
**Equipamentos de elevação e movimentação de
carga — Regras para projeto
Parte 2: Verificação das estruturas ao
escoamento, fadiga e estabilidade**

*Lifting appliances — Rules for design
Part 2: Checking of structures to yielding, fatigue and stability*

ICS 53.020

ISBN 978-85-07-08088-6



ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA
DE NORMAS
TÉCNICAS

Número de referência
ABNT NBR 8400-2:2019
83 páginas

© ABNT 2019



© ABNT 2019

Todos os direitos reservados. A menos que especificado de outro modo, nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida ou utilizada por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e microfilme, sem permissão por escrito da ABNT.

ABNT

Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar

20031-901 - Rio de Janeiro - RJ

Tel.: + 55 21 3974-2300

Fax: + 55 21 3974-2346

abnt@abnt.org.br

www.abnt.org.br

Sumário

Página

Prefácio	vii
1 Escopo	1
2 Referências normativas	1
3 Símbolos e abreviaturas	3
4 Condições gerais	7
5 Condições específicas	7
5.1 Escolha da qualidade do aço	7
5.1.1 Avaliação dos fatores que influenciam a fratura frágil	7
5.1.2 Determinação do grupo de qualidade do aço requerida	12
5.1.3 Qualidade dos aços	13
5.1.4 Requisitos especiais	18
5.2 Verificação com relação ao limite elástico	18
5.2.1 Elementos estruturais exceto juntas	18
5.2.2 Caso de juntas	21
5.3 Verificação de elementos sujeitos à flambagem global	30
5.4 Verificação de elementos sujeitos a flambagem localizada	30
5.5 Caso de estruturas sujeitas a deformações significativas	31
5.6 Verificações de elementos sujeitos à fadiga	32
5.6.1 Número convencional de ciclos e espectro de tensão	33
5.6.2 Material utilizado e efeito de entalhe	33
5.6.3 Determinação da tensão máxima $\sigma_{\text{máx}}$	33
5.6.4 Relação κ entre as tensões extremas	33
5.6.5 Verificação de elementos sujeitos à fadiga	33
5.7 Verificação quanto ao limite de deflexões das estruturas	34
5.8 Estabilidade e segurança contra o movimento causado pela ação do vento	35
5.8.1 Finalidade	35
5.8.2 Estabilidade – Cálculos	35
5.8.3 Estabilidade contra o tombamento para trás em operação	37
5.8.4 Aplicação de cargas de vento	37
5.8.5 Base do equipamento	38
5.8.6 Deformação	38
5.8.7 Resistência ao arrastamento causado pelo vento	38
Anexo A (normativo) Projeto de juntas utilizando parafusos de alta resistência com torque controlado	40
A.1 Generalidades	40
A.2 Coeficiente de atrito μ	40
A.3 Aperto do parafuso	41
A.4 Valor da área resistente dos parafusos	41
A.5 Especificação dos parafusos	41
Anexo B (informativo) Tensões nas juntas soldadas	44

Anexo C (informativo) Verificação de elementos estruturais sujeitos à flambagem global e localizada	46
C.1 Verificação de elementos estruturais sujeitos à flambagem global.....	46
C.1.1 Determinação dos comprimentos efetivos para cálculo do índice de esbeltez λ	46
C.1.2 Caso de barras submetidas à compressão e flexão.....	47
C.2 Verificação de elementos estruturais sujeitos a flambagem localizada	50
C.2.1 Tensão crítica de flambagem	50
C.2.2 Determinação das tensões admissíveis à flambagem localizada	53
C.2.3 Exemplo de verificação de flambagem localizada	53
C.2.4 Verificação de flambagem para tubos circulares.....	56
Anexo D (normativo) Verificação de elementos estruturais sujeitos a fadiga	58
D.1 Generalidades.....	58
D.2 Verificação de elementos estruturais.....	58
D.2.1 Determinação das tensões admissíveis à fadiga para solicitações de tração e compressão	59
D.2.2 Tensões admissíveis de cisalhamento no material base de partes estruturais	62
D.2.3 Tensões admissíveis para o caso de cargas combinadas na tração (ou compressão) e cisalhamento	62
D.3 Verificação dos meios de junção (soldas, parafusos, rebites).....	65
D.3.1 Soldas.....	65
D.3.1.1 Cargas de tração e compressão nas soldas	65
D.3.1.2 Cargas de cisalhamento nas soldas	65
D.3.1.3 Cargas combinadas	65
D.3.2 Parafusos e rebites	65
D.3.2.1 Solicitações de tração	65
D.3.2.2 Solicitações de cisalhamento e pressão diametral:	65
D.3.3 Classificação dos casos de construção para juntas	66
D.3.3.1 Qualidade das juntas soldadas.....	66
D.3.3.2 Casos de construção para juntas.....	68
D.4 Exemplos de cálculos de verificação à fadiga de junta soldada entre aba e alma em aço EN 10025 S235/ASTM A 36	78
D.4.1 Aba superior da viga de uma ponte rolante sobre a qual se movimenta um carro (ver Figura D.2)	78
D.4.2 Verificação à fadiga e limite elástico	79
D.4.2.1 Primeiro exemplo – Componente no grupo <i>E4</i> com solda de filete (Q.C.)	79
D.4.2.2 Segundo exemplo – Componente no grupo <i>E6</i> – Solda em K (Q.E.)	81
Figuras	
Figura 1 – Z_A em termos de tensão e soldas	9
Figura 2 – Coeficiente de avaliação $Z_B = f(t)$	10
Figura 3 – Coeficiente de avaliação $Z_C = f(T)$	12
Figura 4 – Juntas rebitas	22
Figura 5 – Junta com parafusos de tração	24

Figura 6 – Amplitude da tensão máxima admissível à fadiga.....	26
Figura 7 – Junta aparafusada com várias fileiras	29
Figura 8 – Estrutura flexível com grandes deformações.....	31
Figura 9 – Dimensões b e h da viga tipo caixa.....	35
Figura 10 – Exemplo: aplicação da carga P_2 para içamento de uma lança.....	37
Figura A.1 – Número de superfícies de atrito efetivas.....	42
Figura B.1 – Solda de filete.....	44
Figura C.1 – Valores de K para diferentes condições de vínculos	47
Figura C.2 – Chapa em compressão.....	51
Figura C.3 – Dimensões da viga	54
Figura C.4 – Disposição central do reforço F	56
Figura C.5 – Disposição excêntrica do reforço F	57
Figura D.1 – Tensão admissível para aços S355/ASTM A 572 GR 50 (tração, grupo E6)	62
Figura D.2 – Secção da viga.....	78

Tabelas

Tabela 1 – Coeficiente Z_B em função da espessura.....	10
Tabela 2 – Coeficiente Z_C em função da temperatura.....	11
Tabela 3 – Classificação dos grupos de qualidade em relação à soma dos coeficientes de avaliação	12
Tabela 4 – Grupos de qualidade, aços não ligados	14
Tabela 5 – Grupos de qualidade, aços soldáveis de granulação fina	15
Tabela 6 – Grupos de qualidade, aços de alta resistência temperados e revenidos.....	16
Tabela 7 – Grupos de qualidade, aços de alta resistência para trefilamento.....	17
Tabela 8 – Coeficiente de segurança em relação ao limite elástico σ_E	18
Tabela 9 – Valores para σ_E , σ_R e σ_a para aços de construção sem liga metálica de granulação fina e aços na condição de temperados e revenidos	19
Tabela 10 – Valores de σ_E , σ_R e σ_a para aços com alto limite de escoamento para conformação a frio e seções ocas	20
Tabela 11 – Coeficientes de segurança κ' e κ''	25
Tabela 12 – Tensão equivalente máxima admissível em soldas (N/mm^2).....	30
Tabela 13 – Coeficientes de segurança na flambagem ν_V	31
Tabela 14 – Combinações e fatores de carga a serem considerados	36
Tabela 15 – Arrastamento causado pelo vento.....	38
Tabela 16 – Resistência ao deslocamento e coeficientes de atrito	39
Tabela A.1 – Valores de μ	40
Tabela A.2 – Área resistente à tração dos parafusos.....	41
Tabela A.3 – Tensão de ruptura σ_R	42
Tabela A.4 – Forças transmissíveis no plano da junta, por parafuso e por superfície de atrito (Parafusos de $1\,000\,N/mm^2/1\,200\,N/mm^2$: $\sigma_E = 900\,N/mm^2$; $\sigma_a = 0,8 \times \sigma_E$)	43
Tabela C.1 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbeltez λ para perfis laminados em aço $\sigma_E = 240\,N/mm^2$	48

Tabela C.2 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbelteza λ para perfis laminados em aço $\sigma_E = 355 \text{ N/mm}^2$	49
Tabela C.3 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbelteza λ para tubos em aço $\sigma_E = 240 \text{ N/mm}^2$	50
Tabela C.4 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbelteza λ para tubos em aço $\sigma_E = 355 \text{ N/mm}^2$	50
Tabela C.5 – Valores dos coeficientes de flambagem K_σ e K_τ para chapas apoiadas em suas quatro bordas	52
Tabela C.6 – Valores de ρ e tensões críticas reduzidas σ_{cr}^V , $\sigma_{cr, c}^V$ e τ_{cr}^V (N/mm^2).....	53
Tabela D.1 – Valores de σ_w (N/mm^2) de acordo com o grupo de componentes e caso de construção	60
Tabela D.2 – Valores de $\tau_{xym\acute{a}x.}/\tau_{xya}$ em termos de $\sigma_{xm\acute{a}x.}/\sigma_{xa}$ e $\sigma_{ym\acute{a}x.}/\sigma_{ya}$	64
Tabela D.3 – Qualidade da solda.....	67
Tabela D.4 – Partes não soldadas.....	68
Tabela D.5 – Partes soldadas	69

Prefácio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas pelas partes interessadas no tema objeto da normalização.

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da ABNT Diretiva 2.

A ABNT chama a atenção para que, apesar de ter sido solicitada manifestação sobre eventuais direitos de patentes durante a Consulta Nacional, estes podem ocorrer e devem ser comunicados à ABNT a qualquer momento (Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996).

Os Documentos Técnicos ABNT, assim como as Normas Internacionais (ISO e IEC), são voluntários e não incluem requisitos contratuais, legais ou estatutários. Os Documentos Técnicos ABNT não substituem Leis, Decretos ou Regulamentos, aos quais os usuários devem atender, tendo precedência sobre qualquer Documento Técnico ABNT.

Ressalta-se que os Documentos Técnicos ABNT podem ser objeto de citação em Regulamentos Técnicos. Nestes casos, os órgãos responsáveis pelos Regulamentos Técnicos podem determinar as datas para exigência dos requisitos de quaisquer Documentos Técnicos ABNT.

A ABNT NBR 8400-2 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos (ABNT/CB-004), pela Comissão de Estudo Equipamentos de Elevação de Carga (CE-004:010.001). O Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 03, de 12.03.2019 a 13.05.2019.

A ABNT NBR 8400-2 é baseada na FEM 1001 (10.1998), *Section I – Heavy lifting appliances – Rules for design of hoisting appliances da Fédération Européenne de la Manutention (FEM)*.

A ABNT NBR 8400-2 cancela e substitui a ABNT NBR 8400:1987.

A ABNT NBR 8400, sob o título geral “*Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto*”, tem previsão de conter as seguintes partes:

- Parte 1: Classificação e cargas sobre estruturas e mecanismos;
- Parte 2: Verificação das estruturas ao escoamento, fadiga e estabilidade;
- Parte 3: Verificação à fadiga e seleção de componentes dos mecanismos;
- Parte 4: Equipamento elétrico;
- Parte 5: Cargas para ensaio e tolerâncias de fabricação.

O Escopo em inglês da ABNT NBR 8400-2 é o seguinte:

Scope

This Standard establishes the checking of structural elements to be carried-out for the three loading cases defined in ABNT NBR 8400-1, and if there is sufficient safety relate to the critical stress, considering the three possible causes of failure bellow:

- *exceeds the elastic limit;*
- *exceeds the critical stress of global or localized buckling;*
- *exceeds the endurance limit.*

It also establishes the checking to be made regarding the stability of the equipment in operation and out of operation, to ensure sufficient safety margin against tipping and movment, due to the action of the wind.

Following appliances are not covered by this Standard:

- *mobile jib cranes on pneumatic or solid rubber tyres, crawler tracks, lorries, trailers and brackets;*
- *series lifting equipment;*
- *electric hoists;*
- *pneumatic hoists;*
- *accessories for lifting;*
- *hand operated chain blocks;*
- *elevating platforms, work platforms, dock levellers;*
- *winches;*
- *jacks, tripods, combined apparatus for pulling and lifting;*
- *stacker cranes;*
- *bulk solid handling equipment.*

Equipamentos de elevação e movimentação de carga — Regras para projeto

Parte 2: Verificação das estruturas ao escoamento, fadiga e estabilidade

1 Escopo

Esta Norma estabelece as verificações a serem realizadas para os diversos elementos estruturais considerando os três casos de solicitação definidos no ABNT NBR 8400-1, e se existe margem de segurança suficiente em relação às tensões críticas, considerando as três possíveis causas de falha descritas a seguir:

- exceder o limite de escoamento;
- exceder a tensão crítica de flambagem global ou localizada;
- exceder o limite de resistência à fadiga.

Estabelece também as verificações as serem feitas em relação à estabilidade do equipamento em operação e fora de operação, para assegurar margem de segurança suficiente contra o tombamento e arrastamento, devido a ação do vento.

Esta Norma não se aplica aos seguintes equipamentos:

- guindastes móveis com lança sobre pneus de borracha sólida ou pneumáticos, esteiras de lagartas, caminhões e reboques;
- equipamentos de elevação produzidos em série;
- talhas elétricas;
- talhas pneumáticas;
- acessórios para içamento;
- talhas manuais;
- plataformas de elevação, plataformas de trabalho;
- guinchos;
- macacos, tripés, aparelhos combinados para tração e içamento;
- empilhadeiras;
- equipamentos de manuseio de materiais a granel.

2 Referências normativas

Os documentos a seguir são citados no texto de tal forma que seus conteúdos, totais ou parciais, constituem requisitos para este Documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edi-

ções citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 8400-1, *Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto – Classificação e cargas sobre estruturas e mecanismos*

ABNT NBR ISO 148-1, *Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo charpy – Parte 1: Método de ensaio*

ASTM A36, *Standard specification for carbono structural steel*

ASTM A572, *Standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel*

ISO 2553, *Welding and allied processes – Symbolic representation on drawings – Welded joints*

ISO 22986, *Cranes – Stiffness – Bridge and gantry cranes*

EN 10025-1, *Hot rolled products of structural steels – General technical delivery conditions*

EN 10025-2, *Hot rolled products of structural steels – Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*

EN 10025-3, *Hot rolled products of structural steels – Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels*

EN 10023-4, *Hot rolled products of structural steels – Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels*

EN 10025-6, *Hot rolled products of structural steels – Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition*

EN 10027-1, *Designation systems for steels – Part 1: Steel names*

EN 10027-2, *Designation systems for steels – Part 2: Numerical system*

EN 10149-1, *Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming – Part 1: General delivery conditions*

EN 10149-2, *Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming – Part 2: Technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels*

EN 10149-3, *Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming – Part 3: Technical delivery conditions for normalized or normalized rolled steels*

EN 10210-1, *Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions*

EN 10219-1, *Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions*

3 Símbolos e abreviaturas

Para os efeitos deste documento aplicam-se os seguintes símbolos e abreviaturas:

Símbolo	Unidade	Designação
A	–	Influência combinada da tensão de tração residual com tensão devido ao peso próprio
B	–	Influência da espessura do elemento estrutural
C	–	Influência do frio Coeficiente utilizado para calcular o torque de aperto dos parafusos
D_t	mm	Diâmetro dos furos para parafusos
d_2	mm	Diâmetro do núcleo do parafuso
d_t	mm	Diâmetro nominal do parafuso
E	N/mm ²	Módulo de elasticidade do aço
e	mm	Espessura da chapa no cálculo de flambagem Espessura da chapa em juntas soldadas
e_1, e_2	mm	Espessura da chapa em juntas soldadas
$E1$ a $E8$	–	Grupos de componentes
F	N	Força de compressão sobre o elemento no cálculo de flambagem global de viga
F_i	N	Carga de trabalho admissível em parafusos
I_1, I_2	mm ⁴	Momento de inércia dos enrijecedores
I_z	mm ⁴	Momento de inércia dos enrijecedores
K_0 a K_4	–	Casos de entalhe de elementos soldados
l_k	m	Comprimento dos elementos apertados em juntas aparafusadas
M	N.m	Momento externo nas juntas aparafusadas
M_a	N.m	Torque requerido para aperto dos parafusos
M_F	N.m	Momento fletor no elemento no cálculo de flambagem
m	–	Número de superfícies de atrito nas juntas aparafusadas
N	N	Força perpendicular ao plano de junta em juntas aparafusadas
N_G	–	Qualidade comum em soldagem
N_M	N	Força de tração devido ao momento externo em juntas aparafusadas
P_a	mm	Passo da rosca
R_E	N/mm ²	Limite elástico aparente σ_E de acordo com a ISO 3800-1
r	–	Relação de tensão para grandes deformações
S_b	mm ²	Área da seção do núcleo do parafuso

Símbolo	Unidade	Designação
S_{eq}	mm ²	Área da seção equivalente da junta aparafusada
T	°C	Temperatura ambiente no local de instalação
T	N	Força paralela ao plano da junta em uniões aparafusadas
T_a	N	Carga admissível por parafuso que pode ser transmitida pelo atrito
T_c	°C	Temperatura de ensaio para ensaio de impacto
t	mm	Espessura do elemento estrutural ao selecionar a qualidade do aço Espessura de parede da casca cilíndrica na análise de flambagem
t	mm	Espessura da seção ideal ao selecionar a qualidade do aço
v	mm	Distância da fibra extrema do centro de gravidade da seção no cálculo de flambagem
W_0, W_1, W_2	–	Casos de entalhe de elementos não soldados
Z_A	–	Índice de avaliação para a influência A
Z_B	–	Índice de avaliação para a influência B
Z_C	–	Índice de avaliação para a influência C
α	–	Relação de lados do painel no cálculo de flambagem
Δ_{l1}	mm	Encurtamento de elementos unidos sob a força de aperto em juntas aparafusadas
Δ_{l2}	mm	Alongamento do parafuso sob a força de aperto
δ_b	–	Coeficiente elástico de juntas aparafusadas
$\kappa, \kappa', \kappa''$	–	Coeficientes de segurança aplicados às juntas aparafusadas
κ	–	Relação entre as tensões extremas no cálculo de fadiga
$\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$	–	Relação de tensões individuais extremas $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ no cálculo de fadiga
λ	–	Índice de esbeltez da coluna no cálculo de flambagem
μ	–	Coeficiente de atrito nas roscas Coeficiente de atrito das superfícies de contato de juntas aparafusadas
ν	–	Coeficiente de segurança para tensões críticas em elementos estruturais
ν'	–	Coeficiente de peso próprio no cálculo de elementos estruturais submetidos à deformação significativa
ν_E	–	Coeficiente de segurança para o cálculo de elementos estruturais dependendo do caso de solicitação
ν_T	–	Coeficiente de segurança para o cálculo de juntas aparafusadas dependendo do caso de solicitação
ν_v	–	Coeficiente de segurança para flambagem

Símbolo	Unidade	Designação
ρ	–	Coefficiente de redução aplicado a tensões críticas no cálculo de flambagem
σ	N/mm ²	Tensão calculada em estruturas em geral
σ_0	N/mm ²	Tensão de tração para $k = 0$ no cálculo da resistência à fadiga
σ_1	N/mm ²	Tensão de trabalho na seção do núcleo dos parafusos
σ'_1	N/mm ²	Tensão admissível equivalente para parafusos
σ_{+1}	N/mm ²	Tensão de tração admissível para $\kappa = +1$ no cálculo de fadiga
σ_A	N/mm ²	Amplitude da tensão máxima admissível em parafusos no cálculo de fadiga
$\sigma_E, \sigma_{E,r}$	N/mm ²	Tensão de escoamento do aço
σ_G	N/mm ²	Tensão de tração devido à carga permanente Tensão devido ao peso próprio
$\sigma_R, \sigma_{R,r}$	N/mm ²	Tensão de ruptura à tração do aço
σ^E_R	N/mm ²	Tensão de Euler
σ_v	N/mm ²	Tensão devido a cargas variáveis
σ_a	N/mm ²	Tensão de tração admissível para elementos estruturais
σ_b	N/mm ²	Tensão inicial no cálculo de juntas aparafusadas
σ_c	N/mm ²	Tensão admissível à fadiga em compressão para elementos estruturais
σ_{cp}	N/mm ²	Tensão equivalente utilizada no cálculo de elementos estruturais
σ_{cr}	N/mm ²	Tensão crítica utilizada no cálculo de elementos estruturais submetidos a grandes deformações
σ^v_{cr}	N/mm ²	Tensão crítica de flambagem
$\sigma^v_{cr,c}$	N/mm ²	Tensão crítica de comparação utilizada no cálculo de flambagem
$\sigma^v_{cr,cR}$	N/mm ²	Tensão crítica de comparação reduzida utilizada no cálculo de flambagem
σ^v_i	N/mm ²	Tensão de flambagem ideal para cilindros circulares de paredes finas
σ_m	N/mm ²	Média aritmética de todas as tensões superiores e inferiores durante a duração total do uso Tensões admissíveis nos ensaios de conformidade à ISO 3800-1
$\sigma_{máx.}$	N/mm ²	Tensão máxima no cálculo de fadiga para elementos estruturais
$\sigma_{mín.}$	N/mm ²	Tensão mínima no cálculo de fadiga para elementos estruturais
σ_n	N/mm ²	Pressão de contato em juntas rebitas
σ_p	N/mm ²	Tensão teórica de tração no parafuso devido ao torqueamento
σ_t	N/mm ²	Tensão de tração admissível na verificação à fadiga de elementos estruturais

Símbolo	Unidade	Designação
σ_v	N/mm ²	Tensão reduzida de flambagem para elementos circulares de paredes finas
σ_w	N/mm ²	Tensão admissível na tração/compressão alternada na verificação à fadiga de elementos de mecanismo
σ_x	N/mm ²	Tensão normal na direção x ao calcular elementos estruturais
σ_{xa}	N/mm ²	Tensão admissível na verificação à fadiga de elementos estruturais
$\sigma_{x\text{máx.}}$	N/mm ²	Tensão máxima na verificação à fadiga de elementos estruturais
$\sigma_{x\text{mín.}}$	N/mm ²	Tensão mínima na verificação à fadiga de elementos estruturais
σ_y	N/mm ²	Tensão normal na direção y ao calcular elementos estruturais
σ_{ya}	N/mm ²	Tensão admissível na verificação à fadiga de elementos estruturais
$\sigma_{y\text{máx.}}$	N/mm ²	Tensão máxima na verificação à fadiga de elementos estruturais
$\sigma_{y\text{mín.}}$	N/mm ²	Tensão mínima na verificação à fadiga de elementos estruturais
τ	N/mm ²	Tensão de cisalhamento em geral
τ_α	N/mm ²	Tensão de cisalhamento admissível ao calcular elementos estruturais
τ_β	N/mm ²	Tensão de torção nos parafusos devido ao torqueamento
$\tau_{\chi\rho}^{\omega}$	N/mm ²	Tensão de cisalhamento crítica de flambagem
$t_{\mu/\xi}$	N/mm ²	Tensão máxima de cisalhamento na verificação à fadiga de elementos de mecanismo
$t_{\text{mín.}}$	N/mm ²	Tensão mínima de cisalhamento na verificação à fadiga de elementos de mecanismo
t_{xy}	N/mm ²	Tensão de cisalhamento ao calcular elementos estruturais
t_{xya}	N/mm ²	Tensão admissível de cisalhamento na verificação à fadiga de elementos estruturais
$t_{xy\text{máx.}}$	N/mm ²	Tensão máxima de cisalhamento na verificação à fadiga de elementos estruturais
$t_{xy\text{mín.}}$	N/mm ²	Tensão mínima de cisalhamento na verificação à fadiga de elementos estruturais
ψ	—	Relação de tensão nas bordas da chapa no cálculo de flambagem
Ω	—	Fator de tolerância em juntas aparafusadas
ω	—	Coefficiente de flambagem

4 Condições gerais

As tensões geradas nos diversos elementos estruturais são determinadas para os três casos de solicitação definidos na ABNT NBR 8400-1 e uma verificação é realizada para assegurar que há segurança suficiente de um coeficiente γ em relação às tensões críticas, considerando as três possíveis causas de falha descritas a seguir:

- exceder o limite elástico;
- exceder a tensão crítica de flambagem global ou localizada;
- exceder o limite de resistência à fadiga.

