dos cordões de ponteamto para a montagem da peça não foi adequadamente removida.	Remover totalmente a escória dos cordões de ponteamto após montagem da peça. Usar picadeira e escova de aço.
Ângulo de eletrodo ou movimentação do eletrodo (tecimento) inadequados.	Mudar o ângulo do eletrodo para que a escória líquida não ultrapasse a poça de solda. Manter a velocidade de soldagem adequada e evitar um tecimento excessivo.
Bitola do eletrodo muito grossa ou chanfro muito apertado. A escória não destaca com facilidade.	Usar a menor bitola do eletrodo. Aumentar o ângulo do chanfro para facilitar o acesso do eletrodo e facilitar a remoção de escória entre cordões.

Fonte: GERDAU, 2014.

### 1.10 Determinação dos custos em soldagem.

O termo custo pode tanto pode significar tanto uma estimativa quanto o custo real. Independentemente de qualquer dos casos tem-se como objetivo a determinação do custo do metal depositado. Dentre os motivos para se determinar o custo podemos citar: elaboração de orçamentos para concorrência e estimativas para comparação entre processos de fabricação e soldagem (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

O custo total de um processo qualquer de soldagem pode ser calculado conforme abaixo:

$$CT = CMO + CMA + CE + CM + CD + CMC \quad (R\$) \quad (II)$$

Onde **CMO** é o custo da mão de obra, **CMA** é o custo do metal de adição, **CE** é o custo da energia elétrica, **CM** é o custo de manutenção, **CD** é o custo de depreciação e **CMC** é o custo de outros materiais de consumo. Para efetuar o cálculo dos custos de soldagem podemos considerar todos os itens acima ou apenas alguns deles, o que vai depender da precisão desejada (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

O custo da mão de obra (**CMO**) é dado por:

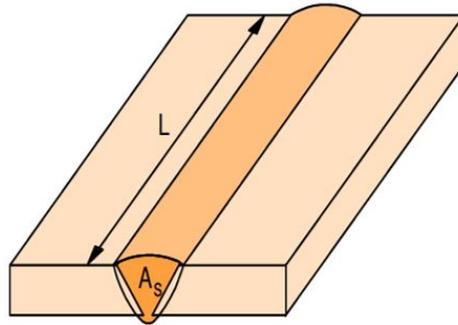
$$CMO = (\text{Custo unitário}) (R\$/h) \cdot (\text{tempo de soldagem}) (h) \quad (III)$$

Este pode ser calculado incluindo salários, encargos sociais e os custos fixos da empresa (“overhead”). O tempo de soldagem pode ou não incluir os tempos de parada do soldador para troca de eletrodos, retirada de escória, dentre outros. Caso seja necessário um cálculo mais objetivo, o custo de soldagem pode levar em conta apenas o trabalho dos profissionais envolvidos diretamente com a soldagem, incluindo montadores e soldadores. Neste caso os custos fixos da empresa devem ser considerados em uma parcela específica (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

O cálculo estimativo do custo do metal de adição deve iniciar pela avaliação do custo do metal depositado (**CMD**), cujo é dado pelo produto da massa de metal depositado pelo custo do eletrodo (ou vareta), conforme equação IV (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

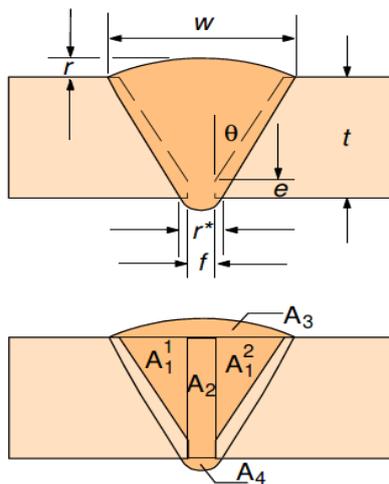
$$CMD = \text{massa do metal depositado} (kg) \cdot \text{custo do eletrodo} (R\$/kg) \quad (IV)$$

A massa do metal depositado (**Mmd**) é obtida pelo produto da área da seção transversal da junta, do comprimento da solda e da densidade do material, conforme equação V. A área da seção transversal depende da geometria de chanfro usado, no caso de soldas de chanfro. Para cálculo do custo de soldas de filete considera-se para seção transversal a área de um triângulo retângulo.



$m_s = A_s \cdot L \cdot \rho$   
 $\rho$  = é a densidade da solda  
 $A_s$  é a área da seção transversal do cordão  
 $L$  é o comprimento do cordão

Figura 45 – Cálculo da massa de metal depositado ( $m_s$ ).  
Fonte: MODENESI, 2001.



$$m_{md} = \int \rho \cdot L \cdot dA_{Smd}$$

$$A_{Smd} = \sum_{k=1}^n A_{sn} \cdot dk$$

$$m_{md} = \rho \cdot L \cdot \sum_{k=1}^n A_{sn} \cdot dk$$

$$A_2 = t \cdot f$$

$$A_3 = (\pi/2 + 1) \cdot [2 \cdot (t-e) \cdot \tan(\theta) + f] \cdot r/4$$

$$A_4 = \pi/2 \cdot f^2 \text{ ou } A_4 = \pi/2 \cdot r^2$$

Figura 46 – Exemplo de cálculo de  $A_s$ .  
Fonte: MODENESI, 2001.

$$Mmd (kg) = \rho \cdot L \cdot \{ (t-e)^2/2 \cdot \tan(\theta) + t \cdot f + \pi \cdot w \cdot r/4 + (\pi/2 + 1) \cdot [2(t-e) \cdot \tan(\theta) + f] \cdot r/4 + \pi/2 \cdot f^2 \} \quad (V)$$

Tabela X - Área da seção transversal

Tipo de chanfro	Área da seção transversal
V Simples	$(e-h)^2 \cdot \tan(\theta/2) + d \cdot e$
V Duplo	$0,5 \cdot [(e-h)^2 \cdot \tan(\theta/2)] + d \cdot e$
K	$0,5 \cdot [(e-h)^2 \cdot \tan \theta] + d \cdot e$
Y	$0,25 \cdot [(e-h)^2 \cdot \tan \theta] + d \cdot e$

onde, e= espessura da chapa,  $\theta$ =ângulo da junta,  
h=nariz, d=fresta.

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

No cálculo do custo do metal de adição (CMA) devemos considerar a parte deste é perdida na forma de respingos, pontas descartadas, e outras, estimada pela eficiência de

deposição (**ED**), a qual é obtida dividindo-se o preço do metal depositado pela eficiência de deposição do processo, conforme equação VI:

$$CMA (R\$) = \frac{100 \cdot CMD}{ED (\%)} \quad (VI)$$

O custo da energia elétrica é calculado por:

$$CE (R\$) = \frac{10 \cdot PE (kWh) \cdot PES (kW) \cdot t (h)}{E (\%)} \quad (VII)$$

Onde **PE** é o preço da energia elétrica, **PES** é a potência elétrica de saída, **t<sub>a</sub>** é o tempo de arco aberto e **E** é a eficiência do equipamento. O fator 10 foi obtido a partir de um fator de 100 relativo à eficiência de deposição e outro de 1000 devido à diferença de unidades para a potência de saída (**kW**) e as utilizadas para sua determinação, tensão (**V**) e corrente de soldagem (**A**), cujo produto é expresso em **Watts (W)**. Os fabricantes de equipamentos de soldagem fornecem a eficiência elétrica média dos produtos. Para efeito de conhecimento a eficiência elétrica média de um transformador é cerca de 80%, enquanto um gerador apresenta eficiência de cerca de 65%. A potência elétrica de saída é dada pelo produto da tensão (**V**) pela corrente de soldagem (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Com base na velocidade de soldagem (**v<sub>w</sub>**) o tempo de arco é dado por:

$$t_a = \frac{\int_0^L dl}{v_w} \quad (VIII)$$

Onde:

*L*=comprimento de solda

Com base na taxa de deposição do processo (**z<sub>m</sub>**), o tempo de arco é dado por:

$$t_a = \frac{Mmd}{Z_m} \quad (IX)$$

Onde:

$$Z_m = \frac{dm}{dt}$$

A taxa de deposição é definida como a quantidade de material depositado por unidade tempo e é dependente de muitos fatores, como o processo de soldagem, o tipo, diâmetro e comprimento do eletrodo, e o tipo, a polaridade e a intensidade de corrente (MODENESI, 2001).

Para uma soldagem com mais de um passe a velocidade de soldagem é dada por:

$$1/v_{wm} = \sum_i \frac{1}{v_{wi}} \quad (X)$$

Onde:

*v<sub>wi</sub>* é a velocidade de soldagem por passe

O número necessário de passes pode ser estimado, para uma velocidade média  $v_{wm}$  por passe, por:

$$n_P = Mmd \cdot v_{wm} / \frac{dm}{dt} \cdot \int_0^L dl \quad (XI)$$

O tempo total para operação de soldagem ( $t_T$ ), considerando o tempo de arco aberto e o tempo necessário para outras operações (remoção de escória e respingos, troca de eletrodos, posicionamento do cabeçote, dentre outros) é obtido por:

$$t_T = \frac{t_\Phi}{\Phi} \quad (XII)$$

Na equação XII  $\Phi$  é o fator de ocupação ou de marcha, cujo para operações manuais varia de 5% a 30% (MODENESI, 2001).

