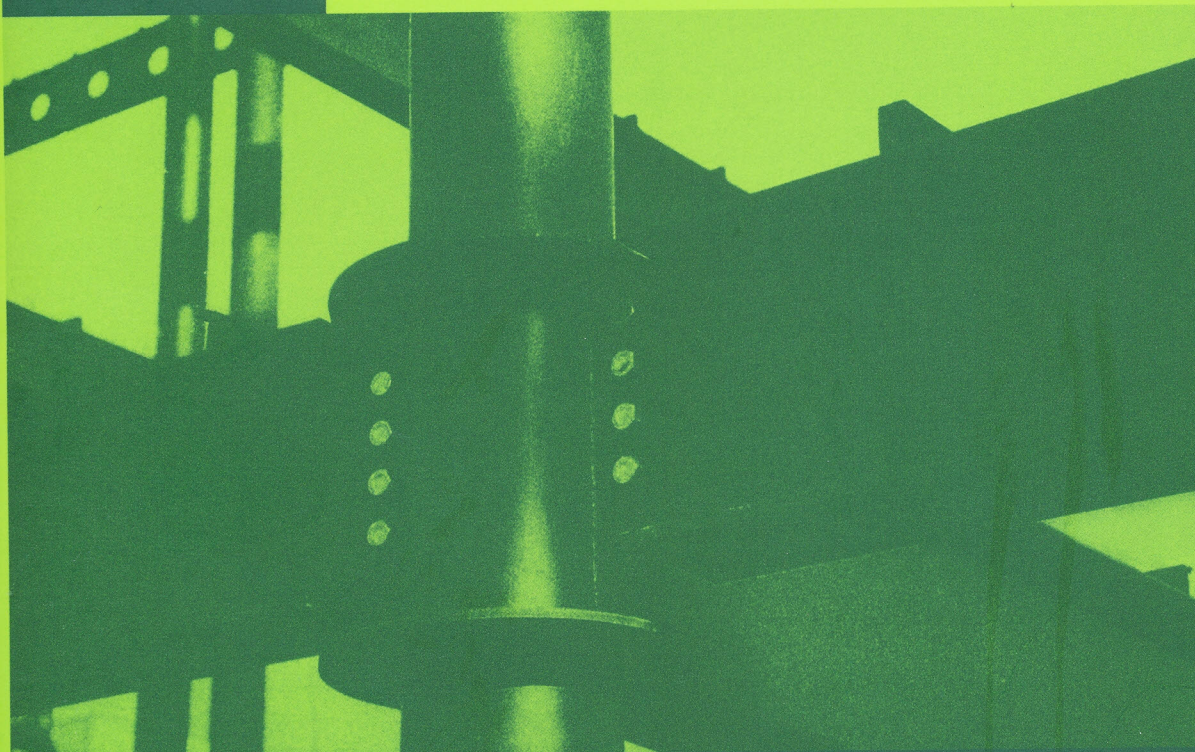


Manual de Construção em Aço



Ligações em Estruturas Metálicas - Volume 1

LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS VOLUME 1

4^a. Edição revisada e atualizada

Série “Manual de Construção em Aço”

- Galpões para Usos Gerais
- Ligações em Estruturas Metálicas Vol. 1 e 2
- Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço
- Alvenarias
- Painéis de Vedação
- Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço
- Tratamento de Superfície e Pintura
- Transporte e Montagem
- Steel Framing: Arquitetura
- Interfaces Aço-Concreto
- Steel Framing: Engenharia
- Pontes e Viadutos em Vigas Mistas
- Treliças tipo Steel Joist
- Viabilidade Econômica
- Dimensionamento de Perfis Formados a Frio conforme NBR 14762 e NBR 6355 (CD)
- Projeto e Durabilidade
- Estruturas Mistas Vol. 1 e 2
- Prevenção contra Incêndio no Projeto de Arquitetura

INSTITUTO AÇO BRASIL
ALEXANDRE LUIZ VASCONCELLOS(REV.)

LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS VOLUME 1

4ª. Edição revisada e atualizada

INSTITUTO AÇO BRASIL
CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO

**RIO DE JANEIRO
2011**

© 2011 INSTITUTO AÇO BRASIL /CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida por quaisquer meio, sem a prévia autorização desta Entidade.

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Informações do Instituto Aço Brasil/CBCA

I59l Instituto Aço Brasil
Ligações em estruturas metálicas. Volume 1 / Instituto Aço Brasil, Alexandre Luiz Vasconcellos(rev.). - Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil /CBCA, 2011.

59p.; 29 cm. -- (Série Manual de Construção em Aço)

ISBN 978-85-89819-27-5

1.Ligações flexíveis 2. Construção em aço 3. Ligações rígidas 4. Ligação de peça tracionada I. Títulos (série) . II. Vasconcellos, Alexandre Luiz

CDU 692.1:691.714
4a edição rev.

1a Edição , 1987
2a Edição, Maio 2001
3a Edição, Outubro 2004
4ª.Edição, Agosto 2011

Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço
Av. Rio Branco, 181 / 28º Andar
20040-007 - Rio de Janeiro - RJ
e-mail: cbca@acobrasil.org.br
site: www.cbca-acobrasil.org.br

SUMÁRIO

Capítulo 1

Dispositivos de ligação	09
1 Dispositivos de ligação	10
1.1 Parafusos	11
1.1.1 Parafusos de baixo carbono	11
1.1.2 Parafusos de alta resistência	12
1.1.2.1 Métodos para aplicação da força de protensão	14
1.2 Soldas	15
1.2.1 Soldagem com eletrodo revestido ou processo “SMAW”	16
1.2.2 Soldagem com proteção gasosa ou processo “GMAW”	18
1.2.3 Soldagem com fluxo no núcleo ou processo “FCAW”	19
1.2.4 Soldagem a arco submerso ou processo “SAW”	19
1.2.5 Compatibilidade entre metais para soldagem	19
1.2.6 Simbologia da soldagem	20
1.2.7 Controle de qualidade das soldas	30

Capítulo 2

Classificação das ligações	33
2 Classificação das ligações	34
2.1 Segundo os esforços	34
2.2 Segundo a rigidez	34
2.2.1 Ligação rígida	37
2.2.2 Ligação flexível	38
2.3 Ligação semi-rígida	38

Capítulo 3

Resistência de parafusos	39
3 Resistência de parafusos	40
3.1 Generalidades	40
3.2 Parafusos	40
3.2.1 Conexões do tipo contato	41
3.2.1.1 Tração	41
3.2.1.2 Força cortante	42
3.2.1.2.1 Cisalhamento do corpo do parafuso	42
3.2.1.2.2 Pressão de contato no furo	42
3.2.1.2.3 Tração e cisalhamento combinados	44
3.2.2 Resistência de cálculo em conexões do tipo atrito	45
3.2.3 Dimensões e uso de furos	48
3.2.3.1 Pega longa e ligações de grande comprimento	49
3.2.4 Efeito alavanca	49
3.2.4.1 Determinação do efeito alavanca	50

Capítulo 4

Resistência de soldas	53
4 Resistência de soldas	54
4.1 Generalidades	54
4.2 Solda de filete	54
4.2.1 Disposições construtivas para solda de filete	55
4.3 Solda de entalhe	56
4.3.1 Penetração parcial	56
4.3.2 Penetração total	57
4.3.3 Disposições construtivas para soldas de entalhe	58
4.4 Solda de tampão	58
4.4.1 Disposições construtivas para solda de tampão	58

Apresentação

Atualmente, os dispositivos mais utilizados para a união de elementos estruturais em aço são os parafusos (de baixo carbono ou de alta resistência) e a solda elétrica.

Neste Manual estão apresentadas considerações específicas e exemplos de cálculo utilizando esses dois principais dispositivos de ligação em estruturas de aço, tornando-se necessária a consulta da NBR 8800:2008 durante a leitura, para perfeito entendimento do texto.

Vale observar a utilização do Sistema Internacional de Unidades:

- Características geométricas das seções expressas em centímetros (cm);
- Forças em quilonewtons (kN);
- Momentos fletores em quilonewtons x cm (kNcm);
- Tensões em quilonewtons / centímetros quadrados (kN/cm²) ou megapascals (MPa).

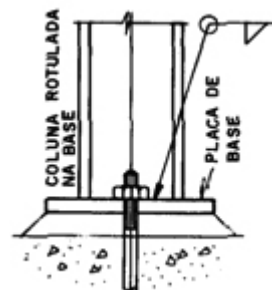
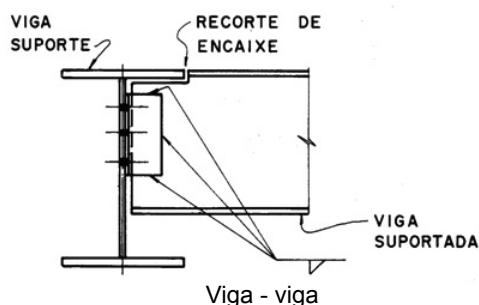
Capítulo 1

Dispositivos de Ligação

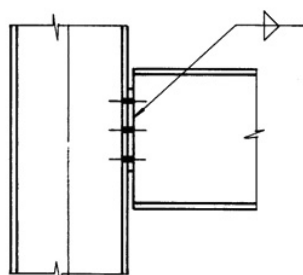
1 - Dispositivos de Ligação

O termo ligação é aplicado a todos os detalhes construtivos que promovam a união de partes da estrutura entre si ou a sua união com elementos externos a ela, como por exemplo, as fundações.

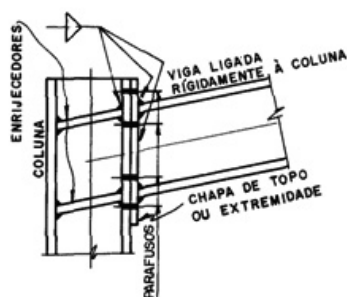
A Figura 1 ilustra alguns exemplos dos principais tipos de ligação em estrutura de aço.



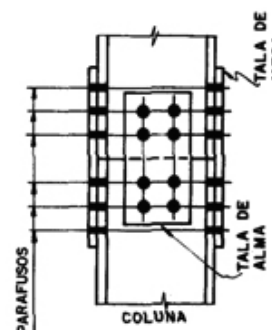
Placa de base para colunas



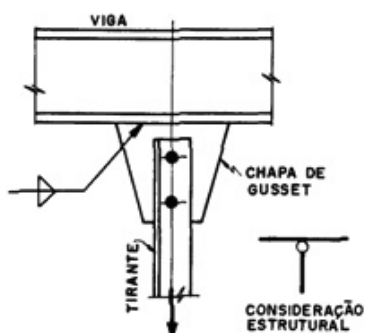
Viga – coluna transmitindo apenas força cortante



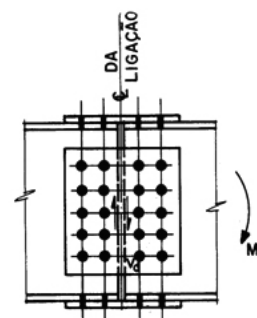
Viga – coluna engastada



Emenda de coluna



Ligação em treliças



Emenda de viga

Figura 1 - Exemplos de ligação em estruturas de aço.

As ligações são compostas dos elementos de ligação e dos meios de ligação.

Os elementos de ligação são todos os componentes incluídos no conjunto para permitir ou facilitar a transmissão dos esforços:

- enrijecedores;
- chapas de ligação;
- placas de base;
- cantoneiras;
- consolos;
- talas de emenda e
- parte das peças ligadas envolvidas localmente na ligação.

Os meios de ligação são os elementos que promovem a união entre as partes da estrutura para formar a ligação:

- soldas;
- parafusos;
- barras redondas rosqueadas e
- pinos.

Uma ligação deve ser dimensionada de forma que a sua resistência de cálculo seja igual ou superior à solicitação de cálculo ou uma porcentagem especificada da resistência de cálculo da barra.

As solicitações de cálculo (forças e momentos fletores) são calculadas por meio da análise da ligação sujeita às ações respectivamente multiplicadas pelos coeficientes de ponderação e combinação específicos. Em outras palavras, as ligações devem ter resistência suficiente para suportar as ações atuantes e satisfazer todos os requisitos básicos apresentados na NBR 8800: 2008.

A resistência de cálculo da ligação será determinada com base na resistência dos elementos e meios de ligação que a compõem.

Além disso, devem ser atendidos os seguintes requisitos da NBR 8800:2008:

- Permitir a execução de maneira adequada e em boas condições de segurança da fabricação, do transporte, do manuseio e da montagem da estrutura;

- Com exceção de diagonais e montantes de travejamento de barras compostas, barras redondas para tirantes, terças e longarinas, as ligações devem ser dimensionadas para uma força solicitante mínima de 45kN, com direção e sentido da força atuante;

- Ligações de barras tracionadas ou comprimidas devem ser dimensionadas no mínimo para 50% da força axial resistente de cálculo da barra;

Essa última condição estabelece uma compatibilidade entre a resistência da barra e a da ligação, ou seja, independentemente do valor da solicitação, a ligação deve pelo menos apresentar uma resistência de cálculo igual à metade da resistência de cálculo da barra.

Em algumas situações específicas, o dimensionamento também pode ter como base um estado-limite de serviço (NBR 8800:2008, 6.1.1.2).

1.1 - Parafusos

1.1.1 - Parafusos de baixo carbono

Também conhecidos como parafusos comuns, seguem as especificações ASTM A307 ou ISO 898-1 Classe 4.6 e são fabricados a partir de fio máquina ou barras de aço com baixo teor de carbono, sendo mais utilizado o ASTM A307 (para resistência mínima à ruptura ver tabela 7)

Os parafusos de baixo carbono utilizados em estruturas de aço têm, em geral, cabeça e porca sextavada, com rosca parcial ou ao longo de todo o corpo do parafuso (figura 2). A instalação é feita sem especificação de torque de montagem (aperto), desconsiderando a resistência ao deslizamento entre as partes conectadas.

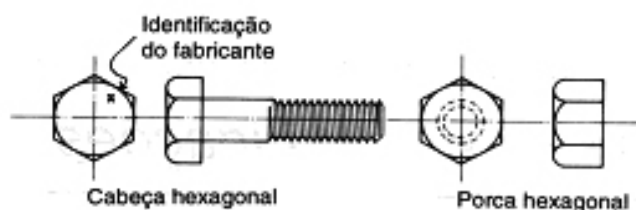


Figura 2 – Parafuso de baixo carbono

As ligações envolvendo parafusos de baixo carbono são assumidas sempre como ligações do tipo contato, ou seja, os parafusos são solicitados ao cisalhamento, à tração ou a ambos os esforços simultaneamente. Os esforços de tração são transmitidos diretamente por meio de tração no corpo do parafuso e os esforços de cisalhamento são transmitidos por cisalhamento do corpo do parafuso e o contato de sua superfície lateral com a face do furo, devido ao deslizamento entre as chapas ligadas (figura 3).

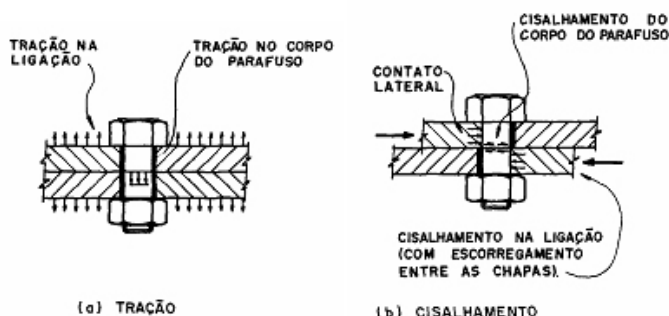


Figura 3 – Transmissão de esforços em parafusos de baixo carbono.

1.1.2 - Parafusos de Alta Resistência

A utilização de aços de alta resistência mecânica na fabricação de parafusos permite a montagem desses parafusos com protensão evitando o deslizamento entre as partes conectadas, pois as superfícies de contato das chapas ficam firmemente pressionadas umas contra as outras. Assim, quanto maior o torque, maior a pressão de contato imposta, maior a força de atrito mobilizada e, conseqüentemente, maior a resistência ao deslizamento (figura 4).

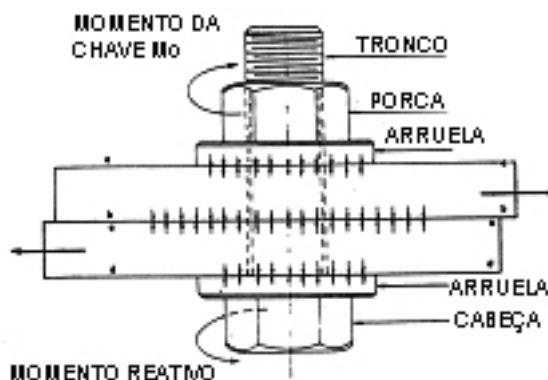


Figura 4 - Efeito do torque aplicado na porca.

Os esforços de cisalhamento nas ligações com parafusos de alta resistência são transmitidos ou por atrito, devido à pressão entre as partes ligadas, nas chamadas ligações por atrito, ou por contato do corpo do parafuso com as paredes do furo, com cisalhamento do corpo do parafuso, nas chamadas ligações por contato.