A qualidade do aço utilizado deve ser estabelecida e as propriedades físicas, composição química e qualidade da solda devem ser garantidas pelo fabricante do material.

As tensões admissíveis para os materiais utilizados são determinadas, conforme prescrito em 5.2, 5.3, 5.4 e 5.6, com referência às tensões críticas para o material.

Estas tensões críticas são aquelas que correspondem ao limite elástico (que, na prática, envolve estabelecer a tensão correspondente ao limite crítico para escoamento) ou à tensão crítica de flambagem global ou localizada ou, no caso de fadiga, a tensão para a qual a probabilidade de sobrevivência nos ensaios é de 90 %.

As tensões nos elementos estruturais devem ser calculadas com base nos diferentes casos de solicitação examinados na ABNT NBR 8400-1, aplicando-se os procedimentos convencionais de cálculo de resistência dos materiais.

5 Condições específicas

5.1 Escolha da qualidade do aço

As verificações requeridas nas normas de projeto para a segurança da estrutura contra falha por escoamento, instabilidade e falha por fadiga não garantem a segurança contra fratura frágil.

Para obter segurança suficiente contra fratura frágil, a qualidade do aço deve ser escolhida de acordo com as condições que influenciam a fratura frágil.

As influências mais importantes sobre a sensibilidade à fratura frágil em estruturas de aço são as seguintes:

- A: efeito combinado da tensão residual longitudinal com a tensão do peso próprio;
- B: espessura do elemento t ;
- C: influência do frio.

As influências A, B, e C são avaliadas em número de pontos. A qualidade do aço requerida depende da soma destes pontos.

5.1.1 Avaliação dos fatores que influenciam a fratura frágil

As influências A, B e C definidas em 5.1 estão descritas e quantificadas a seguir.

5.1.1.1 Influência A: efeito combinado da tensão residual longitudinal com a tensão do peso próprio

As equações para as linhas I, II e III são mostradas na Figura 1.

Linha I: Sem soldas ou somente soldas transversais

$$Z_A = \frac{\sigma_G}{0,5\sigma_a} - 1$$

Válido somente para $\sigma_G > 0,5 \times \sigma_a$

Linha II: Soldas longitudinais

$$Z_A = \frac{\sigma_G}{0,5\sigma_a}$$

Linha III: Sobreposição de soldas

$$Z_A = \frac{\sigma_G}{0,5\sigma_a} + 1$$

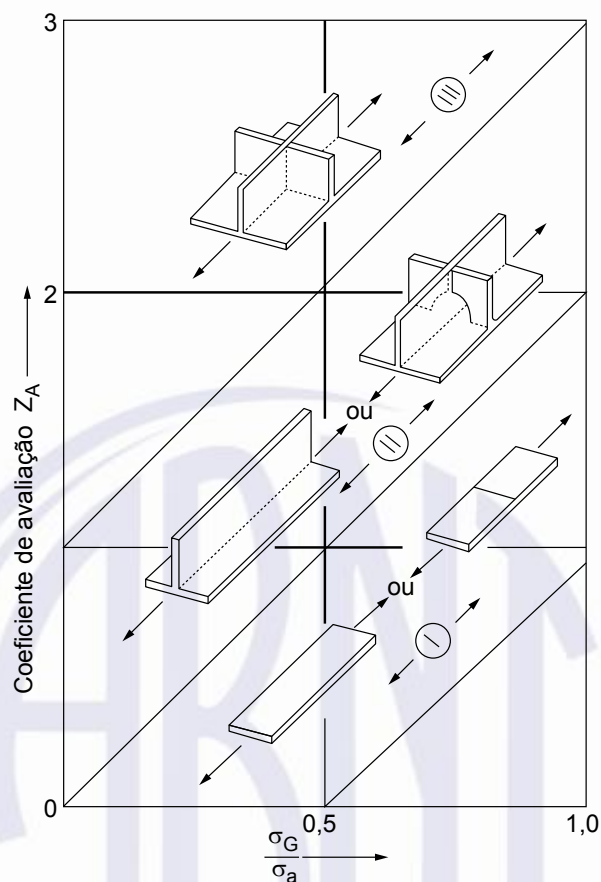
onde

σ_a é a tensão admissível com relação ao limite elástico, caso de solicitação I;

σ_G é tensão de tração devido à carga permanente, por exemplo, peso próprio;

Z_A é o coeficiente de avaliação para a influência A.

O risco de fratura frágil é aumentado por altas concentrações de tensão, em especial por esforço de tensão triaxial, como é o caso com sobreposição de soldas. Se elementos com tensão baixa recebem alívio de tensão após a soldagem (aproximadamente 600 °C a 650 °C), a linha I pode ser utilizada para todos os tipos de solda.



Legenda

- I sem soldas ou somente soldas transversais
- II soldas longitudinais
- III sobreposição de soldas

Figura 1 – Z_A em termos de tensão e soldas

5.1.1.2 Influência B: espessura do elemento t

O coeficiente de avaliação Z_B em função de espessura t é ilustrado na Figura 2. A Tabela 1 fornece os valores de Z_B para diferentes espessuras, calculados pelas equações abaixo:

para $t = 5 \text{ mm}$ a 20 mm

$$Z_B = 9 \times t^2 / 2\,500$$

para $t = 20 \text{ mm}$ a 100 mm

$$Z_B = 0,65 \times \sqrt{(t - 14,81)} - 0,05$$

onde

t é a espessura do elemento, expressa em milímetro (mm);

Z_B é o coeficiente de avaliação para a influência B.

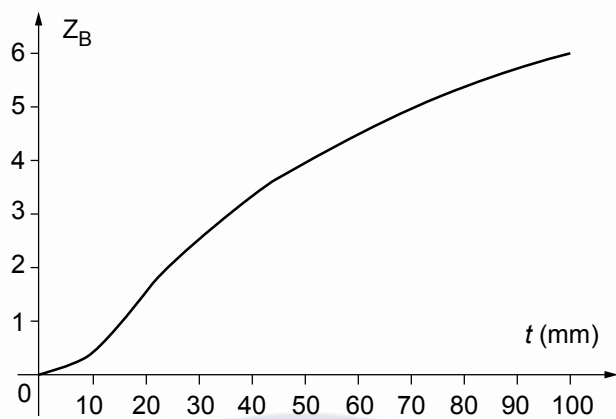


Figura 2 – Coeficiente de avaliação $Z_B = f(t)$

Tabela 1 – Coeficiente Z_B em função da espessura

t mm	Z_B	t mm	Z_B	t mm	Z_B
		16	0,9	60	4,3
5	0,10	20	1,45	65	4,55
6	0,15	25	2,0	70	4,8
7	0,20	30	2,5	75	5,0
8	0,25	35	2,9	80	5,2
9	0,30	40	3,2	85	5,4
10	0,40	45	3,5	90	5,6
12	0,50	50	3,8	95	5,8
15	0,80	55	4,0	100	6,0

Para perfis laminados, a espessura idealizada t_i deve ser utilizada. Ou seja:

Para perfis circulares: $t_i = d / 1,8$

Para perfis quadrados: $t_i = t / 1,8$

Para perfis retangulares: $t_i = b / 1,8$

onde

b representa o lado maior do retângulo e a relação dos lados $b/t \leq 1,8$.

Para $b/t > 1,8$ então $t_i = t$

5.1.1.3 Influência C: influência do frio

A temperatura mais baixa no local da instalação do equipamento determina a classificação. Esta temperatura geralmente é mais baixa do que a temperatura operacional.

Exemplar para uso exclusivo - VOITH PAPER MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. - 61.243.119/0001-80

O coeficiente de avaliação Z_C em função da temperatura T é ilustrado na Figura 3. A Tabela 2 fornece os valores de Z_C para diferentes temperaturas, calculados pelas equações abaixo:

de $T = 0\text{ °C}$ a $T = -30\text{ °C}$ adotar:

$$Z_C = 6 \times T^2 / 1\ 600$$

de $T = -30\text{ °C}$ a $T = -55\text{ °C}$ adotar:

$$Z_C = [-2,25 \times T - 33,75] / 10$$

onde

T é a temperatura no local da instalação, expressa em graus Celsius (°C);

Z_C é o coeficiente de avaliação para a influência C.

Tabela 2 – Coeficiente Z_C em função da temperatura

T °C	Z_C	T °C	Z_C
0	0,0	-30	3,4
-5	0,1	-35	4,5
-10	0,4	-40	5,6
-15	0,8	-45	6,7
-20	1,5	-50	7,9
-25	2,3	-55	9,0

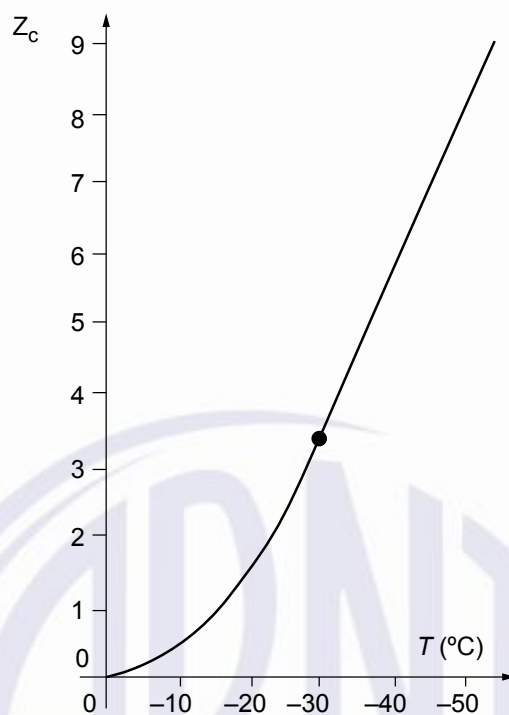


Figura 3 – Coeficiente de avaliação $Z_C = f(T)$

5.1.2 Determinação do grupo de qualidade do aço requerida

É a soma dos coeficientes de avaliação de 5.1.1 que determina a qualidade mínima requerida para a estrutura de aço.

A Tabela 3 apresenta a classificação do grupo de qualidade em relação à soma dos coeficientes de avaliação.

Se a soma dos coeficientes de avaliação for maior que 16 ou se a qualidade do aço requerida não puder ser obtida, medidas especiais são necessárias para obter a qualidade do aço necessária para a segurança contra fratura frágil que deve ser determinada por especialistas em materiais.

Tabela 3 – Classificação dos grupos de qualidade em relação à soma dos coeficientes de avaliação

Soma dos coeficientes de avaliação de 5.1.1 $\Sigma Z = Z_A + Z_B + Z_C$	Grupo de qualidade correspondente na Tabela 4
≤ 2	1
≤ 4	2
≤ 8	3
≤ 16	4

5.1.3 Qualidade dos aços

As propriedades dos diferentes tipos de aço frequentemente utilizados são fornecidas nas seguintes normas:

EN 10025-1, EN 10025-2, EN 10025-6 , EN 10149-1, EN 10149-2, EN 10149-3, EN 10210-1, e EN 10219-1.

A qualidade dos aços nestas normas de projeto se refere à propriedade do aço para exibir comportamento dúctil em determinadas temperaturas.

Os aços são divididos em quatro grupos de qualidade. O grupo no qual o aço é classificado é obtido a partir da resistência ao impacto em um determinado ensaio e a uma determinada temperatura.

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 compreendem os valores de resistência ao impacto e temperaturas de ensaio para os quatro grupos de qualidade.

T_C é a temperatura para o ensaio de impacto de entalhe-V;

T é a temperatura no local de instalação do equipamento.

T_C e T não são comparáveis diretamente, pois o ensaio de impacto de entalhe-V impõe uma condição mais desfavorável do que a de carregamento do equipamento em serviço ou fora de serviço.

As resistências ao impacto indicadas são os valores mínimos, sendo os corpos de prova longitudinais e os valores médios dos três ensaios.

A resistência ao impacto deve ser determinada de acordo com os ensaios de impacto de entalheV, de acordo com a ABNT NBR ISO 148-1.

Os aços de diferentes grupos de qualidade podem ser soldados.

Tabela 4 – Grupos de qualidade, aços não ligados

Grupo de qualidade	Energia de impacto de acordo com a ABNT NBR ISO 148-1 J	Temperatura de ensaio T _C °C	Designação dos aços			Norma antiga	Norma nova			
			De acordo com a Norma antiga	De acordo com a EN 10027-1 a	De acordo com a EN 10027-2 b					
1	–	–	ST 37-2 ST 44-2	S235JR S275JR	1 0037 1 0044	DIN 17100				
			50 B	S355JR	1 0045	BS 4360 (1972)				
2	27	+20	Fe 360-B Fe 430-B Fe 510-B	S235JR S275JR S355JR	1 0037 1 0044 1 0045	EN 10025 (1990)				
			R St 37-2 St 44-2	S235JRG2 S275JR	1 0038 1 0044	DIN 17100				
			E 24(A37)-2 E 28 - 2 E 36 (A52)-2	S235JR S275JR S355JR	1 0037 1 0044 1 0045	NFA35-501				
			40 B 43 B	S235JRG2 S275JR	1 0038 1 0044	BS 4360 (1972)				
			3	27	±0	Fe 360-C Fe 430-C Fe 510-C		S235JO S275JO S355JO	1 0114 1 0143 1 0553	EN 10025 (1990)
						St 37-3U St 44-3U St 52-3U		S235JO S275JO S355JO	1 0114 1 0143 1 0553	DIN 17100
E 24 (A37)~3 E 28 - 3 E 36 (A52)-3	S235JO S275JO S355JO	1 0114 1 0143 1 0553				NFA35-501				
40 C 43 C 50 C	S235JO S275JO S355JO	1 0114 1 0143 1 0553				BS 4360 (1972)				
4	27	–20	Fe 360-D1 Fe 360-D2 Fe 430-D1 Fe 430-D2 Fe 510-D1 Fe 510-D2	S235J2G3 S235J2G4 S275J2G3 S275J2G4 S355J2G3 S355J2G4	1 0116 1 0117 1 0144 1 0145 1 0570 1 0577	EN 10025 (1990)				
			Fe 510-DD1 Fe 510-DD2	S355K2G3 S355K2G4	1 0595 1 0596					
	40		27	St 37-3N – St 44-3N – St 52-3N –	S235J2G3 S235J2G4 S275J2G3 S275J2G4 S355J2G3 S355J2G4	1 0116 1 0117 1 0144 1 0145 1 0570 1 0577	DIN 17100			
				– –	S355K2G3 S355K2G4	1 0595 1 0596				
	27		40	E 24 (A37)-4 E 28-4	S235J2G3 S275J2G3	1 0116 1 0144	NFA35-501			
				E 36 (A52)-4	S355K2G3	1 0595				
	27		27	40 D 43 D 50 D	S235J2G3 S275J2G3 S355J2G3	1 0116 1 0144 1 0570	BS 4360 (1972)			
				St 52-3N	S355J2H	1 0576	DIN 17100			
				50D	S355J2H	1 0576	BS 4360 (1972)			

Tabela 5 – Grupos de qualidade, aços soldáveis de granulação fina

Grupo de qualidade	Energia de impacto de acordo com a ABNT NBR ISO 148-1 J	Temperatura de ensaio T_C °C	Designação dos aços			Norma antiga	Norma nova
			De acordo com a Norma antiga	De acordo com a EN 10027-1	De acordo com a EN 10027-2		
4	40	-20		S275N	1 0490	NF A 36-201 (1984)	EN 10025-3
	47			S275NL	1 0491		
	40		E 355 R	S355N	1 0545		
	47		E 355 FP	S355NL	1 0546		
	40		E 420 R	S420N	1 8902		
	47		E 420 FR	S420NL	1 8912		
	40		E 460 R	S460N	1 8901	DIN 17102 (1983)	EN 10025-3
	47		E 460 FP	S460NL	1 8903		
	40		StE285	S275N	1 0490		
	47		TStE285	S275NL	1 0491		
	40		StE355	S355N	1 0545		
	47		TStE355	S355NL	1 0546		
	40		StE420	S420N	1 8902	(Reino Unido)	EN 10025-3
	47		TStE420	S420NL	1 8912		
	40		StE460	S460N	1 8901		
	47		TS1E460	S460NL	1 8903		
	40		40EE	S275N	1 0490		EN 10025-4
	47			S275NL	1 0491		
	40		50EE	S355N	1 0545		
	47			S355NL	1 0546		
	40			S420N	1 8902		
	47			S420NL	1 8912		
	40		55EE	S460N	1 8901		EN 10025-4
	47			S460NL	1 8903		
	40			S275M	1 8818		
	47			S275ML	1 8819		
	40			S355M	1 8823		
	47			S355ML	1 8834		
	40			S420M	1 8825		
	47			S420ML	1 8836		
	40			S460M	1 8827		
	47			S460ML	1 8838		

Tabela 6 – Grupos de qualidade, aços de alta resistência temperados e revenidos

Grupo de qualidade	Energia de impacto de acordo com a ABNT NBR ISO 148-1 J	Temperatura de ensaio T_C °C	Designação dos aços			Norma antiga	Norma nova
			De acordo com a Norma antiga	De acordo com a EN 10027-1	De acordo com a EN 10027-2		
4	30	-20	S460T	S460Q	1 8908	NFA 36-204 (1992)	EN 10025-6
	40			S460QL	1 8906		
	50			S460QL1	1 8916		
	30		S500T	S500Q	1 8924		
	40			S500QL	1 8909		
	50			S500QL1	1 8984		
	30		S550T	S550Q	1 8904		
	40			S550QL	1 8926		
	50			S550QL1	1 8986		
	30		S620T	S620Q	1 8914		
	40			S620QL	1 8927		
	50			S620QL1	1 8987		
	30		S690T	S690Q	1 8931		
	40			S690QL	1 8928		
	50			S690QL1	1 8988		
	30			S890Q	1 8940		
	40			S890QL	1 8983		
	50			S890QL1	1 8925		
	30		S960T	S960Q	1 8941		
	40			S960QL	1 8933		
	30		TStE 460 V	S460Q	1 8908	(Norma da Alemanha)	EN 10025-6
	40			S460QL	1 8906		
	50			S460QL1	1 8916		
	30		StE 500 V	S500Q	1 8924		
	40		TStE 500 V	S500QL	1 8909		
	50		ESTe 500 V	S500QL1	1 8984		
	30		StE 550 V	S550Q	1 8904		
	40		TStE 550 V	S550QL	1 8926		
	50		ESTe 550 V	S550QL1	1 8986		
	30		StE 620 V	S620Q	1 8914		
	40		TStE 620 V	S620QL	1 8927		
	50		ESTe 620 V	S620QL1	1 8987		
	30		StE 690 V	S690Q	1 8931		
	40		TStE 690 V	S690QL	1 8928		
	50		ESTe 690 V	S690QL1	1 8988		
	30		TStE 890 V	S890Q	1 8940		
	40			S890QL	1 8983		
	50			S890QL1	1 8925		
	30		TStE 960 V	S960Q	1 8941		
	40			S960QL	1 8933		

Tabela 7 – Grupos de qualidade, aços de alta resistência para trefilamento

Grupo de qualidade	Energia de impacto de acordo com a ABNT NBR ISO 148-1 J	Temperatura de ensaio T _C °C	Designação dos aços			Norma antiga	Norma nova	
			De acordo com a Norma antiga	De acordo com a EN 10027-1	De acordo com a EN 10027-2			
4	40	-20	E315 D	S315MC	1 0972	NF A 36-231 (1992)	EN 10149-2	
			E355 D	S355MC	1 0978			
			E420 D	S420MC	1 0980			
				S460MC	1 0982			
				S5Q0MC	1 0984			
			E560 D	S550MC	1 0986			
				S600MC	1 8969			
				S650MC	1 8976			
			E690 D	S700MC	1 8974			
			QStE 300 TM	S315MC	1 0972	SEW 092		
			QStE 360 TM	S355MC	1 0976			
			QStE 420 TM	S420MC	1 0980			
			QStE 460 TM	S460MC	1 0982			
			QStE 500 TM	S500MC	1 0984			
			QStE 550 TM	S550MC	1 0986			
			QStE 600 TM	S600MC	1 8969			
			QStE 650 TM	S650MC	1 8976			
			QStE 690 TM	S700MC	1 8974			
			43F35	S315MC	1 0972	(Reino Unido)		
			46F40	S355MC	1 0976			
			50F45	S420MC	1 0980			
				S460MC	1 0982			
				S500MC	1 0984			
			60F55	S550MC	1 0986			
				S600MC	1 8969			
				S650MC	1 8976			
			75F70	S700MC	1 8974			
			QStE 260 N	S260NC	1 0971	SEW 92-75		EN 10149-3
			QStE 300 N	S315NC	1 0973			
			QStE 360 N	S355NC	1 0977			
			QStE 420 N	S420NC	1 0981			
				S260NC	1 0971	(Reino Unido)		
			40/30	S315NC	1 0973			
			43/35	S355NC	1 0977			
				S420NC	1 0981			

5.1.4 Requisitos especiais

Além das condições descritas anteriormente para a escolha da qualidade do aço, os seguintes requisitos devem ser observados:

- aços não acalmados ou não desoxidados do grupo de qualidade 1 podem ser utilizados para estruturas de equipamentos de manuseio de carga somente no caso de perfis laminados e tubos não excedendo a 6 mm de espessura;
- elementos com espessura superior a 50 mm não podem ser utilizados para estruturas soldadas de equipamentos de manuseio de carga, salvo se o fabricante possuir uma ampla experiência em solda de chapas espessas. A qualidade do aço e seu ensaio, neste caso, devem ser determinados por especialistas;
- se as partes forem curvadas a frio com uma relação de raio/espessura da chapa < 10 , a qualidade do aço deve ser adequada para curvatura a frio.