O custo de depreciação é dado por:

$$CD = \frac{\text{valor do investimento inicial (R\$)} - \text{valor residual (R\$)}}{\text{vida útil do equipamento}} \quad (XIII)$$

No Brasil taxas máximas de depreciação são estabelecidas pela Secretaria da Receita Federal (SRF):

Tabela XI - Taxas máximas de depreciação estabelecidas pela SRF

Tipos de ativos	Taxa anual (%)	Vida útil (anos)
Prédios/Construções	4	25
Móveis e utensílios	10	10
Máquinas e equipamentos	10	10
Veículos e equipamentos	20	5

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011.

O custo médio de manutenção (**CMM**) deve ser avaliado tendo por base os custos de manutenção do equipamento, para um certo período de tempo, dividido pelo número de horas de operação deste equipamento no período considerado. Então, o custo da manutenção para uma determinada operação pode ser calculado por:

$$CM (R\$) = CMM (R\$/h) \times \text{tempo de operação (h)} \quad (XIV)$$

Temos ainda outros custos de consumo, os quais levam em consideração: bicos de contato, líquido antirrespingos, eletrodos não consumíveis, materiais de segurança, etc. O custo destes itens deve ser incluído no custo total de soldagem (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

### 1.11 Dimensionamento de solda.

Segundo a norma AWS D 1.1 de 2010 a garganta efetiva de solda deve ser definida como a distância mínima da raiz de junta à sua face, com ou sem dedução de 3mm, menos qualquer convexidade. O comprimento efetivo máximo de solda de qualquer solda em chanfro, a despeito da orientação, deve ser a largura da parte encaixada, perpendicular à direção da resistência compressiva ou de tração.

Quando o projeto prevê enchimento incompleto (penetração parcial), com chanfro em bisel, a espessura efetiva  $t_e$  é tomada igual à profundidade  $y$  do entalhe menos 3 mm, quando o ângulo da raiz do entalhe fica entre  $45^\circ$  e  $60^\circ$  (exceto na soldagem com proteção gasosa ou com fluxo no núcleo em posições plana e horizontal quando toma-se  $t_e = y$ ), quando este ângulo é maior que  $60^\circ$  em chanfros em V ou bisel, toma-se  $t_e$  igual à profundidade do entalhe (PFEIL e PFEIL, 2009). O comprimento efetivo é igual à largura da peça ligada pela solda de entalhe. A área efetiva de solda é o produto do comprimento efetivo pela garganta efetiva de solda ( $A = t_e \times L$ ) (ANDRADE, 1994). A garganta efetiva de uma solda de entalhe de penetração total deve ser tomada igual a menor das espessuras das partes soldadas (PINHEIRO, 2005). As gargantas de solda com penetração parcial são projetadas com espessuras mínimas construtivas a fim de garantir a fusão do metal-base (PFEIL e PFEIL, 2009).

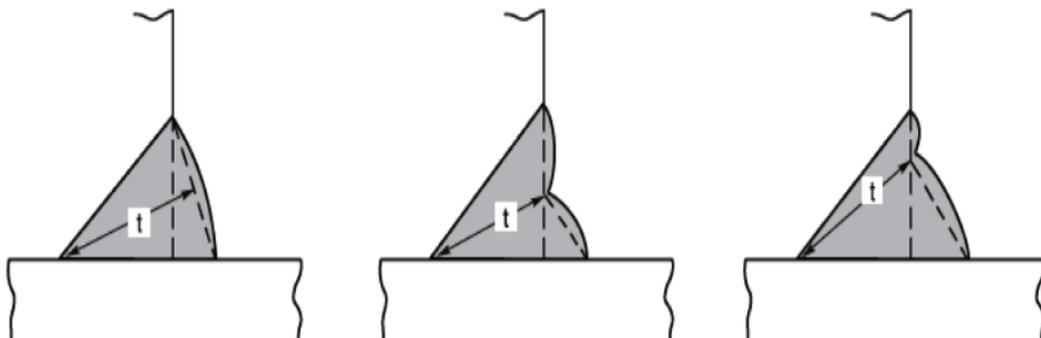


Figura 47 – Garganta efetiva de solda.  
Fonte: AWS D1.1, 2010.

Tabela XII - Dimensões mínimas da garganta de solda de entalhe com penetração parcial

Espessura da chapa mais fina em mm	Garganta de solda com penetração parcial $t_{e\min}$
até 6,3	3
6,3 a 12,5	5
12,5 a 19	6
19 a 37,5	8
37,5 a 57	10
57 a 152	13
acima de 152	16

Fonte: NBR 8800 de 2008.

As resistências de cálculo são calculadas em função de uma área efetiva de solda:

$$A_w = t_e \cdot L \quad (XV)$$

Onde  $t_e$  = garganta efetiva e  $L$  = comprimento efetivo e pela área  $A_{MB}$  do metal de base, a qual é obtida pelo produto do comprimento da solda pela espessura da peça mais delgada da ligação (PFEIL e PFEIL, 2009).

Para soldas de entalhe de penetração total, sujeitas a tensões de compressão ou tração ou perpendiculares ao eixo de solda, as resistências de cálculo são obtidas com base no escoamento do metal-base ( $f_y$ ) (PFEIL e PFEIL, 2009).

$$R_d = A_{MB} \cdot f_y / \gamma_{a1} \quad (XVI)$$

Onde  $\gamma_{a1}$ , coeficiente parcial de segurança, é igual a 1,10 para combinações de ações normais, especiais ou de construção, e 1,00 para combinações de ações excepcionais (PFEIL e PFEIL, 2009).

Para soldas de entalhe de penetração parcial sob tração ou compressão perpendiculares ao eixo da solda, a resistência é determinada com o menor valor entre (VXII) e (XVIII) (PFEIL e PFEIL, 2009):

Metal de Base

$$R_d = A_{MB} \cdot f_y / \gamma_{a1} \quad (XVII)$$

Metal da solda

$$R_d = 0,60 \cdot A_w \cdot f_w / \gamma_{w1} \quad (XVIII)$$

Onde:

$f_w$  = tensão resistente do metal da solda

$A_w$  = área efetiva de solda

$\gamma_{w1}=1,25$  para combinações normais, especiais ou de construção

$\gamma_{w1}= 1,05$  para combinações excepcionais de ações

No caso de tensões de tração ou compressão paralelas ao eixo da solda de penetração total ou parcial, não é necessário verificar a resistência. Para tensões de cisalhamento, as tensões atuando em direções diferentes são combinadas vetorialmente. A resistência de projeto é calculada pelas seguintes expressões:

Penetração total: Metal-base

$$R_d = A_{MB} \cdot (0,60 \cdot f_y) / \gamma_{a1} \quad (XIX)$$

Penetração parcial: Metal da solda

$$R_d = A_w \cdot (0,60 \cdot f_w) / \gamma_{w2} \quad (XX)$$

Onde

$\gamma_{w2} = 1,35$  para combinações normais, excepcionais ou de construção, e

$\gamma_{w2} = 1,15$  para combinações excepcionais

O tamanho mínimo de uma solda de filete é dado em função da parte menos espessa soldada:

Tabela XIII - Dimensões mínimas da perna de solda de filete

Espessura da chapa mais fina em mm	Tamanho mínimo da perna de solda de filete em mm
até 6,3	3
6,3 a 12,5	5
12,5 a 19	6
acima de 19	8

Fonte: NBR 8800 de 2008.

O tamanho máximo da perna de uma solda de filete que pode ser aplicado ao longo de bordas de partes soldadas é o seguinte (NBR 8800 de 2008):

- Quando se tratar de bordas de material com espessura inferior a 6,35 mm, não mais do que a espessura do material.
- No caso de bordas de material com espessura igual ou superior a 6,35 mm, não mais do que a espessura do material subtraída de 1,5 mm, exceto se no desenho essa solda seja especificada como reforçada durante a execução, de modo a obter a espessura total desejada da garganta.

Para efetuarmos cálculos de dimensionamento assemelhamos as soldas de filete a triângulos retângulos. Os filetes são especificados pelo comprimento de seus lados. Chamados

de garganta do filete a espessura desfavorável  $t$ , indicada na figura 48; perna é definida como o menor lado do filete; e raiz, a interseção das faces de fusão.

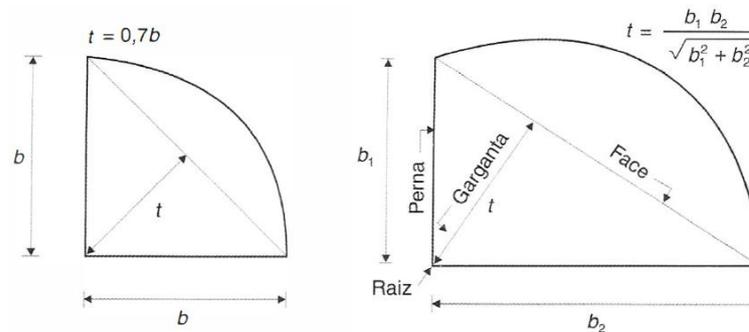


Figura 48 – Filete de solda.  
Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

O cálculo da área efetiva de um filete de pernas iguais  $b$  e comprimento efetivo  $L$  é obtido por:

$$t_e . L = 0,7 . b . L \quad (XXI)$$

Definimos o comprimento efetivo  $L$  como o comprimento total da solda, considerando-se os retornos de extremidade. No caso de soldas de filetes longitudinais em peças submetidas a esforços axiais  $L$  é tomado igual ao comprimento da solda multiplicado pelo fator de redução  $\beta$  (PFEIL e PFEIL, 2009).

$$\beta = 1,2 - 0,002 . L/b, \text{ sendo } 0,6 \leq \beta \leq 1,0 \quad (XXII)$$

O fator de redução é aplicável a soldas longas ( $L > 100 b$ ), nas quais deve-se considerar que as distribuições de tensão não são distribuídas uniformemente.