De acordo com a NBR 8800:2008, as duas formas de transmissão de esforços não podem ser superpostas, sendo a resistência última do parafuso independente do atrito entre as partes. O projeto de ligações por atrito precisa também levar em conta se o deslizamento é um estado-limite de serviço ou um estado-limite último (ver item 3.2.2 à frente).

Para desenvolver as forças de atrito, as partes parafusadas da estrutura não podem ser separadas por quaisquer materiais, inclusive pintura, que não sejam aços estruturais, devendo ficar totalmente em contato quando montadas. Devem ainda, estar isentas de escamas de laminação, rebarbas, sujeiras ou qualquer outra matéria estranha que impeça o perfeito contato entre as partes.

A protensão aplicada quando da montagem dos parafusos é a mesma para ligações por atrito e por contato. A diferença entre elas está no acabamento exigido para as superfícies de deslizamento das chapas e no desempenho, em função do carregamento, ao longo da vida útil:

- a ligação por contato é indicada para carregamentos predominantemente estáticos, onde o eventual deslizamento entre as partes ligadas não afeta a vida útil dos parafusos e da própria ligação e nem o comportamento global da estrutura;

- a ligação por atrito é indicada para carregamentos dinâmicos e para os casos em que qualquer deslizamento entre as partes ligadas possa afetar o comportamento previsto para a estrutura.

A utilização de aços de alta resistência mecânica na fabricação de parafusos na especificação ASTM A325 e A490 ou na especificação ISO 4016 Classe 8.8 ou 10.9, todos com rosca UNC parcial, ocorreu após a comprovação experimental de que a aplicação de torque na instalação dos parafusos evita o deslizamento entre as partes conectadas quando ficam firmemente pressionadas umas contra as outras.

Os fabricantes de parafusos de alta resistência estampam na cabeça as especificações A325 ou A490 (figura 5).

A cabeça e a porca desses parafusos são hexagonais e bem mais robustas que as correspondentes aos parafusos de baixo carbono. As porcas para os parafusos A325 são fabricadas com o mesmo material (A325), enquanto que para os parafusos A490 são utilizadas as porcas em aço A194 com tratamento térmico especial. As arruelas devem estar em conformidade com as últimas especificações ASTM F-436 para serem empregadas com ambos os

tipos de parafusos.

No caso de parafusos A325 deve-se usar arruelas sob o elemento que gira (de preferência a porca) e nos parafusos A490 sob a cabeça e a porca, no caso do material base apresentar limite de escoamento inferior a 280 MPa.

As dimensões dos parafusos, porcas e arruelas são especificadas na ASME B18.2.6, considerando parafusos de cabeça hexagonal e porca hexagonal pesada. As dimensões básicas dos parafusos e porcas de alta resistência estão apresentadas na tabela 1.

O comprimento do parafuso deve ser tal que, após a instalação, sua extremidade coincida ou ultrapasse a face externa da porca, considerando para isto, uma folga no cálculo do comprimento para compensar as tolerâncias de execução do parafuso e da estrutura.

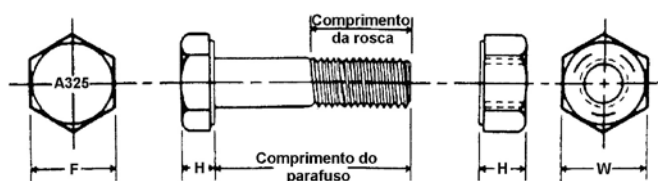


Figura 5 – Parafuso de alta resistência.

Tabela 1 - Dimensões básicas de parafusos e porcas de alta resistência conforme ASME B18.2.6.

Diâmetro dos parafusos (pol)	Dimensões para parafusos estruturais hexagonais			Dimensões para porcas hexagonais	
	F (pol)	H (pol)	Comprimento da rosca (pol)	W (pol)	H (pol)
$\frac{1}{2}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{5}{16}$	1	$\frac{7}{8}$	$\frac{31}{64}$
$\frac{5}{8}$	$1 \frac{1}{16}$	$\frac{25}{64}$	$1 \frac{1}{4}$	$1 \frac{1}{16}$	$\frac{39}{64}$
$\frac{3}{4}$	$1 \frac{1}{4}$	$\frac{15}{32}$	$1 \frac{3}{8}$	$1 \frac{1}{4}$	$\frac{47}{64}$
$\frac{7}{8}$	$1 \frac{7}{16}$	$\frac{35}{64}$	$1 \frac{1}{2}$	$1 \frac{7}{16}$	$\frac{55}{64}$
1	$1 \frac{5}{8}$	$\frac{39}{64}$	$1 \frac{3}{4}$	$1 \frac{5}{8}$	$\frac{63}{64}$
$1 \frac{1}{8}$	$1 \frac{13}{16}$	$\frac{11}{16}$	2	$1 \frac{13}{16}$	$1 \frac{7}{64}$
$1 \frac{1}{4}$	2	$\frac{25}{32}$	2	2	$1 \frac{7}{32}$
$1 \frac{3}{8}$	$2 \frac{13}{16}$	$\frac{27}{32}$	$2 \frac{1}{4}$	$2 \frac{3}{16}$	$1 \frac{11}{32}$
$1 \frac{1}{2}$	$2 \frac{3}{8}$	$\frac{15}{16}$	$2 \frac{1}{4}$	$2 \frac{3}{8}$	$1 \frac{15}{32}$

1.1.2.1 - Métodos para aplicação da força de protensão

Segundo a NBR 8800:2008, o controle do aperto dos parafusos pode ser feito mediante três processos:

- Aperto pelo método da rotação da porca: neste método, para aplicar a força de protensão mínima especificada na Tabela 15 da NBR 8800:2008 e reproduzida no item 3.2.2 adiante, deve haver número suficiente de parafusos na condição de pré-torque, de forma a garantir que as partes estejam em pleno contato. Define-se condição de pré-torque como o aperto obtido após poucos impactos aplicados por uma chave de impacto ou pelo esforço máximo aplicado por uma pessoa usando uma chave normal. Após essa operação inicial, devem ser colocados parafusos nos furos restantes e em seguida

também levados à condição de pré-torque. A seguir, todos os parafusos recebem um aperto adicional por meio da rotação aplicável da porca, como indicado na Tabela 2. Tanto o aperto adicional quanto o torque final devem iniciar-se pela parte mais rígida da ligação e prosseguir em direção às bordas livres. Durante essa operação, a parte oposta àquela em que se aplica a rotação não pode girar.

Tabela 2 – Rotação da porca a partir da posição de pré-torque.

Comprimento do parafuso (medido da parte inferior da cabeça à extremidade)	Disposição das faces externas das partes parafusadas		
	Ambas as faces normais ao eixo do parafuso	Uma das faces normal ao eixo do parafuso e a outra face inclinada não mais que 1:20 (sem arruela biselada)	Ambas as faces inclinadas em relação ao plano normal ao eixo do parafuso não mais que 1:20 (sem arruelas biseladas)
Inferior ou igual a 4 diâmetros	1/3 de volta	1/2 volta	2/3 de volta
Acima de 4 diâmetros até no máximo 8 diâmetros, inclusive	1/2 volta	2/3 de volta	5/6 de volta
Acima de 8 diâmetros até no máximo 12 diâmetros	2/3 de volta	5/6 de volta	1 volta

- Aperto com chave calibrada ou chave manual com torquímetro: tais chaves devem ser reguladas para fornecer uma protensão mínima 5% superior à protensão dada na Tabela 11 adiante. As chaves devem ser calibradas pelo menos uma vez por dia de trabalho, para cada diâmetro de parafuso a instalar e devem ser recalibradas quando forem feitas mudanças significativas no equipamento ou quando for notada uma diferença significativa nas condições de cada superfície dos parafusos, porcas e arruelas. Para demais condições vide item 6.7.4.4.2 da NBR 8800:2008.

- Aperto pelo uso de um indicador direto de tração: é permitido apertar parafusos pelo uso de um indicador direto de tração, desde que fique demonstrado, por um método preciso de medida direta, que o parafuso ficou sujeito à força mínima de protensão estabelecida na Tabela 11 adiante.

- Parafusos com controle de tração: é permitido o uso de parafusos com controle direto de tração desde que sejam obedecidos os requisitos da Specification for Structural joints using ASTM A325 or A490 do AISC (American Institute of Steel Construction).

1.2 - Soldas

A união de componentes metálicos pode ser feita por meio da fusão de eletrodos metálicos. Devido à alta temperatura produzida por um arco voltaico, processa-se também a fusão parcial dos componentes a serem ligados. Após o resfriamento, metal base e metal do eletrodo passam a constituir um corpo único.

Essa operação necessita de uma fonte de energia elétrica de baixa voltagem e alta amperagem a fim de gerar o calor necessário e os aços devem ter soldabilidade.

A soldabilidade de um aço indica a facilidade da execução de uma junta por meio do processo de soldagem sem defeitos e livre de fissuras ou falhas. Alguns aços estruturais são melhores para a soldagem do que outros e os procedimentos de soldagem devem levar em conta a composição química do metal base.

A NBR 8800:2008 recomenda a aplicação das disposições contidas no Structural Welding Code da American Welding Society (AWS) para a especificação dos materiais de soldagem e apresenta os quatro processos de soldagem mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Processos de soldagem segundo a NBR 8800:2008.

Processo de soldagem	Sigla
Soldagem com eletrodo revestido ou "Shield Metal Arc Welding"	SMAW
Soldagem com proteção gasosa ou "Gas Metal Arc Welding"	GMAW
Soldagem com fluxo no núcleo ou "Flux Cored Arc Welding"	FCAW
Soldagem a arco submerso ou "Submerged Arc Welding"	SAW

1.2.1 - Soldagem com eletrodo revestido ou Processo "SMAW"

Esse é o mais antigo e o mais versátil dentre os vários processos de soldagem a arco, unindo metais pelo aquecimento entre um eletrodo revestido (consumível) e o metal base. O metal fundido do eletrodo é transferido através do arco até a poça de fusão do metal base, formando-se assim, o metal de solda depositado.

Eles são protegidos por uma atmosfera de gases produzida a partir da decomposição do revestimento e formam uma escória que

migra para a superfície em função de sua menor densidade cobrindo o depósito e também controlando a taxa de resfriamento (figura 6).

A escória deve ser removida depois de cada passe de solda.



Soldagem por aquecimento dos elementos por meio de um arco elétrico entre o metal base e o eletrodo revestido, cuja fusão do revestimento forma a escória de proteção solidificada.

Figura 6 - Soldagem com eletrodo revestido.

A soldagem com eletrodo revestido é o processo mais usado dentre todos devido à simplicidade do equipamento, à resistência, à qualidade das soldas e também ao baixo custo. Possui grande flexibilidade e solda a maioria dos metais numa ampla faixa de espessuras. A soldagem por esse processo pode ser feita em quase todos os lugares e em condições extremas. A operação é totalmente manual e o equipamento de soldagem consiste de uma fonte de energia, cabos de ligação, um porta-eletrodo (alicate), conector de terra (garra) e o eletrodo em si. O suprimento de energia pode ser tanto em corrente alternada como contínua.

O eletrodo consiste de uma vareta metálica (alma do eletrodo), com um revestimento não metálico. A alma do eletrodo estabelece o arco voltaico e fornece metal de adição para a solda. Diferentes tipos de eletrodos são produzidos, geralmente contendo ligas para adicionar durabilidade, força e ductilidade à solda.

Para manter suas características elétricas, físicas, mecânicas e metalúrgicas, os eletrodos devem ser adquiridos em embalagens hermeticamente fechadas e após a abertura da embalagem, mantidos em estufas com temperatura de no mínimo 120°C. Não podem ser reaquecidos mais de uma vez e devem ser descartados se forem molhados.

Na especificação AWS, os eletrodos são designados pela letra “E” e um conjunto de algarismos (figura 7):

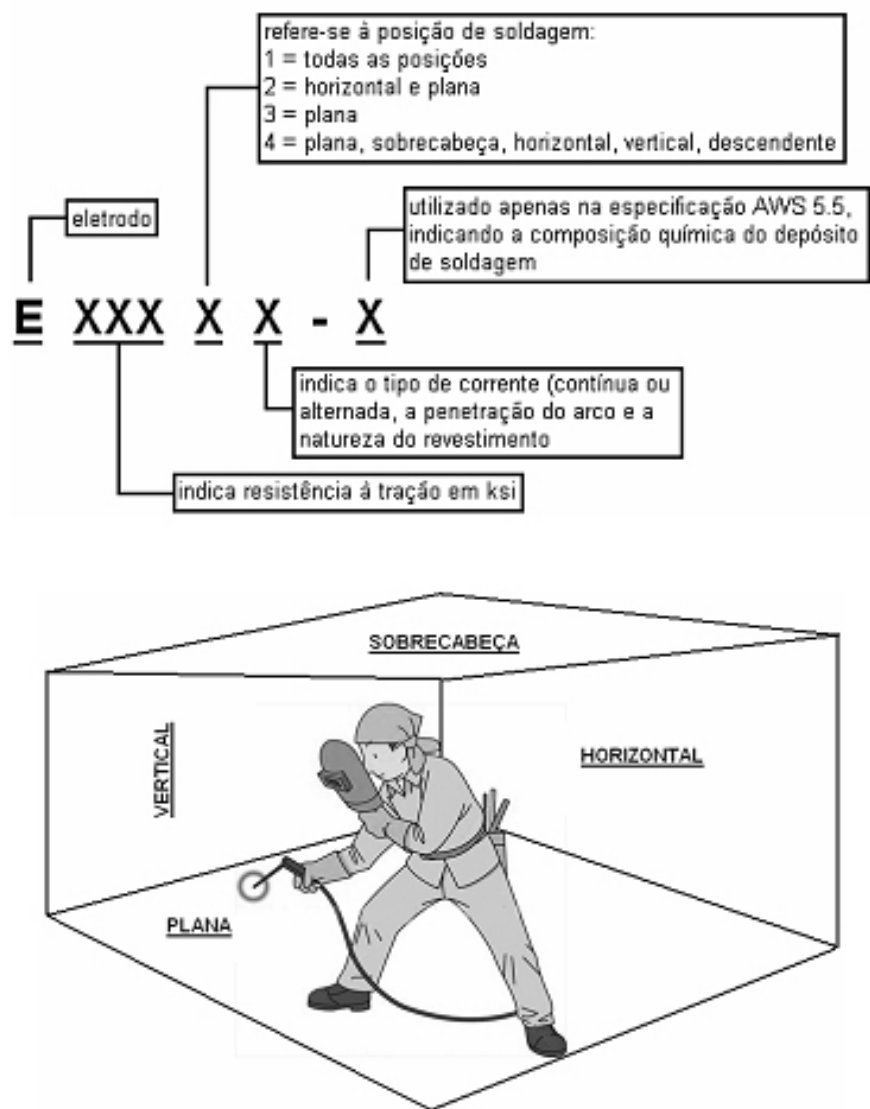


Figura 7 – Posições de soldagem e designação de eletrodos.

Por exemplo:

- E 6010: (60): fw = 60ksi = 415MPa;
(1): adequado para todas as posições de soldagem;
(0): corrente CC+ ou CA, grande penetração, revestimento celulósico; uso: onde é importante grande penetração.
- E 7018: (70): fw = 70ksi = 485MPa;
(1): adequado para todas as posições de soldagem;
(8): corrente CC+ ou CA, média penetração, revestimento básico; uso: aços de baixa-liga.

1.2.2. Soldagem com proteção gasosa ou processo "GMAW"

Os processos mais utilizados com proteção gasosa são os sistemas:

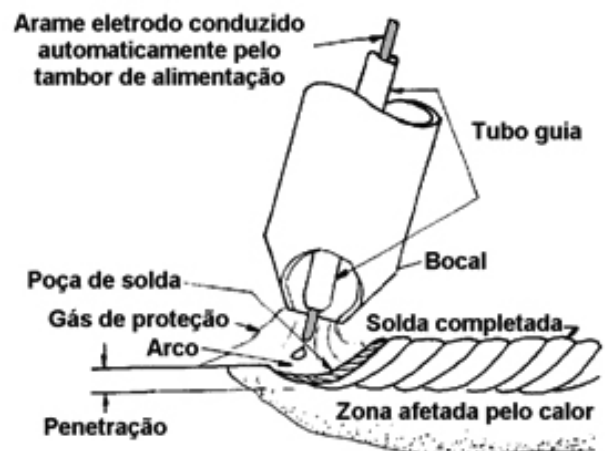
- MIG (Metal Inert Gas), cuja proteção é realizada principalmente com gases inertes como Hélio ou Argônio;
- MAG (Metal Active Gas), cuja proteção é realizada principalmente com gases ativos como o Dióxido de Carbono, Oxigênio e Nitrogênio.

Hoje, com as misturas gasosas contendo os mais variados teores de gases ativos e inertes seria até difícil dizer quando é MIG ou quando é MAG, mas pode-se afirmar que a partir do momento em que se adiciona no gás inerte qualquer porcentagem de um gás que promova alterações químicas ou metalúrgica do metal de solda, a mistura é considerada ativa.