5.2 Verificação com relação ao limite elástico

Para esta verificação, há distinção entre os elementos da estrutura e as juntas rebitadas, aparafusadas ou soldadas.

5.2.1 Elementos estruturais exceto juntas

5.2.1.1 Elementos submetidos à tração ou compressão simples

5.2.1.1.1 Caso de aços para os quais a relação entre a tensão de escoamento σ_E e a tensão de ruptura $\sigma_R < 0,7$

A tensão calculada σ não pode exceder a tensão máxima admissível σ_a obtida ao dividir a tensão de escoamento σ_E pelo coeficiente v_E que depende do caso de solicitação, conforme definido em 5.3.

Os valores de v_E e as tensões admissíveis são fornecidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficiente de segurança em relação ao limite elástico v_E

	Caso I	Caso II	Caso III
Valores de v_E	1,5	1,33	1,1
Tensão admissível σ_a	$\sigma_E/1,5$	$\sigma_E/1,33$	$\sigma_E/1,1$

Para aços-carbono mostrados nas Tabelas 9 e 10, a tensão de escoamento σ_E é convencionalmente adotada como aquela que corresponde a um alongamento de 0,2 %.

Tabela 9 – Valores para σ_E , σ_R e σ_a para aços de construção sem liga metálica de granulação fina e aços na condição de temperados e revenidos

Norma	Aço	Espessura t mm	Tensão de escoamento	Tensão de ruptura	Tensão admissível		
			σ_E	σ_R	σ_a		
			N/mm ²	N/mm ²	Caso I N/mm ²	Caso II N/mm ²	Caso III N/mm ²
EN 10025-2	S235	< 16	235	340	157	177	214
		< 40	225	340	150	169	205
		< 100	215	340	143	162	195
		< 150	195	340	130	147	177
		< 200	185	320	123	139	168
		< 250	175	320	117	132	159
	S275	< 16	275	410	183	207	250
		< 40	265	410	177	199	241
		< 63	255	410	170	192	232
		< 80	245	410	163	184	223
		< 100	235	410	157	177	214
		< 150	225	400	150	169	205
		< 200	215	380	143	162	195
		< 250	205	380	137	154	186
EN 10025-2 e EN 10025-3	S355 S355N e S355NL aços até $t \leq 150$	< 16	355	490	237	267	323
		< 40	345	490	230	259	314
		< 63	335	490	223	252	305
		≤ 80	325	490	217	244	295
		≤ 100	315	490	210	237	286
		≤ 150	295	470	197	222	268
		≤ 200	285	450	190	214	259
EN 10025-3 e EN 10025-4	S460	< 250	275	450	183	207	250
		≥ 16	460	550	307	346	418
		≤ 40	440	550	293	331	400
		≤ 63	430	550	287	323	391
		≤ 80	410	550	273	308	373
EN 10025-6	S460	≤ 100	400	550	267	301	364
		≤ 50	460	550	307	346	418
		≤ 150	440	550	293	331	400
	S690	≤ 50	690	770	460	519	627
		≤ 100	650	760	433	489	591
		≤ 150	630	710	420	474	573
	S890	≤ 50	890	940	593	669	809
		≤ 100	830	880	553	624	755
	S960	≤ 50	960	980	640	722	873

NOTA 1 A tensão de escoamento σ_E e a tensão admissível σ_a dos perfis estruturais ocos conformados a quente de acordo com a EN 10210-1, estão em conformidade com as tensões apresentadas na Tabela 9, $t \leq 65$ mm, para as classes 235 a 460.

NOTA 2 A tensão de escoamento σ_E e a tensão admissível σ_a dos perfis estruturais ocos soldados e conformados a frio de acordo com a EN 10219-1, estão em conformidade com as tensões apresentadas na Tabela 9, $t \leq 40$ mm, para as classes 235 a 460.

Tabela 10 – Valores de σ_E , σ_R e σ_a para aços com alto limite de escoamento para conformação a frio e seções ocas

Norma	Aço	Espessura t mm	Tensão de escoamento σ_E N/mm ²	Tensão de ruptura σ_R N/mm ²	Tensão admissível σ_a		
					Caso I N/mm ²	Caso II N/mm ²	Caso III N/mm ²
EN 10149-2 e EN 10149-3	S315	todos t	315	390	210	237	286
	S355		355	430	237	267	323
	S420		420	480	280	316	382
	S460		460	520	307	346	418
	S500		500	550	333	376	455
	S550		550	600	367	414	500
	S600		600	650	400	451	545
	S650	< 8	650	700	433	489	591
		> 8	630	700	420	474	573
	S700	< 8	700	750	467	526	636
		> 8	680	750	453	511	618
EN 10219-1	S420MH	< 16	420	500	280	315	382
	e MLH	> 40	400	500	267	300	363

5.2.1.1.2 Casos de aço com tensão de escoamento elevada ($\sigma_E/\sigma_R > 0,7$)

Para aços com tensão de escoamento elevada onde a relação σ_E/σ_R for maior que 0,7, o uso de coeficientes ν_E não garante uma margem de segurança adequada. Neste caso, pode ser realizada uma verificação, se a tensão σ_a fornecida pela seguinte equação não for excedida:

$$\sigma_a = \left[\frac{\sigma_E + \sigma_R}{\sigma_{E \times r} + \sigma_{R \times r}} \right] \times \sigma_{a \times r}$$

onde

σ_E e σ_R são a tensão de escoamento e a tensão de ruptura do aço examinado;

$\sigma_{E \times r}$ e $\sigma_{R \times r}$ são essas mesmas tensões para o aço tomado como referência, tendo respectivamente, 360 N/mm² e 510 N/mm²;

$\sigma_{a \times r}$ é a tensão admissível para o aço de referência no caso de solicitação considerado.

5.2.1.2 Elementos submetidos ao cisalhamento

A tensão admissível ao cisalhamento τ_a tem o seguinte valor:

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}}$$

sendo σ_a a tensão admissível à tração.

5.2.1.3 Elementos submetidos a cargas combinadas – Tensão equivalente

Com σ_x , σ_y e τ_{xy} sendo, respectivamente, as duas tensões normais e a tensão de cisalhamento em um determinado ponto, deve ser verificado:

- 1) se cada uma das tensões σ_x e σ_y é menor que σ_a e se τ_{xy} é menor que τ_a ;
- 2) se a tensão equivalente σ_{cp} é menor que σ_a , ou seja:

$$\sigma_{cp} = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \times \sigma_y + 3 \times \tau_{xy}^2)} \leq \sigma_a$$

Ao utilizar esta equação, um método simples é tomar os valores máximos de σ_x , σ_y e τ_{xy} . Contudo, este cálculo leva a uma tensão equivalente muito alta, nos casos em que é impossível a ocorrência simultânea das três tensões máximas.

Entretanto, o método de cálculo simples, sendo conservador, é sempre aceitável.

Se desejar um cálculo mais preciso é necessário determinar a combinação prática mais desfavorável que pode ocorrer. Três verificações devem ser realizadas ao calcular sucessivamente a tensão equivalente resultante das três combinações descritas a seguir:

- $\sigma_{x\text{máx.}}$ e as tensões correspondentes σ_y e τ_{xy} ;
- $\sigma_{y\text{máx.}}$ e as tensões correspondentes σ_x e τ_{xy} ;
- $\tau_{xymáx.}$ e as tensões correspondentes σ_x e σ_y .

Deve-se observar que quando duas das três tensões são aproximadamente do mesmo valor e maiores do que metade da tensão admissível, a combinação mais desfavorável dos três valores pode ocorrer em casos de solicitação diferentes daqueles correspondentes ao máximo de cada uma das três tensões.

Caso especial:

- Tração (ou compressão) combinada com cisalhamento

A seguinte equação deve ser verificada:

$$\sqrt{(\sigma^2 + 3 \times \tau^2)} \leq \sigma_a$$

5.2.2 Caso de juntas

5.2.2.1 Juntas rebitas

5.2.2.1.1 Rebite sem cisalhamento

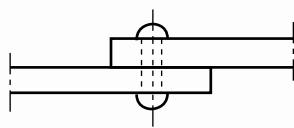
Considerando o efeito da força de aperto, a tensão de cisalhamento calculada não pode exceder:

$$\tau = 0,6 \times \sigma_a \text{ no caso de cisalhamento simples (Figura 4-a);}$$

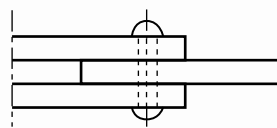
e

$$\tau = 0,8 \times \sigma_a \text{ no caso de cisalhamento duplo ou múltiplo (Figura 4-b).}$$

onde σ_a é a tensão admissível do metal utilizado para o rebite.



a) Cisalhamento simples



b) Cisalhamento duplo ou múltiplo

Figura 4 – Juntas rebitadas**5.2.2.1.2 Rebite sem tração**

A tensão de tração calculada σ não pode exceder o seguinte valor:

$$\sigma < 0,2 \times \sigma_a$$

5.2.2.1.3 Rebites carregados em tração e cisalhamento

As seguintes condições devem ser verificadas:

- $\sigma < 0,2 \times \sigma_a$; e
- $\tau \leq 0,6 \times \sigma_a$ para cisalhamento simples; ou
- $\tau \leq 0,8 \times \sigma_a$ para cisalhamento duplo ou múltiplo.

5.2.2.1.4 Limites de pressão diametral

A pressão diametral nas paredes dos furos σ_n não pode exceder:

- $\sigma_n \leq 1,5 \times \sigma_a$ para cisalhamento simples;
- $\sigma_n \leq 2 \times \sigma_a$ para cisalhamento duplo ou múltiplo.

Não devem ser utilizados rebites submetidos à tração, principalmente para os elementos principais. Todas as juntas devem ter, no mínimo, dois rebites alinhados na direção da força.

5.2.2.2 Juntas aparafusadas**5.2.2.2.1 Generalidades**

Juntas aparafusadas podem ser submetidas a tensões devido às forças que atuam perpendicularmente à junta (unidas por parafusos de tração), devido às forças que atuam paralelamente às superfícies das juntas e, também, devido às forças que atuam simultaneamente perpendicular e paralelamente à superfície da junta.

5.2.2.2.2 Juntas feitas com parafusos de tração com torque controlado**5.2.2.2.2.1 Generalidades**

Uma junta com parafusos de tração com aperto controlado é uma junta na qual a tensão principal está na direção do eixo do parafuso ou haste rosqueada e que foi submetida ao efeito do aperto aplicado na ausência de uma carga externa, o que é recomendado para todas as juntas submetidas à fadiga.

Cuidados devem ser tomados para assegurar que o parafuso não seja submetido à carga de cisalhamento. Estes parafusos não estão incluídos na categoria de parafusos de alta resistência, porém podem ser utilizados se atenderem às condições do Anexo A.

Cuidados devem ser tomados para assegurar que os parafusos sejam apertados corretamente e que o aperto seja permanente (tolerância de $\pm 10\%$). O fator $\Omega = 1,1$ é introduzido para considerar as tolerâncias.

Durante a aplicação do aperto inicial no parafuso, sob o efeito combinado de tração e carga de torção, a tensão não pode exceder a 80 % do limite elástico, levando em consideração as perdas na aplicação do aperto inicial.

5.2.2.2.2 Cálculo da carga admissível sobre as juntas

O cálculo da força de aperto inicial F_p a ser utilizada é o seguinte :

a) Aperto com torção

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_p^2 + 3 \times \tau_b^2} \leq 0,8 \sigma_E$$

com

$$\tau_b = \left[\frac{(2 \times d_2 \sigma_p)}{d_t} \right] \times \left[\frac{p_a}{\pi \times d_2} + 1,155 \times \mu \right]$$

onde

σ_p é a tensão de tração teórica sob o efeito do aperto (F_p/S_b);

τ_b é a tensão de torção sob o efeito do aperto;

d_2 é o diâmetro da raiz da rosca;

S_b é a seção na raiz, calculada no diâmetro d_2 ;

d_t é o diâmetro nominal do parafuso;

p_a é o passo da rosca;

μ é o coeficiente de atrito nas roscas;

σ_E é o limite elástico do material do parafuso.

b) Aperto sem torção

$$\sigma_b \leq 0,8 \sigma_E$$

Para a carga admissível F_1 atuante sobre a junta, duas verificações devem ser realizadas conforme a seguir:

- 1) Sob a carga máxima, considerando o coeficiente de segurança κ e κ' , o limite elástico do parafuso não pode ser excedido.

determinar:

$$\sigma'_1 = \sqrt{\sigma_E^2 - 3 \times \tau_b^2}$$

Verificar se:

$$\frac{F_1}{S_b} \leq \frac{(\sigma'_1 - \sigma_p)}{\kappa \times \kappa' \times \delta_b}$$

onde

$$\delta_b = \Delta l_1 / (\Delta l_1 + \Delta l_2);$$

Δl_1 é o encurtamento dos elementos a serem apertados sob a ação da força de aperto;

Δl_2 é o alongamento do parafuso sob a ação da força de aperto.

Para partes montadas, a seção a ser considerada para o cálculo de Δl_1 é dado pela equação:

$$S_{eq} = 0,25 \times \pi \times \left[(S_1 + 0,1l_k)^2 - D_t^2 \right]$$

onde

S_1 é o diâmetro externo do encosto da cabeça do parafuso, conforme mostrado na Figura 5;

l_k é o comprimento das partes apertadas, conforme estabelecido na Figura 5 ;

D_t é o diâmetro dos furos dos parafusos, conforme mostrado na Figura 5.

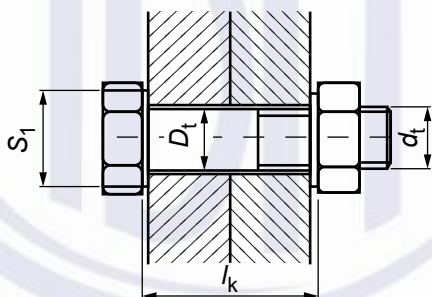


Figura 5 – Junta com parafusos de tração

Para parafusos cujo diâmetro da haste difere consideravelmente do diâmetro da raiz da rosca e onde houver uma extensão de rosca considerável sobrando na parte submetida à tração, deve ser realizado um cálculo completo de Δl_2 .

- 2) Sob a carga máxima com aplicação dos coeficientes Ω , κ' e κ'' não pode ocorrer a separação das partes.

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S_b} \leq \frac{\sigma_p}{\kappa' \times \kappa'' \times (1 - \delta_b) \times \Omega}$$

Coeficientes de segurança κ , κ' e κ''

κ depende da condição da superfície das partes a serem apertadas (superfície usinada $\kappa = 1$);

κ' corresponde à segurança em relação ao limite elástico de acordo com a Tabela 11;

κ'' corresponde à segurança contra a separação das partes.

Tabela 11 – Coeficientes de segurança κ' e κ''

	Caso I	Caso II	Caso III
κ'	1,50	1,33	1,1
κ''	1,3	1,0	1,0
Os coeficientes κ' e κ'' devem ser aplicados à condição mais desfavorável, resultante da perda da aplicação do esforço de aperto inicial.			

A verificação à fadiga dos parafusos é realizada somente para as cargas do caso I.

Sob o efeito da carga de serviço F_1 , o esforço de tração real varia entre os seguintes valores:

$$\sigma_p \text{ e } \sigma_p + \frac{F_1 \times \delta_b}{S_b}$$

A seguinte equação deve ser verificada:

$$\sigma_1 = + \frac{F_1}{S_b} \leq 2 \times \frac{\sigma_A}{\delta_b}$$

onde σ_A é a amplitude da tensão máxima admissível à fadiga, fornecida no gráfico da Figura 6.

Para qualquer outro tipo de parafuso ou método de projeto, o valor σ_A deve assegurar no mínimo um nível de segurança equivalente contra fadiga. Qualquer ensaio de conformidade deve ser realizado de acordo com a ISO 3800-1 conforme as equações a seguir:

$$\sigma_m = 0,8 \times R_E \quad (R_E = \sigma_E)$$

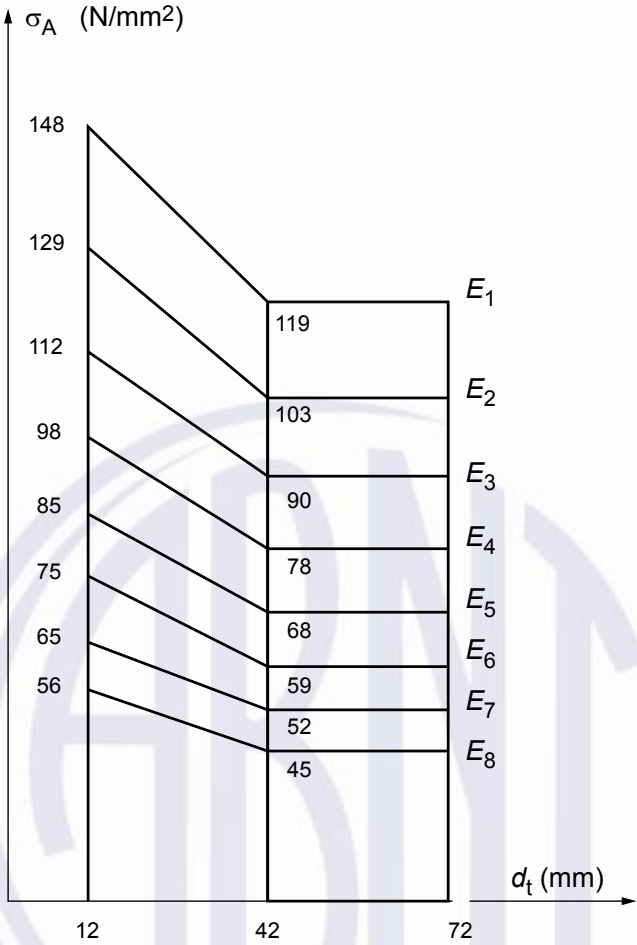


Gráfico para parafusos ISO com:

- rosca-padrão;
- classes 8.8, 10.9, 12.9;
- rosca laminada a frio com tratamento térmico após a laminação.

Figura 6 – Amplitude da tensão máxima admissível à fadiga

5.2.2.2.3 Juntas aparafusadas submetidas às forças atuando paralelas ao plano da junta

5.2.2.2.3.1 Parafusos submetidos ao cisalhamento (parafusos ajustados)

Preferencialmente para tensão não flutuante com e sem pré-carga.

As seguintes verificações pressupõem que o aparafusamento foi efetuado sob condições apropriadas, ou seja, utilizando parafusos ajustados (torneados ou com acabamento a frio) com as devidas tolerâncias e hastes que preencham a extensão total dos furos feitos nas partes a serem montadas. Os furos devem ser feitos e alargados com as devidas tolerâncias.

Parafusos comuns de aço-carbono de baixa resistência, como os de classe 5.6, são permitidos somente para juntas secundárias que não transmitem cargas pesadas. Estes parafusos são proibidos para juntas submetidas à fadiga.

A tensão calculada τ sobre a haste não pode exceder os valores fornecidos para rebites em 5.2.2.1.1.

A pressão diametral não pode exceder os valores indicados em 5.2.2.1.4.

5.2.2.2.3.2 Parafusos submetidos à tração e cisalhamento combinados

Verificar se:

$$\sigma \leq 0,65 \times \sigma_a$$

e

$$\tau \leq 0,6 \times \sigma_a \quad \text{para cisalhamento simples;}$$

$$\tau \leq 0,8 \times \sigma_a \quad \text{para cisalhamento duplo ou múltiplo.}$$

$$\text{e se } \sqrt{\sigma^2 + 3 \times \tau^2} \leq \sigma_a$$

A tensão admissível em um parafuso é limitada a:

a) $\sigma_a = 0,7 \times \sigma_{E(0,2)}$ para execução normal;

b) $\sigma_a = 0,8 \times \sigma_{E(0,2)}$ para uma construção que evite a deformação da rosca do parafuso.

onde $\sigma_{E(0,2)}$ é o limite convencional do escoamento a 0,2 % de alongamento percentual do metal que constitui o parafuso.

5.2.2.2.3.3 Juntas utilizando parafusos de alta resistência com torque controlado (A.R)

Este tipo de junta é recomendado para montagens submetidas à fadiga e cujas cargas principais estão paralelas às faces da junta. Elementos unidos por parafusos A.R são submetidos aos seguintes tipos de cargas:

a) Cargas atuando no plano da junta (símbolo T):

Neste caso, as cargas tendem a fazer com que as partes em contato deslizem e a força seja transmitida por atrito. Para determinar a carga admissível por parafuso T_a que pode ser transmitida por atrito, a força de tração F que existe no parafuso após o aperto deve ser considerada. Esta força é multiplicada pelo coeficiente de atrito μ das superfícies de contato, e os coeficientes de segurança v_T que são iguais aqueles de 5.2.1.1 são aplicados a esta força limite, ou seja:

$$v_T = 1,5 \text{ para caso de solicitação I;}$$

$$v_T = 1,33 \text{ para caso de solicitação II;}$$

$$v_T = 1,1 \text{ para caso de solicitação III.}$$

Isto pode ser expresso pela seguinte equação:

$$T_a = m \frac{(\mu \times F - N)}{v_T}$$

sendo m o número de superfícies de atrito.

A força de tração F em um parafuso depende do torque de aperto. O valor de μ depende do metal que constitui os elementos, o estado das superfícies em contato e o método de preparação. O Anexo A fornece informações sobre este assunto.

b) Forças perpendiculares ao plano da junta (símbolo N)

A verificação por cálculo das forças perpendiculares à superfície de montagem deve ser realizada de acordo com 5.2.2.2.1.

Se a junta aparafusada for submetida a um momento externo M, a carga de tração deve ser determinada no parafuso submetido à carga máxima e, onde aplicável, adicionada à carga de tração existente devido a N.

c) Cargas combinadas dos tipos T, N e M

Duas verificações devem ser realizadas:

- 1) que para o parafuso com a tensão mais elevada, a soma das forças de tração devido às cargas N e M permanece inferior à força de tração admissível conforme definido em 5.2.2.2.2;
- 2) que a carga média que é transmitida pelo atrito é menor que o valor descrito a seguir:

$$T = \frac{\mu \times (F - N) \times m}{v_T}$$

d) Determinação das tensões nos elementos da junta

Para elementos submetidos à compressão, a tensão é calculada sobre a seção bruta (área do corte transversal com furos não deduzidos).