A exigência de dimensões mínimas para filetes de solda é necessária para garantir a fusão dos materiais que estão sendo soldados, evitar a ocorrência de fraturas a frio e minimizar as distorções. A espessura da chapa mais fina é usada como base para determinação da dimensão mínima da perna de solda. Não é necessário que a perna do filete exceda a espessura da chapa mais fina, exceto por necessidade de cálculo. No caso em que  $t = b$  pode ocorrer a fusão da quina superior da chapa e a redução da perna, por este motivo é necessária uma folga de 1,5 mm entre a perna  $b$  e a espessura  $t$  da chapa (PFEIL e PFEIL, 2009).

Conforme especificações da norma brasileira deve-se ter ainda:

$$L \geq 4.b \text{ ou } 40 \text{ mm (o maior dos dois valores)} \quad (XXIII)$$

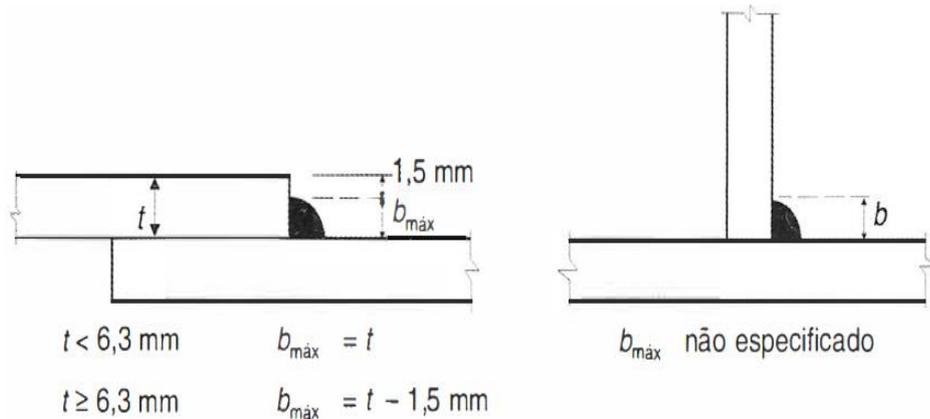


Figura 49 – Dimensões máximas dos lados de solda de filete.  
 Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

Em casos de utilização de solda de filete em ligações de extremidade de peças tracionadas, é necessário que o comprimento dos filetes ( $L_w$ ) seja maior ou igual à largura  $a$  das chapas (PFEIL e PFEIL, 2009).

O cálculo da resistência das soldas de filete é realizado em função da área efetiva, dada por:

$$A_w = t \cdot L \quad (XXIV)$$

Sendo  $t$  = espessura da garganta de solda.

Segundo os autores podemos desprezar a ação de esforços solicitantes de tração ou compressão atuando paralelamente à direção do eixo longitudinal da solda. Entretanto devemos levar em consideração a transmissão de esforços de uma chapa à outra através de cisalhamento pela garganta de solda. O limite de ruptura do metal de solda deve ser considerado como estado limite. Todo esforço atuante em uma direção qualquer do plano perpendicular ao eixo longitudinal da solda é considerado de cisalhamento.

O cálculo da resistência pode ser obtido por:

$$R_d = A_w \cdot (0,60 \cdot f_w) / \gamma_{w2} \quad (XXV)$$

No caso de tensões não-uniformes podemos calcular a resistência em como esforço por unidade de comprimento:

$$R_d = t \cdot (0,60 \cdot f_w) / \gamma_{w2} \quad (XXVI)$$

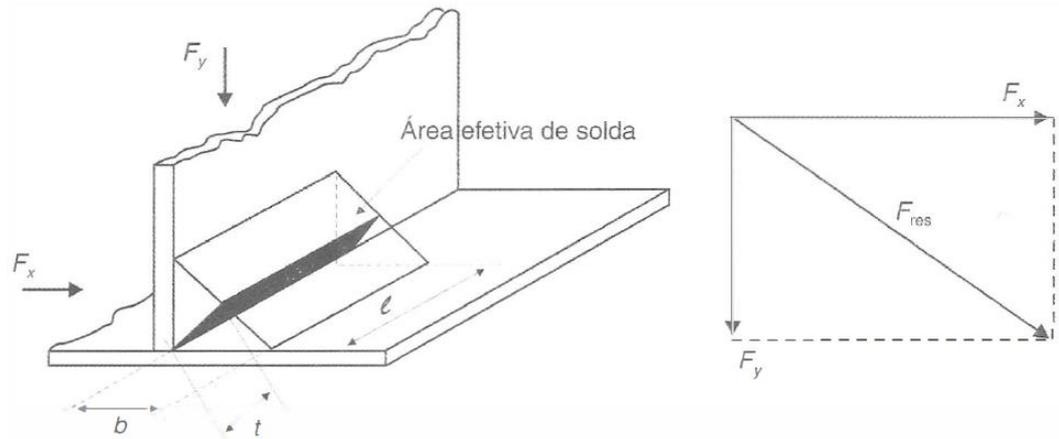


Figura 50 – Composição das forças de cisalhamento no filete de solda.  
 Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

Para chapas e peças de ligação submetidas a cisalhamento, o cálculo dimensional é feito com base nas resistências ao escoamento da seção bruta:

$$R_d = A_g \cdot (0,6 \cdot f_y) / \gamma_{a1} \quad (XXVII)$$

Sendo  $A_g$  a área submetida a cisalhamento calculada com a espessura da peça ligada. O termo  $f_y$  é a tensão de escoamento do metal de base,  $\gamma_{a1}$  é o coeficiente parcial de segurança.

## 2. METODOLOGIA

O presente estudo é de natureza quantitativa, uma vez que efetuaremos simulações computacionais com base em dados fornecidos pela NBR 8800 e AWS D1.1 quanto ao dimensionamento de solda de filete para fabricação de estruturas metálicas de aço carbono.

Para calcularmos o custo de metal depositado utilizaremos os dados disponibilizados nas planilhas orçamentárias da SEINFRA – Secretaria de Estado de Infraestrutura do Amazonas e a metodologia adotada para este cálculo será a descrita na revisão bibliográfica.

Com base nas fontes consultadas, temos que o custo pode ser expresso por:

$$f_{\text{custo}} = \int_0^t CMO dt + \int_0^t CE dt + \int_0^t CD dt + \int_0^t CMM dt + C_{\text{unitário}} \cdot \int_0^t MMD dt$$

Entretanto, para efeito de simplificação consideraremos apenas a última parcela da expressão supracitada, a qual fornece o custo do metal depositado em função do preço do kilograma do metal, sua densidade, o comprimento do cordão e a área da seção transversal. Consideraremos os casos de cálculo com perdas (perda de ponta do eletrodo, excesso de respingos, e outras) e o cálculo sem levar em conta as perdas. Os eletrodos adotados para a simulação serão o E6013 e o E7018, com resistências de 415 Mpa e 485 Mpa, respectivamente. Os resultados obtidos através da simulação computacional serão organizados em gráficos para melhor avaliação e discussão.

Para executarmos os cálculos de resistência do metal de solda em função do comprimento do cordão utilizamos a seguinte equação modificada, a qual não foi encontrada nas obras consultadas e relaciona o comprimento do cordão ( $L$ ), as pernas dos filetes ( $S_{12}$  e  $S_{22}$ ), a resistência do metal de solda ( $f_w$ ) e o fator de segurança ( $\gamma_w$ ):

$$R_{wd} = (1,2 \cdot L - 0,002 \cdot L^2) \cdot ((S_{12}/2 \cdot (S_{22})^2) + ((S_{22}/2 \cdot (S_{12})^2)^{0,5} \cdot (0,6 \cdot f_w \cdot 10^6) \cdot (S_{12} \cdot S_{22}) / (\gamma_w \cdot ((S_{12})^2 + (S_{22})^2))$$

Consideraremos em nosso estudo apenas as soldas de filete, fabricadas pelo processo de soldagem a arco elétrico por eletrodo revestido, devido à sua larga utilização, a qual corresponde à cerca de 80% de todos os tipos de soldas aplicados no mundo.