A soldagem MIG/MAG usa o calor de um arco elétrico entre um eletrodo nu, que é o próprio arame sólido alimentado com uma velocidade constante a partir do aperto de um gatilho, e o metal base. O calor funde o final do eletrodo e a superfície do metal base para

formar a poça de fusão. A proteção do arco e da poça de solda fundida vem inteiramente do gás alimentado externamente (figura 8), que pode ser inerte ou ativo ou ainda uma mistura destes, daí a denominação do processo.

Em função da proteção gasosa, esse processo não é recomendado para serviços de campo.



Soldagem por aquecimento dos elementos por meio de um arco elétrico entre o metal base e o eletrodo nu, protegido por um gás

Figura 8 - Soldagem MIG/MAG.

As maiores vantagens do processo MIG/MAG são: a alta velocidade de soldagem, versatilidade, a larga capacidade de aplicação, a alta taxa de deposição, mínimo respingo, a baixa liberação de gás e fumaça, a ampla faixa de materiais e de espessuras que podem ser soldados e a boa aparência do cordão.

É um processo muito utilizado na soldagem de chapas finas.

O equipamento de soldagem MIG/MAG consiste de uma pistola de soldagem, um suprimento de energia, um suprimento de gás de proteção e um sistema com gatilho para acionamento de arame.

1.2.3 - Soldagem com fluxo no núcleo ou Processo “FCAW”

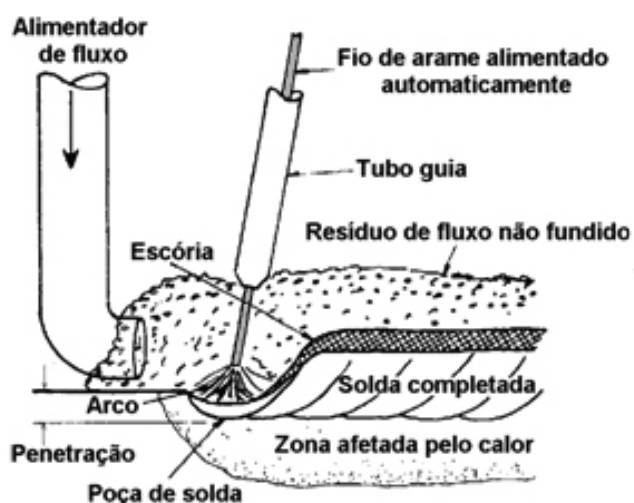
O processo FCAW é similar ao GMAW exceto pelo fato de que o eletrodo é tubular e apresenta fluxo no seu interior. Porém, possui características operacionais totalmente distintas do GMAW e tem especificações próprias.

1.2.4 - Soldagem a Arco Submerso ou Processo “SAW”

A soldagem a arco submerso une metais pelo aquecimento com um arco elétrico entre um eletrodo nu e o metal base. O arco e o eletrodo são protegidos por uma camada de fluxo granular fusível depositado sobre a peça de trabalho.

O eletrodo é utilizado como metal de adição, sem qualquer aplicação de pressão. Normalmente, o processo SAW é utilizado em soldas planas e particularmente indicado para soldas automáticas e semi-automáticas. Devido à proteção do fluxo, a proteção dos olhos não é, normalmente, necessária.

Dispositivos automáticos asseguram a alimentação do eletrodo a uma velocidade constante de tal forma que a movimentação do arame em relação à peça faz progredir concomitantemente o banho de fusão que se encontra sempre coberto e protegido pela escória formada pelo fluxo e impurezas (figura 9).



Soldagem por aquecimento dos elementos por meio de um arco elétrico (submerso em fluxo granular) entre o metal base e o eletrodo nu.

Figura 9 - Soldagem a arco submerso.

Devido à qualidade e rapidez de execução, esse processo é muito utilizado na soldagem de chapas espessas de aço, como por exemplo, em perfis soldados e dentre as vantagens deste processo, pode-se citar a alta qualidade da solda e resistência mecânica, taxa de deposição e alta velocidade de deslocamento, além da pouca fumaça.

1.2.5 - Compatibilidade entre Metais para Soldagem

Muitos aços destinados à construção de edifícios podem ser soldados sem cuidados ou procedimentos especiais. A tabela 4, extraída da NBR 8800:2008, 6.2.4, apresenta alguns metais-base e tipos de eletrodo para diferentes procedimentos de soldagem por arco elétrico e por tipo de aço.

Tabela 4 – Compatibilidade do metal base e do metal da solda.

















Aço	SMAW	GMAW	SAW	FCAW
Aço patinável de média e alta resistência	E 7018 W	ER 8018 SG	F 7AO-EW	F 71T8 Ni1
	E 7018 G			E 80T1 W
ASTM A36	E 7018	ER 70 S6	F 7AO-EL12	E 70T-1 E 71T-1 E 70T-4
		ER 70 S3		
ASTM A572 grau 50	E 7018	ER 70 S6	F 7AO-EM12K	
		ER 70 S3		
ASTM A570 grau 40	E 7018 / E 6013	ER 70 S6	F 7AO-EL12	
		ER 70 S3		

1.2.6 - Simbologia da Soldagem

Símbolos padronizados em desenhos de engenharia são usados para indicar a localização, detalhes do chanfro e outras informações para as corretas operações de soldagem. Existem sistemas de símbolos de soldagem desenvolvidos em normas de diferentes países. No Brasil, o sistema mais usado é o da American Welding Society, através de sua norma AWS A2.4, Symbols for Welding and Nondestructive Testing. Um símbolo completo de soldagem consiste dos seguintes elementos:

- Linha de referência (sempre horizontal);
- Seta;
- Símbolo básico da solda;
- Dimensões e outros dados;
- Símbolos suplementares;
- Símbolos de acabamento;
- Cauda;
- Especificação de procedimento, processo ou outra referência.

A figura 10 apresenta o conjunto de símbolos da AWS.

Símbolos Básicos de Solda									
Rebordo	Filete	Tampão	Ranhura ou Chanfro					Filetes convexos	
			Reto	V	Meio V	U	J	Duplo	Simples
									
Símbolos Suplementares									
Solda com chapa de base	Afastamento	Toda volta	Solda de campo	Contorno					
				Esmerilhar	Convexa				
									

LOCALIZAÇÃO DE SOLDAS

LADO DA SETA	LADO OPOSTO	DE AMBOS OS LADOS
<p>solda de campo</p> <p>dimensão 22 esmerilhar abertura da raiz 3 ver nota 5</p>	<p>dimensão 19</p> <p>ângulo incluído 90°</p> <p>abertura da raiz 2</p> <p>dimensão 19</p> <p>ângulo incluído 40°</p> <p>abertura da raiz 0</p> <p>ver nota 5</p> <p>B2</p>	<p>dimensão 12,5</p> <p>comprimento da solda 50-125</p> <p>deslocado se for solda alternada</p> <p>passo (espaçamento de centro a centro das soldas) 19</p> <p>dimensão da solda</p> <p>solda perimetral</p>

1. O lado para o qual a seta aponta é o lado de execução do trabalho.
2. Solda para ambos os lados e do mesmo tipo têm as mesmas dimensões, exceto onde anotado.
3. Use símbolos de solda quando houver mudanças abruptas da junta ou conforme dimensões (exceto quando for usado o símbolo de solda perimetral).
4. Todas as soldas são contínuas e de proporções especificadas, exceto onde anotado.
5. A solda da seta é usada para casos de referências ou de especificação (a cauda será omitida quando as referências não forem usadas).
6. Dimensões de comprimentos e passo (espaçamentos) serão sempre em milímetros.

Figura 10 - Símbolos de solda elétrica segundo a AWS.

Dispositivos de ligação

A norma brasileira NBR 7165 apresenta vários exemplos de uso da simbologia de soldagem. Alguns deles estão reproduzidos na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem.



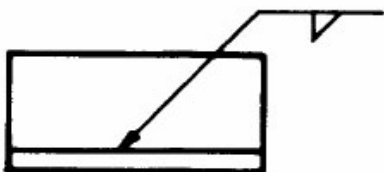
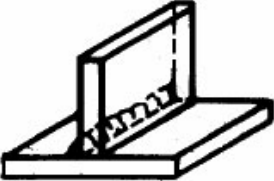
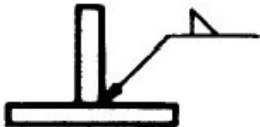
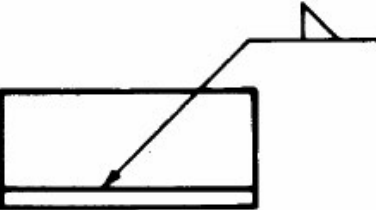

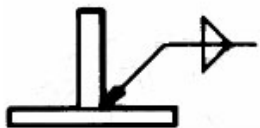
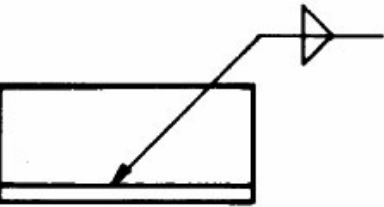
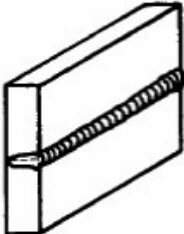
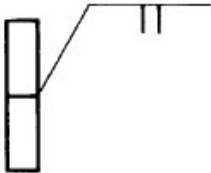
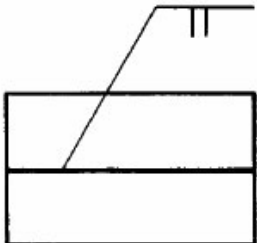
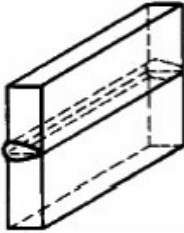
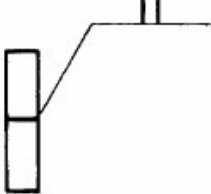
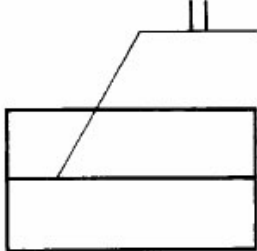
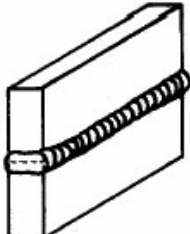
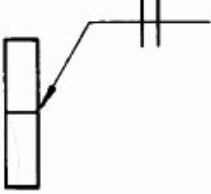
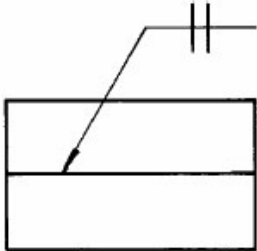
Significado	Representação 1	Representação 2
		
		
		
		
		
		

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

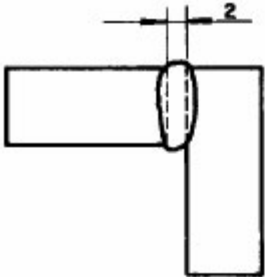
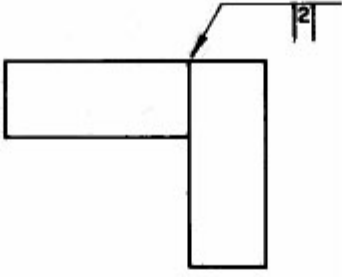
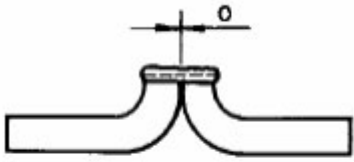

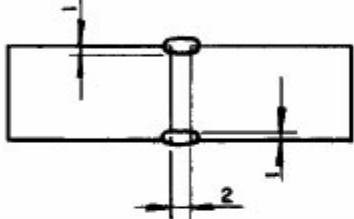
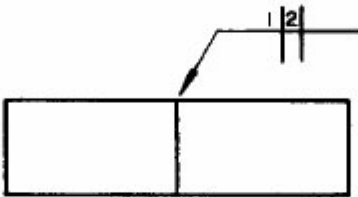
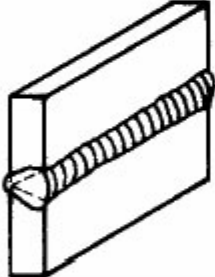
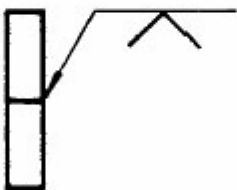
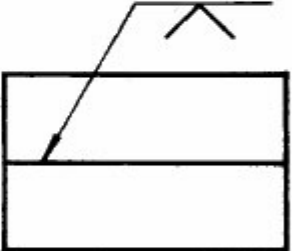
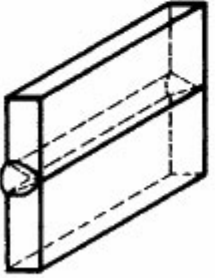
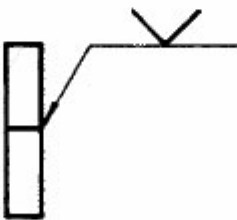
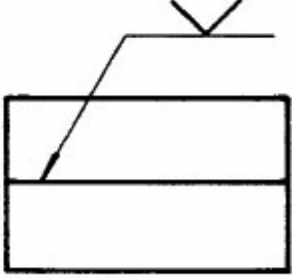
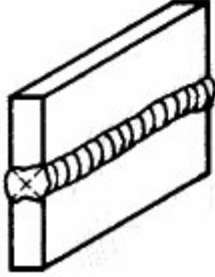
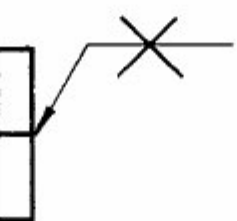
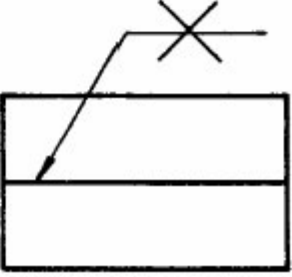

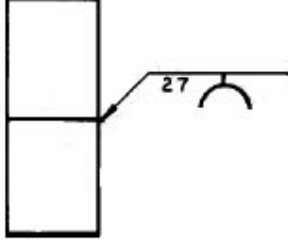
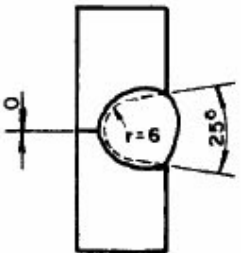
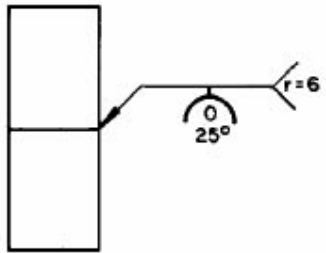
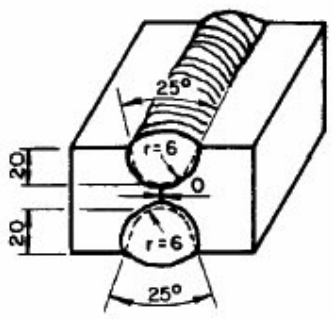
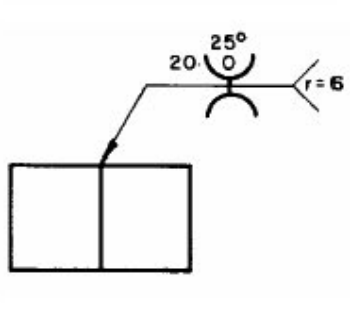
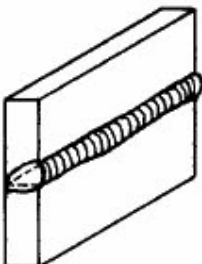
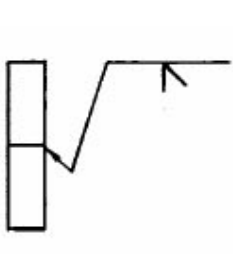
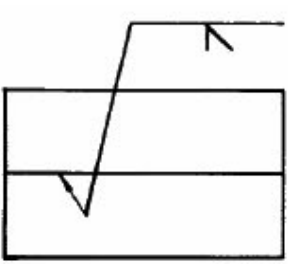
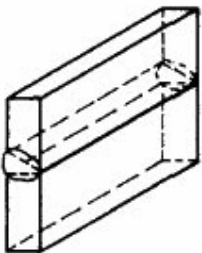
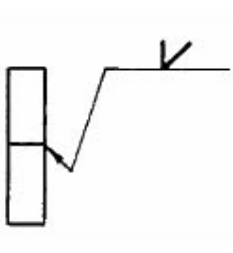
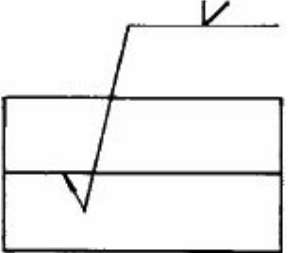
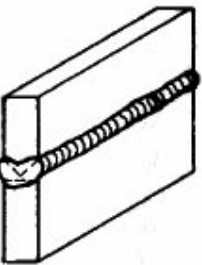
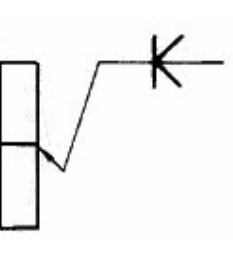
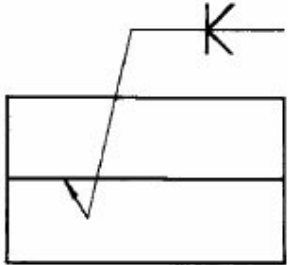
		-
		-
		-
		