Para elementos submetidos à tração há dois casos:

- 1) Primeiro caso: parafusos colocados em uma fileira única, perpendicular à direção da carga. As seguintes condições devem ser verificadas:
 - a carga total sobre a seção bruta;
 - 60 % da carga total sobre a seção líquida (área da seção transversal com os furos deduzidos).
- 2) Segundo caso: várias fileiras de parafusos perpendiculares à direção da carga.

A seção mais carregada correspondendo à fileira 1 para o elemento A (ver Figura 7) deve ser analisada e as duas condições seguintes verificadas:

- a carga total sobre a seção bruta; e
- na seção líquida, a carga a ser considerada corresponde à soma das cargas atribuídas às fileiras 2 e 3 (ou seja 2/3 da carga total) somada a 60 % da carga atribuída à fileira 1 (ou seja 1/3 da carga total).

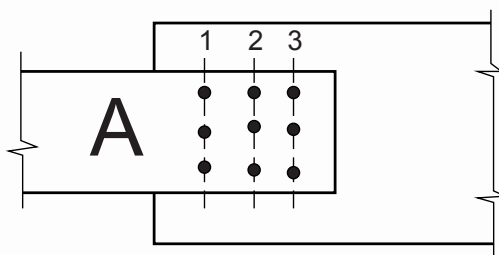


Figura 7 – Junta aparafusada com várias fileiras

No caso de haver somente duas fileiras de parafusos, a carga a ser considerada na seção líquida é de 80 % da carga total.

Isto pressupõe que a carga está igualmente dividida entre todos os parafusos e que o número de fileiras de parafusos é pequeno, pois se houverem muitas fileiras, os últimos parafusos carregam pouca carga. Portanto, é recomendado que se utilize até duas fileiras de parafusos, ou, excepcionalmente, três.

e) Execução de juntas com parafusos de alta resistência

Deve-se enfatizar que os cálculos descritos anteriormente para verificar a adequação de juntas com parafusos de alta resistência são válidos somente para juntas produzidas de acordo com a prática aceita que requer torque controlado dos parafusos e preparação das superfícies de contato para obter coeficientes de atrito adequados.

Ver Anexo A para mais orientações.

5.2.2.3 Juntas soldadas

Nas juntas soldadas, pressupõe-se que o metal depositado tenha no mínimo características tão boas quanto o metal-base.

Deve-se verificar se a tensão desenvolvida, nos casos de tração e compressão longitudinal, não excede as tensões admissíveis σ_a fornecidas em 5.2.1.1. Para cisalhamento nas soldas, a tensão admissível τ_a é fornecida pela seguinte equação:

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{2}}$$

Entretanto, para determinados tipos de solicitação, especialmente tensões transversais nas soldas, a tensão equivalente máxima admissível é reduzida.

A Tabela 12 resume os valores que não podem ser excedidos para determinados aços de acordo com o tipo de solicitação.

Tabela 12 – Tensão equivalente máxima admissível em soldas (N/mm²)

Tipos de solicitação	Tensão de escoamento do aço					
	240 ^a			355 ^a		
	Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III
Tensões equivalentes longitudinais para todos os tipos de soldas	160	180	215	240	270	325
Esforços de tração transversal ao cordão						
1) Soldagem de topo e soldas K de qualidade especial	160	180	215	240	270	325
2) Soldas de qualidade comum	140	158	185	210	236	285
3) Soldas de filete	113	127	152	170	191	230
Tensão de compressão transversal ao cordão						
1) Soldagem de topo e soldas K	160	180	215	240	270	325
2) Soldas de filete	130	146	175	195	220	265
Cisalhamento Todos os tipos de soldas	113	127	152	170	191	230
NOTA Ajustar a tensão admissível na mesma razão de variação da tensão de escoamento para outros aços. O Anexo B fornece informações adicionais sobre juntas soldadas.						
^a Atentar para a variação da tensão de escoamento com a espessura para alguns aços.						

5.3 Verificação de elementos sujeitos à flambagem global

Em princípio, as partes que possam sofrer flambagem global devem ser projetadas com a mesma margem de segurança que a adotada em relação ao limite elástico; em outras palavras, tendo determinado a tensão crítica de flambagem, a tensão máxima admissível é a tensão crítica dividida pelo coeficiente apropriado (1,5 ou 1,33 ou 1,1) especificado em 5.2.1.1.

A escolha de um método de cálculo prático é do fabricante que deve declarar a origem do método escolhido.

Se o método escolhido envolver a multiplicação da tensão calculada pelo coeficiente de flambagem ω , dependente do coeficiente de esbeltez do elemento e depois verificando se esta tensão amplificada permanece menor que uma determinada tensão admissível, o valor a ser escolhido para esta tensão admissível deve ser conforme especificado em 5.2.1.1.

NOTA O Anexo C mostra como aplicar vários métodos clássicos de cálculo de acordo com os requisitos descritos em 5.3.

5.4 Verificação de elementos sujeitos a flambagem localizada

Na determinação dos coeficientes de segurança contra flambagem localizada estabelecidos a seguir, foi considerado que as chapas planas sob tensão de compressão igualmente distribuída sobre a

largura da chapa são expostas a um risco maior de flambagem do que as chapas sob tensão que variam de compressão para tração ao longo da largura da chapa.

Em consequência, a segurança contra a flambagem depende da relação ψ de tensão nas bordas da chapa. Deve ser verificado se a tensão calculada não é maior que a tensão crítica de flambagem dividida pelo coeficiente ν_V fornecido na Tabela 13.

Tabela 13 – Coeficientes de segurança na flambagem ν_V

Tipo de elemento	Caso	Coeficiente de segurança na flambagem ν_V
Flambagem de elementos planos	I	$1,70 + 0,175 (\Psi - 1)$
	II	$1,50 + 0,125 (\Psi - 1)$
	III	$1,35 + 0,075 (\Psi - 1)$
Flambagem de elementos curvos: Cilindros circulares (por exemplo, tubos)	I	1,70
	II	1,50
	III	1,35
NOTA 1 A relação de tensão ψ das bordas varia entre +1 e -1.		
NOTA 2 O Anexo C fornece o procedimento para determinar a tensão crítica de flambagem.		

5.5 Caso de estruturas sujeitas a deformações significativas

Neste caso, as tensões nos elementos podem não ser proporcionais às forças aplicadas devido à deformação da estrutura como resultado da aplicação destas forças.

Este é o caso, por exemplo, com a tensão produzida na coluna de um guindaste (ilustrado esquematicamente na Figura 8), onde está claro que o momento na coluna não é proporcional às forças aplicadas devido às deformações que aumentam seu braço de momento.

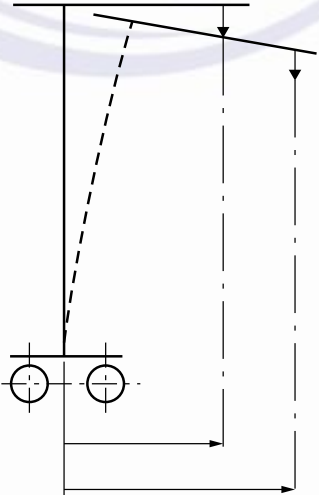


Figura 8 – Estrutura flexível com grandes deformações

Neste caso, o cálculo é feito da seguinte maneira:

- a) primeiramente realizar as verificações requeridas em 5.2, 5.3 e 5.4 calculando a tensão resultante dos vários casos de carregamento e verificando se existe uma margem de segurança suficiente

em relação à tensão crítica (limite de escoamento, flambagem global e localizada). No cálculo dessa tensão, é levada em consideração a deformação devido às cargas sobre a estrutura;

- b) uma verificação adicional também é realizada calculando a tensão resultante da aplicação das cargas multiplicadas pelo coeficiente v do caso de carga examinado e levando em consideração as deformações resultantes da aplicação destas cargas majoradas e verificando se as tensões calculadas dessa forma permanecem inferiores à tensão-limite de escoamento e de flambagem global e localizada.

Entretanto, para levar em consideração o fato de que as cargas variáveis S_V (solicitações devido à elevação da carga multiplicadas por ψ , para o vento e movimentos horizontais) são mais perigosas que a carga constante devido ao peso próprio S_G , uma verificação pode ser realizada na prática, considerando os dois casos seguintes:

- 1) Quando os efeitos do peso próprio S_G e da carga variável S_V levam à deformação em direções opostas:

determinar a tensão σ_G resultante da aplicação do peso próprio S_G (sem majoração) e σ_V resultante das cargas variáveis S_V , multiplicado pelo coeficiente v correspondente ao caso avaliado (ver 5.2, limite elástico, 5.3, flambagem global e 5.4, flambagem localizada) e verificar se esta tensão é menor que o valor crítico, ou seja:

$$\sigma \text{ resultante de } (S_G + v \times S_V) < \sigma_{cr}$$

- 2) Quando o peso próprio e a carga variável levam a deformações na mesma direção:

determinar a tensão resultante da aplicação da carga variável multiplicada pelo coeficiente v e do peso morto multiplicado pelo coeficiente:

$$v' = 1 + (v - 1) \times r$$

onde $r = \sigma_G / (\sigma_G + \sigma_V)$ é calculado no estágio inicial das deformações.

Então, obtemos σ resultante de:

$$(v' \times S_G + v \times S_V) \leq \sigma_{cr}$$

5.6 Verificações de elementos sujeitos à fadiga

O risco de fadiga ocorre quando um elemento é submetido a cargas variáveis e repetidas.

A resistência à fadiga é calculada considerando os seguintes parâmetros:

- número convencional de ciclos e o espectro de tensão os quais o elemento é submetido;
- material utilizado e o efeito de entalhe no ponto que está sendo avaliado;
- a tensão máxima extrema $\sigma_{m\acute{a}x.}$ que pode ocorrer no elemento;
- a relação κ entre os valores extremos de tensão.

5.6.1 Número convencional de ciclos e espectro de tensão

O número de ciclos de variação de carga e o espectro de tensões a serem considerados são discutidos na ABNT NBR 8400-1, em 5.1.2.2 e 5.1.2.3.

Estes dois parâmetros são definidos unicamente pelo grupo em que está classificado o elemento da estrutura conforme a ABNT NBR 8400-1, 5.1.4 (classificação dos componentes em grupos).

5.6.2 Material utilizado e efeito de entalhe

A resistência à fadiga de um elemento depende da qualidade do material utilizado e da forma e método de produzir as juntas. A forma de união das partes e os meios de fazê-la têm o efeito de produzir concentrações de tensão (ou efeito de entalhe) que reduzem consideravelmente a resistência à fadiga do elemento.

O Anexo D fornece a classificação de diversas juntas de acordo com o seu grau de concentração de tensão (ou efeito de entalhe).

5.6.3 Determinação da tensão máxima $\sigma_{\text{máx.}}$

A tensão máxima, $\sigma_{\text{máx.}}$, é a tensão mais alta em valor absoluto (ou seja, pode ser de tração ou compressão) que ocorre no elemento no caso de solicitação I referido na ABNT NBR 8400-1, 5.3.1, sem aplicação de coeficiente de majoração M_x .

Ao verificar à fadiga os elementos em compressão, o coeficiente de flambagem ω não pode ser aplicado.

5.6.4 Relação κ entre as tensões extremas

Esta relação é determinada ao calcular os valores extremos de tensão os quais o componente é submetido no caso de solicitação I.

A relação pode variar de acordo com os ciclos operacionais, porém está a favor da segurança quando se determina esta relação κ , considerando os valores extremos que podem ocorrer durante possíveis operações no caso de solicitação I.

Se $\sigma_{\text{máx.}}$ e $\sigma_{\text{mín.}}$ são os valores algébricos destas tensões extremas, sendo $\sigma_{\text{máx.}}$ a tensão extrema de maior valor absoluto, a relação κ pode ser escrita como:

$$\kappa = \frac{\sigma_{\text{mín.}}}{\sigma_{\text{máx.}}} \text{ ou } \frac{\tau_{\text{mín.}}}{\tau_{\text{máx.}}} \text{ no cisalhamento}$$

Esta relação, que varia de +1 a -1, é positiva se as tensões extremas forem no mesmo sentido (tensões pulsantes) e negativa quando as tensões extremas forem de direção oposta (tensões alternantes).

5.6.5 Verificação de elementos sujeitos à fadiga

Utilizando os parâmetros definidos em 5.5.1 a 5.5.4, a adequação dos elementos estruturais e das juntas sujeitas à fadiga é assegurada ao verificar se a tensão $\sigma_{\text{máx.}}$, conforme definido em 5.5.3, não é maior que a tensão admissível à fadiga dos elementos sob avaliação.

Esta tensão admissível à fadiga origina-se da tensão crítica, definida como sendo a tensão que, com base nos ensaios realizados em corpos de prova, corresponde a 90 % de probabilidade de sobrevivência, a qual um coeficiente de segurança de 4/3 é aplicado da seguinte maneira:

σ_a para fadiga = $0,75\sigma$ para 90 % de probabilidade de sobrevivência.

A determinação destas tensões admissíveis, com relação a todas estas avaliações, é um problema complexo e geralmente é aconselhável consultar livros especializados sobre o assunto.

O Anexo D fornece indicações práticas, com base nos resultados de pesquisa nesta área, sobre a determinação de tensões admissíveis para os aços de tensão de ruptura de 370 N/mm² a 520 N/mm², de acordo com os vários grupos nos quais os componentes estão classificados e os efeitos de entalhe dos principais tipos de juntas utilizadas na fabricação de equipamentos de elevação.

5.7 Verificação quanto ao limite de deflexões das estruturas

Embora uma grande deflexão indevida possa afetar de maneira adversa as vigas da estrutura devido ao perigo do movimento das juntas, nenhum efeito adverso deve ser preocupante no caso de vigas de alma cheia ou tipo caixa.

Na prática, a amplitude da deflexão dever ser limitada somente no ponto de vista de conveniência da operação, uma vez que oscilações verticais da carga podem ser problemáticas em alguns casos.

Entretanto, as seguintes proporções para as vigas principais tipo caixa do equipamento devem ser consideradas:

$$p/h \leq 25;$$

$$p/b \leq 65 \text{ para sistemas de partida direta ou com degraus de torque na translação};$$

$$p/b \leq 80 \text{ para sistemas com controle de aceleração e variação contínua da velocidade "stepless" para a translação}.$$

onde

p é o vão;

h é a altura da viga (ver Figura 9);

b é a largura da viga (ver Figura 9).

Estas proporções também se aplicam ao vão de pórticos rolantes.

Para pórticos com balanços laterais, a relação p/b deve ser aplicada tomando para o valor de p a soma do vão com os balanços laterais, a menos que as pernas possam garantir um efeito enrijecedor adequado.

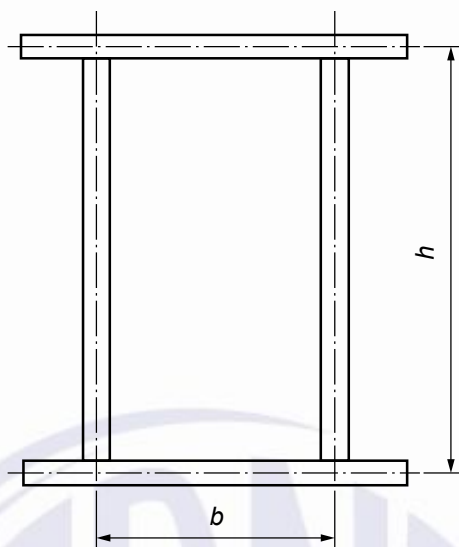


Figura 9 – Dimensões b e h da viga tipo caixa

NOTA A ISO 22986, *Cranes – Stiffness – Bridge and gantry cranes*, traz recomendações de deflexões e frequências naturais em equipamentos de elevação de carga que podem ser utilizadas como orientação, na ausência de uma imposição nas especificações dos clientes.

As vigas principais dos equipamentos devem ser projetadas com uma contraflecha cujo valor deve ser igual à deflexão ocasionada pelo peso próprio das vigas mais 50 % da soma do peso próprio do carro e da carga máxima. Fica a critério do fabricante a aplicação da contraflecha nos seguintes casos:

- a) quando o valor calculado for inferior a 5 mm ou 1/2000 do vão (o que for maior);
- b) para vigas fabricadas de perfis simples.

5.8 Estabilidade e segurança contra o movimento causado pela ação do vento

5.8.1 Finalidade

Esses requisitos especificam as condições a serem atendidas na verificação pelo cálculo da estabilidade dos equipamentos que estão sujeitos ao tombamento e arrastamento, assumindo que estes estejam apoiados em um caminho de rolamento firme e nivelado.

Quando for requerido que o equipamento opere em uma superfície inclinada, o fabricante deve levar em consideração as condições especificadas.

5.8.2 Estabilidade – Cálculos

5.8.2.1 Estabilidade

Um equipamento é considerado estável quando a soma algébrica dos momentos de estabilização for maior ou igual à soma dos momentos de tombamento.

5.8.2.2 Cálculos

Os cálculos devem ser realizados para verificar a estabilidade do equipamento calculando a soma dos momentos de tombamento e de estabilização, utilizando as cargas multiplicadas pelo fator de carga fornecido na Tabela 14.

Em todos os cálculos, a posição do equipamento e de seus componentes e o efeito de todas as cargas e forças devem ser considerados em sua combinação, direção e efeito menos favoráveis.

5.8.2.3 Efeito do deslocamento

Para equipamentos projetados para transladar com cargas, as forças induzidas pela variação máxima vertical permissível no caminho de rolamento, conforme especificado pelo fabricante, devem ser levadas em consideração, além de outras cargas especificadas na condição II da Tabela 14.

5.8.2.4 Efeito do local

Quando requerido, os efeitos de excitação apropriados para o local ou zona em particular devem ser considerados como uma condição adicional de carregamento, por exemplo, abalo sísmico.

5.8.2.5 Efeito das fixações

Nos cálculos mostrados na Tabela 14, devem ser consideradas as cargas induzidas pela massa do equipamento e de seus componentes, incluindo todos os dispositivos de içamento que são partes permanentes do equipamento em sua condição de trabalho.

5.8.2.6 Efeito da colisão

Para o caso de colisão (por exemplo, impacto no batente), os cálculos de estabilidade devem ser baseados nas considerações dinâmicas.

Tabela 14 – Combinações e fatores de carga a serem considerados (continua)

Condição	Carregamento	Fator de carga a ser considerado
I. Estabilidade básica	Cargas induzidas pelo peso próprio	1,0
	Carga aplicada	1,6 <i>P</i>
	Carga do vento	0
	Forças de inércia	0
II. Estabilidade dinâmica	Cargas induzidas pelo peso próprio	1,0
	Carga aplicada	1,35 <i>P</i>
	Carga do vento	1,0 <i>W1</i>
	Forças de inércia	1,0 <i>D</i>
III. Estabilidade inversa (Liberação repentina de carga)	Cargas induzidas pelo peso próprio	1,0
	Carga aplicada	-0,2 <i>P</i>
	Carga do vento	1,0 <i>W1</i>
	Forças de inércia	0

Tabela 14 (conclusão)

Condição	Carregamento	Fator de carga a ser considerado
IV. Carga do vento extremo	Cargas induzidas pelo peso próprio	1,0
	Carga aplicada	1,0 P_1
	Carga do vento	1,2 W_2
	Forças de inércia	0
V. Estabilidade durante a instalação ou desmontagem (ver Figura 10)	Cargas induzidas pelo peso próprio	1,0
	Carga aplicada	1,25 P_2
	Carga do vento	1,0 W_3
	Forças de inércia	1,0 D

onde

D são as forças de inércia devido ao acionamento;

P é a carga útil;

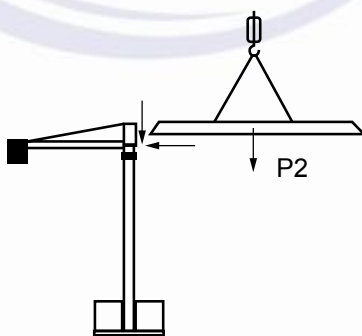
P_1 é o dispositivo de içamento da carga, fixo ao equipamento, por exemplo, moitão (fora de operação, o dispositivo de içamento deve ser considerado como parte do peso do equipamento e seus componentes);

P_2 é o peso da peça que está sendo instalada/removida durante a instalação ou desmontagem;

W_1 é o efeito do vento durante a operação;

W_2 é o efeito do vento fora de operação – efeitos de rajada de vento devem ser incluídos;

W_3 é o efeito do vento de operação W_1 ou o efeito do vento limite para montagem de acordo com o manual de instruções do fabricante.

Figura 10 – Exemplo: aplicação da carga P_2 para içamento de uma lança

5.8.3 Estabilidade contra o tombamento para trás em operação

A estabilidade contra o tombamento para trás é abrangida pela condição III.

5.8.4 Aplicação de cargas de vento

5.8.4.1 Em operação

As forças do vento em operação devem sempre ser aplicadas nas direções menos favoráveis.

5.8.4.2 Fora de operação

As forças do vento fora de operação também devem ser aplicadas nas direções menos favoráveis.

5.8.5 Base do equipamento

O fabricante do equipamento deve especificar as forças atuantes no solo ou na estrutura de sustentação. As informações fornecidas pelo fabricante devem estabelecer todas as condições aplicáveis para as quais as forças foram determinadas (incluindo o vento quando fora de serviço). Quando a base do equipamento oferece toda ou parte da estabilidade deste, o fabricante deve especificar os requisitos aplicáveis para a base do equipamento.

5.8.6 Deformação

Quando as deformações de segunda ordem afetarem o momento de tombamento em mais de 10 %, estas devem ser levadas em consideração para cada condição da Tabela 14. Caso contrário, as deformações de segunda ordem podem ser desconsideradas na verificação da estabilidade.

5.8.7 Resistência ao arrastamento causado pelo vento

A resistência ao arrastamento causado pelo vento pode ser comprovada pelo cálculo de todos os equipamentos sobre trilhos que operam em áreas abertas sob as condições da Tabela 15.

Tabela 15 – Arrastamento causado pelo vento

Condição	Carregamento	Fator de carga a ser considerado
1. Em serviço	Cargas induzidas pelo peso próprio	1,0
	Carga aplicada	1,35 <i>P</i>
	Carga do vento	1,2 <i>W</i> ₁
	Forças de inércia	1,0 <i>D</i>
2. Fora de serviço	Cargas induzidas pelo peso próprio	1,0
	Carga aplicada	1,0 <i>P</i> ₁
	Carga do vento	1,2 <i>W</i> ₂
	Forças de inércia	0

Quando garras de trilho ou dispositivos similares forem necessários para evitar arrastamento do equipamento fora do serviço, o manual do operador deve advertir que estes devem ser aplicados quando o limite do vento em serviço for atingido.

A resistência ao deslocamento devido ao atrito e os coeficientes de atrito mostrados na Tabela 16 devem ser aplicados.

Tabela 16 – Resistência ao deslocamento e coeficientes de atrito

Relação: Resistência ao deslocamento/carga radial		Coeficiente de atrito entre o trilho e:	
Mancais de buchas	Mancais de rolamento	a roda freada	a garra de trilho
0,02	0,005	0,14	0,25
NOTA Coeficientes de atrito maiores podem ser utilizados se puder ser demonstrado que eles estão presentes em todas as condições e qualidades de superfície (por exemplo, óleo, sujeira, gelo).			