Além das normas técnicas citadas, foram utilizadas monografias, manuais técnicos, livros de autores consagrados no meio científico e apostilas sobre o Matlab, as quais nos auxiliaram na utilização de ferramentas básicas do programa, com o objetivo de obtermos um consistente embasamento bibliográfico para elaboração do estudo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi avaliado o comportamento da força resistiva do metal de solda em função do comprimento do cordão de solda para os casos de solda de filete com pernas iguais a 6 mm e solda de filete com pernas diferentes, iguais a 4,0 mm e 8,0 mm, conforme critérios de dimensionamento fornecidos pela NBR 8800/08 e adotando ainda o eletrodo E6013, com resistência à ruptura de 415 MPa. No algoritmo utilizamos um passo igual a 10 e consideramos a variação de comprimento de 0,04 m a 1 m, pois os critérios de dimensionamento estabelecidos em norma estabelecem o valor mínimo de 40 mm para comprimento do cordão e não há o estabelecimento de valor máximo obtendo o seguinte resultado:

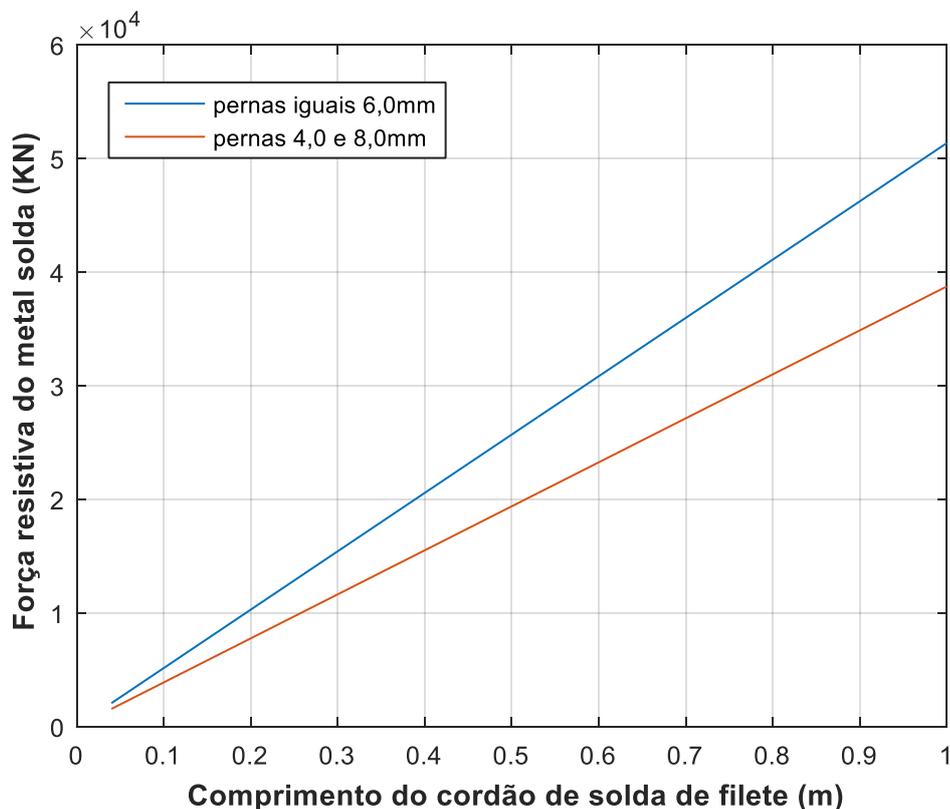


Gráfico 1: L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) - E6013.  
Fonte: Própria.

Podemos ver que nos dois casos temos um comportamento linear. Foi observado que para qualquer comprimento do cordão diferente de zero tomado, a força resistiva do metal de solda é maior para soldas de filete de pernas iguais.

No segundo caso foi utilizado um filete com pernas iguais a 8,0 mm e outro com pernas diferentes, sendo uma de 8,0 mm e outra de 12,0 mm e adotamos um passo igual a 10 e variamos o comprimento do cordão de solda de 0,04 m até 1 m. O eletrodo considerado na

simulação foi novamente o E6013, cuja resistência à ruptura do metal de solda é 415 MPa. Obtivemos um gráfico com o seguinte aspecto:

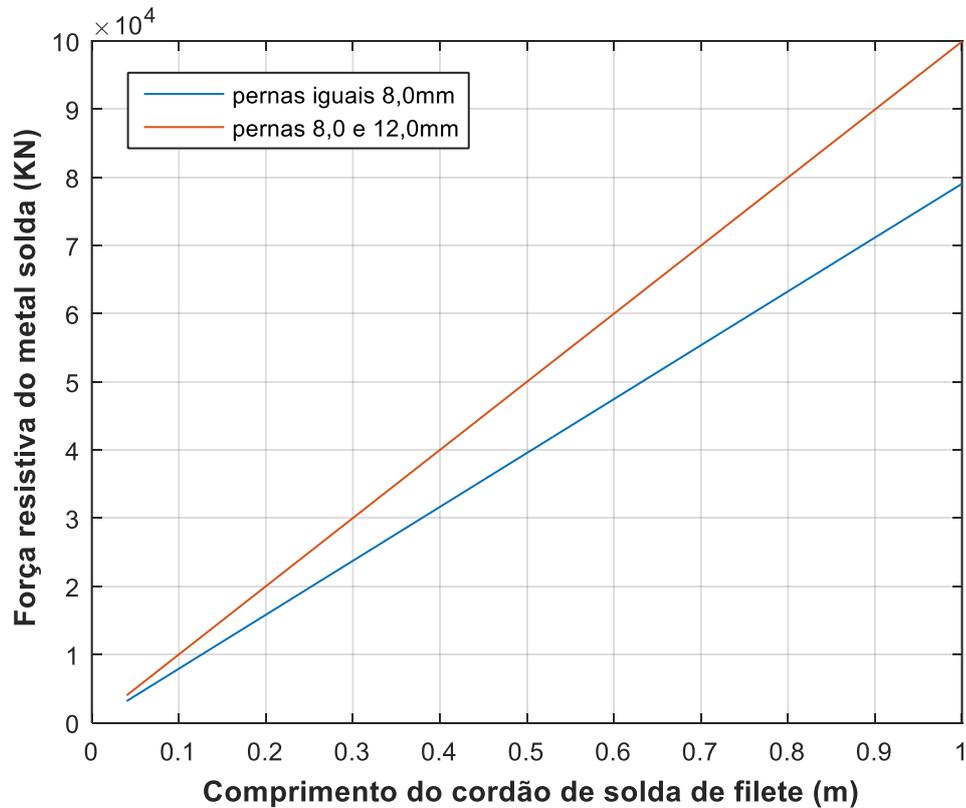


Gráfico 2: L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) - E6013.  
Fonte: Própria.

No gráfico 2 foi observado que para qualquer comprimento do cordão de solda diferente de zero tomado, a resistência do metal de solda é maior para o filete de pernas diferentes.

No terceiro gráfico foi utilizado o eletrodo E7018, cuja resistência à ruptura do metal de solda vale 485 Mpa. Consideramos um filete com pernas iguais a 4 mm e outro com pernas diferentes, correspondendo à 4 mm e 6 mm cada. O passo utilizado foi de 10 e a variação do comprimento do cordão foi de 0.04 m a 1 m. Obtivemos o seguinte resultado:

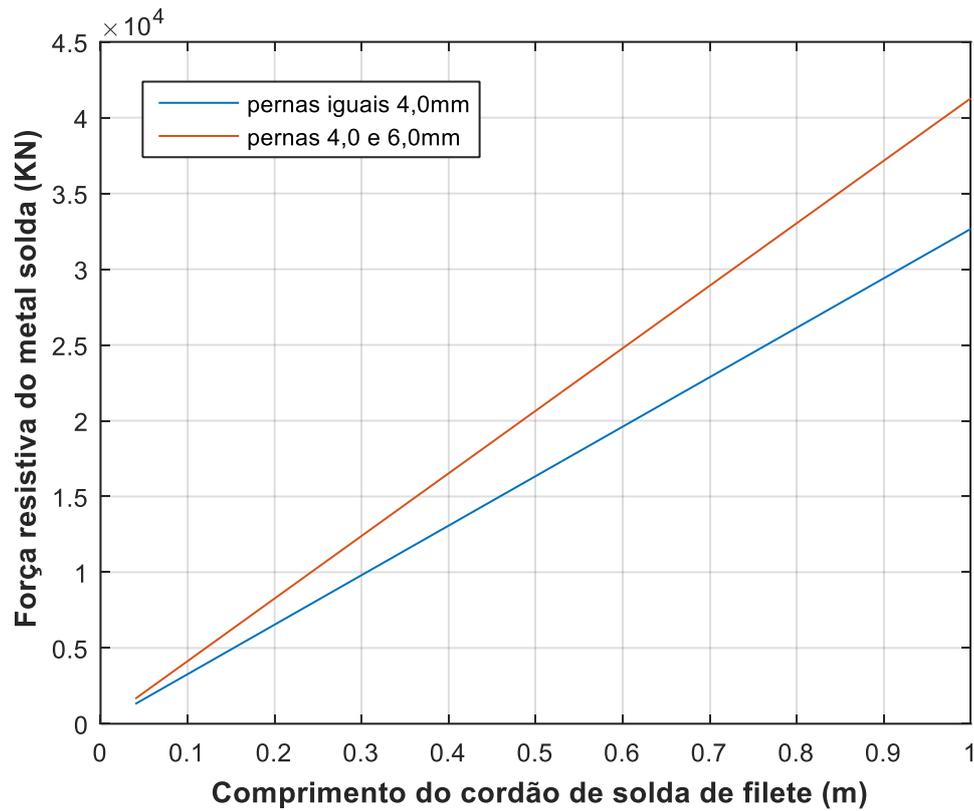


Gráfico 3: L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) – E7018.  
Fonte: Própria.

Foi observado que para qualquer comprimento do cordão diferente de zero tomado a força resistiva do metal de solda é maior para o filete com pernas diferentes.