		
		

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

		<p>—</p>
		<p>—</p>
		<p>—</p>

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

		-
		-
		-
		
		
		

Dispositivos de ligação

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

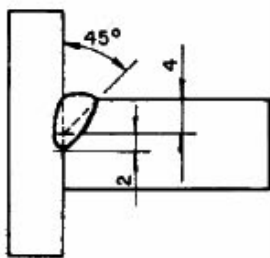
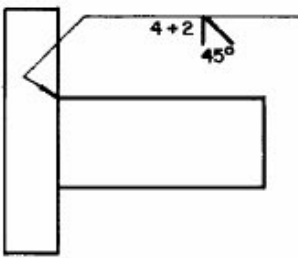
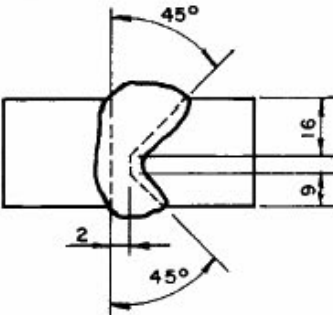
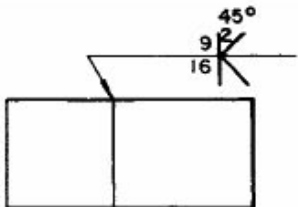
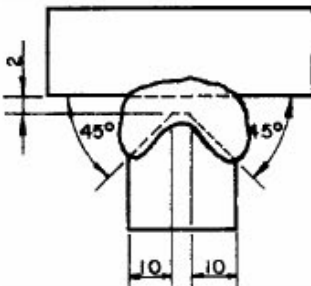
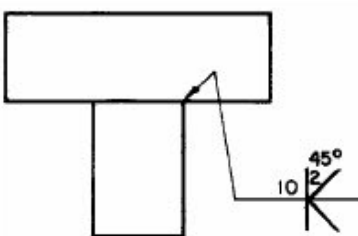
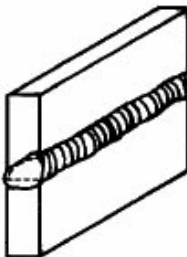
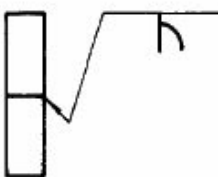
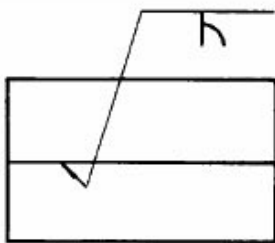
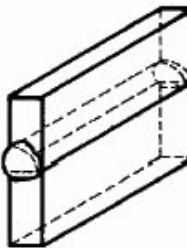
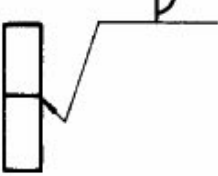
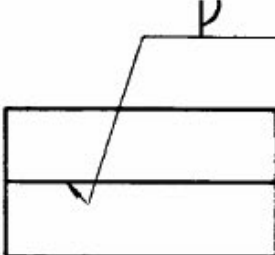
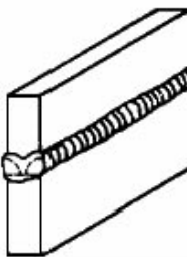

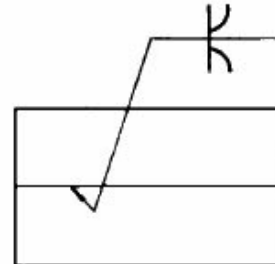
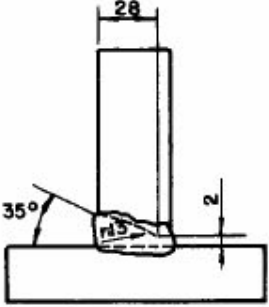
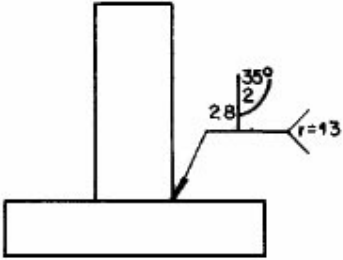
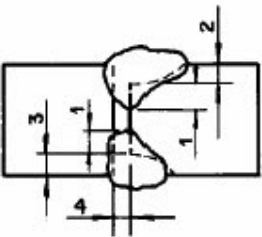
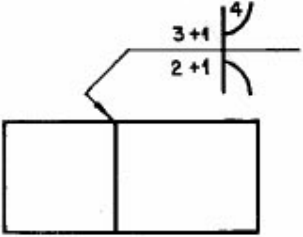
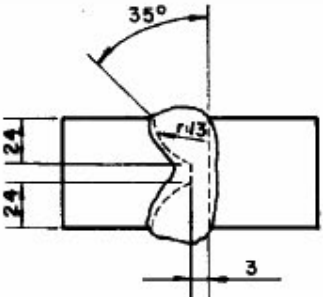
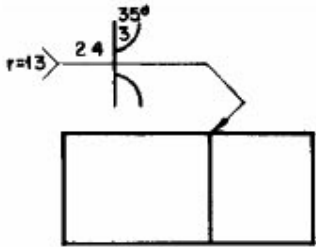

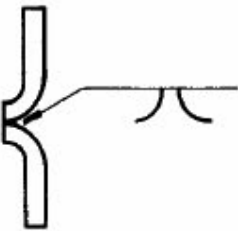
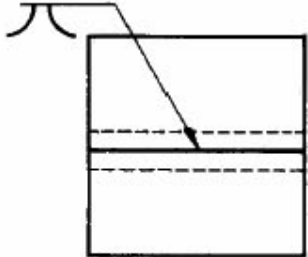
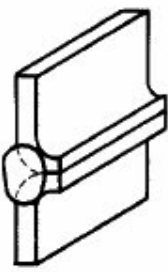
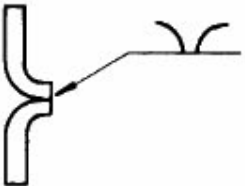
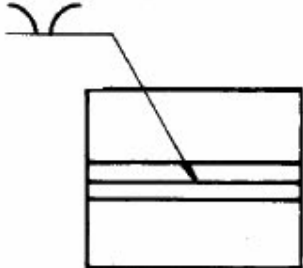
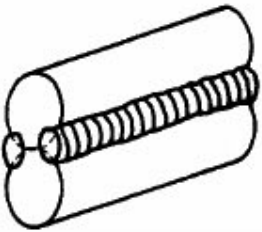
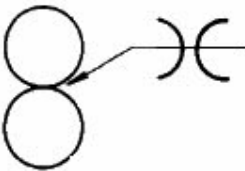
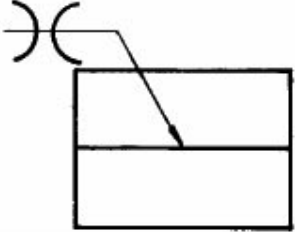
		-
		-
		-
		
		
		

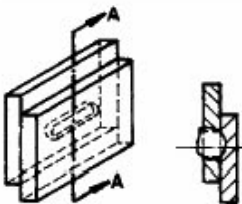
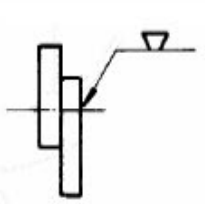
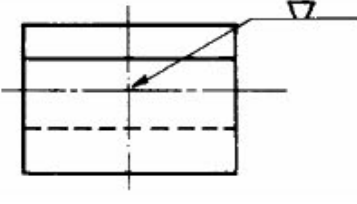
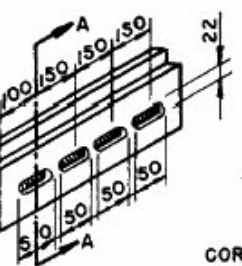
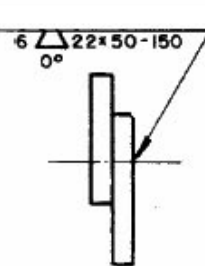
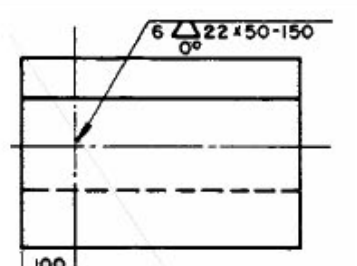
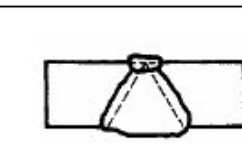
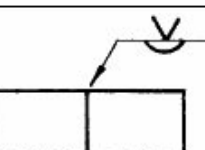

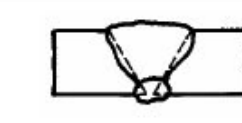
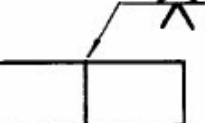

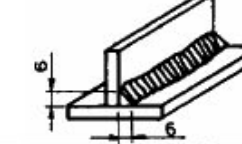
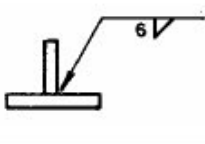
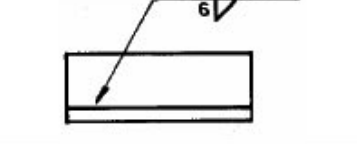

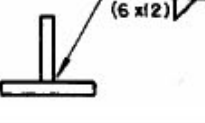
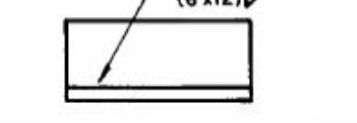
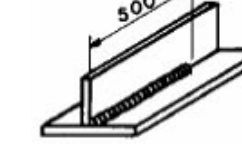
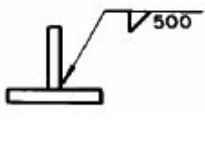
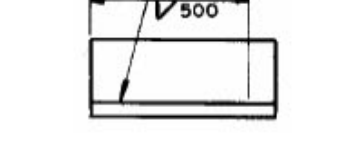
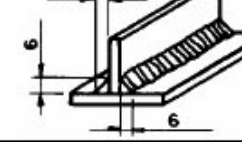
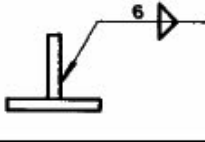


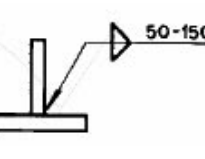
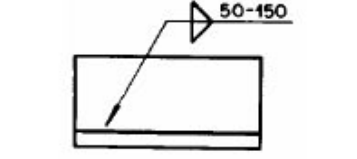
Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

		-
		-
		-
		
		
		

Dispositivos de ligação

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

 <p>CORTE A-A</p>		
 <p>CORTE A-A</p>		
		
		
		
		
		
		
		

Dispositivos de ligação

Tabela 5 – Exemplos da simbologia de soldagem (continuação)

1.2.7 - Controle de Qualidade das Soldas

A menos que boas técnicas e procedimentos de soldagem sejam usados, um grande número de defeitos pode ocorrer e resultar em descontinuidades internas à solda. Alguns dos defeitos mais comuns são: fusão incompleta do eletrodo, penetração inadequada na junta, porosidade, altura de solda inadequada ou mordeduras, absorção indesejável de escórias na composição da solda e fissuras longitudinais ou transversais.

Portanto, sem soldadores e inspetores

devidamente qualificados e um programa de procedimentos de controle e inspeção bem definidos, por exemplo, baseado nas recomendações do AWS e AISC (American Institute of Steel Construction), não será possível garantir a resistência e a segurança de uma estrutura ou partes da estrutura soldada.

Basicamente, o controle de qualidade das soldas pode ser aferido com testes comentados na tabela 6:

Tabela 6 – Controle de qualidade das soldas

Método de inspeção	Características	Limitações
Visual	O mais comum e mais econômico. Particularmente bom para soldas com um único passe.	Detecta somente trincas superficiais grosseiras, excessos e falta de solda e imperfeições.
Líquido penetrante	Utilizado quando a geometria da peça é complexa, dificultando a operação do equipamento de partículas magnéticas. Uso instantâneo em qualquer lugar. Detecta defeitos superficiais como trincas (micro-trincas da ordem de 0,001 mm de largura), fissuras, porosidade, mordeduras.	Detecta somente descontinuidades superficiais. Ondulações de soldas reentrantes e ranhuras podem dar falsas indicações. Exame de custo mais elevado do que o de partículas magnéticas.
Partícula magnética	Detecta defeitos na superfície e sub-superfície como trincas, fissuras, porosidade, mordeduras e sobreposição, descontinuidades lineares da ordem de 0,5mm, além de descontinuidades mascaradas por esmerilhamento, óxidos etc., e as escondidas sob pinturas. É um exame mais rápido e econômico do que o anterior. Indicações podem ser coletadas e preservadas em fitas plásticas.	Requer relativa lisura da superfície. Falta de cuidado no uso de pontas magnetizadas podem desprezar defeitos de golpeamento de arco. Necessita que o campo magnético seja gerado perpendicularmente à descontinuidade. Necessita em certos casos de desmagnetização da peça. Limpeza posterior. Depende da força do campo magnético.
Radiográfico	Detecta defeitos internos como porosidade, escória, vazios, fissuras, irregularidades, falta de fusão. Indicado para espessuras entre 4 mm e 70 mm. Um filme negativo é registro permanente. Distinção mais fácil do tipo de descontinuidade detectada. Executado em qualquer tipo de superfície.	Defeitos devem ocupar mais que aproximadamente 1,5% da espessura para ser registrado. Somente fissuras paralelas ao colidimento são registradas. Necessidade de acesso pelos dois lados da superfície inspecionada. Radiação perigosa, havendo a necessidade de evacuação de todo pessoal próximo à área em que está sendo realizada a radiografia. Tempo de exposição aumenta com a espessura. Custo mais elevado do que o ultra-sônico. Resultado duvidoso para soldas de filete.
Ultra-sônico	Detecta fissuras em qualquer orientação, escória, falta de fusão, inclusões, rupturas lamelares, vazios. Pode examinar minuciosamente quase qualquer espessura comercial. Alta sensibilidade na detecção de pequenos defeitos. Precisão na localização da descontinuidade e estimativa do tamanho. Inspeção rápida. Necessidade de acesso por somente uma superfície do elemento ensaiado.	Superfícies devem ser lisas. Equipamento deve ser frequentemente calibrado. Operador deve ser qualificado. Grânulos excessivamente grosseiros fornecem falsas indicações. Defeitos classificados por tamanho podem não ser muito exatos. O sistema pode ser sensível a pequenos defeitos que não são nocivos à estrutura. Falta de registro permanente. Difícil aplicação em peças de geometria complexa.

- Inspeção visual - dependem da experiência do soldador ou inspetor para detectar defeitos superficiais;

- Líquidos penetrantes: penetram nos defeitos revelando-os por meio de um material poroso ou fluorescente, também para detectar defeitos superficiais, principalmente em soldas de filete;

- Inspeção por partículas magnéticas, cujo espalhamento destas partículas na superfície da solda detecta defeitos internos através da sua disposição;

- Inspeção interna da solda por ultra-som através da emissão e recepção das ondas;

- Inspeção por radiografia com o emprego de raios-X para detectar defeitos internos na solda.

Capítulo 2

Classificação das Ligações

2 - Classificação das Ligações

Como visto, as ligações podem ser classificadas em soldadas ou parafusadas e, segundo o item 6.1.9.1 da NBR 8800:2008, parafusos não podem ser considerados trabalhando em conjunto com soldas, exceto em ligações a cisalhamento, nas quais parafusos instalados em furos-padrão ou furos pouco alongados com a maior dimensão transversal à direção da força podem ser considerados trabalhando conjuntamente a filetes longitudinais de solda, desde que considerada menos de 50% da força resistente de cálculo do grupo de parafusos.

Assim, quando classificamos as ligações em parafusadas ou soldadas, na maioria das vezes, o cálculo da ligação implica na verificação de grupos de parafusos ou de linhas de solda.

Pelas próprias características dos meios de ligação, nas ligações de fábrica é preferível o uso da solda, enquanto nas ligações de campo utilizam-se preferencialmente os parafusos.

Na análise e dimensionamento de estruturas metálicas sabe-se que não é suficiente classificar a ligação como indicado acima. Também devem ser consideradas outras classificações.

2.1 - Segundo os Esforços Solicitantes

Os parafusos devem resistir a esforços de tração, cisalhamento ou ambos, ao passo que as soldas devem resistir a tensões de tração, compressão, cisalhamento ou a combinação de tensões tangenciais e normais. Dependendo dos esforços solicitantes e das posições relativas desses esforços e dos grupos de parafusos ou linhas de solda resistentes, as ligações podem ser dos seguintes tipos básicos:

- cisalhamento centrado (fig. 11a);
- cisalhamento excêntrico (fig. 11b);
- tração ou compressão (fig. 11c);
- tração ou compressão com cisalhamento (fig. 11d).