Anexo A (normativo)

Projeto de juntas utilizando parafusos de alta resistência com torque controlado

A.1 Generalidades

Em 5.2.2.2.3.3 são estabelecidos os requisitos gerais a serem observados para a execução de juntas com parafusos de alta resistência.

Este Anexo fornece algumas instruções sobre a preparação das superfícies a serem unidas, coeficientes de atrito obtidos e os métodos de aperto.

A.2 Coeficiente de atrito μ

O coeficiente de atrito utilizado para o cálculo da força transmitida pelo atrito depende do material unido e da preparação das superfícies.

A preparação mínima antes da união consiste em remover todo vestígio de poeira, ferrugem, óleo e tinta escovando vigorosamente a superfície com uma escova metálica limpa. As manchas de óleo devem ser removidas com limpeza por chamas ou com a aplicação de produtos químicos apropriados (por exemplo, tetracloreto de carbono).

Uma preparação mais cuidadosa aumenta o coeficiente de atrito. Isto pode ser por jateamento, decapagem ou limpeza por chama de oxiacetileno realizada não mais que 5h antes do aperto. A escovação deve ser realizada somente antes da união.

Os coeficientes de atrito são fornecidos na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Valores de μ

Material unido	Superfícies preparadas normalmente (desengravar e escovar)	Superfícies especialmente preparadas (limpeza por chama, jateamento ou jateamento e pintura especial a base de zinco epóxi ou inorgânico)
Aços: EN 10025S235/S275/S355 ASTM A36/ASTM A 572 GR 50 ou equivalente	0,30	0,50

A.3 Aperto do parafuso

É necessário inserir duas arruelas, uma sob a cabeça do parafuso e a outra sob a porca. Estas arruelas devem ter um chanfro de 45° no mínimo, na borda interna, e devem ser posicionadas no lado da cabeça do parafuso ou da porca. Elas devem ter tratamento térmico para que sua dureza seja no mínimo igual à do metal do parafuso.

O valor da tensão induzida no parafuso deve atingir o valor determinado pelo cálculo.

Esta tensão, resultante do aperto, pode ser medida pelo cálculo do torque a ser aplicado ao parafuso e fornecida pela seguinte equação:

$$M_a = 1,10 \times C \times d \times F$$

onde

M_a é o torque aplicado, expresso em newtons x metro (N.m);

d é o diâmetro nominal do parafuso, expresso em milímetros (mm);

F é a força de tração nominal a ser induzida no parafuso, expressa em kilonewtons (kN);

C é um coeficiente que depende da forma da rosca, coeficiente de atrito nas roscas e entre a porca e a arruela.

Para parafusos com roscas métricas e arruelas no estado de fornecimento (levemente oleadas, sem ferrugem ou poeira):

$$C = 0,18$$

O esforço de tração no parafuso não pode exceder ao definido em 5.2.2.2.2.

A.4 Valor da área resistente dos parafusos

Ao determinar a tensão no parafuso, a área resistente deve ser calculada tomando a média aritmética do diâmetro do núcleo (menor) e o diâmetro efetivo da rosca. Estes valores são fornecidos na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Área resistente à tração dos parafusos

Diâmetro nominal mm	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
Área resistente à tração mm ²	36,6	58	84,3	115	157	192	245	303	353	459	561

A.5 Especificação dos parafusos

Os parafusos utilizados para este tipo de junta possuem limite elástico elevado.

A tensão de ruptura σ_R deve ser maior que os valores fornecidos na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Tensão de ruptura σ_R

$\sigma_E 0,2$ N/mm ²	σ_R N/mm ²
< 700	> $1,15 \times \sigma_E$
700 a 850	> $1,12 \times \sigma_E$
> 850	> $1,10 \times \sigma_E$

O diâmetro dos furos não pode exceder mais de 2 mm o diâmetro do parafuso.

A Tabela A.4 fornece, por parafuso e por superfície de atrito, os valores das forças transmissíveis no plano paralelo ao da junta, para parafusos de 1 000 N/mm² a 1 200 N/mm² com limite elástico de $\sigma_E = 900$ N/mm² para vários coeficientes de atrito, para os aços EN 10025 S235/S275/S355/ ASTM A36/ASTM A 572 GR 50 ou equivalente.

Para aplicar estes valores, o número de superfícies de atrito efetivas, conforme indicado na Figura A.1, deve ser determinado.

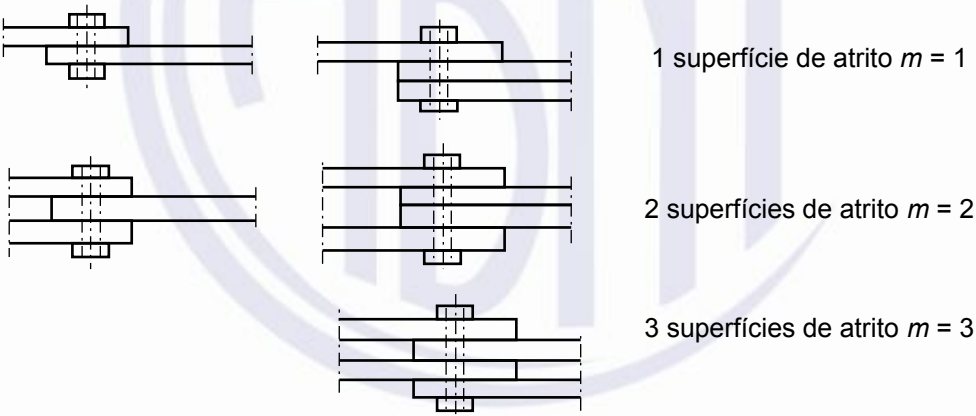


Figura A.1 – Número de superfícies de atrito efetivas

Para um parafuso com limite elástico de σ_E , os valores das forças e torques indicados na Tabela A.4 devem ser multiplicados pela relação $\sigma_E/900$.

Quando métodos especiais não são adotados para evitar o arrancamento da rosca, deve-se considerar $\sigma_a = 0,7 \sigma_E$, e, portanto, estes valores devem ser divididos por 1,14.

**Tabela A.4 – Forças transmissíveis no plano da junta, por parafuso e por superfície de atrito
(Parafusos de 1 000 N/mm²/1 200 N/mm²: $\sigma_E = 900 \text{ N/mm}^2$: $\sigma_a = 0,8 \times \sigma_E$)**

Diâmetro do parafuso mm	Área resistente à tração mm ²	Força de tração ^a kN	Torque aplicado N.m	Superfícies preparadas normalmente			Superfícies especialmente preparadas		
				Aços EN 10025 S235/S275/S355 ASTM A36/ASTM A 572 GR 50 ou equivalente			Aços EN 10025 S235/S275/S355 ASTM A36/ASTM A 572 GR 50 ou equivalente		
				$\mu = 0,30$			$\mu = 0,50$		
				Caso I kN	Caso II kN	Caso III kN	Caso I kN	Caso II kN	Caso III kN
10	58	41,7	82,7	8,3	9,4	11,4	13,9	15,7	18,9
12	84,3	60,6	144,0	12,1	13,6	16,5	20,2	22,8	27,5
14	115	82,7	229,0	16,5	18,6	22,5	27,5	31,0	37,6
16	157	113,0	358,0	22,6	25,5	30,8	37,7	42,5	51,4
18	192	138,0	492,0	27,6	31,0	37,6	46,0	51,8	62,7
20	245	176,0	697,0	35,2	39,7	48,0	58,5	66,1	80,0
22	303	218,0	950,0	43,6	49,3	59,7	72,5	82,0	99,0
24	353	254,0	1 200,0	50,8	57,1	69,4	84,5	95,5	115,5
27	459	330,0	1 760,0	66,0	74,2	90,0	110,0	124,0	150,0

^a Esta Tabela somente se aplica a parafusos que foram tensionados por métodos que não produzem torção no corpo do parafuso, como no caso do uso de tensionador hidráulico. Para outros métodos de torqueamento, o esforço de tração deve ser calculado conforme 5.2.2.2.2.

Anexo B (informativo)

Tensões nas juntas soldadas

Este anexo fornece indicações gerais para o projeto de equipamentos de elevação de carga, conforme a seguir:

- a) todos os métodos de cálculo pressupõem a necessidade de uma junta executada apropriadamente, ou seja, uma solda com penetração correta e forma adequada para que a junção entre componentes a serem unidos e o cordão de solda fiquem livres de descontinuidade ou mudança brusca de secção, bem como crateras ou entalhes devido a mordeduras;

O projeto da solda deve ser adaptado às forças a serem transmitidas e literatura especializada também deve ser consultada.

Deve-se observar que a resistência de uma junta soldada melhora significativamente se a superfície da solda passar por acabamento por esmerilhamento cuidadoso.

- b) não é necessário considerar as concentrações de tensão devido à concepção da junta ou tensões residuais;
- c) as tensões admissíveis nas soldas são aquelas determinadas em 5.2.2.3 e a tensão de comparação σ_{cp} no caso de tensões combinadas (de tração ou compressão) σ e a tensão de cisalhamento τ são fornecidas pela seguinte equação:

$$\sigma_{cp} = \sqrt{(\sigma^2 + 2 \times \tau^2)}$$

No caso de envolver tensões duplas σ_x e σ_y e a tensão de cisalhamento τ_{xy} , a seguinte equação deve ser aplicada:

$$\sigma_{cp} = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \times \sigma_y + 2 \times \tau_{xy}^2)}$$

- d) em um filete de solda, a largura da secção considerada é a profundidade no fundo da garganta do cordão e sua extensão é o comprimento efetivo da solda sem as crateras finais (Figura B.1).

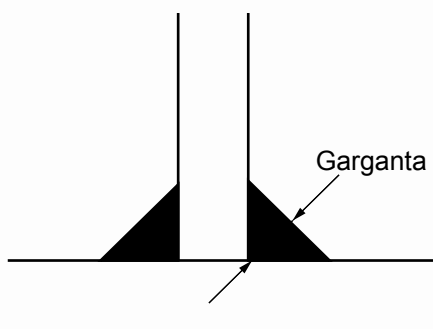


Figura B.1 – Solda de filete

O comprimento não precisa ser reduzido se a junta se fechar em si mesma ou se cuidados especiais forem tomados para limitar o efeito das crateras.

Prestar atenção ao fato de que as falhas por fadiga em juntas soldadas raramente ocorrem no próprio cordão da solda, mas, geralmente, ao lado da mesma no metal-base.

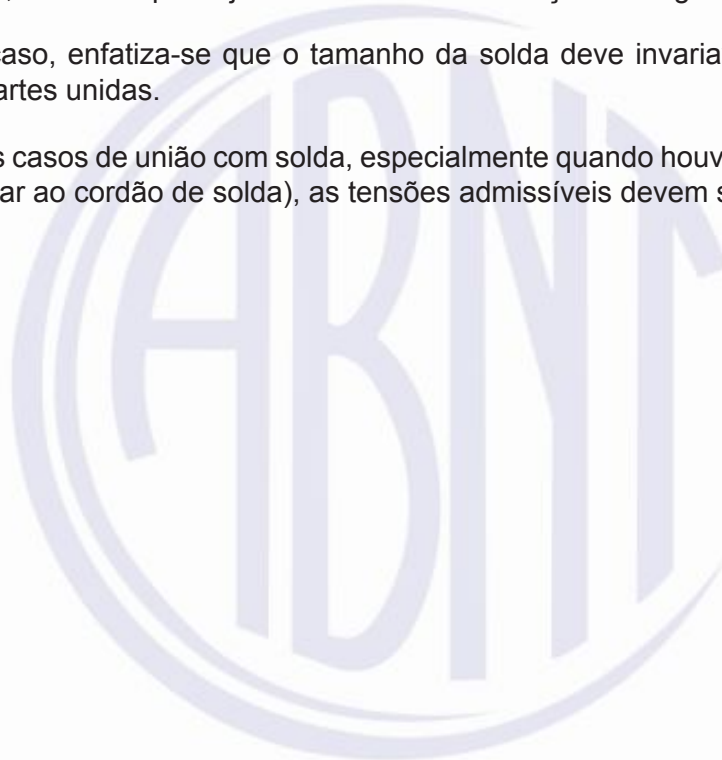
As tensões $\sigma_{\min.}$ e $\sigma_{\max.}$ para os cálculos de resistência à fadiga para o metal-base ao lado do cordão da solda podem, em geral, ser calculadas utilizando os métodos clássicos de resistência dos materiais.

Para verificar a resistência à fadiga da solda, geralmente basta confirmar se a solda é capaz de transmitir as mesmas cargas que o metal-base.

Este critério não é obrigatório quando as partes unidas forem superdimensionadas em relação às forças realmente transmitidas. Quando este for o caso, basta dimensionar o cordão de solda de acordo com essas forças, contanto que seja realizada uma verificação à fadiga de acordo com o Anexo D.

Seja qual for o caso, enfatiza-se que o tamanho da solda deve invariavelmente ser proporcional à espessura das partes unidas.

Em determinados casos de união com solda, especialmente quando houver uma carga transversal (ou seja, perpendicular ao cordão de solda), as tensões admissíveis devem ser reduzidas (ver 5.2.2.3).



Anexo C (informativo)

Verificação de elementos estruturais sujeitos à flambagem global e localizada

O objetivo deste Anexo não é adotar uma posição específica sobre a verificação em relação à flambagem global e localizada de elementos estruturais, deixando a critério do fabricante a escolha do método de cálculo, cuja origem deve ser justificada.

C.1 Verificação de elementos estruturais sujeitos à flambagem global

Esta Norma recomenda o uso de um método prático nos casos mais simples, que consiste em majorar a tensão calculada nos diversos casos de solicitação definidos em 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3 da ABNT NBR 8400-1, por um coeficiente de flambagem ω que depende do índice de esbeltez do elemento, e verificando se em cada um destes casos a tensão majorada permanece menor que as tensões fornecidas nas Tabelas 9 e 10.

Os valores de ω são fornecidos nas tabelas descritas abaixo, como uma função do índice de esbeltez λ :

- Tabela C.1 – Perfis laminados em aço com $\sigma_E = 240 \text{ N/mm}^2$;
- Tabela C.2 – Perfis laminados em aço com $\sigma_E = 355 \text{ N/mm}^2$;
- Tabela C.3 – Tubos em aço com $\sigma_E = 240 \text{ N/mm}^2$;
- Tabela C.4 – Tubos em aço com $\sigma_E = 355 \text{ N/mm}^2$.

C.1.1 Determinação dos comprimentos efetivos para cálculo do índice de esbeltez λ

Os comprimentos de flambagem L_{fb} para o cálculo do índice de esbeltez λ são determinados através da seguinte equação:

$$L_{fb} = K \times L \quad (\text{Os valores de } K \text{ para diferentes condições de vínculos são fornecidos na Figura C.1}).$$

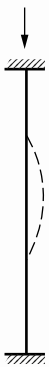
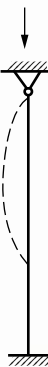
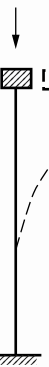

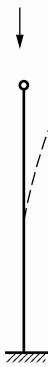





Tipo de fixação (a forma flambada é mostrada pela linha tracejada)						
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Valor teórico de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valor de projeto de K	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Representação esquemática das condições de extremidade		Sem rotação e sem translação				
		Com rotação e sem translação				
		Sem rotação e com translação				
		Com rotação e com translação				

Figura C.1 – Valores de K para diferentes condições de vínculos

Na dúvida sobre a influência dos engastamentos existentes nas extremidades de uma barra, sua influência não é considerada e a barra é calculada como sendo articulada em suas duas extremidades e, por conseguinte, toma-se como comprimento de flambagem o comprimento real ($K = 1$).

C.1.2 Caso de barras submetidas à compressão e flexão

No caso de barras carregadas excentricamente ou carregadas axialmente com um momento, causando flexão na barra, verificar pelas duas equações descritas a seguir:

$$\frac{F}{S} + \left(\frac{M_f \times v}{I} \right) \leq \sigma_a$$

e

$$\frac{\omega \times F}{S} + 0,9 \left(\frac{M_f \times v}{I} \right) \leq \sigma_a$$

onde

F é a carga compressiva aplicada à barra;

S é a área da seção da barra;

M_f é o momento fletor na seção avaliada;

v é a distância do ponto mais afastado em relação à linha neutra;

I é o momento de inércia da barra.

ou efetuar o cálculo preciso em termos das deformações sofridas pela barra sob o efeito da flexão e compressão combinadas, por integração ou por aproximações sucessivas.

**Tabela C.1 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbeltez λ
para perfis laminados em aço $\sigma_E = 240 \text{ N/mm}^2$**

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08
30	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13
40	1,14	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20
50	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
60	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,39	1,40
70	1,41	1,42	1,44	1,45	1,46	1,48	1,49	1,50	1,52	1,53
80	1,55	1,56	1,58	1,59	1,61	1,62	1,64	1,66	1,68	1,69
90	1,71	1,73	1,74	1,76	1,78	1,80	1,82	1,84	1,86	1,88
100	1,90	1,92	1,94	1,96	1,98	2,00	2,02	2,05	2,07	2,09
110	2,11	2,14	2,16	2,18	2,21	2,23	2,27	2,31	2,35	2,39
120	2,43	2,47	2,51	2,55	2,60	2,64	2,68	2,72	2,77	2,81
130	2,85	2,90	2,94	2,99	3,03	3,08	3,12	3,17	3,22	3,26
140	3,31	3,36	3,41	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75
150	3,80	3,85	3,90	3,95	4,00	4,06	4,11	4,16	4,22	4,27
160	4,32	4,38	4,43	4,49	4,54	4,60	4,65	4,71	4,77	4,82
170	4,88	4,94	5,00	5,05	5,11	5,17	5,23	5,29	5,35	5,41
180	5,47	5,53	5,59	5,66	5,72	5,78	5,84	5,91	5,97	6,03
190	6,10	6,16	6,23	6,29	6,36	6,42	6,49	6,55	6,62	6,69
200	6,75	6,82	6,89	6,96	7,03	7,10	7,17	7,24	7,31	7,38
210	7,45	7,52	7,59	7,66	7,73	7,81	7,88	7,95	8,03	8,10
220	8,17	8,25	8,32	8,40	8,47	8,55	8,63	8,70	8,78	8,86
230	8,93	9,01	9,09	9,17	9,25	9,33	9,41	9,49	9,57	9,65
240	9,73	9,81	9,89	9,97	10,05	10,14	10,22	10,30	10,39	10,47
250	10,55									

**Tabela C.2 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbeltez λ
para perfis laminados em aço $\sigma_E = 355 \text{ N/mm}^2$**

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11
30	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18
40	1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27
50	1,28	1,30	1,31	1,32	1,33	1,35	1,36	1,37	1,39	1,40
60	1,41	1,43	1,44	1,46	1,48	1,49	1,51	1,53	1,54	1,56
70	1,58	1,60	1,62	1,64	1,66	1,68	1,70	1,72	1,74	1,77
80	1,79	1,81	1,83	1,86	1,88	1,91	1,93	1,95	1,98	2,01
90	2,05	2,10	2,14	2,19	2,24	2,29	2,33	2,38	2,43	2,48
100	2,53	2,58	2,64	2,69	2,74	2,79	2,85	2,90	2,95	3,01
110	3,06	3,12	3,18	3,23	3,29	3,35	3,41	3,47	3,53	3,59
120	3,65	3,71	3,77	3,83	3,89	3,96	4,02	4,09	4,15	4,22
130	4,28	4,35	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69	4,75	4,82	4,89
140	4,96	5,04	5,11	5,18	5,25	5,33	5,40	5,47	5,55	5,62
150	5,70	5,78	5,85	5,93	6,01	6,09	6,16	6,24	6,32	6,40
160	6,48	6,57	6,65	6,73	6,81	6,90	6,98	7,06	7,15	7,21
170	7,32	7,41	7,49	7,58	7,67	7,76	7,85	7,94	8,03	8,12
180	8,21	8,30	8,39	8,48	8,58	8,67	8,76	8,86	8,95	9,05
190	9,14	9,24	9,34	9,44	9,53	9,63	9,73	9,83	9,93	10,03
200	10,13	10,23	10,34	10,44	10,54	10,65	10,75	10,85	10,96	11,06
210	11,17	11,28	11,38	11,49	11,60	11,71	11,82	11,93	12,04	12,15
220	12,26	12,37	12,48	12,60	12,71	12,82	12,94	13,05	13,17	13,28
230	13,40	13,52	13,63	13,75	13,87	13,99	14,11	14,23	14,35	14,47
240	14,59	14,71	14,83	14,96	15,08	15,20	15,33	15,45	15,58	15,71
250	15,83									

Tabela C.3 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbeltez λ para tubos em aço $\sigma_E = 240 \text{ N/mm}^2$

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02
30	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06
40	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11
50	1,12	1,13	1,11	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18
60	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27
70	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37
80	1,39	1,40	1,41	1,42	1,44	1,46	1,47	1,48	1,50	1,51
90	1,53	1,54	1,56	1,58	1,59	1,61	1,63	1,64	1,66	1,68
100	1,70	1,73	1,76	1,79	1,83	1,87	1,90	1,94	1,97	2,01
110	2,05	2,08	2,12	2,16	2,20	2,23				

NOTA Para $\lambda > 115$, adotar o valor de ω da Tabela C.1.

Tabela C.4 – Valor do coeficiente ω em termos do índice de esbeltez λ para tubos em aço $\sigma_E = 355 \text{ N/mm}^2$

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05
30	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,10
40	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17
50	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27
60	1,28	1,30	1,31	1,32	1,33	1,35	1,36	1,38	1,39	1,41
70	1,42	1,44	1,46	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59
80	1,62	1,66	1,71	1,75	1,79	1,83	1,88	1,92	1,97	2,01
90	2,05									

NOTA Para $\lambda > 90$, adotar o valor de ω na Tabela C.2.

NOTA Os valores de ω nas Tabelas C.3 e C.4 são válidos para calcular o caso de uma barra carregada axialmente consistindo de um tubo simples cujo diâmetro é igual a pelo menos seis vezes a sua espessura.

C.2 Verificação de elementos estruturais sujeitos a flambagem localizada

C.2.1 Tensão crítica de flambagem

Do ponto de vista teórico, a tensão crítica de flambagem σ_{Vcr} é estimada como um múltiplo da tensão de Euler fornecida pela seguinte equação:

$$\sigma_R^E = \frac{\pi^2 E \times (e/b)^2}{12 \times (1 - \eta^2)}$$

representando a tensão crítica de flambagem de uma chapa de espessura e , tendo uma largura igual a b , sendo esta a dimensão da chapa medida na direção perpendicular às tensões de compressão (ver Figura C.2).