No gráfico 4 consideramos novamente o eletrodo E7018, um filete com pernas iguais à 7 mm e outro com pernas de 5 mm e 7mm. Utilizamos o passo igual a 10 a variação do comprimento do cordão de solda indo de 0,04 m à 1,0 m, obtendo o seguinte resultado:

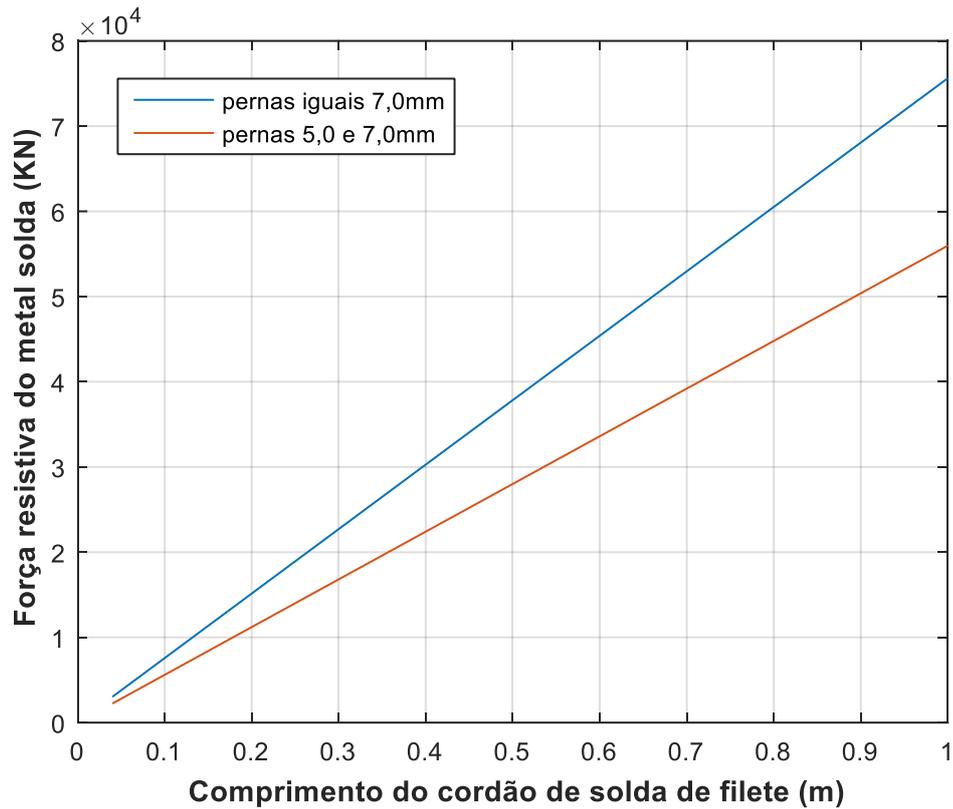


Gráfico 4: L (m) x Força resistiva do metal de solda (kN) – E7018.  
Fonte: Própria.

Neste caso foi observado que para qualquer comprimento diferente de zero tomado o filete de pernas iguais apresenta o maior valor para a força resistiva. A alternância vista com relação a maior ou menor força resistiva apresentada nos casos estudados está diretamente relacionada com o maior ou menor valor da área efetiva  $A_w$ , cuja é maior nos casos 1 e 4 para os filetes de pernas iguais e nos casos 2 e 3 para os filetes com pernas diferentes.

Foi simulado o comportamento da eficiência e da taxa de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 em relação a valores ótimos de corrente com base nos dados do manual do fabricante ESAB (2005). Através da realização de uma aproximação linear obtivemos os seguintes resultados:

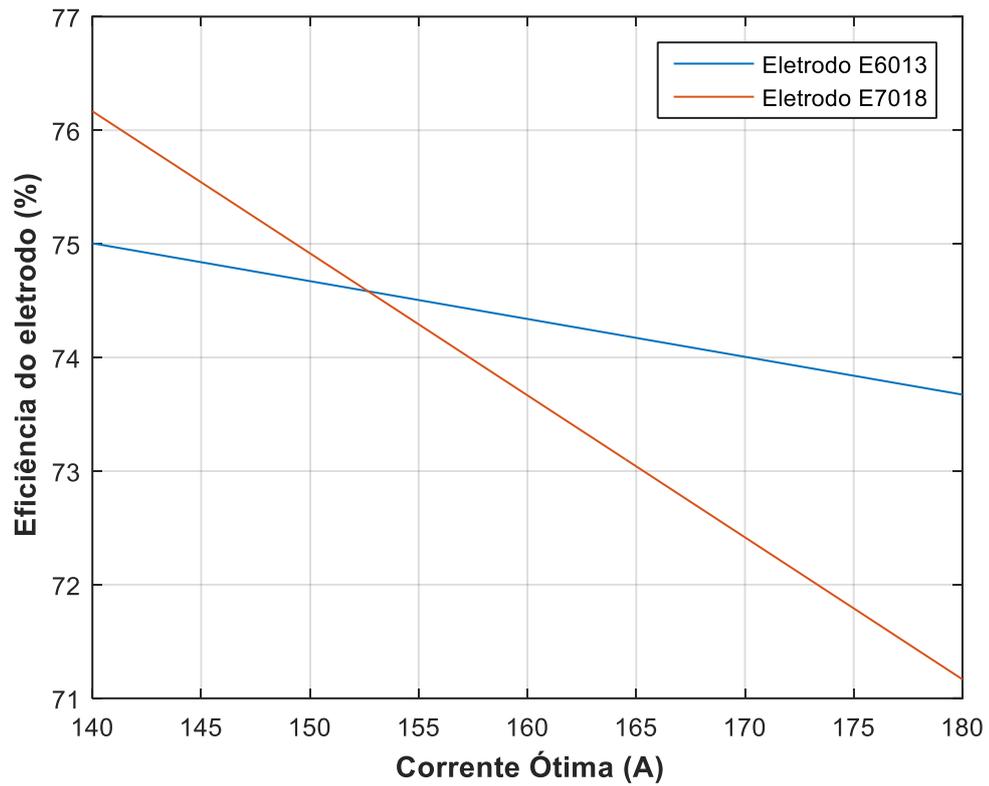


Gráfico 5: Eficiência do eletrodo (%) x Corrente ótima (A) – E6013 e E7018.  
Fonte: Própria.

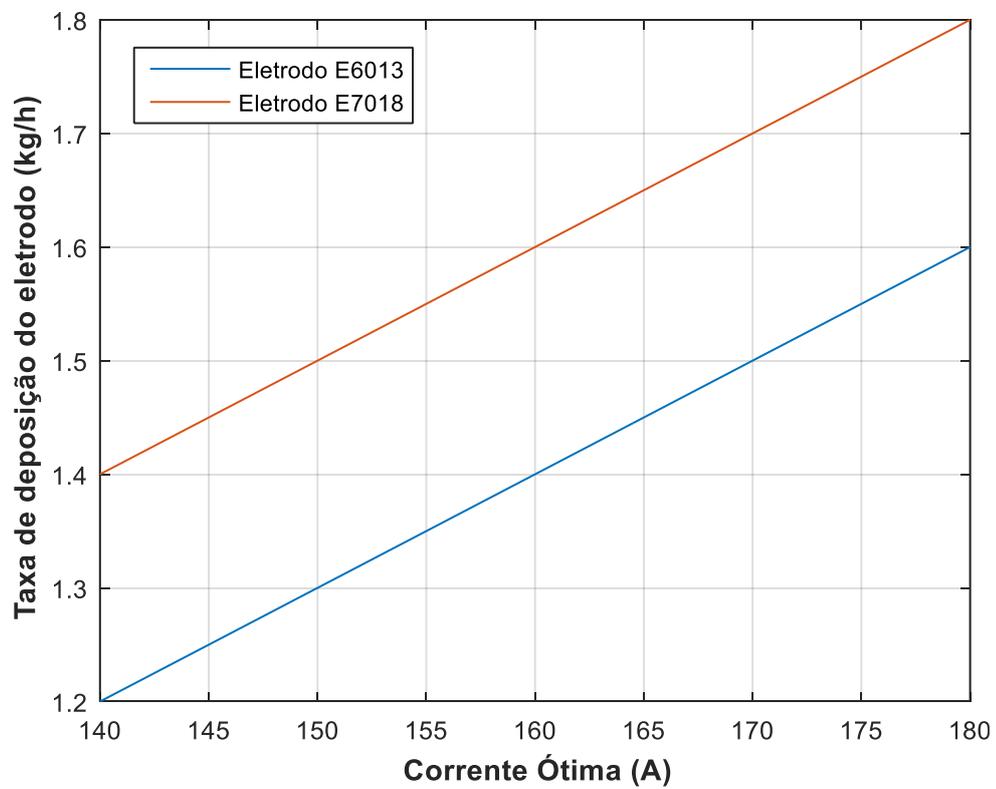


Gráfico 6: Taxa de deposição do eletrodo (kg/h) x Corrente ótima (A) – E6013 e E7018.  
Fonte: Própria.

Através do gráfico 5 foi observado que a eficiência do eletrodo E7018 diminui mais rapidamente com o aumento da amperagem da corrente ótima. Nos dois casos temos um valor específico para a corrente ótima para o qual a eficiência de deposição é a máxima possível. Também devemos lembrar que faixas de corrente são estabelecidas pelo fabricante conforme o diâmetro do eletrodo, para sua correta utilização.

No gráfico 6 obtivemos duas retas crescentes com o mesmo coeficiente angular. Logo, é fácil ver que a taxa de deposição dos eletrodos tende a aumentar com o aumento da corrente elétrica. Porém, valores excessivos de corrente podem aumentar a instabilidade do arco, provocando o fenômeno denominado golpe de arco e facilitando a ocorrência de descontinuidades, o que conforme vimos, pode comprometer principalmente a resistência da solda.