Os esforços solicitantes podem ainda ser constantes ao longo da vida útil da ligação (estaticamente aplicados) ou variáveis ao longo dela (dinamicamente aplicados). Neste trabalho serão analisadas apenas as ligações submetidas ao primeiro tipo de esforço.

Para ligações submetidas a esforços variáveis ao longo da vida útil, a NBR 8800:2008, anexo K, deverá ser consultada para as verificações adicionais.

2.2 - Segundo a Rigidez

É fato que o comportamento mecânico das ligações influi sensivelmente na distribuição dos esforços e deslocamentos das estruturas, tornando-se essencial o conhecimento da rigidez e da capacidade de rotação da ligação.

A análise de esforços na estrutura metálica deve incluir a influência do comportamento das ligações entre os elementos estruturais. Como nesta fase, em geral, as ligações não estão dimensionadas, a análise pode ser feita baseada no comportamento estimado.

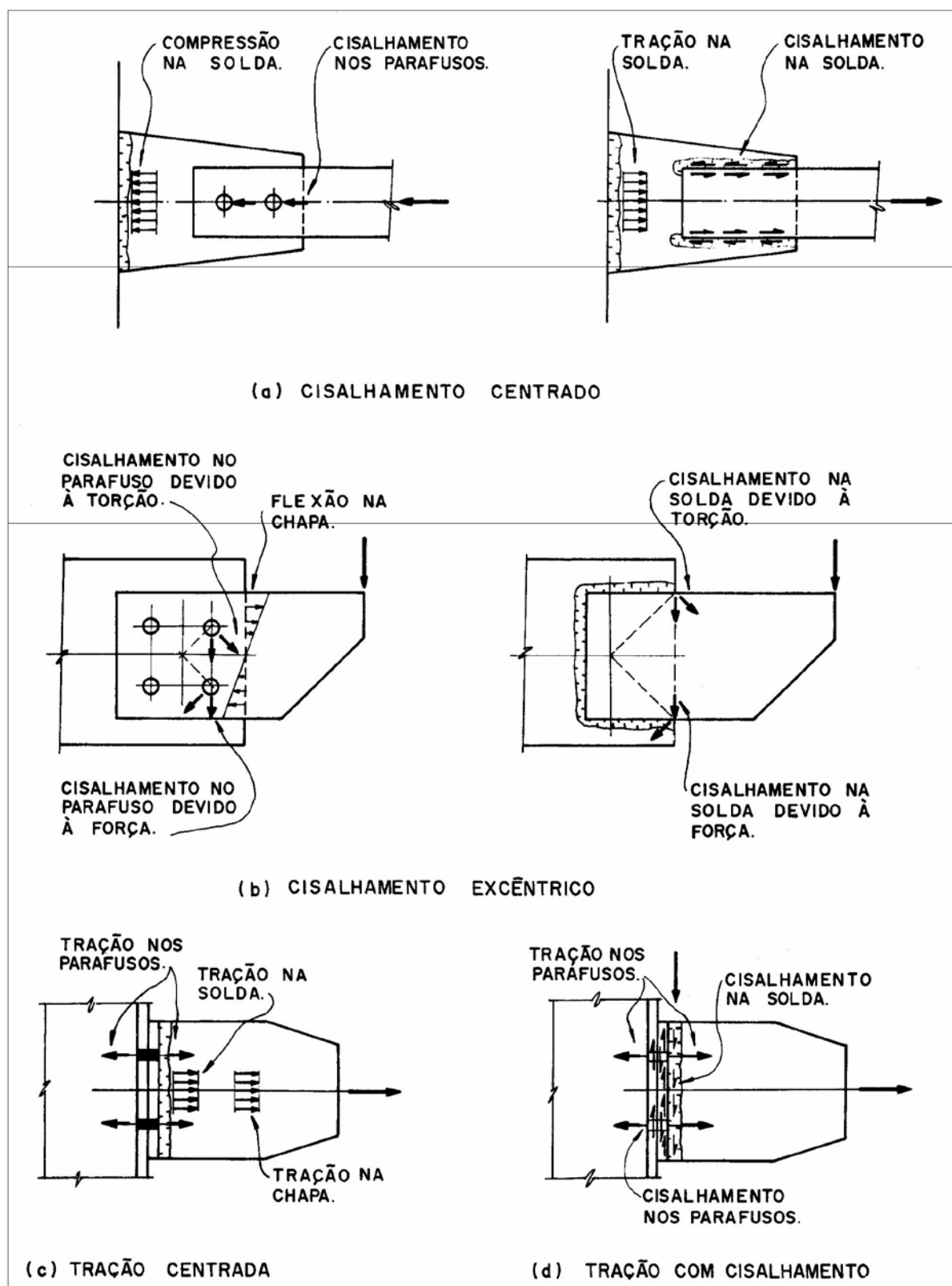


Fig. 11 - Esforços Solicitantes na Ligação

Classificação das ligações

Depois de dimensionadas as ligações, se o seu comportamento não for consistente com aquele estimado, a estrutura deve ser recalculada até a convergência do processo.

Nas estruturas reticuladas, o comportamento das ligações pode ser traduzido pela curva momento fletor-rotação ($M_i-\Phi_i$), como simplificada ilustrado na figura 12. Com base nesta curva obtêm-se as três propriedades fundamentais de uma ligação:

- a rigidez (S_i);
- o momento resistente (M_i, R_d);
- a capacidade de rotação (Φ_d).

A rotação de uma ligação Φ_i é definida como a variação do ângulo formado pela tangente aos eixos dos elementos conectados, após a deformação, como ilustrado na figura 13.a para uma ligação viga-pilar.

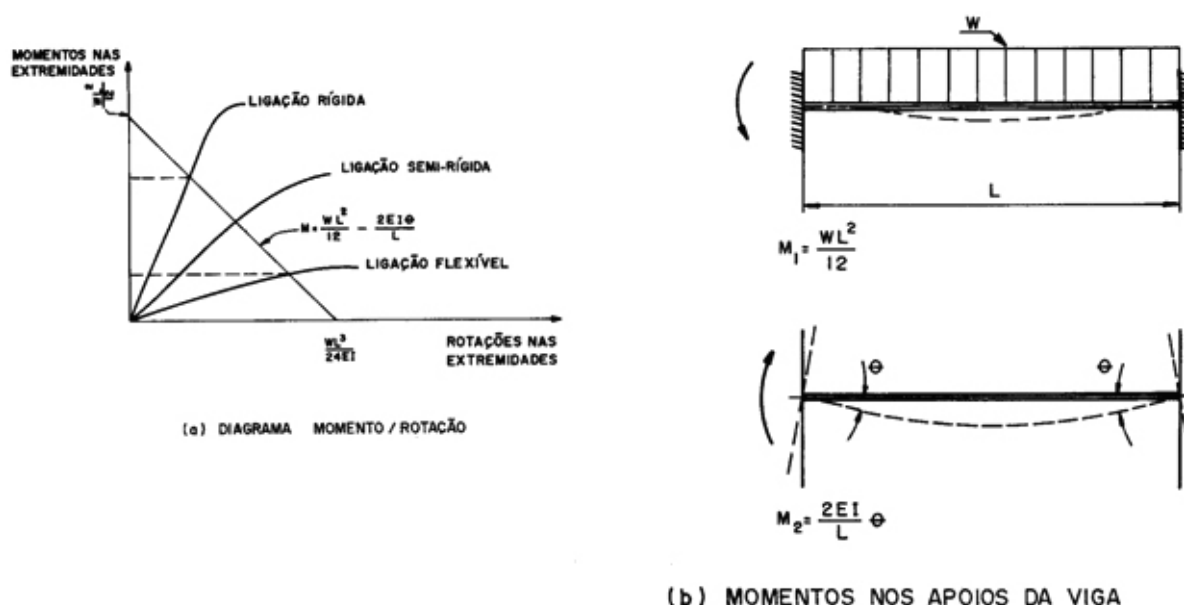


Fig. 12- Comportamento das Ligações

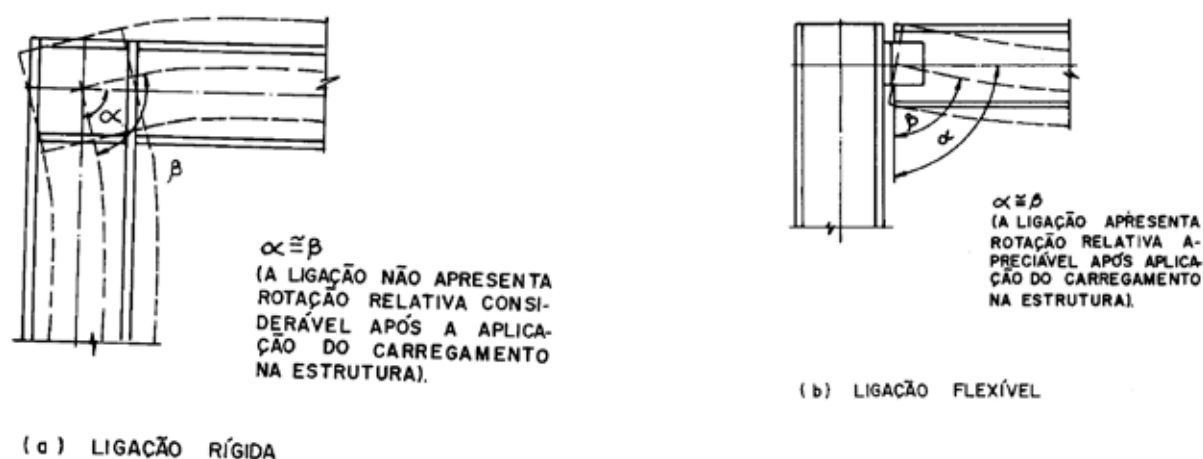


Fig. 13- Ligações Rígida e Flexível

O conhecimento da rigidez das ligações é fundamental para a análise elástica das estruturas. Quando se utilizam métodos plásticos de análise também é fundamental conhecer a resistência e a capacidade de rotação das ligações.

Assim, além das barras que compõem a estrutura, também as ligações deverão ser convenientemente concebidas e dimensionadas, sob pena da estrutura não se comportar conforme desejado.

Dessa forma as ligações deverão ser projetadas conforme as hipóteses feitas para os nós das barras na análise estrutural:

- nos locais onde foram previstas ligações rígidas, deverão ser previstos detalhes que efetivamente impeçam a rotação relativa das partes;

- nos locais onde a ligação deve permitir a rotação relativa das partes, os detalhes deverão ser tais que propiciem essa rotação com o mínimo de restrição.

De acordo com o grau de impedimento da rotação relativa de suas partes, as ligações são classificadas nos três tipos a seguir descritos.

2.2.1 - Ligação Rígida

A ligação é tal que o ângulo entre os elementos estruturais que se interceptam permanece essencialmente o mesmo após o carregamento da estrutura.

A partir dos limites estabelecidos pelo item 6.1.2 da NBR 8800:2008 uma ligação viga-pilar pode ser considerada rígida se:

$$S_i \geq \frac{25EI_v}{L_v}$$

Essa condição é válida somente para estruturas nas quais, em cada andar, a seguinte condição é satisfeita:

$$\frac{K_v}{K_p} \geq 0,1$$

S_i é a rigidez da ligação, correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação, denominada rigidez inicial;

I_v é o momento de inércia da seção transversal da viga conectada no plano da estrutura;

L_v é o comprimento da viga conectada;

K_v é o valor médio de $\frac{I_v}{L_v}$ para todas as vigas no topo do andar

K_p é o valor médio de $\frac{I_p}{L_p}$ para todos os pilares do andar

I_p é o momento de inércia da seção transversal do pilar conectada no plano da estrutura;

L_p é a altura do andar para um pilar.

Caso a primeira condição seja satisfeita, mas a segunda não, a ligação deve ser considerada semi-rígida.

A rigidez de uma ligação na análise estrutural, ou seja, sua capacidade de impedir a rotação relativa local das peças ligadas, é uma forma de obter-se indicações da importância do seu comportamento na resposta global da estrutura e indica se a consideração dada às ligações (rígida, semi-rígida ou rotulada), em termos de rotações e deslocamentos, condiz com o comportamento real da ligação.

Os valores de S_i podem ser determinados de acordo com o Eurocode 3 Part 1-8 ou com base em resultados experimentais.

2.2.2 - Ligação Flexível

Neste caso a restrição à rotação relativa entre os elementos estruturais deve ser tão pequena quanto se consiga obter na prática.

No caso de vigas, sujeitas à flexão simples, por exemplo, a ligação flexível transmite apenas a força cortante.

A partir dos limites estabelecidos pelo item 6.1.2 da NBR 8800:2008 uma ligação viga-pilar pode ser considerada rotulada se:

$$S_i \leq \frac{0,5EI_v}{L_v}$$

Onde:

S_i é a rigidez da ligação, correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação, denominada rigidez inicial;

I_v é o momento de inércia da seção transversal da viga conectada no plano da estrutura;

L_v é o comprimento da viga conectada;

2.2.3 - Ligação Semi-Rígida

Nesse caso o momento transmitido através da ligação não é nem zero (ou próximo de zero) como no caso de ligações flexíveis e nem o momento máximo (ou próximo dele) como no caso de conexões rígidas.

Para que se possa utilizar a ligação semi-rígida, deverá ser conhecido primeiro a relação de dependência entre o momento resistente e a rotação.

As ligações semi-rígidas são raramente utilizadas, devido à dificuldade de se estabelecer esta relação, e não serão abordadas nesse trabalho.

A figura 12 representa graficamente o

comportamento dos três tipos de ligação em relação ao diagrama Momento/Rotação para diversas ligações.

Nela estão indicadas as curvas relativas às ligações rígidas, semi-rígidas e flexíveis e também a reta que relaciona momentos e rotações nos apoios para uma viga submetida a carga uniforme.

Para a viga com carga uniforme temos:

- considerando as conexões nas extremidades teoricamente rígidas, o momento nos apoios e será (fig. 12b):

$$M_1 = \frac{WL^2}{12}$$

- considerando que a ligação não é teoricamente rígida e permite alguma rotação das seções dos apoios (θ), o alívio de momento nos apoios será (fig. 12b):

$$M_2 = \frac{4EI}{L}\theta - \frac{2EI}{L}\theta = \frac{2EI}{L}\theta$$

- o momento real nos apoios será a soma tensorial dos dois valores:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{WL^2}{12} - \frac{2EI}{L}\theta$$

- para $\theta = 0$ (ligação teoricamente rígida):

$$M = \frac{WL^2}{12}$$

- para $M = 0$ (ligação teoricamente flexível), que é a rotação nos apoios da viga biapoiada:

$$\theta = \frac{WL^3}{24EI}$$

Capítulo 3

Resistência de parafusos

3 - Resistência de Parafusos

Neste capítulo serão apresentadas as resistências de cálculo de parafusos conforme a norma brasileira NBR 8800:2008.

3.1 - Generalidades

Uma ligação deve ser dimensionada de forma que a sua resistência de cálculo seja igual ou superior à:

- solicitação de cálculo;
- uma porcentagem especificada da resistência de cálculo da barra, conforme comentado no item 1.

Em barras comprimidas que não sejam pilares com extremidades usinadas, todas as partes das ligações devem ser dimensionadas para também resistir ao momento fletor e força cortante resultantes de uma força transversal igual a 2% da força axial resistente de cálculo da barra conectada, aplicada na posição da emenda. A barra deve ser considerada birrotulada para determinação do momento fletor e da força cortante na emenda.

Em pilares com extremidades usinadas com transmissão de forças de compressão por contato, as ligações devem garantir a estabilidade estrutural e manter em posição todas as partes ligadas, com segurança

3.2 - Parafusos

As conexões parafusadas podem ser de dois tipos: ligação do tipo contato (bearing-type) ou do tipo atrito (friction-type). No primeiro tipo, podem ser utilizados parafusos comuns ou de alta resistência, já que os parafusos são instalados sem aperto controlado (protensão). Quanto ao segundo tipo, apenas os parafusos de alta resistência podem ser utilizados, uma vez que a resistência ao deslizamento está diretamente ligada à protensão aplicada aos parafusos.

O gráfico da figura 14 apresenta, de maneira simplificada, o comportamento força-deslocamento relativo de uma ligação constituída por parafusos de alta resistência protendidos, onde nota-se a ocorrência de quatro fases:

- Fase (a): a força aplicada (F) é menor que a resistência ao deslizamento, ocorrendo apenas deslocamentos provenientes da deformação elástica das chapas.

- Fase (b): a força aplicada (F) supera a resistência ao deslizamento e há um deslocamento brusco proveniente da acomodação dos parafusos nos respectivos furos.

- Fase (c): ocorre deformação do conjunto em fase elástica.

- Fase (d): ocorre deformação do conjunto em fase inelástica, culminando com a falha da ligação.