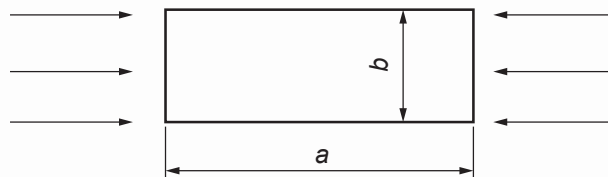


Figura C.2 – Chapa em compressão

Na equação mostrada acima, E é o módulo de elasticidade e η o coeficiente de Poisson.

Para aços normais nos quais $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ e $\eta = 0,3$, a tensão Euler torna-se:

$$\sigma_R^E = 189\,800 \times (e/b)^2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

A tensão crítica de flambagem σ_{vcr} deve ser um múltiplo deste valor de onde para o caso de compressão:

$$\sigma_{cr}^v = K_\sigma \times \sigma_R^E \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

No caso de cisalhamento, a tensão crítica é:

$$\tau_{cr}^v = K_\tau \times \sigma_R^E \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Os coeficientes K_σ e K_τ conhecidos como os coeficientes de flambagem dependem:

- da relação $\alpha = a/b$ dos dois lados da chapa;
- da maneira como a chapa é apoiada ao longo das bordas;
- do tipo de carregamento sofrido pela chapa no seu plano;
- de um reforço eventual da chapa.

Os valores de K_σ e K_τ são fornecidos a seguir para alguns casos simples (ver Tabela C.5).

Para casos mais complexos, consultar literatura especializada.

Para os casos de compressão e cisalhamento combinados, considerar o procedimento a seguir.

Adotando σ e τ para as tensões calculadas na compressão e no cisalhamento, a tensão de comparação crítica $\sigma_{cr.c}^v$ é determinada a partir da seguinte equação:

$$\sigma_{cr.c}^v = \frac{\sqrt{(\sigma^2 + 3 \times \tau^2)}}{\frac{1+\psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^v} + \sqrt{\left(\frac{3-\psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^v}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}^v}\right)^2}}$$

sendo ψ definido na Tabela C.5.

NOTA As equações mostradas anteriormente que fornecem as tensões críticas σ_{cr}^v e $\sigma_{cr.c}^v$ são aplicadas somente quando os valores determinados dessa forma estiverem abaixo do limite de proporcionalidade (ou seja, 190 N/mm^2 para aço com $\sigma_E = 240\text{ N/mm}^2$ e 290 N/mm^2 para aço com $\sigma_E = 355\text{ N/mm}^2$).

Para os demais aços estruturais, quando não conhecidos, utilizar a seguinte relação para o limite de proporcionalidade:

$$\sigma_P = 0,76 \times \sigma_E$$

De forma similar, a equação fornecendo τ_{cr}^V deve ser aplicada somente quando o valor $\sqrt{3} \times \tau_{cr}^V$ estiver abaixo do limite de proporcionalidade.

Sempre que as equações fornecerem valores acima desses limites, é necessário adotar um valor crítico limite, obtido multiplicando o valor crítico calculado pelo coeficiente ρ fornecido na Tabela C.6, que também indica os valores reduzidos correspondentes aos diversos valores calculados de σ_{cr}^V e τ_{cr}^V .

Para aços estruturais com valores de tensão de escoamento intermediários ou superiores aos da Tabela C.6, a tensão crítica reduzida pode ser obtida da expressão descrita a seguir:

$$\sigma_{cr.cR}^V = \frac{\sigma_E \times (\sigma_{cr.c}^V)^2}{0,1836 \sigma_E^2 + (\sigma_{cr.c}^V)^2}$$

Tabela C.5 – Valores dos coeficientes de flambagem K_σ e K_τ para chapas apoiadas em suas quatro bordas

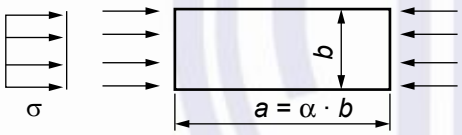

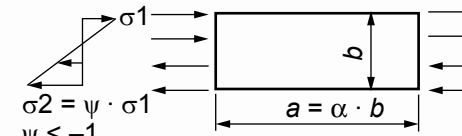
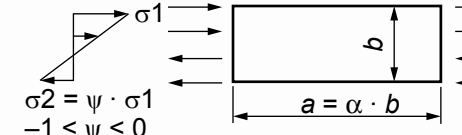
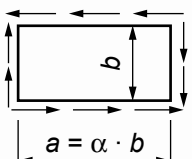
Nº	Caso	$\alpha = a / b$	K_σ ou K_τ
1	Compressão uniforme simples 	$\alpha > 1$ $\alpha < 1$	$K_\sigma = 4$ $K_\sigma = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right)^2$
2	Compressão não uniforme 	$\alpha > 1$ $\alpha < 1$	$K_\sigma = \left(\frac{8,4}{\psi + 1} \right)$ $K_\sigma = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right)^2 \times \frac{2,1}{\psi + 1,1}$
3	Flexão pura $\psi = -1$ ou flexão com tração preponderante 	$\alpha > 2/3$ $\alpha < 2/3$	$K_\sigma = 23,9$ $K_\sigma = 15,87 + \frac{1,87}{\alpha^2} + 8,6 \times \alpha^2$
4	Flexão com compressão preponderante $-1 < \psi < 0$ 		$K_\sigma = (1 + \psi) \times K' - \psi \times K'' + 10 \times \psi \times (1 + \psi)$ onde $K' =$ valor de K_σ para $\psi = 0$ no caso nº 2 $K'' =$ valor de K_σ para flexão pura (caso nº 3)
5	Cisalhamento puro 	$\alpha > 1$ $\alpha < 1$	$K_\tau = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2}$ $K_\tau = 4 + \frac{5,34}{\alpha^2}$

Tabela C.6 – Valores de ρ e tensões críticas reduzidas σ_{cr}^V , $\sigma_{cr.c}^V$ e τ_{cr}^V (N/mm²)

σ_{cr}^V ou $\sigma_{cr.c}^V$ calculada	τ_{cr}^V calculada	ρ	$\sigma_{cr.R}^V$ ou $\sigma_{cr.c.R}^V$ reduzida	$\tau_{cr.R}^V$ reduzida	σ_{cr}^V ou $\sigma_{cr.c}^V$ calculada	τ_{cr}^V calculada	ρ	$\sigma_{cr.R}^V$ ou $\sigma_{cr.c.R}^V$ reduzida	$\tau_{cr.R}^V$ reduzida
Aço com $\sigma_E = 240$ N/mm ²					Aço com $\sigma_E = 355$ N/mm ²				
190	110	1,00	190	110	290	168	1,00	290	168
200	116	0,97	194	113	300	173	0,98	294	169
210	121	0,94	197	114	310	179	0,96	297	172
220	127	0,91	200	116	320	185	0,94	300	174
230	133	0,88	202	117	330	191	0,92	303	175
240	139	0,85	204	118	340	196	0,90	306	176
250	145	0,82	206	119	350	202	0,88	308	177
260	150	0,80	208	120	360	208	0,86	309	178
280	162	0,76	212	122	380	220	0,82	312	180
300	173	0,72	215	124	400	231	0,79	316	182
340	197	0,65	221	128	440	254	0,73	322	185

C.2.2 Determinação das tensões admissíveis à flambagem localizada

Após determinar as tensões críticas de flambagem, conforme indicado anteriormente, a tensão admissível é obtida ao dividir a tensão crítica pelo coeficiente v_v definido em 5.4.

As tensões são determinadas para cada caso de solicitação, de acordo com o definido em 5.4; em seguida uma verificação é realizada para assegurar que essas tensões calculadas não excedam as tensões admissíveis determinadas, conforme indicado anteriormente.

No caso de compressão e cisalhamento combinados, a tensão de comparação crítica $\sigma_{cr.c}^V$ deve ser comparada com a tensão de comparação calculada a partir da equação fornecida em 5.2.1.3.

$$\sigma_{cp} = \sqrt{(\sigma^2 + 3 \times \tau^2)} \text{ ou seja, } \sigma_{cr.c}^V / \sigma_{cp} > v_v$$

C.2.3 Exemplo de verificação de flambagem localizada

Tomar o caso de uma viga de chapas de aço com $\sigma_E = 240$ N/mm², com um vão de 10 m, altura de 1,5 m, uma espessura de alma de 0,010 m, uma carga uniformemente distribuída de 162 kN/m e diafragmas distanciados de 1,25 m.

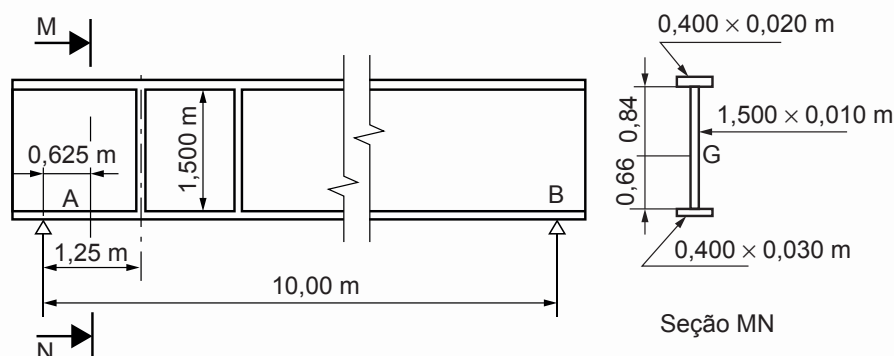


Figura C.3 – Dimensões da viga

Reações nos apoios: $A = B = 810 \text{ kN}$

Momento de inércia da viga = $1\,419\,000 \text{ cm}^4$

Verificação na seção MN, localizada a 0,625 m de A

Momento fletor em MN:

$$M_f = 810 \times 0,625 - \frac{162 \times 0,625^2}{2} = 474,7 \text{ kNm}$$

Tensão superior (compressão):

$$\sigma_1 = -\frac{474,7 \times 10^6 \times 0,84 \times 10^3}{1\,419\,000 \times 10^4} = -28 \text{ N/mm}^2$$

Tensão inferior (tração):

$$\sigma_2 = -\frac{474,7 \times 10^6 \times 0,66 \times 10^3}{1\,419\,000 \times 10^4} = -22 \text{ N/mm}^2$$

Estas tensões são calculadas nas bordas superiores e inferiores da alma.

Tensão de cisalhamento:

$$\frac{810 \times 10^3 - 162 \times 0,625 \times 10^3}{10 \times 1500} = 47 \text{ N/mm}^2$$

Flexão (caso 4 – compressão preponderante):

$$\psi = \frac{0,22}{-0,28} = -0,79$$

$$\alpha = \frac{1,25}{1,5} = 0,83 < 1$$

sendo $K_\sigma = (1 + \psi) \times K' - \psi \times K'' + 10 \times \psi \times (1 + \psi)$

Na qual

$$K' = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right)^2 \times \frac{2,1}{\psi + 1,1} = \left(0,83 + \frac{1}{0,83} \right)^2 \times \frac{2,1}{0 + 1,1} = 7,9$$

e

$$K'' = 23,9$$

onde

$$K_{\sigma} = (1 - 0,79) \times 7,9 + 0,79 \times 23,9 - 10 \times 0,79 \times (1 - 0,79) = 18,88$$

Tensão de Euler:

$$\sigma_R^E = 189\,800 \times (e/b)^2 = 189\,800 \times \left(\frac{10}{1500} \right)^2 = 8,4 \text{ N/mm}^2$$

resultando em uma tensão crítica de flambagem à compressão:

$$\sigma_{cr}^v = K_{\sigma} \times \sigma_R^E = 18,88 \times 8,4 = 158,6 \text{ N/mm}^2$$

Cisalhamento:

$$K_{\tau} = 4 + \frac{5,34}{\alpha^2} = 4 + \frac{5,34}{0,83^2} = 11,75$$

e

$$\tau_{cr}^v = K_{\tau} \times \sigma_R^E = 11,75 \times 8,4 = 99 \text{ N/mm}^2$$

A tensão de comparação crítica então se torna:

$$\sigma_{crxc}^v = \frac{\sqrt{(28^2 + 3,47^2)}}{\frac{1-0,79}{4} \times \frac{28}{158,5} + \sqrt{\left(\frac{3+0,79}{4} \times \frac{28}{158,5} \right)^2 + \left(\frac{47}{99} \right)^2}}$$

$$\sigma_{crxc}^v = 168 \text{ N/mm}^2$$

Conclusão:

A tensão de comparação no caso de tração (ou compressão) combinada com cisalhamento é fornecida em 5.2.1.3.

$$\sigma_{cp} = \sqrt{(\sigma^2 + 3 \times \tau^2)} = 86 \text{ N/mm}^2$$

Este valor é menor que a tensão crítica de flambagem definida em 5.3 para o caso de solicitação I.

$$\nu_v = 1,70 + 0,175 (\Psi - 1) = 1,7 + 0,175 (-0,79 - 1) = 1,387$$

$$\frac{168}{1,387} = 121 \text{ N/mm}^2$$

A tensão admissível de flambagem, portanto, não é excedida no caso de solicitação I.

Naturalmente, uma verificação deve ser realizada para assegurar que as tensões de flambagem admissíveis não são excedidas nos casos de solicitação II e III.

C.2.4 Verificação de flambagem para tubos circulares

Tubos circulares com parede fina como, por exemplo, tubos grandes que são submetidos à compressão central ou axial excêntrica, devem ser verificados para flambagem local se:

$$\frac{t}{r} \leq 25 \times \frac{\sigma_E}{E}$$

onde

t é a espessura da parede;

r é o raio a partir do meio da espessura da parede;

σ_E é o limite elástico do tipo de aço, conforme Tabela 9;

E é o módulo de elasticidade do aço.

A tensão de flambagem ideal σ_i^v pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$\sigma_i^v = 0,2 \times E \times \frac{t}{r}$$

Em todos os casos onde σ_i^v estiver situado acima do limite de proporcionalidade do aço estrutural, a tensão de flambagem ideal σ_i^v deve ser reduzida para σ^v por meio do fator ρ .

Com um espaçamento máximo de $10r$, reforços transversais devem ser providenciados cujo momento de inércia deve ser no mínimo:

$$I = \frac{r \times t^3}{2} \sqrt{\frac{r}{t}}$$

O momento de inércia é calculado com as seguintes equações:

- a) disposição central do reforço F (Figura C.4, centro de gravidade da seção do reforço no plano mediano da espessura de parede);

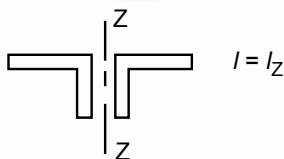


Figura C.4 – Disposição central do reforço F

$$I = I_Z$$

- b) disposição excêntrica do reforço F (Figura C.5, centro de gravidade da seção F_2 do reforço fora do plano mediano da parede 1).

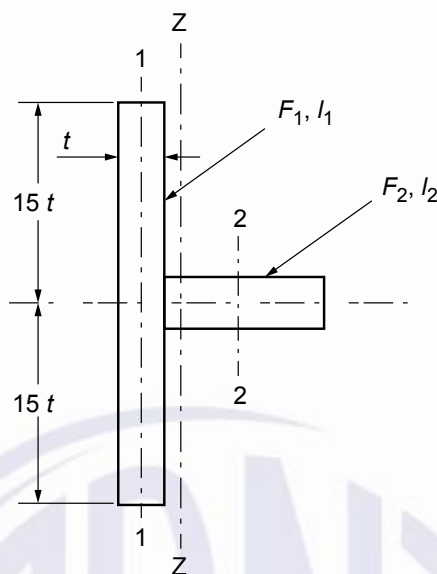


Figura C.5 – Disposição excêntrica do reforço F

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + F_1 \times e_1^2 + F_2 \times e_2^2$$

É aceito que este cálculo de σ_i^v e σ^v , respectivamente, leva em consideração as divergências geométricas entre as superfícies real e ideal do tubo, devido aos defeitos locais de construção, até a dimensão de $t/2$.

Anexo D (normativo)

Verificação de elementos estruturais sujeitos a fadiga

D.1 Generalidades

Deve-se lembrar que a fadiga é uma das causas de falha contempladas em 5.5 e, portanto, a verificação à fadiga é um adicional em relação ao limite elástico, flambagem global ou flambagem local.

Se as tensões admissíveis à fadiga, conforme determinado a seguir, forem maiores do que as permitidas para outras condições, isto indica que as dimensões dos componentes não são determinadas pela verificação à fadiga.

Em 5.6 estão relacionados os parâmetros que devem ser considerados ao verificar os componentes estruturais à fadiga.

O objetivo deste Anexo primeiramente é classificar as diversas juntas de acordo com o seu efeito de entalhe, conforme definido em 5.6.2 e, em seguida, determinar para estes vários efeitos de entalhe e para cada grupo de classificação do componente, conforme definido na ABNT NBR 8400-1, 5.1.4, as tensões admissíveis à fadiga como uma função do coeficiente κ definido em 5.6.4.

Estas tensões admissíveis à fadiga foram determinadas como resultado dos ensaios realizados em corpos de prova com diferentes efeitos de entalhe e submetidas a vários espectros de carga. Elas foram determinadas com base nos valores de tensão que nos ensaios garantiram 90 % de sobrevivência, incluindo um fator de segurança de 4/3.

Na prática, uma estrutura consiste em elementos que foram soldados, rebitados ou aparafusados e a experiência mostra que o comportamento de um elemento difere bastante de um ponto para o outro. A região próxima de uma junta constitui invariavelmente um ponto fraco que estará vulnerável, conforme o tipo de junta empregado.

Examina-se, desta forma, em primeiro estágio o efeito da fadiga sobre os elementos, distantes de qualquer junta e nas proximidades imediatas das juntas. Em segundo estágio, examina-se a resistência à fadiga dos elementos de junta propriamente ditos (cordões de solda, rebites e parafusos).

D.2 Verificação de elementos estruturais

O ponto de partida é a resistência à fadiga do metal contínuo distante de uma junta e, geralmente, distante de um ponto no qual uma concentração de tensão e por consequência, uma diminuição da resistência à fadiga pode ocorrer.

Para considerar a redução de resistência próxima às juntas, como resultado da presença de furos ou soldas que produzem alterações de secção, os efeitos dos entalhes ao redor destas juntas, que caracterizam as concentrações de tensão causadas pela presença de descontinuidades no metal, são examinados.

Estes efeitos dos entalhes causam uma redução das tensões admissíveis e a extensão depende do tipo de descontinuidade encontrada, ou seja, do método de montagem utilizado.

Para classificar a importância destes efeitos dos entalhes, as várias formas de construção de juntas são divididas em categorias conforme descrito a seguir:

a) partes não soldadas

Estes elementos apresentam três casos de construção.

Caso W_0 está relacionado ao próprio material sem o efeito do entalhe.

Casos W_1 e W_2 estão relacionados aos elementos perfurados (ver Tabela D.1).

b) partes soldadas

Estas juntas estão organizadas por ordem de severidade do efeito do entalhe, aumentando de K_0 até K_4 , correspondendo às partes estruturais localizadas próximas dos filetes de solda.

A Tabela D.3 fornece algumas indicações para os entalhes, de acordo com a qualidade e a classificação da solda e de várias juntas que são utilizadas com mais frequência, na construção de equipamentos de elevação.

D.2.1 Determinação das tensões admissíveis à fadiga para solicitações de tração e compressão

Os valores-base que foram utilizados para determinar as tensões admissíveis na tração e compressão são aqueles resultantes da aplicação de uma tensão alternada constante $\pm \sigma_w$ ($\kappa = -1$) fornecendo uma taxa de sobrevivência de 90 % nos ensaios, a qual um fator de segurança de 4/3 foi aplicado.

Para considerar o número de ciclos e o espectro de tensão, os valores σ_w foram determinados para cada grupo de classificação do elemento, o qual leva em consideração estes dois parâmetros.

Para partes não soldadas, os valores σ_w são idênticos para diversos aços de menor grau de resistência.

Estes valores são mais altos para aços de maior grau de resistência.

Para partes soldadas, os valores σ_w são considerados idênticos para diversos tipos de aços estruturais de baixa e média resistência.

Tabela D.1 – Valores de σ_w (N/mm²) de acordo com o grupo de componentes e caso de construção

Grupo do componente	Componentes não soldados						Componentes soldados				
	Casos de construção						Casos de construção				
	W_0		W_1		W_2		(S235/S275/S355/ASTM A36/ASTM A572 GR 50 ou equivalente)				
	S235/ S275 ASTM A36	S355 ASTM A572 GR 50	S235/ S275 ASTM A36	S355 ASTM A572 GR 50	S235/ S275 ASTM A36	S355 ASTM A572 GR 50	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4
E1	249,1	298,0	211,7	253,3	174,4	208,6	(361,9)	(323,1)	(271,4)	193,1	116,3
E2	224,4	261,7	190,7	222,4	157,1	183,2	(293,8)	262,3	220,3	157,4	94,4
E3	202,2	229,8	171,8	195,3	141,5	160,8	238,4	212,9	178,8	127,7	76,6
E4	182,1	201,8	154,8	171,5	127,5	141,2	193,5	172,8	145,1	103,7	62,2
E5	164,1	177,2	139,5	150,6	114,9	124,0	157,1	140,3	117,8	84,2	50,5
E6	147,8	155,6	125,7	132,3	103,5	108,9	127,5	113,8	95,6	68,3	41,0
E7	133,2	136,6	113,2	116,2	93,2	95,7	103,5	92,4	77,6	55,4	33,3
E8	120,0	120,0	102,0	102,0	84,0	84,0	84,0	75,0	63,0	45,0	27,0

Os valores entre parênteses são maiores que 0,75 vez a tensão de ruptura e são somente valores teóricos (ver NOTA 2).

As seguintes equações fornecem para todos os valores de κ as tensões admissíveis à fadiga.

a) $\kappa \leq 0$

— para tração:

$$\sigma_t = \sigma_w \times \frac{5}{(3 - 2 \times \kappa)} \quad (D.1)$$

— para compressão:

$$\sigma_c = \sigma_w \times \frac{2}{(1 - \kappa)} \quad (D.2)$$

σ_w é fornecido na Tabela D.1.

b) $\kappa > 0$

— para tração:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_0}{\left[1 - \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{+1}}\right)\right]} \quad (D.3)$$

— para compressão:

$$\sigma_c = 1,2 \times \sigma_t \quad (D.4)$$

onde

σ_0 é a tensão de tração para $\kappa = 0$, fornecida pela Equação D.1 cujo valor é:

$$\sigma_0 = 1,66 \times \sigma_W$$

σ_{+1} é a tensão de tração para $\kappa = +1$ que é a tensão de ruptura σ_R dividida pelo coeficiente de segurança 4/3:

$$\sigma_{+1} = 0,75 \times \sigma_R$$

σ_t está limitado em todo caso a $0,75 \times \sigma_R$.

Como ilustração, a Figura D.1 mostra curvas fornecendo as tensões admissíveis como uma função da razão κ para os seguintes casos:

- aço S355/ASTM A 572 GR 50;
- esforço de tração predominante;
- grupo E6;
- casos de construção W_0 , W_1 , W_2 para componentes não soldados e casos de construção para juntas K_0 a K_4 .