Para o cálculo do custo de soldagem utilizamos como base os dados da SEINF (Secretaria de Estado de Infraestrutura do Amazonas), a qual estabelece os valores de R\$ 13,40 por kg para o eletrodo E6013 e R\$ 14,76 por kg para o eletrodo E7018, valores estipulados para eletrodos com 4 mm de diâmetro. Consideramos também o cálculo do custo com 100% de eficiência de deposição e com perdas devido a descontinuidades como excesso de respingos, dimensionamento incorreto da junta, e outras, fatores que diminuem a eficiência de deposição do eletrodo utilizado, a qual depende diretamente da amperagem da corrente aplicada, conforme dados fornecidos pelo fabricante ESAB (2005). Vale ressaltar também que consideramos apenas o caso envolvendo tensões uniformemente distribuídas, peças simétricas e cordões de solda ideais, ou seja, perfeitamente homogêneos com relação à distribuição do metal de adição. Para efeito de simplificação da simulação consideramos o somatório do comprimento de vários filetes de solda semelhantes, adotando por extrapolação o limite máximo de 40 m. Obtivemos os seguintes resultados:

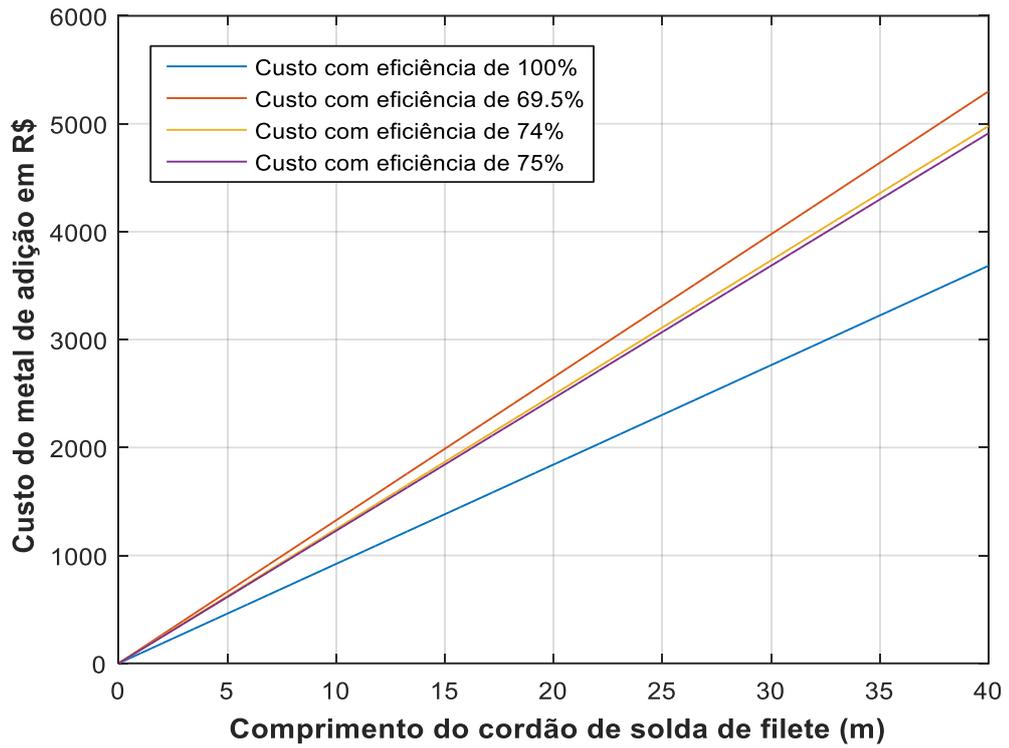


Gráfico 7: L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E7018.

Filete com pernas iguais a 4,0mm.

Fonte: Própria.

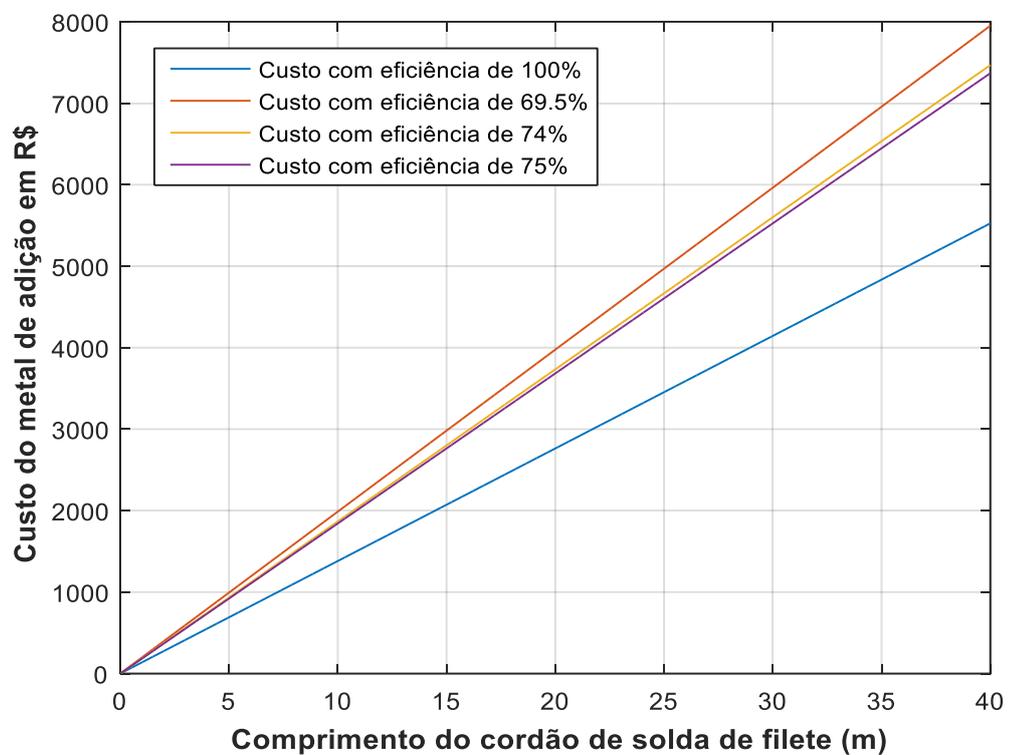


Gráfico 8: L (m) x Custo do metal de adição – E7018.

Filete com pernas de 4,0mm e 6,0mm.

Fonte: Própria.

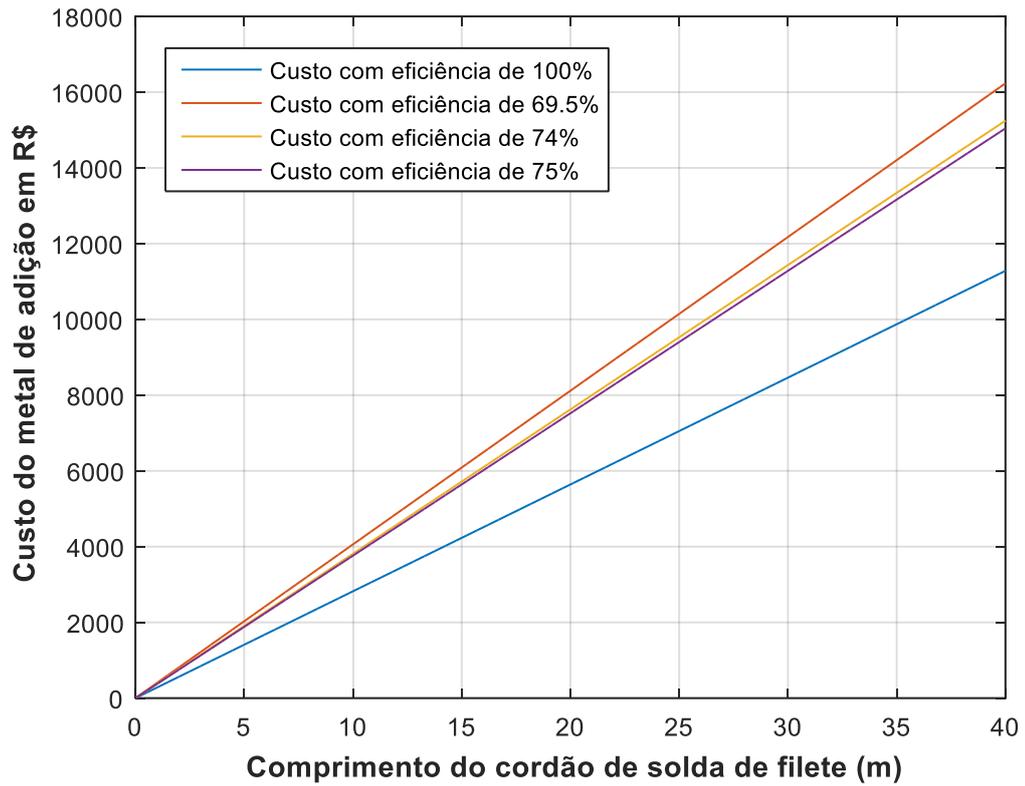


Gráfico 9: L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E7018.

Filete com pernas iguais a 7,0 mm.

Fonte: Própria.