Há quatro modos de falha possíveis nas conexões parafusadas:

- Modo de falha (1): cisalhamento do corpo do parafuso.

- Modo de falha (2): deformação excessiva da parede do furo (esmagamento).

- Modo de falha (3): cisalhamento da chapa (rasgamento).

- Modo de falha (4): ruptura da chapa por tração na seção líquida.

É importante observar que a fase (a) corresponde à ligação do tipo atrito, ou seja, a resistência ao deslizamento ainda não foi superada. A partir da fase (b), a ligação passa a se comportar como uma ligação por contato.

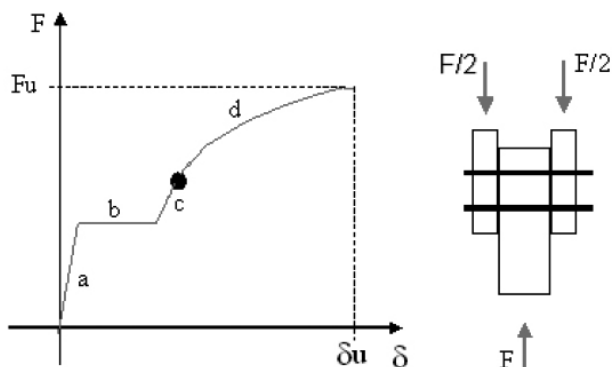


Figura 14 - Comportamento força-deslocamento relativo em ligação.

3.2.1 - Conexões do Tipo Contato

Nas conexões por contato, os parafusos podem resultar solicitados à tração (figura 15a), ao cisalhamento (figura 15b) ou à tração e cisalhamento simultaneamente (figura 15c).

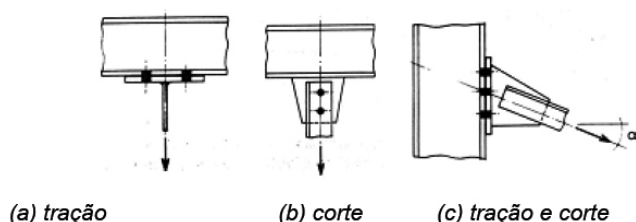


Figura 15 - Conexões por contato.

3.2.1.1 - Tração

A força de tração resistente de cálculo para um parafuso ou barra rosqueada é dada por:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,75A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

No caso de barras redondas rosqueadas, a força resistente de cálculo também não deve ser superior a:

$$F_{t,Rd} = \frac{A_b f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

f_{ub} é a resistência à ruptura do material do parafuso ou barra rosqueada à tração, especificada na tabela 7;

f_{yb} é a resistência ao escoamento do material do parafuso ou barra rosqueada, especificada na tabela 7;

A_b é a área bruta, baseada no diâmetro do parafuso ou no diâmetro externo da rosca da barra redonda rosqueada;

d_b é o diâmetro do parafuso;

Y_{a1} é o coeficiente de ponderação das resistências para o estado limite último de escoamento da seção bruta dado na Tabela 8;

Y_{a2} é o coeficiente de ponderação das resistências para o estado limite último de ruptura da seção líquida dado na Tabela 8.

A tabela 7 apresenta os limites de escoamento e resistência à tração para os aços.

Resistência de parafusos

Tabela 7 – Limite de escoamento e resistência à tração.

Especificação	f_{yb} (MPa)	f_{ub} (MPa)	Diâmetro (mm)	Diâmetro (pol)
ASTM A325 ^a	635	825	$16 \leq d_b \leq 24$	$\frac{1}{2} \leq d_b \leq 1$
	560	725	$24 < d_b \leq 36$	$1 < d_b \leq 1 \frac{1}{2}$
ASTM A490 ^b	895	1.035	$16 \leq d_b \leq 36$	$\frac{1}{2} \leq d_b \leq 1 \frac{1}{2}$
ASTM A307	-	415	-	$\frac{1}{2} \leq d_b \leq 4$
ISO 898-1 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ISO 4016 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ISO 4016 Classe 10.9	900	1.000	$12 \leq d_b \leq 36$	-

^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.

^b Parafusos ASTM A490 não devem ser galvanizados.

Os valores de ponderação das resistências do aço estrutural são dados na tabela 8.

Tabela 8 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências

Combinações	γ_{a1}	γ_{a2}	γ_e	γ_{w1}	γ_{w2}
Normais	1,10	1,35	1,20	1,25	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,25	1,35
Excepcionais	1,00	1,15	1,00	1,05	1,15

3.2.1.2 - Força Cortante

A força cortante resistente de cálculo de um parafuso ou barra rosqueada, por plano de corte, deve ser calculada considerando os dois estados limites últimos a seguir.

3.2.1.2.1 - Cisalhamento do Corpo do Parafuso

A resistência de cálculo é dada por:

$$F_{v,Rd} = \frac{\phi_v A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

$\phi_v = 0,4$ para parafusos de alta resistência e barras rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e demais parafusos de baixo carbono para qualquer posição do plano de corte;

$\phi_v = 0,5$ para parafusos de alta resistência e barras rosqueadas, quando o plano de corte não passa pela rosca .

3.2.1.2.2 - Pressão de Contato no Furo

A resistência de cálculo é dada por:

$$F_{c,Rd} = \frac{\phi_c l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2\phi_c d_b t f_u}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

$\phi_c = 1,2$ para furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto;

$\phi_v = 1,5$ para furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força quando a deformação no furo para forças de serviço não for uma limitação de projeto;

$\phi_v = 1,0$ no caso de furos muito alongados na direção perpendicular à da força;

l_f é a distância, na direção da força, entre as bordas de furos adjacentes ou de furo a borda livre;

t é a espessura da parte ligada;

f_u é a resistência à ruptura do aço da parede do furo.

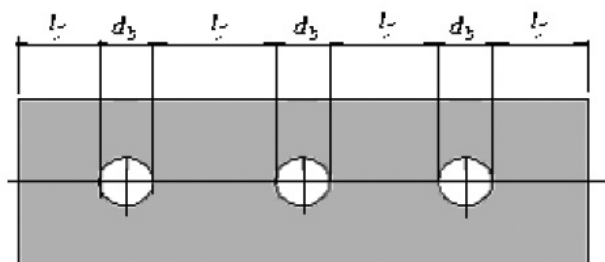


Figura 16 - Dimensões l_f e d_f em uma chapa de espessura "t".

A tabela 9 apresenta as resistências de cálculo para parafusos em ligações por contato.

Tabela 9 – Resistência de cálculo dos parafusos em ligações por contato para $\gamma_{a2}=1,25$ (kN).

ESPECIFICAÇÃO ASTM		DIÂMETRO NOMINAL										
		1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"	1 3/8"	1 1/2"	1 3/4"	2"
		ÁREA BRUTA mm ²										
		126	198	285	388	506	641	792	958	1140	1552	2027
A307	TRAÇÃO	29,1	45,7	65,7	89,5	116,7	147,8	182,6	220,9	262,8	357,8	467,3
	FORÇA CORTANTE	15,5	24,3	35,0	47,7	62,2	78,8	97,4	117,8	140,2	190,8	249,2
A325	TRAÇÃO	57,8	90,8	130,6	177,8	231,9	258,2	319,0	385,9	459,2	625,1	816,4
	FORÇA CORT. (ROSCA FORA PL. DE CORTE)	38,5	60,5	87,1	118,6	154,6	172,1	212,7	257,2	306,1	416,7	544,3
	FORÇA CORT. (ROSCA NO PL. DE CORTE)	30,8	48,4	69,7	94,8	123,7	137,7	170,1	205,8	244,9	333,4	435,4
A490	TRAÇÃO	72,5	113,9	163,9	223,1	291,0	368,6	455,4	550,9	655,5	892,4	1165,5
	FORÇA CORT. (ROSCA FORA PL. DE CORTE)	48,3	75,9	109,3	148,7	194,0	245,7	303,6	367,2	437,0	594,9	777,0
	FORÇA CORT. (ROSCA NO PL. DE CORTE)	38,6	60,7	87,4	119,0	155,2	196,6	242,9	293,8	349,6	475,9	621,6
ESPECIFICAÇÃO ISO 898 CLASSE 4.6		DIÂMETRO NOMINAL										
		M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M42	M48
		ÁREA BRUTA (BASEADA NO DIÂMETRO NOMINAL) mm ²										
		113	201	314	380	452	573	707	855	1018	1385	1810
TRAÇÃO		25,1	44,7	69,8	84,4	100,4	127,3	157,1	190,0	226,2	307,8	402,2
FORÇA CORTANTE		13,4	23,8	37,2	45,0	53,6	67,9	83,8	101,3	120,7	164,1	214,5

3.2.1.2.3 - Tração e Cisalhamento Combinados

Com base em análise experimental de parafusos solicitados simultaneamente à tração e cisalhamento, é razoável a utilização de uma curva circular de interação, cuja expressão é dada por:

$$\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1,0$$

Onde:

$F_{t,Sd}$ é a força de tração de cálculo;

$F_{v,Sd}$ é a força de cisalhamento de cálculo por plano de corte;

$F_{t,Rd}$ é a resistência de cálculo à tração, conforme 3.2.1.1;

$F_{v,Rd}$ é a resistência de cálculo ao cisalhamento, por plano de corte, conforme 3.2.1.2.1.

Buscando uma simplificação, o modelo matemático adotado pela norma norte-americana (AISC) e pela norma brasileira NBR 8800:2008 substitui a curva circular por três trechos lineares, conforme figura 17.

Nesse caso, além das verificações para os dois esforços isolados, conforme apresentado anteriormente, deverão ser atendidas também as exigências apresentadas na tabela 10.

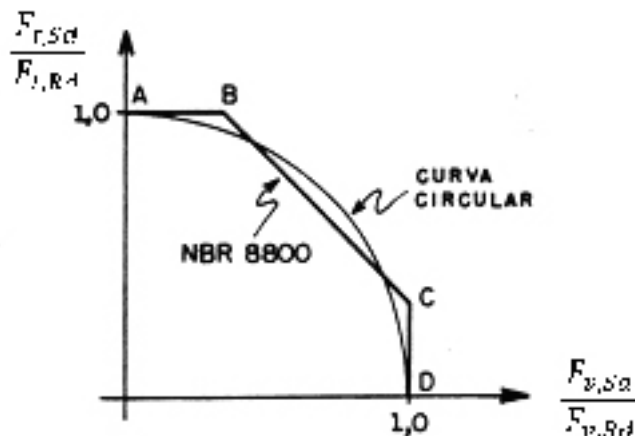


Figura 17 - Curvas de interação tração/cisalhamento para parafusos.

- Trecho AB - reta horizontal: despreza-se a influência do cisalhamento
- Trecho CD - reta vertical: despreza-se a influência da tração
- Trecho BC - interação linear, cuja expressão é dada por:

$$\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} + \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} \leq C$$

Onde C é uma constante admitida como sendo igual a 4/3. Isolando $F_{t,Sd}$, obtém-se:

$$F_{t,Sd} \leq \frac{4}{3} F_{t,Rd} - F_{v,Sd} \frac{F_{t,Rd}}{F_{v,Rd}}$$

Substituindo os valores de $F_{t,Rd}$ e $F_{v,Rd}$ para cada caso, obtém-se a máxima tração de cálculo $F_{t,Sd}$ que pode atuar simultaneamente com a força cortante $F_{v,Sd}$. Com os valores de $F_{v,Sd}$, a NBR 8800:2008 apresenta as expressões da tabela 10, as quais limitam o valor da resistência de cálculo à tração $F_{t,Rd}$.

Tabela 10 - Tração e cortante combinadas

Tipo de parafuso	Limitação da resistência à tração
Parafusos baixo carbono e barras rosqueadas em geral	$F_{t,Sd} \leq \frac{f_{ub}A_b}{\gamma_{a2}} - 1,90F_{v,Sd}$
Parafusos de alta resistência ASTM A325/A490	$F_{t,Sd} \leq \frac{f_{ub}A_b}{\gamma_{a2}} - 1,90F_{v,Sd}$ (nota 1) $F_{t,Sd} \leq \frac{f_{ub}A_b}{\gamma_{a2}} - 1,50F_{v,Sd}$ (nota 2)
Nota 1: plano de corte passa pela rosca.	
Nota 2: plano de corte não passa pela rosca.	

3.2.2 - Resistência de Cálculo em Conexões do Tipo Atrito

A condição básica para uma ligação atuar por atrito é a de que não ocorra deslizamento entre seus componentes. Para isso, a força de cisalhamento no parafuso, produzida pelas combinações últimas de ações não pode ultrapassar a resistência ao deslizamento e não pode ultrapassar suas respectivas resistências de cálculo dadas no item 3.2.1.

Assim, nas situações em que o deslizamento é um estado limite último, ou seja, nas ligações com furos alargados e furos pouco alongados ou muito alongados com alongamentos paralelos à direção da força aplicada, a força resistente de cálculo de um parafuso ao deslizamento é dada por:

$$F_{f,Rd} = \frac{1,13\mu C_h F_{tb} n_s}{\gamma_e} \left(1 - \frac{F_{t,Sd}}{1,13F_{Tb}} \right)$$

Nas situações em que o deslizamento é um estado limite de serviço, ou seja, nas ligações com furos-padrão e furos pouco alongados ou muito alongados com alongamentos transversais à direção da força aplicada e está relacionado ao desempenho da estrutura e não à segurança, a força resistente nominal de um parafuso ao deslizamento é dada por:

$$F_{f,Rk} = 0,80\mu C_h F_{Tb} n_s \left(1 - \frac{F_{t,Sk}}{0,80F_{Tb}} \right)$$

Onde:

F_{tb} é a força de protensão mínima por parafuso considerada como sendo 70% da resistência mínima à tração do parafuso, ou seja: $F_{tb} = 0,70A_r f_{ub}$. Para valores das forças de protensão mínimas na montagem de parafusos ASTM, a tabela 15 da NBR 8800:2008 é reproduzida na Tabela 11 a seguir.

A_e é a área efetiva à tração ou área resistente dada na tabela 14, a seguir;

$F_{t,Sd}$, caso exista, é a força de tração solicitante de cálculo no parafuso que reduz a força de protensão, calculada com as combinações últimas de ações;

N_s é o número de planos de deslizamento;

γ_e é o coeficiente de ponderação da resistência, dado na tabela 8;

μ é o coeficiente médio de atrito dado na tabela 12;

C_h é um fator de furo dado na tabela 13.

Resistência de parafusos

Tabela 11 – Força de protensão mínima em parafusos de alta resistência.

Diâmetro do parafuso: d_b		Força de protensão mínima: F_{Tb} (kN)	
polegadas	mm	ASTM A325	ASTM A490
$\frac{1}{2}$		53	66
$\frac{5}{8}$		85	106
	16	91	114
$\frac{3}{4}$		125	156
	20	142	179
	22	176	221
$\frac{7}{8}$		173	216
	24	205	257
1		227	283
	27	267	334
$1 \frac{1}{8}$		250	357
	30	326	408
$1 \frac{1}{4}$		317	453
	36	475	595
$1 \frac{1}{2}$		460	659

Tabela 12 – Coeficientes médios de atrito.

Superfície	Coeficiente médio de atrito μ
Superfícies laminadas, limpas, isentas de óleos ou graxas, sem pintura e superfícies galvanizadas a quente com rugosidade aumentada manualmente por meio de escova de aço.	0,35
Superfícies jateadas sem pintura.	0,50
Superfícies galvanizadas a quente.	0,20

Tabela 13 – Fatores de furo.

Tipo de furo	Fator de furo C_h
Furos padrão	1,00
Furos alargados ou pouco alongados	0,85
Furos muito alongados	0,70

Nas ligações por atrito permite-se apenas a utilização de parafusos de alta resistência, pois nesse caso é necessário aplicar um torque elevado.

A área efetiva à tração ou área resistente de um parafuso é um valor compreendido entre a área bruta e a área da raiz da rosca. Essa área pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$A_e = 0,25d_b^2 \left(1 - k \frac{P}{d_b}\right)^2$$

Onde:

P = passo da rosca

K = 0,9743 para roscas UNC (parafusos ASTM) e 0,9382 para rosca métrica ISO grossa.

A tabela 14 apresenta os valores da área efetiva à tração (A_e) e da área bruta (A_b) dos parafusos com rosca UNC e ISO.

Tabela 14 - Valores de A_e e A_b

ISO	UNC	P (mm)	A _b (cm ²)	A _e (cm ²)	A _e /A _b
M 12		1,75	1,13	0,84	0,75
	12,5	1,95	1,26	0,92	0,73
	16	2,31	1,98	1,46	0,74
M 16		2,00	2,01	1,57	0,78
	19	2,54	2,85	2,15	0,75
M 20		2,50	3,14	2,45	0,78
M 22		2,50	3,80	3,03	0,80
	22,2	2,82	3,88	2,93	0,77
M 24		3,00	4,52	3,53	0,78
	25	3,18	5,06	3,91	0,77
M 27		3,00	5,73	4,59	0,80
	28,5	3,63	6,41	4,92	0,77
M 30		3,50	7,07	5,61	0,79
	32	3,63	7,92	6,25	0,79
M 33		3,50	8,55	6,94	0,81
	35	4,23	9,58	7,45	0,78
M 36		4,00	10,18	8,17	0,80
	38	4,23	11,40	9,07	0,80
M 42		4,50	13,85	11,20	0,81
	44	5,08	15,52	12,26	0,79
M 48		5,00	18,10	14,70	0,81
	50	5,64	20,27	16,13	0,80

A protensão F_{tb} é determinada levando-se em consideração o estado de tensões no parafuso, ou seja, a atuação simultânea de tensões normais σ devida à tração e tensões de cisalhamento τ provenientes do momento de torção.