As tensões admissíveis foram limitadas a 240 N/mm^2 , ou seja, a tensão admissível adotada para a verificação em relação à tensão de ruptura.

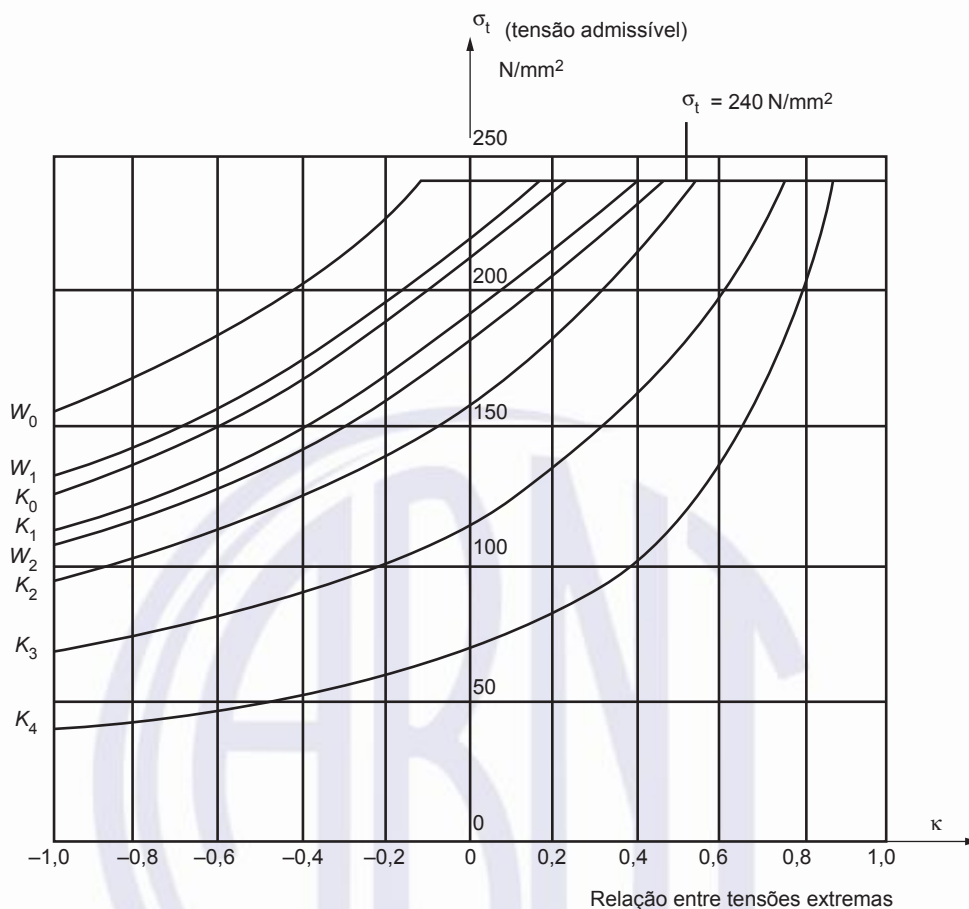


Figura D.1 – Tensão admissível para aços S355/ASTM A 572 GR 50 (tração, grupo E6)

D.2.2 Tensões admissíveis de cisalhamento no material base de partes estruturais

Para cada grupo de E1 a E8, considera-se a tensão admissível à fadiga na tração do caso W_0 dividido por $\sqrt{3}$:

$$\tau_a = \frac{\sigma_t \text{ do caso } W_0}{\sqrt{3}}$$

D.2.3 Tensões admissíveis para o caso de cargas combinadas na tração (ou compressão) e cisalhamento

Neste caso, as tensões admissíveis para fadiga para cada carga normal em tração (ou compressão) σ_{xa} e σ_{ya} e cisalhamento τ_{xya} são determinadas assumindo que cada uma atua separadamente adotando respectivamente os seguintes valores κ de acordo com 5.6.4:

$$\kappa_x = \frac{\sigma_x \text{ mín.}}{\sigma_x \text{ máx.}} \kappa_{xy} = \frac{\sigma_y \text{ mín.}}{\sigma_y \text{ máx.}} \kappa_{xy} \frac{\tau_{xy} \text{ mín.}}{\tau_{xy} \text{ máx.}}$$

Em seguida, as três condições a seguir são verificadas:

$$\sigma_x \text{ máx.} < \sigma_{xa} \quad \sigma_y \text{ máx.} < \sigma_{ya} \quad \tau_{xy} \text{ máx.} < \tau_{xya}$$

Nenhuma das tensões máximas calculadas pode exceder o valor admissível de σ_a ou τ_a do caso de solicitação I em relação ao limite elástico (ver 5.2.1.1).

- a) se uma das tensões for acentuadamente maior do que as outras duas em um dos casos de solicitação é suficiente verificar o elemento à fadiga sob a carga correspondente, desprezando o efeito das outras duas;
- b) nos outros casos, além da verificação para cada carga assumida atuar sozinha, recomenda-se que a seguinte relação seja verificada (Equação D.5):

$$\left(\frac{\sigma_{xm\acute{a}x.}}{\sigma_{xa}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ym\acute{a}x.}}{\sigma_{ya}}\right)^2 - \sigma_{xm\acute{a}x.} \times \sigma_{ym\acute{a}x.} + \left(\frac{\tau_{xym\acute{a}x.}}{\tau_{xya}}\right)^2 \leq 1 \quad (D.5)$$

onde os valores de tensão σ_{xa} , σ_{ya} e τ_{xya} são os resultantes da aplicação das Equações (D.1), (D.2), (D.3) e (D.4) limitados a $0,75 \times \sigma_R$.

Como esta desigualdade constitui uma condição rigorosa, valores ligeiramente maiores que 1 são aceitáveis, porém neste caso é necessário verificar a seguinte relação:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{xm\acute{a}x.}}{\sigma_{xa}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ym\acute{a}x.}}{\sigma_{ya}}\right)^2 - \sigma_{xm\acute{a}x.} \times \sigma_{ym\acute{a}x.} + \left(\frac{\tau_{xym\acute{a}x.}}{\tau_{xya}}\right)^2} \leq 1,05$$

Observar também que os valores do módulo de σ_{xa} e módulo de σ_{ya} no denominador para o terceiro termo devem ser adotados como valores absolutos e para $\sigma_{xm\acute{a}x.}$ e $\sigma_{ym\acute{a}x.}$ sendo atribuídos seus valores algébricos.

Ao aplicar esta equação, ver as instruções fornecidas em 5.2.1.3.

Em outras palavras:

- executar a verificação combinando os valores máximos $\sigma_{xm\acute{a}x.}$, $\sigma_{ym\acute{a}x.}$ e $\tau_{xym\acute{a}x.}$ e comparando com as tensões admissíveis σ_{xa} , σ_{ya} e τ_{xya} calculadas com base nos valores mais desfavoráveis de κ ; ou
- procurar a combinação mais desfavorável realmente possível realizando a verificação com os seguintes valores:
 - a) $\sigma_{xm\acute{a}x.}$ e $\kappa_{xm\acute{a}x.}$ com os valores correspondentes de σ_y , τ_{xy} , κ_y e κ_{xy} ;
 - b) $\sigma_{ym\acute{a}x.}$ e $\kappa_{ym\acute{a}x.}$ com os valores correspondentes de σ_x , τ_{xy} , κ_x e κ_{xy} ;
 - c) $\tau_{xym\acute{a}x.}$ e $\kappa_{xym\acute{a}x.}$ com os valores correspondentes de σ_x , σ_y , κ_x e κ_y .

Neste contexto, ver NOTA em 5.2.1.3.

Para facilitar os cálculos, a Tabela D.2 fornece os valores admissíveis de:

$\tau_{xym\acute{a}x.}/\tau_{xya}$ como uma função de $\sigma_{xm\acute{a}x.}/\sigma_{xa}$ e de $\sigma_{ym\acute{a}x.}/\sigma_{ya}$

Na Tabela D.2, os valores de $\sigma_{xm\acute{a}x.}/\sigma_{xa}$ são fornecidos na coluna esquerda com a seguinte convenção: a relação é considerada positiva se $\sigma_{xm\acute{a}x.}$ e $\sigma_{ym\acute{a}x.}$ possuírem o mesmo sinal e negativa em caso contrário.

Tabela D.2 – Valores de $\tau_{xym\acute{a}x.}/\tau_{xya}$ em termos de $\sigma_{xm\acute{a}x.}/\sigma_{xa}$ e $\sigma_{ym\acute{a}x.}/\sigma_{ya}$

$\frac{\sigma_{xm\acute{a}x.}}{\sigma_{xa}}$	$\frac{\sigma_{ym\acute{a}x.}}{\sigma_{ya}}$										
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
+1,0	0	0,300	0,400	0,458	0,490	0,500	0,490	0,458	0,400	0,300	0
+0,9	0,300	0,436	0,520	0,575	0,608	0,625	0,625	0,608	0,575	0,520	0,436
+0,8	0,400	0,520	0,600	0,656	0,693	0,714	0,721	0,714	0,693	0,656	0,600
+0,7	0,458	0,575	0,656	0,714	0,755	0,781	0,794	0,781	0,781	0,755	0,714
+0,6	0,490	0,608	0,693	0,755	0,800	0,831	0,849	0,854	0,849	0,831	0,800
+0,5	0,500	0,625	0,714	0,781	0,831	0,866	0,889	0,900	0,900	0,889	0,866
+0,4	0,490	0,625	0,721	0,794	0,849	0,889	0,917	0,933	0,938	0,933	0,917
+0,3	0,458	0,608	0,714	0,794	0,854	0,900	0,933	0,954	0,964	0,964	0,954
+0,2	0,400	0,575	0,693	0,781	0,849	0,900	0,938	0,964	0,980	0,985	0,980
+0,1	0,300	0,520	0,656	0,755	0,831	0,889	0,933	0,964	0,985	0,995	0,995
0	0	0,436	0,600	0,714	0,800	0,866	0,916	0,964	0,980	0,995	1,000
-0,1		0,300	0,520	0,656	0,755	0,831	0,889	0,933	0,964	0,985	0,995
-0,2			0,400	0,575	0,693	0,781	0,849	0,900	0,938	0,964	0,980
-0,3			0,173	0,458	0,608	0,714	0,794	0,854	0,900	0,933	0,954
-0,4				0,265	0,490	0,625	0,721	0,781	0,849	0,889	0,917
-0,5					0,300	0,500	0,625	0,714	0,781	0,831	0,866
-0,6						0,300	0,490	0,608	0,693	0,755	0,800
-0,7							0,265	0,458	0,575	0,656	0,714
-0,8								0,173	0,400	0,520	0,600
-0,9										0,300	0,436
-1,0											0

NOTA Se $\sigma_{xm\acute{a}x.}$ e $\sigma_{ym\acute{a}x.}$ tiverem sinais opostos (tração ou compressão), ler os valores de $\tau_{xym\acute{a}x.}/\tau_{xya}$ iniciando pelos valores negativos de $\sigma_{xm\acute{a}x.}/\sigma_{xa}$.

NOTA 1 Ao aplicar as considerações anteriores é essencial levar em consideração os efeitos de flexão secundários que um método específico de construção pode causar nos elementos da estrutura.

NOTA 2 Ao consultar a Tabela D.1 de valores de σ_w , pode-se observar que no grupo E1 e E2, tensões muito mais altas do que aquelas geralmente permitidas nas estruturas são citadas. Estes valores são na verdade apenas teóricos obtidos pela extrapolação dos resultados dos ensaios em um grupo mais elevado (E3 a E8) com casos de entalhe médios e severos (K_2 , K_3 e K_4). Portanto, não há necessidade de atribuir nenhum significado material a estes valores entre parênteses e, considerá-los, poderia em alguns casos levar à conclusão de que uma construção do tipo K_0 ou K_1 poderia resistir melhor à fadiga do que um metal não soldado (caso W_0). Esta anomalia aparente ilustra o fato bem conhecido que nem sempre é necessário efetuar verificações de fadiga para grupos mais baixos com casos de entalhe leves a moderados.

Com relação aos cálculos, deve-se lembrar que estes valores teóricos de σ_w são utilizados somente para determinar as tensões admissíveis à fadiga σ_{xa} , σ_{ya} e τ_{xya} , para uso na Equação D.5, que abrange o caso de cargas combinadas.

Exemplos de cálculos são fornecidos no final deste Anexo.

D.3 Verificação dos meios de junção (soldas, parafusos, rebites)

D.3.1 Soldas

D.3.1.1 Cargas de tração e compressão nas soldas

Soldas sujeitas à fadiga, sob cargas de tração e compressão, são verificadas utilizando as mesmas tensões admissíveis do metal base.

NOTA O limite indicado em 5.2.2.3 para determinados casos específicos de tração transversal e compressão nos cordões de solda deve ser observado.

O Anexo B fornece algumas indicações para a determinação das tensões no cordão de solda.

D.3.1.2 Cargas de cisalhamento nas soldas

As tensões de fadiga por cisalhamento admissíveis nas soldas são determinadas dividindo as tensões admissíveis na tração para o caso K_0 por $\sqrt{2}$.

D.3.1.3 Cargas combinadas

O método exposto anteriormente para elementos estruturais é utilizado ao avaliar o efeito da fadiga nos cordões de solda submetidos a cargas combinadas variáveis.

D.3.2 Parafusos e rebites

D.3.2.1 Solicitações de tração

A fadiga devido às solicitações de tração variáveis de rebites não precisa ser considerada.

No caso de parafusos submetidos à tração, a verificação deve ser realizada conforme 5.2.2.2.2.

Neste contexto, deve-se observar que parafusos e, ainda mais importante, rebites submetidos à tração devem ser evitados sempre que possível.

D.3.2.2 Solicitações de cisalhamento e pressão diametral:

As solicitações de cisalhamento simples e múltiplo, conforme definido em 5.2.2.1.1, devem ser distinguidas (ver Figuras 4-a e 4-b).

As tensões de cisalhamento admissíveis à fadiga para parafusos e rebites são fixadas multiplicando as tensões admissíveis em tração para o caso W_2 por:

- 0,6 para cisalhamento simples;
- 0,8 para cisalhamento duplo ou múltiplo.

Os valores de pressão diametral admissível são obtidos multiplicando os valores de cisalhamento admissíveis nos parafusos e rebites por 2,5.

D.3.3 Classificação dos casos de construção para juntas

As juntas podem ser rebitadas, aparafusadas ou soldadas.

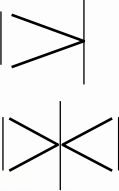
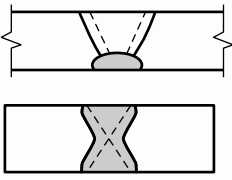
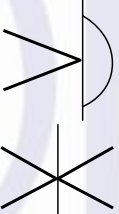
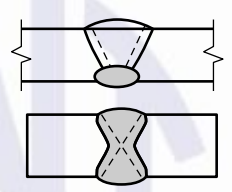
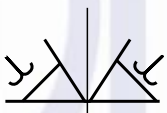

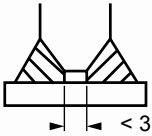
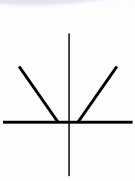
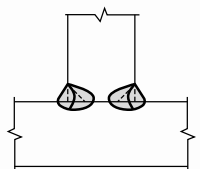
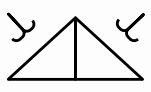

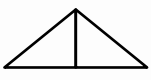
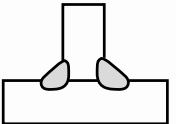
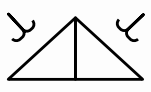

D.3.3.1 Qualidade das juntas soldadas

Os tipos de soldas mais comumente utilizados para equipamentos de elevação são as soldas de topo, soldas de topo de chanfro duplo e soldas de filete, de qualidade comum (Q.C.) ou qualidade especial (Q.E.), conforme especificado na Tabela D.3.

Os ensaios de solda também são estipulados para determinados tipos de junta.



Tabela D.3 – Qualidade da solda

Tipo de solda	Qualidade da solda	Execução da solda	Simbologia ISO 2553	Ilustração da solda	Ensaio na solda	
Solda de topo de penetração total	Qualidade especial (Q.E.)	A raiz da solda deve ser removida antes de executar a solda no dorso. Sem crateras nas extremidades. Cordão esmerilhado rente à chapa, paralelamente à direção das forças.			Verificação (por exemplo, com raio X) em 100 % da extensão do cordão.	P 100
	Qualidade comum (Q.C.)	Raiz da solda removida antes de executar a solda no dorso. Sem crateras nas extremidades.			Se a tensão calculada > 80 % da tensão admissível. Ou então, uma verificação aleatória de pelo menos 10% da extensão do cordão de solda.	P 100 P 10
	Qualidade especial (Q.E.)	Raiz da solda removida antes de executar a solda no dorso. Soldar bordas sem entalhes (mordeduras) e esmerilhadas se necessário. Soldas de penetração total.			Verificar para o caso de tensão de tração se a chapa na direção perpendicular a dos esforços está isenta de falha de laminação.	D
Solda K no ângulo formado por duas partes com chanfro em uma das partes a serem unidas no local da solda	Qualidade comum (Q.C.)	Largura sem penetração entre duas soldas < 3 mm. 				
	Qualidade especial (Q.E.)	Bordas das soldas sem entalhes (mordeduras) e esmerilhadas se necessário.			Verificar para o caso de tensão de tração, se a chapa na direção perpendicular a dos esforços está isenta de falha de laminação.	D
Filete de solda no ângulo formado por duas partes	Qualidade comum (Q.C.)					
	Qualidade especial (Q.E.)					

D.3.3.2 Casos de construção para juntas

Nas Tabelas a seguir, os vários casos de modos de montagem são classificados em termos da magnitude do efeito de entalhe produzido.

Deve-se observar que, com uma determinada solda, o efeito de entalhe difere de acordo com o tipo de carga ao qual a junta é submetida.

Por exemplo, uma junta soldada com filete é classificada no caso K_0 para cargas de tração ou compressão longitudinal ($K_{0,31}$) ou cisalhamento longitudinal ($K_{0,51}$) e nos casos K_3 ou K_4 para cargas de tração ou compressão transversal ($K_{3,2}$ ou $K_{4,4}$).

Tabela D.4 – Partes não soldadas

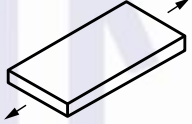

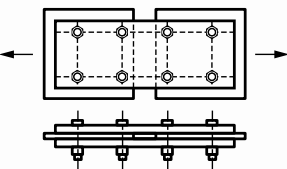
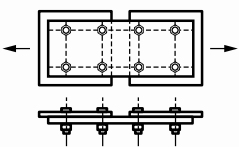
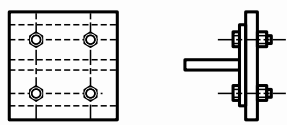
Caso W_0			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
W_0	Metal base, superfície homogênea. Partes sem juntas ou quebras na continuidade (barras sólidas) e sem efeitos de entalhe, salvo se o último puder ser calculado.		
Caso W_1			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
W_1	Partes perfuradas. Partes perfuradas para rebiteagem ou aparafusamento com rebites e parafusos carregadas até 20 % dos valores admissíveis. Partes perfuradas para juntas utilizando parafusos de alta resistência (ver 5.2.2.2.3.3), carregadas até 100 % dos valores admissíveis (ver 5.2.2.2.2.2).		
Caso W_2			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$W_{2.1}$	Partes perfuradas para rebiteagem ou aparafusamento nas quais os rebites ou parafusos são carregados em cisalhamento duplo ou múltiplo.		
$W_{2.2}$	Partes perfuradas para rebiteagem ou aparafusamento, nas quais os rebites ou parafusos são carregados em cisalhamento simples (admitindo cargas excêntricas), as partes não são apoiadas.		
$W_{2.3}$	Partes perfuradas para montagem com rebites ou parafusos carregados em cisalhamento simples, as partes são apoiadas ou guiadas.		

Tabela D.5 – Partes soldadas (continua)

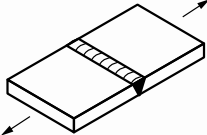
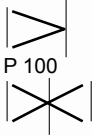
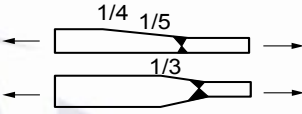
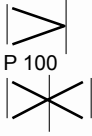
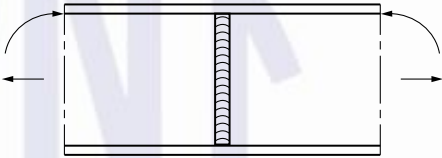
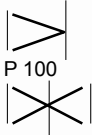
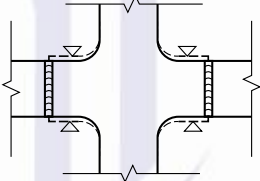
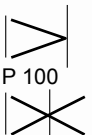
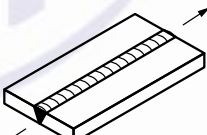
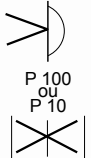
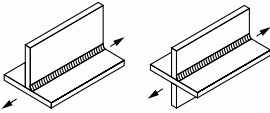
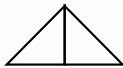
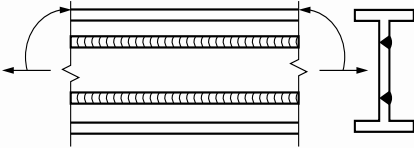
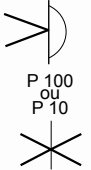
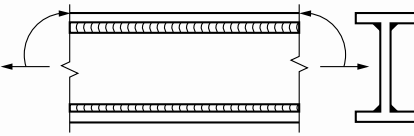
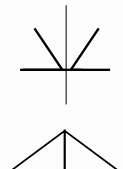
Caso K_0 – Baixa concentração de tensão			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{0,1}$	Partes soldadas com solda de topo (Q.E.) perpendicular à direção das forças.		
$K_{0,11}$	Partes de espessuras diferentes soldadas com solda de topo (Q.E.) perpendicular à direção das forças. Inclinação assimétrica: 1/4 a 1/5; inclinação simétrica: 1/3		
$K_{0,12}$	Solda de topo (Q.E.) em junta transversal da chapa da alma.		
$K_{0,13}$	União fixada por solda de topo (Q.E.) perpendicular à direção das forças.		
$K_{0,3}$	Partes unidas por solda de topo (Q.C.) paralela à direção das forças.		
$K_{0,31}$	Partes unidas por solda de filete (Q.C.) paralela à direção das forças (longitudinal às partes unidas).		
$K_{0,32}$	Solda de topo (Q.C.) entre a seção formada pela aba do perfilado e a alma da viga.		
$K_{0,33}$	Solda K ou de filete (Q.C.) entre a aba e a alma de uma viga calculada para a tensão de comparação nos casos de esforços combinados (ver 5.2.1.3).		