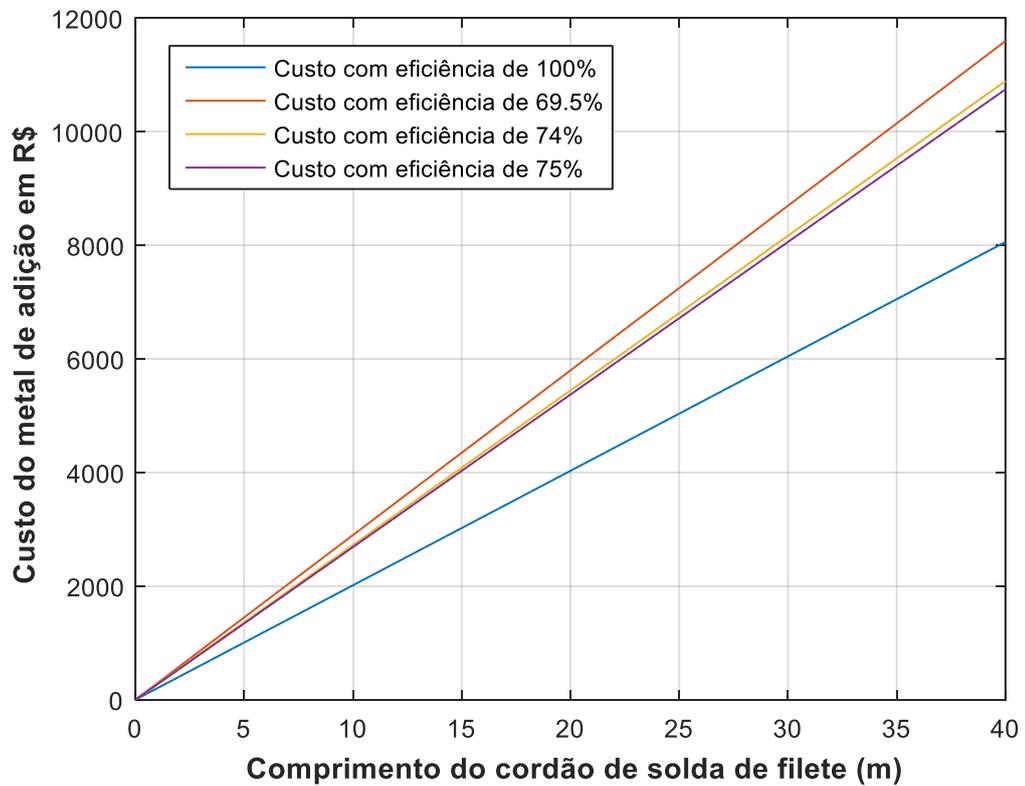


Gráfico 10: L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E7018.

Filete com pernas 5,0 mm e 7,0 mm.

Fonte: Própria.

Foi observado que nos gráficos 5, 6, 7 e 8 há relações lineares entre o custo do metal de adição e o comprimento do cordão de solda de filete. As dimensões adotadas para os filetes também influenciaram significativamente no custo final. Como já esperávamos, quanto maior a eficiência do eletrodo menor será o custo do metal de adição.

Nas simulações utilizando o eletrodo E6013 obtivemos os seguintes resultados:

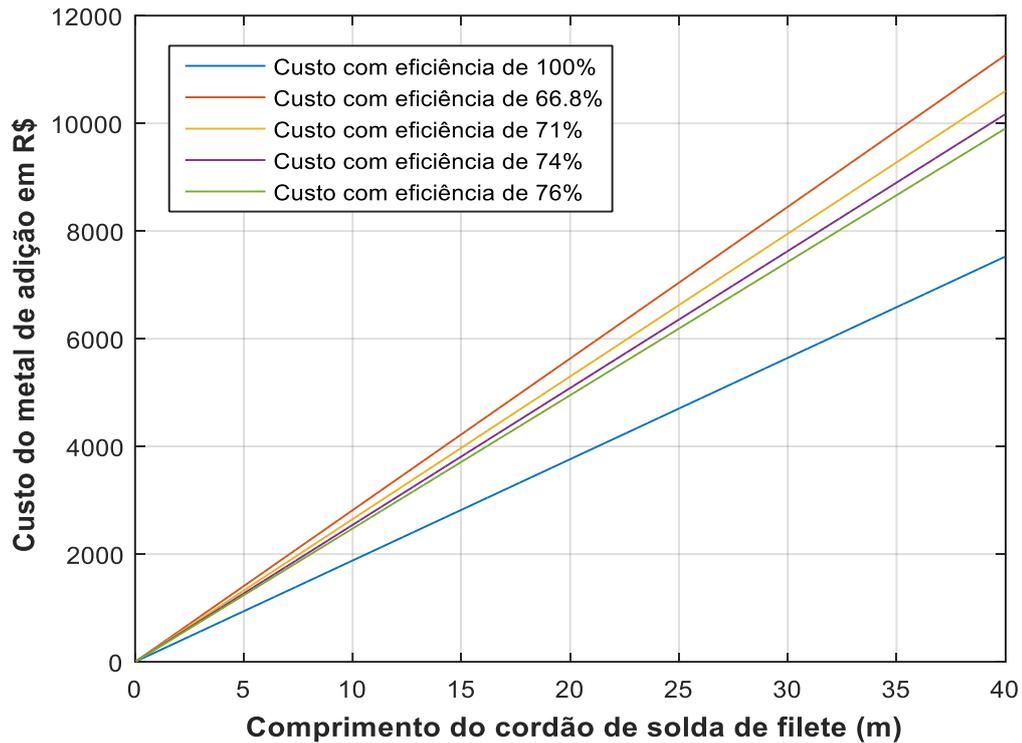


Gráfico 11: L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013.  
Filete com pernas iguais a 6,0 mm.  
Fonte: Própria.

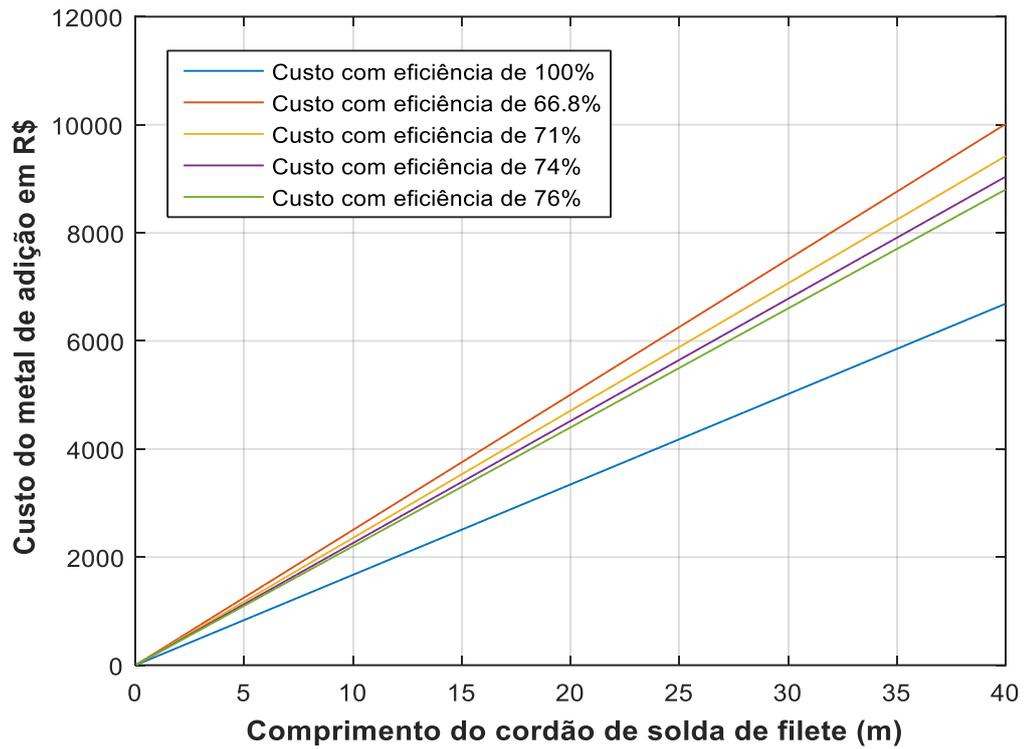


Gráfico 12: L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013.  
Filete com pernas de 4,0 mm e 8,0 mm.  
Fonte: Própria.

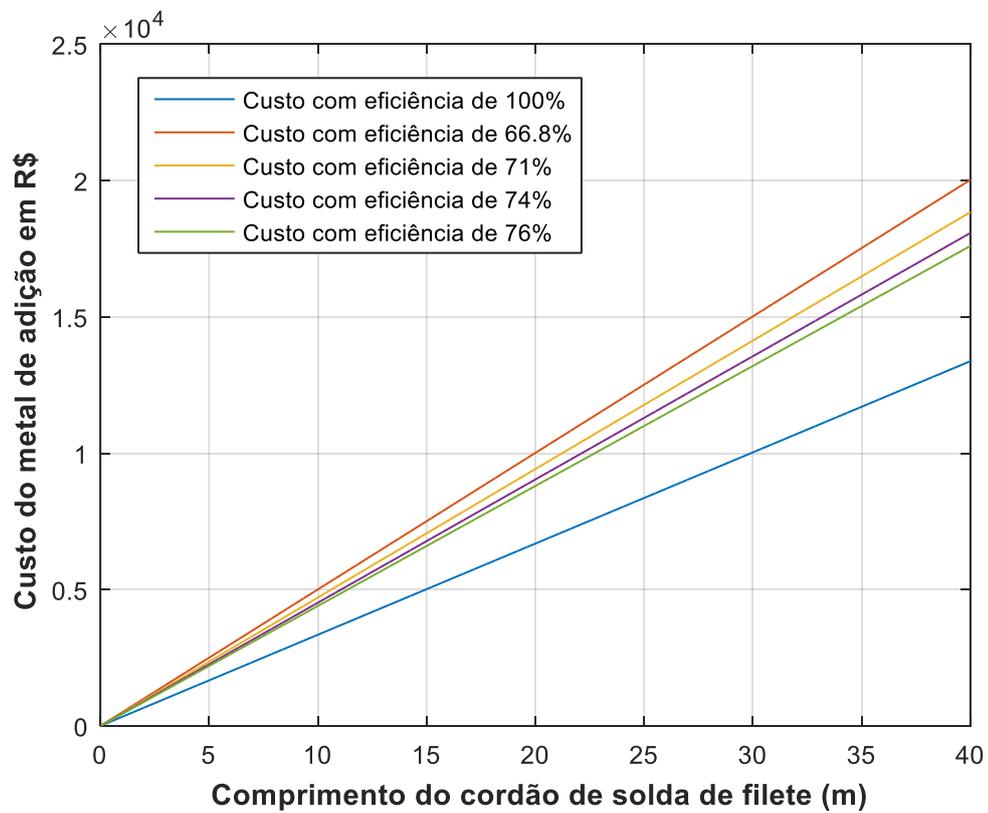


Gráfico 13: L (m) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013.  
Filete com pernas iguais a 8,0 mm.  
Fonte: Própria.