Na fase final de aperto, o corpo do parafuso fica solicitado pela força de tração T₀ dada por:

$$T_0 = \frac{M_0}{kd_b} \cong \frac{M_0}{0,2d_b}$$

Onde:

M₀ = momento de torção aplicado na porca.

k = coeficiente adimensional determinado experimentalmente admitido como 0,2.

Nesse coeficiente já está considerado o atrito da porca sobre a superfície da rosca e sobre a superfície de apoio. O momento de torção resultante no corpo do parafuso é proveniente somente do atrito entre porca e rosca, perfazendo aproximadamente 60% do momento total aplicado M₀ (figura 4).

Adotando-se o critério de resistência de von Mises, a superposição das tensões normais e de cisalhamento deve obedecer a seguinte condição:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq f_{ub}$$

onde

$$\sigma = \frac{T_0}{A_e} = \frac{4T_0}{\pi d_e^2}$$

$$\tau = \frac{0,6M_0}{W_t} = \frac{0,6(0,2T_0d_b)}{\pi d_e^3/16} = 0,48 \frac{d_b}{d_e} \sigma$$

Resistência de parafusos

Observando a tabela 14 nota-se que a relação entre a área efetiva e a área bruta do parafuso (A_e/A_b) tem como valor mínimo 0,73, o que leva a uma relação entre o diâmetro nominal e o diâmetro efetivo (d_b/d_e) ao valor 1,17. Retornando à expressão anterior, obtém-se τ em função de σ :

$$\tau = 0,48 \times 1,17\sigma = 0,56\sigma$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3(0,56\sigma)^2} \leq f_{ub}$$

Finalmente, igualando-se σ_i a f_{ub} :

$$\sigma_i = 0,72f_{ub}$$

Dessa forma, entende-se o valor recomendado para a protensão nos parafusos.

3.2.3 - Dimensões e uso de Furos

A NBR 8800:2008 prevê quatro tipos de furos para parafusos:

- Padrão;
- Alargado;
- Pouco alongado;
- Muito alongado.

As dimensões máximas de furos devem obedecer ao indicado na tabela 12 da NBR 8800:2008 reproduzidos na tabela 15 a seguir. O tipo mais usual, e que será abordado aqui, é o furo-padrão, com diâmetro igual ao diâmetro do parafuso mais 1,5mm, no caso de parafuso milimétrico, ou o diâmetro do parafuso mais 1/16", no caso de parafuso em polegada. Furos de maiores diâmetros podem ser usados nas placas de base para levar em consideração as tolerâncias de chumbadores em bases de concreto, desde que se utilize arruelas especialmente dimensionadas soldadas às placas de base.

Tabela 15 - Dimensões máximas de furos para parafusos e barras rosqueadas.

Menor espessura do metal base na junta t (mm)	d_w (mm)
$\leq 6,35$	3
$6,35 < t \leq 12,5$	5
$12,5 < t \leq 19$	6
> 19	8

Nota: nas ligações parafusadas entre barras devem ser usados furos padrão, a não ser que seja aprovado pelo responsável pelo projeto o uso de furos alargados ou alongados

A distância entre centros de furos, preferencialmente, não deve ser inferior a $3d_b$ e a distância máxima não deve exceder a:

- 300 mm ou 24 vezes a menor espessura das partes ligadas em elementos pintados ou não sujeitos a corrosão;

- 180 mm ou 14 vezes a menor espessura das partes ligadas em elementos sujeitos à corrosão atmosférica executados com aços patináveis não pintados.

Recomenda-se que a distância entre centro de furos padrão e qualquer borda de uma parte ligada, não seja inferior a $1,8d_b$ para $d_b \geq 1\frac{1}{4}"$ e inferior a $1,75d_b$ para $d_b < 1\frac{1}{4}"$. Recomendações menos conservadoras são apresentadas na tabela 14 da NBR 8800:2008.

Para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do furo mais próximo até a borda não pode exceder 150mm ou 12 vezes a menor espessura das partes ligadas.

São permitidas distâncias inferiores às apresentadas desde que seja possível a colocação de porca e arruela na ligação, haja distância suficiente para a rotação da chave e aperto do parafuso e as condições apresentadas no item 3.2.1.2.2 sejam satisfeitas.

3.2.3.1 - Pega Longa e Ligações de Grande Comprimento

Quando o comprimento de pega excede $5d_b$, a força de cisalhamento resistente de cálculo dos parafusos deve ser reduzida em 1% para cada 1,5mm adicionais de pega, exceto nos casos dos parafusos de alta resistência montados com protensão inicial.

Em ligações por contato nas emendas de barras tracionadas, com comprimento superior a 1.270mm na direção da força externa, a força de cisalhamento solicitante de cálculo ($F_{v,Sd}$) e a força solicitante de cálculo à pressão de contato ($F_{c,Sd}$) devem ser multiplicadas por 1,25 para considerar a não-uniformidade da força externa nos parafusos.

3.2.4 - Efeito Alavanca

O efeito alavanca nos parafusos (*prying action*) ocorre devido à excentricidade entre a força externa aplicada e a linha de ação do parafuso, provocando o aumento da força de tração no parafuso. A intensidade desse efeito está diretamente relacionada com a rigidez à flexão das partes envolvidas, ou seja, o efeito alavanca é mais significativo quanto menor a rigidez à flexão dos elementos conectados (fig. 18).

Caso não se faça análises mais rigorosas, segundo a NBR 8800:2008, pode-se considerar atendido o efeito alavanca se a dimensão “a” não for inferior à dimensão “b” da figura 18 e pelo menos uma das duas exigências a seguir forem satisfeitas:

- Na determinação das espessuras das chapas das partes ligadas (t_1 e t_2 – ver figura 18), for empregado o momento resistente plástico (Zf_y) e a força de tração resistente de cálculo dos parafusos for reduzida em 33%;

- Na determinação das espessuras das partes ligadas (t_1 e t_2), for empregado o momento resistente elástico (Wf_y) e a força de tração resistente de cálculo dos parafusos for reduzida em 25%.

Na determinação das espessuras das chapas das partes ligadas deve-se tomar a força atuante em um parafuso e a sua largura de influência na chapa “p”.

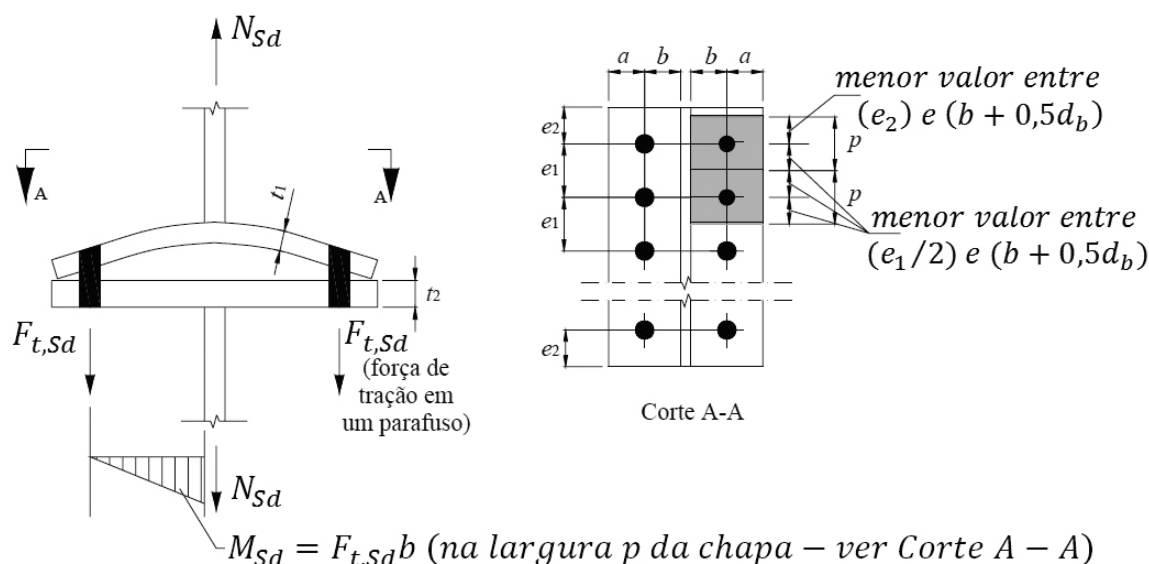


Figura 18 – Efeito alavanca.

3.2.4.1 - Determinação do Efeito Alavanca

Se a chapa das partes ligadas é muito espessa, ela praticamente não apresenta deformação por flexão sob a ação da carga (fig. 19a), diferentemente do que acontece com chapas menos espessas, que tendem a se deformar sob a ação daquela carga, conforme a fig. 19b.

A outra parte da ligação impede a deformação das extremidades da chapa, originando o aparecimento da força adicional Q de tração nos parafusos, que induz flexão na chapa de ligação, conforme fig. 19c.

São definidas as seguintes grandezas para análise do efeito de alavanca:

(a) Largura tributária “ p ” para cada parafuso: soma das duas larguras efetivas de resistência da chapa, de cada lado do parafuso, conforme definido na figura 18:

- Largura efetiva entre dois parafusos: menor valor entre:

$$e_1/2 \text{ e } (b + 0,5d_b)$$

- Largura efetiva entre o parafuso externo e a extremidade da chapa: menor valor entre:

$$e_2 \text{ e } (b + 0,5d_b)$$

(b) Resistência de cálculo à flexão da chapa na seção $\alpha\alpha$ (fig. 20):

De acordo com a NBR 8800:2008, item 5.4.2.2 a resistência nominal à flexão da chapa será dada por $M_{Rd} = 1,50W f_y / \gamma_{a1}$.

Por hipótese, o momento fletor na seção $\alpha\alpha$ é igualado ao momento resistente de cálculo:

$$M_\alpha = M_{Rd} = \left(1,5 \frac{p t^2}{6} f_y \right) / \gamma_{a1}$$

(c) Distância da linha de centro do parafuso à extremidade da chapa, dimensão “ a ” e distância à alma do T da ligação, dimensão “ b ”. (fig. 20)

Caso tenhamos $a > 1,25b$, deve ser usado $a = 1,25b$ nos cálculos.

(d) Momento na seção $\beta\beta$ da chapa (fig.20): a seção $\beta\beta$ é considerada deslocada de $d_b/2$ a partir do centro do furo na direção da seção $\alpha\alpha$, onde d_b é o diâmetro do parafuso. Então:

$$M_2 = Q(a + 0,5d_b) = Qa'$$

(e) Enquanto o momento fletor M_α age na largura p de chapa, o momento M_2 age na largura $p-d'$ resultando:

$$M_2 \leq \frac{p - d'}{p} M_\alpha = \delta M_\alpha$$

Essa expressão refere-se à uma condição de resistência, pois se não for satisfeita, significa que o momento é maior que o momento resistente de cálculo (plastificação total da seção). É interessante observar que δ é um parâmetro puramente geométrico:

$$\delta = \frac{p - d'}{p}$$

d' é a dimensão do furo paralela a "p".

(f) Condição de resistência.

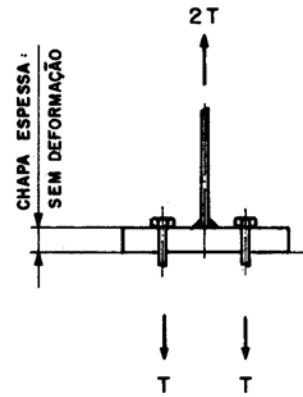
Das condições de equilíbrio, tem-se:

$$M_2 = Qa'$$

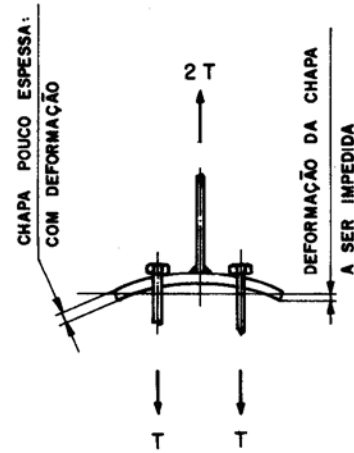
$$M_\alpha = (T + Q)b' - Q(a' + b') = Tb' - Qa' = Tb' - M_2$$

De onde se define a grandeza α como a relação entre o momento fletor de cálculo e a resistência ao momento fletor na seção $\beta\beta$:

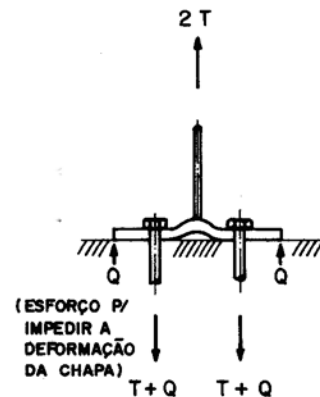
$$\alpha = \frac{M_2}{\delta M_\alpha} = \frac{Tb' - M_\alpha}{\delta M_\alpha} \leq 1$$



a) CHAPA ESPESSA



b) CHAPA POUCA ESPESSA



c) FIGURA FINAL DA CHAPA

Figura 19 – Variação do efeito alavanca.

Resistência de parafusos

Analisando os valores de α , conclui-se que:

- se $\alpha > 1 \rightarrow M_2 > \delta M_\alpha$, ou seja, a espessura da chapa não é suficiente e a condição de resistência não é verificada;

- se $\alpha < 0 \rightarrow$ não há efeito alavanca, ou seja, a hipótese adotada não se verificou e o dimensionamento será governado pelos parafusos, havendo folga na espessura da chapa. Essa situação é recomendável para parafusos tracionados dimensionados à fadiga;

- se $0 < \alpha < 1 \rightarrow$ a hipótese adotada se verifica, a espessura da chapa é adequada e a força Q é dada por:

$$Q = \frac{Tb' - M_\alpha}{a'}$$

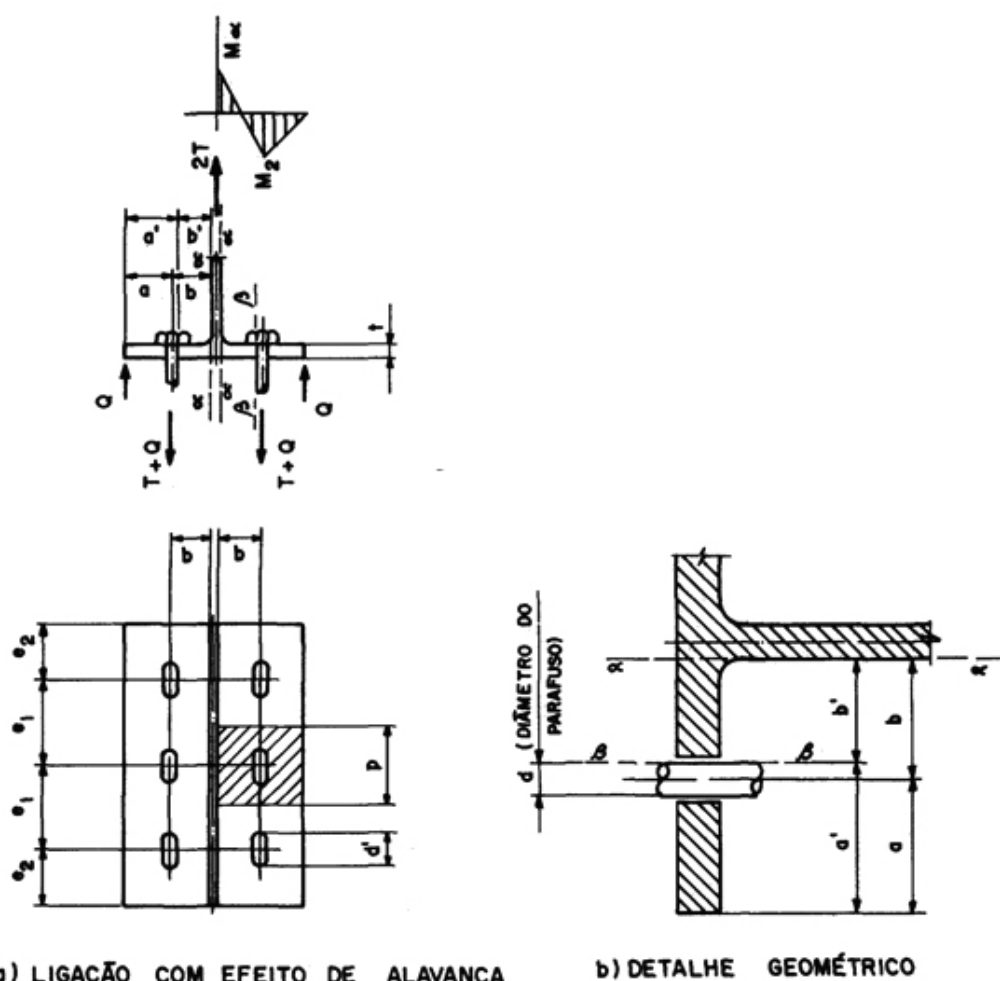


Fig. 20 - Consideração do Efeito de Alavanca

Capítulo 4

Resistência de soldas

4 - Resistência de Soldas

Neste capítulo serão apresentadas as resistências de cálculo de soldas conforme a norma brasileira NBR 8800:2008.