Tabela D.5 (continuação)

Caso K_0 – Baixa concentração de tensão			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{0,5}$	Solda de topo (Q.C.) no caso de cisalhamento longitudinal.		
$K_{0,51}$	Solda K (Q.C.) ou solda de filete (Q.C.) no caso de cisalhamento longitudinal.		
Caso K_1 – Concentração de tensão moderada			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{1,1}$	Partes unidas com solda de topo (Q.C.) perpendicular à direção das forças.		
$K_{1,11}$	Partes de espessuras diferentes soldadas com solda de topo (Q.C.) perpendicular à direção das forças. Inclinação assimétrica: 1/4 a 1/5 (ou inclinações simétricas: 1/3).		
$K_{1,12}$	Solda de topo (Q.C.) executada para junta transversal de chapa de alma.		
$K_{1,13}$	União fixada por solda de topo (Q.C.) perpendicular à direção das forças.		
$K_{1,2}$	Elemento principal contínuo ao qual as partes são unidas por soldas K (Q.E.) perpendiculares à direção das forças.		

Tabela D.5 (continuação)

Caso K_1 – Concentração de tensão moderada			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{1,21}$	Chapa da alma à qual os reforços são unidos perpendicularmente à direção das forças por meio de soldas de filetes (Q.E.) que se estendem até os cantos dos reforços da alma.		
$K_{1,3}$	Partes unidas por solda de topo paralela à direção das forças (sem verificar a solda).		
$K_{1,31}$	Solda K (Q.E.) entre aba curva e a alma (deve ser levado em consideração o efeito da curvatura no cálculo da tensão na junta).		
Caso K_2 – Concentração de tensão média			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{2,1}$	Partes de espessuras diferentes soldadas com solda de topo (Q.C.) perpendicular à direção das forças. Inclinação assimétrica: 1/3 (ou inclinações simétricas : 1/2)		
$K_{2,11}$	Perfis unidos com solda de topo (Q.E.) perpendicular à direção das forças.		
$K_{2,12}$	Perfil unido por solda de topo (Q.E.) perpendicular à direção das forças.		

Tabela D.5 (continuação)

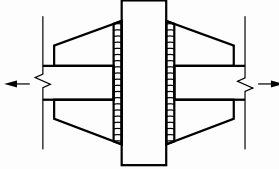
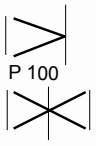
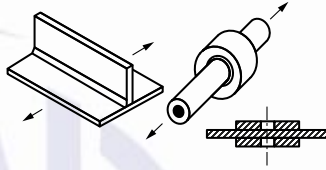
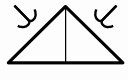
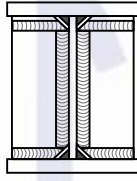
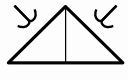
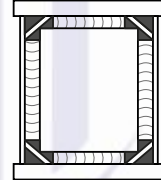
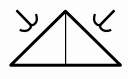
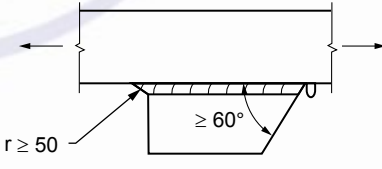
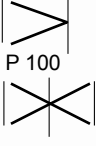
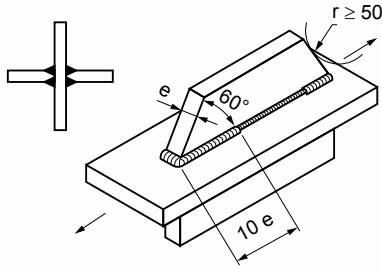
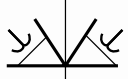
Caso K_2 – Concentração de tensão média			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{2,13}$	Solda de topo (Q.E.) perpendicular à direção das forças, executada na interseção das chapas com reforços auxiliares soldados. As extremidades das soldas são esmerilhadas, evitando entalhes.		
$K_{2,2}$	Elemento principal contínuo ao qual um diafragma transversal, reforços de alma, anéis ou cubos são soldados com solda de filete (Q.E.) perpendicular à direção das forças.		
$K_{2,21}$	Alma na qual soldas de filetes (Q.E.) são utilizadas para fixar reforços transversais de alma com abertura nos cantos e a solda não se estende até os cantos (não cruza a solda).		
$K_{2,22}$	Diafragma transversal fixado por solda de filete (Q.E.) com abertura nos cantos, nos quais as soldas não se estendem até os cantos.		
$K_{2,3}$	Elemento principal contínuo no qual partes são fixadas nas bordas com solda de topo (Q.E.) paralelas à direção das forças. Estas partes terminam em chanfros ou raios. As extremidades das soldas são esmerilhadas, evitando entalhes.		
$K_{2,31}$	Elemento principal contínuo ao qual as partes são soldadas paralelas à direção das forças. As partes terminam em chanfros ou raios. Válido onde as extremidades das soldas são do tipo K (Q.E.) por uma extensão igual a dez vezes a espessura, desde que as extremidades da solda sejam esmerilhadas, evitando entalhes.		

Tabela D.5 (continuação)

Caso K_2 – Concentração de tensão média			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{2,33}$	Elemento contínuo ao qual uma chapa (chanfro de 1/3) é unida por solda de filete (Q.E.), o filete de solda é executado na área X com $a = 0,5e$.		
$K_{2,34}$	Solda K (Q.C.) feita entre aba curva e a alma (deve ser levado em consideração o efeito da curvatura no cálculo da tensão na junta).		
$K_{2,4}$	Junta em forma de cruz executada com soldas K (Q.E.) perpendiculares à direção das forças.		
$K_{2,41}$	Solda K (Q.E.) entre a aba e a alma no caso de carga concentrada no plano da alma perpendicular à solda.		
$K_{2,5}$	Solda K (Q.E.) unindo partes com tensão de flexão ou cisalhamento.		
Caso K_3 – Concentração de tensão severa			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{3,1}$	Partes com espessuras diferentes conectadas com solda de topo (Q.C.) perpendicular à direção das forças. Inclinação assimétrica 1/2, ou posição simétrica sem declive de ligação.		

Tabela D.5 (continuação)

Caso K_3 – Concentração de tensão severa			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{3,11}$	Solda de topo com chapa de apoio (“mata-junta”) e sem solda no dorso. Chapa de apoio fixada por pontos de solda.		
$K_{3,12}$	Tubos unidos com solda de topo com mata-junta.		
$K_{3,13}$	Solda de topo (Q.C.) perpendicular à direção das forças, executada na interseção das chapas com reforços auxiliares soldados. As extremidades das soldas são esmerilhadas, evitando entalhes.		
$K_{3,2}$	Elemento principal contínuo ao qual as partes são fixadas com solda de filete (Q.C.) perpendicular à direção das forças. Estas partes absorvem somente uma pequena parcela das cargas transmitidas pelo elemento principal.		
$K_{3,21}$	Alma da viga e reforço ou diafragma transversal fixado por solda de filete contínua.		
$K_{3,3}$	Elemento principal contínuo no qual partes são fixadas nas bordas com solda de topo (Q.C.) paralelas à direção das forças. Estas partes terminam em chanfros e as extremidades são esmerilhadas para evitar entalhes.		
$K_{3,31}$	Elemento principal contínuo aos quais as partes são soldadas paralelas à direção das forças. Estas partes terminam em chanfros ou raios. Válido onde as extremidades das soldas são de filetes (Q.E.) por uma extensão igual a 10 vezes a espessura, desde que as extremidades da solda sejam esmerilhadas, evitando entalhes.		

Tabela D.5 (continuação)

Caso K_3 – Concentração de tensão severa			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{3,32}$	Elemento contínuo pelo qual se estende uma chapa, terminando em chanfros ou raios paralelos à direção das forças, fixados por solda K (Q.C.); com um comprimento igual a 10 vezes a espessura.		
$K_{3,33}$	Elemento contínuo ao qual é soldada uma chapa paralela à direção das forças, com solda de filete (Q.E.) na área indicada quando $e_1 < 1,5 \times e_2$.		
$K_{3,34}$	Elementos na extremidade aos quais os reforços de ligação são garantidos por solda de filete (Q.E.) quando $e_1 \leq e_2$. No caso de um único reforço, a excentricidade da carga deve ser levada em consideração.		
$K_{3,35}$	Elemento principal contínuo aos quais os reforços são soldados paralelos à direção das forças. As extremidades das soldas são de filetes (Q.E.) por uma extensão igual a 10 vezes a espessura e são esmerilhados para evitar entalhes.		
$K_{3,36}$	Elemento contínuo aos quais os reforços são fixados paralelos à direção das forças com solda (Q.C.) intermitente ou entre os alvíos.		
$K_{3,4}$	Junta em forma de cruz executada com solda K (Q.C.) perpendicular à direção das forças.		
$K_{3,41}$	Solda K (Q.C.) entre a aba e a alma da viga no caso de carga concentrada no plano da alma da viga perpendicular à solda.		

Tabela D.5 (continuação)

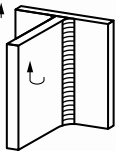
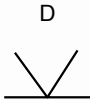
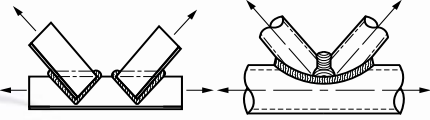

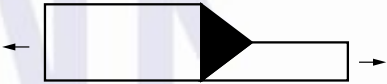
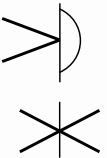
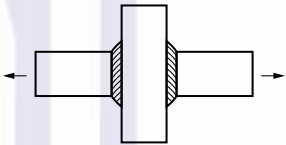
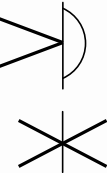
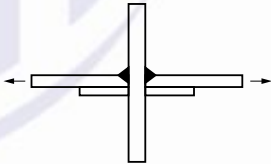

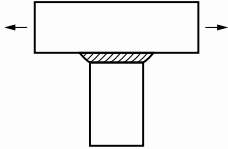
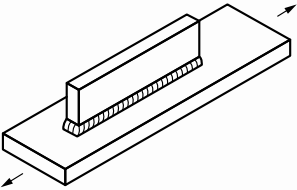
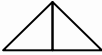
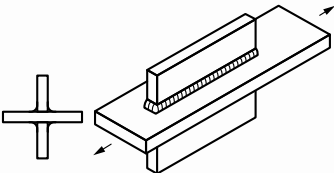

Caso K_3 – Concentração de tensão severa			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{3,5}$	Solda K (Q.C.) unindo partes com tensão de flexão e cisalhamento.		
$K_{3,7}$	Elemento contínuo aos quais tubos ou perfis são fixados com solda de filete (Q.E.).		
Caso K_4 – Concentração de tensão muito severa			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{4,1}$	Partes de espessuras diferentes soldadas com solda de topo (Q.E.) perpendicular à direção das forças. Posição assimétrica sem declive de ligação.		
$K_{4,11}$	Solda de topo (Q.C.) perpendicular à direção das forças, executada na interseção das chapas (sem reforços auxiliares).		
$K_{4,12}$	Solda de chanfro simples perpendicular à direção das forças entre as partes de interseção (junta em forma de cruz).		
$K_{4,3}$	Elemento contínuo no qual as partes são soldadas nas laterais que terminam em ângulos retos, paralelas à direção das forças.		
$K_{4,31}$	Elemento contínuo aos quais as partes, terminando em ângulo reto, paralelas à direção das forças, e recebendo grande parcela das cargas transmitidas pelo elemento principal, são fixadas com solda de filete (Q.C.).		
$K_{4,32}$	Elemento contínuo pelo qual se estende uma chapa que acaba em ângulos retos e fixada com solda de filete. (Q.C.).		

Tabela D.5 (conclusão)

Caso K_4 – Concentração de tensão muito severa			
Referência	Descrição	Figura	Símbolo
$K_{4,33}$	Elemento contínuo no qual uma chapa é fixada com solda de filete (Q.C.) paralela à direção das forças.		
$K_{4,34}$	Junta de chapas com duplo reforço unidas com solda de filete (Q.C.) ($e_1 = e_2$). No caso de um único reforço, a excentricidade da carga deve ser levada em consideração.		
$K_{4,35}$	Partes soldadas uma sobre a outra com solda de filete (Q.C.) em aberturas ou furos.		
$K_{4,36}$	Elementos contínuos entre os quais as chapas de união são fixadas por solda de filete (Q.C.) ou solda de topo (Q.C.).		
$K_{4,4}$	Junta em forma de cruz executada com solda de filete (Q.C.) perpendicular à direção das forças.		D
$K_{4,41}$	Solda de filete (Q.C.) entre a aba e a alma da viga no caso de carga concentrada no plano da alma da viga perpendicular à solda.		
$K_{4,5}$	Solda de filete (Q.C.) unindo partes com tensão de flexão e cisalhamento.		D
$K_{4,7}$	Elemento contínuo aos quais perfis ou tubos são fixados com solda de filete (Q.E.).		

D.4 Exemplos de cálculos de verificação à fadiga de junta soldada entre aba e alma em aço EN 10025 S235/ASTM A 36

D.4.1 Aba superior da viga de uma ponte rolante sobre a qual se movimenta um carro (ver Figura D.2)

Será feita uma verificação combinada à fadiga e limite elástico, conforme sequência de cálculos a seguir.

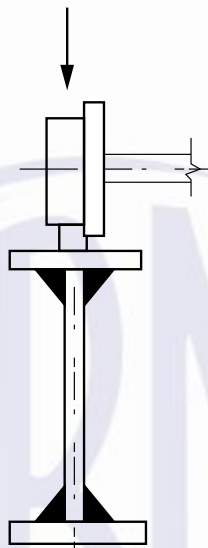


Figura D.2 – Secção da viga

Os resultados dos cálculos de tensão na aba superior da viga são os seguintes:

— compressão longitudinal:

$$\sigma_{x\text{máx.}} = -140 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{x\text{mín.}} = -28 \text{ N/mm}^2;$$

sendo: $\kappa = 0,2$.

— compressão lateral quando a roda do carro passa no ponto considerado:

$$\sigma_{y\text{máx.}} = -100 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{y\text{mín.}} = 0;$$

para a qual $\kappa = 0$.

— cisalhamento: alterando o sinal ao passar de um lado para o outro:

$$\tau_{xy\text{máx.}} = \pm 40 \text{ N/mm}^2;$$

para o qual $\kappa = -1$.

— tensão equivalente:

$$\sqrt{((-140)^2 + (-100)^2 - 140,100 + 3,40^2)} = 144 < 160 \text{ N/mm}^2 (\sigma_a)$$

aceitável (ver 5.2.1.3).

D.4.2 Verificação à fadiga e limite elástico

D.4.2.1 Primeiro exemplo – Componente no grupo E4 com solda de filete (Q.C.)

D.4.2.1.1 Verificação do material adjacente à solda para:

a) compressão longitudinal: caso K_0 (referência 0,31)

— verificação ao limite elástico:

$$\sigma_a = 160 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{x\text{máx.}} = -140 \text{ N/mm}^2.$$

Portanto

$$|\sigma_{x\text{máx.}}| < \sigma_a$$

— verificação à fadiga:

$$\sigma_w = 193,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Tabela D.1, componente E4, caso } K_0\text{);}$$

$$\sigma_a = (5 / 3) \times \sigma_w = 322,5 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{+1} = 0,75 \times \sigma_R = 270 \text{ N/mm}^2;$$

σ_t é limitado a 270 N/mm²;

$$\sigma_c = 1,2 \times \sigma_t = -324 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{xa} = -324 \text{ N/mm}^2.$$

$$|\sigma_{x\text{máx.}}| < |\sigma_{xa}|$$

b) compressão lateral; caso K_4 (referência 4,41)

— verificação ao limite elástico:

$$\sigma_a = 160 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{y\text{máx.}} = -100 \text{ N/mm}^2.$$

$$|\sigma_{y\text{máx.}}| < \sigma_a$$

— verificação à fadiga:

$$\sigma_w = 62,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (Tabela D.1, componente E4, caso } K_4\text{);}$$

$$\sigma_a = 5 / 3 \times \sigma_w = 103,7 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_t = \sigma_o = 107,7 \text{ N/mm}^2 \text{ Equação (3);}$$

$$\sigma_c = 1,2 \times \sigma_t = 124,4 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{ya} = -124,4 \text{ N/mm}^2.$$

$$|\sigma_{ym\acute{a}x.}| < |\sigma_{ya}|$$

c) cisalhamento no material

— verificação ao limite elástico:

$$\tau_{xya} = \frac{160}{\sqrt{3}} = 92,4 \text{ N/mm}^2 ;$$

$$\tau_{xym\acute{a}x.} = +40 \text{ N/mm}^2;$$

$$\tau_{xym\acute{a}x.} < \tau_a$$

— verificação à fadiga:

$$\tau_w = \frac{182,1}{\sqrt{3}} = 105,1 \text{ N/mm}^2 \text{ (Tabela D.1, componente E4, caso } W_0\text{);}$$

$$\tau_a = \tau_w = 105,1 \text{ N/mm}^2;$$

$$\tau_{xya} = 105,1 \text{ N/mm}^2;$$

$$\tau_{xym\acute{a}x.} = 40 \text{ N/mm}^2.$$

$$|\tau_{xym\acute{a}x.}| < \tau_a$$

d) verificação para cargas combinadas

Utilizar a Equação D.5:

Condição a ser verificada:

$$\left(\frac{-140}{-324}\right)^2 + \left(\frac{-100}{-124,4}\right)^2 - \frac{((-140) \times (-100))}{324 \times 124,4} + \left(\frac{40}{92,4}\right)^2 = 0,672 < 1,0$$

portanto, atendida.

D.4.2.1.2 Verificação da solda

Se a espessura das duas soldas for igual à espessura da alma da viga, as tensões $\sigma_{xm\acute{a}x.}$, $\sigma_{ym\acute{a}x.}$ e $\tau_{xym\acute{a}x.}$ possuem os mesmos valores de D.4.2.1.1.

A tensão de tração e compressão admissíveis são as mesmas de D.4.2.1.1 (no material), em relação à verificação ao limite elástico e fadiga. Desse modo, podemos deixar de efetuar verificações para os casos correspondentes para a) e b) de D.4.2.1.1.

As tensões de cisalhamento admissíveis, com relação à verificação ao limite elástico, são obtidas dividindo as tensões de tração admissíveis por $\sqrt{2}$ em vez de $\sqrt{3}$ no caso do material. Portanto, elas são mais favoráveis do que as utilizadas nos casos c) e d) de D.4.2.1.1.

Em resumo, podemos nos restringir a verificar a fadiga de casos correspondentes a c) e d) de D.4.2.1.1.

— cisalhamento na solda:

$$\tau_{xya} = \frac{193,5}{\sqrt{2}} = 136,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{xym\acute{a}x.} = 40 \text{ N/mm}^2;$$

do qual

$$|\tau_{xym\acute{a}x.}| < |\tau_{xya}|$$

— verificação de cargas combinadas:

Utilizando a Equação D.5:

Condição a ser verificada:

$$\left(\frac{-140}{-324}\right)^2 + \left(\frac{-100}{-124,4}\right)^2 - \frac{((-140) \times (-100))}{324 \times 124,4} + \left(\frac{40}{136,8}\right)^2 = 0,571 < 1,0$$

portanto, atendida.

NOTA Se o componente fosse classificado no grupo E6, a tensão $\sigma_{ym\acute{a}x.} = -100 \text{ N/mm}^2$ seria muito alta, visto que a tensão admissível à fadiga para o caso K_4 e $\kappa = 0$ é somente:

$$\sigma_{ya} = 1,2 \times (5/3) \times 41 = 82 \text{ N/mm}^2$$

D.4.2.2 Segundo exemplo – Componente no grupo E6 – Solda em K (Q.E.)

Os valores das cargas e, portanto, das tensões são assumidas iguais aos do primeiro exemplo.

Como as tensões admissíveis para as verificações ao limite elástico não são afetadas pela mudança de grupo e nem pelo tipo de solda, os cálculos do primeiro exemplo permanecem válidos para este caso. Portanto, vamos nos restringir à verificação à fadiga.

D.4.2.2.1 Verificação do material adjacente à solda

a) compressão longitudinal, caso K_0 (referência 0,33)

$$\sigma_w = 127,5 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_0 = 5/3 \times \sigma_w = 212,5 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{+1} = 0,75 \times \sigma_R = 270 \text{ N/mm}^2.$$

da Equação 3

$$\sigma_t = \frac{212,5}{1 - \left(1 - \frac{212,5}{270}\right) \times 0,2} = 222,0 \text{ N/mm}^2 ;$$

$$\sigma_c = +1,2 \times \sigma_t = 266 \text{ N/mm}^2 \text{ (Equação D.4);}$$

$$\sigma_{xa} = -266 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{x\text{máx.}} = -140 \text{ N/mm}^2;$$

do qual

$$|\sigma_{x\text{máx.}}| < |\sigma_{xa}|$$

b) compressão lateral: caso K_2 (referência 2,41)

$$\sigma_w = 95,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (Tabela D.1);}$$

$$\sigma_a = 5/3 \times \sigma_w = 159,3 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_t = \sigma_0 = 159,3 \text{ N/mm}^2 \text{ (Equação D.3);}$$

$$\sigma_c = + 1,2 \times \sigma_t = 191,2 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{ya} = -191,2 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_{y\text{máx.}} = -100 \text{ N/mm}^2;$$

do qual

$$|\sigma_{y\text{máx.}}| < |\sigma_{ya}|$$

c) cisalhamento no material:

$$\tau_{xya} = 147,8 / 305 = 85,3 \text{ N/mm}^2;$$

$$\tau_{xym\text{áx.}} = \pm 40 \text{ N/mm}^2;$$

do qual

$$|\tau_{xym\text{áx.}}| < |\tau_{xya}|$$

d) verificação de cargas combinadas:

Utilizar a Equação D.5:

Condição a ser verificada:

$$\left(\frac{-140}{-266}\right)^2 + \left(\frac{-100}{-191,2}\right)^2 - \frac{((-140) \times (-100))}{266 \times 191,2} + \left(\frac{40}{85,3}\right)^2 = 0,495 < 1,0$$

portanto, atendida.

D.4.2.2.2 Verificação da solda

Raciocínio igual ao do primeiro exemplo.

Deixando os casos c) e d) para serem verificados à fadiga.

— cisalhamento na solda:

$$\tau_{xya} = \frac{193,5}{\sqrt{2}} = 90,2 \text{ N/mm}^2 ;$$

$$\tau_{xym\acute{a}x.} = \pm 40 \text{ N/mm}^2;$$

do qual

$$| \tau_{xym\acute{a}x.} | < | \tau_{xya} |$$

— verificação de cargas combinadas:

Utilizar a Equação D.5:

Condição a ser verificada:

$$\left(\frac{-140}{-266} \right)^2 + \left(\frac{-100}{-191,2} \right)^2 - \frac{((-140) \times (-100))}{266 \, 191,2} + \left(\frac{40}{90,2} \right)^2 = 0,472 < 1,0$$

portanto, atendida.