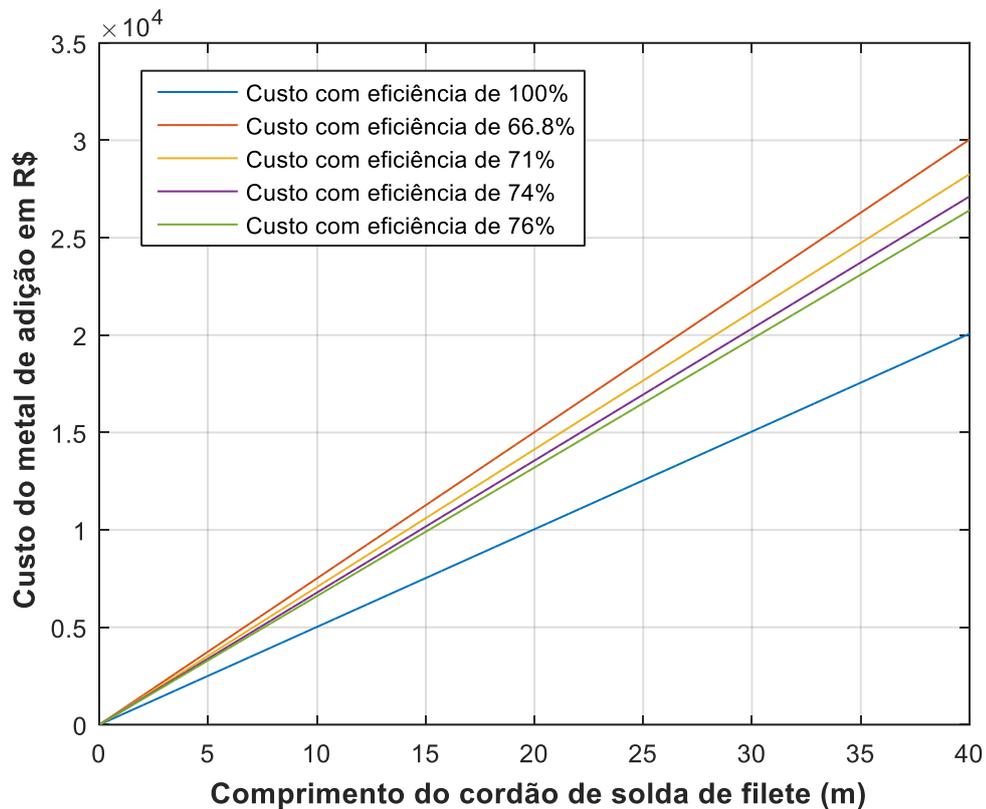


Gráfico 14: L (M) x Custo do metal de adição (R\$) – E6013.

Filete com pernas de 8,0 mm e 12,0 mm.

Fonte: Própria.

O eletrodo E6013 é do tipo rutílico, pois contém elevada quantidade de rutilo ( $TiO_2$ ) em seu revestimento. O Eletrodo E7018 é do tipo básico, também conhecido como de baixo hidrogênio, e possui elevada quantidade de pó de ferro, o que lhe proporciona um arco mais estabilizado e suave, quantidade menor de respingos e conseqüentemente uma taxa de deposição de metal de solda maior em relação ao E6013, possibilidade maior economia com relação a necessidade de materiais para limpeza da solda.

Foi constatado que o efeito imediato de discontinuidades é a significativa elevação do custo do metal de adição e do processo de soldagem como um todo, tanto devido a despesas com materiais para limpeza da solda, quanto por retrabalho (devido ao dimensionamento incorreto de juntas, por exemplo), e ao desperdício de materiais. Além disso, há também a variável mão de obra, que chega a custar cerca de 80% do valor do processo de soldagem, dependendo da posição de trabalho, sendo a posição sobrecabeça a de maior custo, pois exige mais habilidade por parte do soldador.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das considerações e simulações efetuadas foi possível observar uma relação linear entre a força resistente do metal de solda e o comprimento do filete. Vimos que dependendo das dimensões adotadas para as pernas do filete, teremos uma resistência maior ou menor, dentro dos padrões estabelecidos por normas, para os eletrodos E6013 e E7018. Tal alternância é devida à maior ou menor área efetiva  $A_w$ , a qual relaciona-se diretamente as dimensões das pernas através do cálculo do tamanho da garganta efetiva ( $t_e$ ).

Ao avaliarmos a relação entre a eficiência do eletrodo e os valores ótimos de corrente de soldagem foi possível constatar por aproximação linear que a eficiência do eletrodo E7018 diminui mais rapidamente do que a do eletrodo E6013, conforme gráfico 5. Observamos ainda que para cada eletrodo há um valor ótimo de corrente específico para o qual é fornecida a máxima eficiência de deposição. Ao relacionarmos a taxa de deposição dos eletrodos com os valores ótimos de corrente obtivemos retas com o mesmo coeficiente angular, o que denota um crescimento da taxa proporcional ao aumento da corrente elétrica tanto para o E6013 quanto para o E7018.

Os gráficos obtidos para avaliação dos custos do metal de adição possibilitam a fácil visualização da influência das dimensões das pernas de filetes, devido a menor ou maior quantidade de metal de adição necessária. Também foi possível discutir qualitativamente e verificar quantitativamente através dos gráficos a influência da perda de ponta do eletrodo, das descontinuidades e do uso de uma amperagem incorreta para corrente de soldagem no aumento do custo de metal de adição, devido a necessidade de retrabalho e gastos adicionais com materiais para limpeza da solda.

Para futuros trabalhos sugerimos o estudo de outras variáveis contempladas no cálculo do custo total de soldagem, como custo da energia elétrica, da mão de obra, da depreciação, da manutenção dos equipamentos e outros. Deixamos também como sugestão o estudo do dimensionamento de soldas de chanfro, tampão e ranhura. Pode-se ainda efetuar um estudo sobre a influência de outros parâmetros de soldagem e a utilização de outros eletrodos, bem como a aplicação de outros processos de soldagem. É possível ainda realizar um estudo de otimização do dimensionamento e dos custos de soldagem, através de métodos de programação mais robustos, disponibilizados através de funções da biblioteca do software Matlab ou de métodos de programação mais robustos.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8800: **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro. 2008.

ASM INTERNATIONAL: **Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering**, vol. VI – United States of America, 1993.

ANDRADE, Pericles Barretos de - **Curso Básico de Estruturas de aço** – 2ª Edição revisada. Belo Horizonte: Editora IEA, 1994.

AWS D1.1/D1.1M: **Structural Welding Code – Steel**. Miami, 2010.

DAVIES, A. C. – **The Science and Practice of Welding**, vol II. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

ESAB BR – **Eletrodos Revestidos OK**. Manual do fabricante, 2005.

ESAB BR – **Soldagem de tubulações**. Manual do fabricante, 2005.

GERDAU - **Guia de soluções para Soldagem com Eletrodos**, Manual do fabricante, 2014.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**- 3º Edição atualizada- Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MODENESI, Paulo J. – **Estimativa de Custos em Soldagem**. Apostila. Belo Horizonte: UFMG, 2001

NERIS, Manoel Messias – **Soldagem**. São Paulo: Cetec Capacitações, 2012.

OKUMURA, TOSHIE; TANIGUCHI, CÉLIO -**Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1982.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle – **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança –**Estruturas Metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. São Paulo: Editora EDGARD BLÜCHER LTDA, 2005.

SALMON, Charles G.; JOHNSON, John E. – **Design of Steel Structures**. New York: Harper Collins College Publishers, 1996.

SANCHES, Ricardo Almeida – **Defeitos em Solda Detectáveis Através de Inspeção Visual**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Manaus. Manaus, 2010.

Sistema de Custos e Orçamentos, Tabelas de preços. Disponível em: <<http://www.seinfra.am.gov.br/arquivos/download/arqeditor/TABELA%20DE%20PRE%C3>

%87OS-SEINFRA/2015/119%20-%20SEINFRA%20-%20MAR%C3%87O%202015(1).rar  
Acesso em: 28 de Nov. 2016.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de -  
**Soldagem Processos e Metalurgia** – 4<sup>a</sup> Reimpressão - São Paulo: Editora EDGARD  
BLÜCHER LTDA, 2004.