4.1 - Generalidades

A resistência de cálculo de soldas é determinada com base em dois estados limites últimos:

- ruptura da solda na seção efetiva;
- ruptura do metal base na face de fusão.

Em nenhuma situação a resistência da solda poderá ser tomada maior do que a resistência do metal base na ligação.

Nas soldas de filete ou de entalhe, a solicitação considerada pode ser tomada como sendo o cisalhamento na seção efetiva, provocado pela resultante vetorial de todas as forças na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas.

4.2 - Solda de Filete

A resistência de cálculo ao cisalhamento é dada pelo menor valor calculado pelos dois estados limites últimos aplicáveis:

- (1) ruptura da solda na seção efetiva:

$$F_{w,Rd} = \frac{0,60A_w f_w}{\gamma_{w2}}$$

- (2) escoamento do metal base na face de fusão:

$$F_{Rd} = \frac{0,60A_{MB} f_y}{\gamma_{a1}}$$

O fator 0,60 é proveniente do critério de resistência de von Mises aplicado ao caso de cisalhamento puro.

$A_w = l_w a$ é a área efetiva da solda de filete calculada, como o produto do comprimento total da solda e a espessura da garganta efetiva, conforme figura 21;

$A_{MB} = l_w d_w$ é a área líquida do elemento sujeita a cisalhamento, como o produto do comprimento total da solda e o lado menos espesso da perna do filete;

f_w é a resistência mínima à tração do metal da solda dada na tabela 16;

d_w é a perna do filete ou dimensão nominal segundo a AWS. Raiz da solda é a interseção das faces de fusão, conforme figura 21.

a é a garganta efetiva da solda.

l_w é o comprimento do filete.

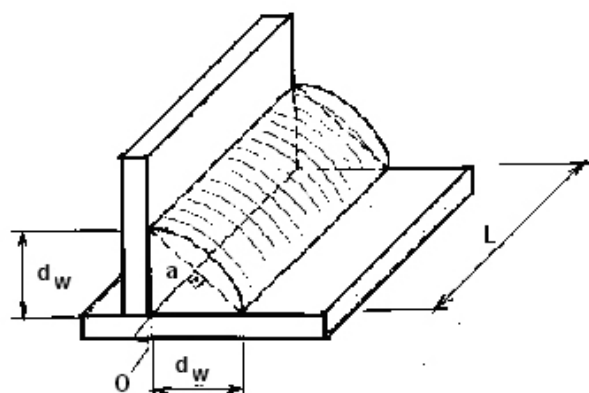


Figura 21 - Filete de solda.

Tabela 16 – Resistência à tração do metal da solda

Metal da solda	f_w (MPa)
classe 6 ou 60 (AWS)	415
classe 7 ou 70 (AWS)	485
Classe 8 ou 80	550

Para tração ou compressão paralelas ao eixo da solda a resistência de cálculo da solda é admitida como sendo a mesma do metal base, ou seja, a solda de filete não precisa ser verificada desde que seja usado metal de solda compatível com o metal base.

4.2.1 - Disposições Construtivas para Solda de Filete

Além da verificação dos estados limites últimos, a NBR 8800:2008 estabelece algumas disposições construtivas relativas à solda de filete.

O tamanho mínimo da perna de uma solda de filete em função da parte menos espessa soldada é apresentado na tabela 17.

Tabela 17 - Dimensão nominal mínima da perna de uma solda de filete (d_w).

Menor espessura do metal base na junta t (mm)	d_w (mm)
$\leq 6,35$	3
$6,35 < t \leq 12,5$	5
$12,5 < t \leq 19$	6
> 19	8

A dimensão nominal máxima da perna de uma solda de filete que pode ser executado ao longo de bordas de partes soldadas é dada na tabela 18.

Tabela 18 - Dimensão nominal máxima da perna de uma solda de filete (d_w)

Espessura do material da borda t (mm)	d_w (mm)
$< 6,35$	t
$\geq 6,35$	$t - 1,5$

O comprimento efetivo das soldas de filete dimensionadas para uma solicitação de cálculo qualquer, não pode ser inferior a 4 vezes seu tamanho da perna e nem inferior a 40 mm ou então, esse tamanho não pode ser considerado maior que 25% do comprimento efetivo da solda.

Em chapas planas tracionadas, se forem usadas apenas filetes longitudinais nas ligações extremas, o comprimento de cada filete não pode ser inferior à distância transversal entre eles.

As soldas intermitentes podem ser executadas desde que cuidados especiais com flambagens locais e corrosão sejam tomados. Devem ser dimensionadas para transmitir as solicitações de cálculo, quando a resistência de cálculo exigida for inferior à de uma solda contínua do menor tamanho de perna permitido. Também podem ser empregadas nas ligações de elementos de barras compostas. O comprimento efetivo de qualquer segmento de solda intermitente de filete não pode ser inferior a 4 vezes o tamanho da perna, nem menor do que 40mm.

As soldas de filete com faces de fusão não ortogonais são permitidas para ângulos entre faces de fusão compreendidos entre 60° e 120°, desde que haja contato entre as partes soldadas através de superfície plana e não apenas uma aresta. Para outros ângulos não se pode considerar tal solda como estrutural, pois esta não é adequada para transmissão de esforços.

Em ligações por superposição, o comprimento mínimo deve ser igual a 5 vezes a espessura da parte ligada menos espessa e nunca inferior a 25mm. Em chapas ou barras ligadas por superposição apenas com filetes transversais e sujeitas a solicitação axial, as soldas de filete devem ser executadas ao longo de ambas as extremidades, exceto quando a deformação

das partes sobrepostas for convenientemente contidas evitando a abertura da ligação pelo efeito das solicitações de cálculo.

As terminações de soldas de filete podem se estender até a extremidade, até as bordas das partes ligadas, ser interrompidas próximo desses locais ou formar um contorno fechado, exceto como limitado a seguir:

- Para juntas por superposição nas quais uma das partes se estende além de uma borda sujeita a tensões de tração longitudinais, os filetes devem ser interrompidos a uma distância dessa borda não inferior ao tamanho da perna do filete d_w , como indicado na figura 22, na qual também está indicado o sentido recomendado de execução da solda;

- Para ligações de elementos estruturais com forças cíclicas normais a elementos em projeção, de frequência e magnitude que tenderiam a causar fadiga progressiva a partir de um ponto na extremidade da solda, os filetes de solda devem contornar os cantos, estendendo-se por uma distância não inferior a duas vezes a dimensão da perna ou à largura da parte ligada, a que for menor;

- Para ligações cujo projeto requer flexibilidade de elementos em projeção, se forem usados retornos nas extremidades dos filetes, o comprimento dos retornos não devem exceder 4 vezes a dimensão da perna;

- Soldas de filete em lados opostos de um plano comum devem ser interrompidas no canto comum a ambas as soldas.

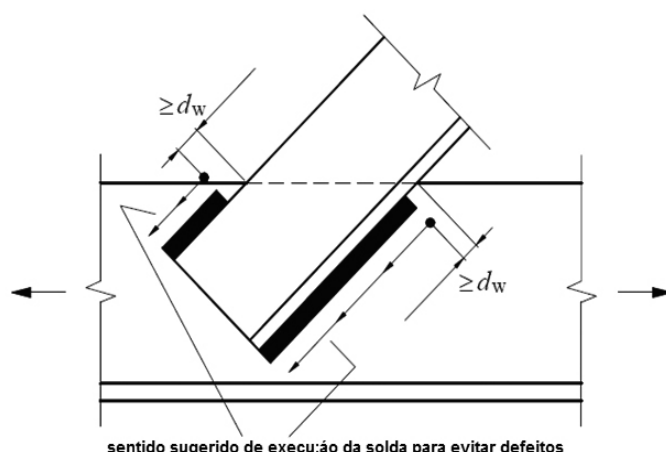


Figura 22 – Filetes de solda próximos de bordas tracionadas.

4.3. Solda de Entalhe

Ligações com soldas de entalhe são mais eficientes quando comparadas a soldas de filete, pois requerem menos metal de solda depositado e eliminam a necessidade de elementos adicionais na conexão, como por exemplo, as cobre juntas. Além disso, devido à sua maior resistência a tensões cíclicas e ao impacto, são preferíveis em casos de elementos solicitados dinamicamente.

4.3.1 - Penetração Parcial

Solda de penetração parcial é a solda executada em um lado da junta ou em ambos, com penetração inferior à espessura das chapas (figura 23). Essas soldas requerem maior cautela. Devido à perda de ductilidade, algumas normas impedem o seu uso no caso de solicitação à tração.

A resistência de cálculo em soldas de penetração parcial para cisalhamento paralelo ao eixo da solda é dada pelo menor valor calculado pelos dois estados limites últimos aplicáveis:

(1) ruptura da solda na seção efetiva:

$$F_{w,Rd} = \frac{0,60A_w f_w}{\gamma_{w2}}$$

(2) escoamento do metal base na face de fusão:

$$F_{Rd} = \frac{0,60A_{MB}f_y}{\gamma_{a2}}$$

A resistência de cálculo em soldas de penetração parcial para tração ou compressão normal à seção efetiva da solda é dada pelo menor valor calculado pelos dois estados limites últimos aplicáveis:

(1) ruptura da solda na seção efetiva:

$$F_{w,Rd} = \frac{0,60A_w f_w}{\gamma_{w1}}$$

(2) escoamento do metal base na face de fusão:

$$F_{Rd} = \frac{A_{MB} f_y}{\gamma_{a1}}$$

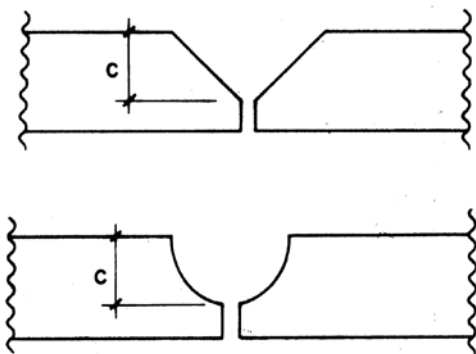
Onde:

$A_w = l_w \cdot a$ é área efetiva da solda de entalhe, dada pelo produto do comprimento da solda pela garganta efetiva. A garganta efetiva é tomada como:

$a = c$ para chanfro em J ou U, chanfro em bisel ou em V, com ângulo de abertura $\geq 60^\circ$ (figura 23):

c é a profundidade do chanfro

$a = c - 3\text{mm}$ para chanfro em bisel ou chanfro em V, com ângulo entre 45° e 60°



c = profundidade de preparação do chanfro

Figura 23 - Soldas de entalhe de penetração parcial.

4.3.2 - Penetração Total

Solda de penetração total é a solda de topo em um lado ou em ambos os lados da junta com penetração completa e fusão do metal da junta e do metal base em toda a profundidade da junta (figura 24)

A resistência de cálculo para escoamento do metal base na face de fusão em soldas de penetração total para a resultante da soma vetorial de cisalhamento é dada pelo valor:

$$F_{Rd} = \frac{0,60A_{MB}f_y}{\gamma_{a1}}$$

A resistência de cálculo para escoamento do metal base na face de fusão em soldas de penetração total (figura 24) para esforços de tração ou compressão normal à seção efetiva da solda é dada pelo valor:

$$F_{Rd} = \frac{A_{MB} f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

$A_{MB} = l_w \cdot d_w$ é a área líquida do elemento sujeita a cisalhamento, como o produto do comprimento total da solda e a menor espessura das partes soldadas, ou seja:

$d_w = t$ (menor espessura das partes soldadas)

Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda não precisam ser verificadas.

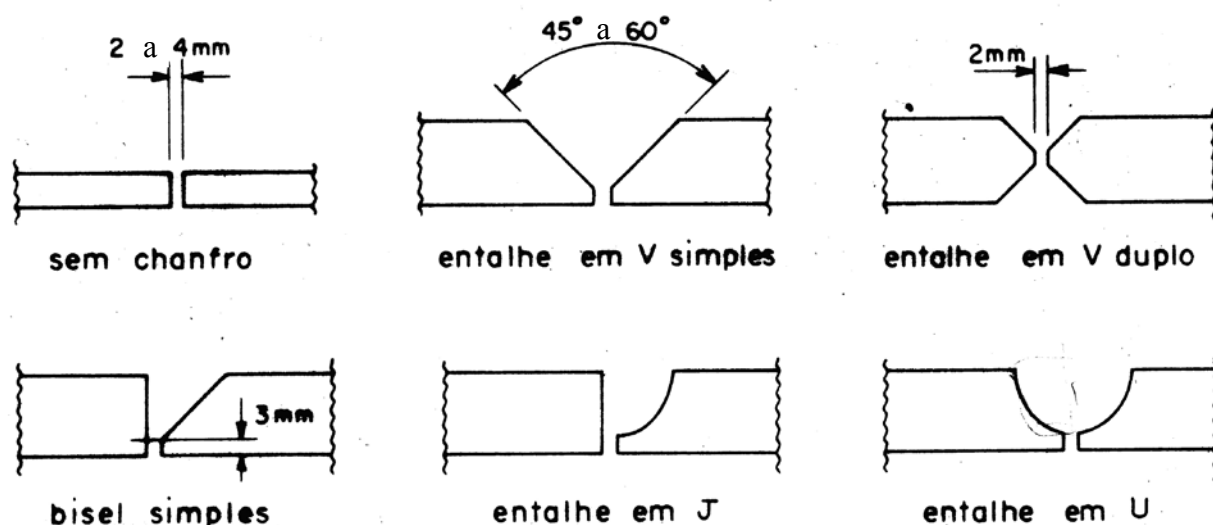


Figura 24 - Soldas de entalhe de penetração total.

4.3.3 - Disposições Construtivas para Soldas de Entalhe

Além da verificação dos estados limites últimos, a NBR 8800:2008 estabelece algumas disposições construtivas relativas à solda de entalhe.

Para soldas de entalhe de penetração total, a garganta efetiva é dada sempre pela menor espessura das partes conectadas. Nas soldas de entalhe de penetração parcial, a garganta efetiva mínima (a_{min}) deve ser estabelecida em função da parte mais espessa, sendo que tal dimensão não necessita ultrapassar a espessura da parte menos espessa, desde que seja obtida a força resistente de cálculo necessária. A tabela 19 apresenta estes valores mínimos.

Tabela 19 – Espessura mínima da garganta efetiva de soldas de entalhe de penetração parcial

Maior espessura do metal base na junta t (mm)	a_{min} (mm)
$\leq 6,35$	3
$6,35 < t \leq 12,5$	5
$12,5 < t \leq 19$	6
$19 < t \leq 37,5$	8
$37,5 < t \leq 57$	10
$57 < t \leq 152$	13
> 152	16

4.4 - Solda de Tampão

Solda de tampão é a solda feita preenchendo furos ou rasgos para transmitir forças paralelas às superfícies de contato em ligações por superposição ou o que é mais frequente, para evitar flambagem ou a separação das partes superpostas e para ligar componentes de barras de seção composta.

A resistência de cálculo é igual ao menor valor calculado pelos dois estados limites últimos aplicáveis às soldas de filete, adotando como área efetiva de cisalhamento a área da seção nominal do furo ou rasgo no plano das superfícies de contato.

4.4.1 - Disposições Construtivas para Soldas de Tampão

O diâmetro dos furos e a largura dos rasgos não pode ser inferior à espessura da parte que os contém acrescida de 8 mm, nem maior do que 2,25 vezes a espessura da solda.

A distância de centro a centro de soldas em furos deve ser igual ou superior a 4 vezes o diâmetro do furo.

O comprimento do rasgo para soldas não pode ser superior a 10 vezes a espessura da solda.

As extremidades desses rasgos devem ter a forma semicircular ou cantos arredondados de raio não inferior à espessura da parte que os contém, exceto aquelas extremidades que se estendem até a borda do elemento soldado.

O espaçamento entre as linhas de centro a centro de rasgos, medido na direção transversal ao comprimento dos rasgos deve ser igual ou superior a 4 vezes a largura do rasgo. A distância de centro a centro de rasgos situados na mesma linha longitudinal ao comprimento deles, medida sobre essa linha, deve ser igual a 2 vezes o comprimento dos rasgos.

A espessura de soldas de tampão em furos ou rasgos situados em material de espessura igual ou superior a 16 mm deve ser igual à espessura desse material. Quando a espessura do material for superior a 16 mm, a espessura da solda deve ser no mínimo igual à metade da espessura do mesmo material, porém não inferior a 16 mm.