
**Equipamentos de elevação e movimentação de
carga — Regras para projeto
Parte 1: Classificação e cargas sobre as
estruturas e mecanismos**

*Lifting appliances — Rules for design
Part 1: Classification and loads on structures and mechanisms*

ICS 53.020

ISBN 978-85-07-08087-9



ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA
DE NORMAS
TÉCNICAS

Número de referência
ABNT NBR 8400-1:2019
66 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	vi
Introdução	viii
1 Escopo	1
2 Referências normativas	1
3 Termos e definições	2
4 Símbolos e abreviaturas	2
5 Condições gerais	6
6 Classificação e cargas	7
6.1 Classificação das estruturas, mecanismos e componentes	7
6.1.1 Plano geral de classificação	7
6.1.2 Classificação do equipamento em geral	8
6.1.3 Classificação dos mecanismos individuais	12
6.1.4 Classificação dos componentes	15
6.2 Carregamentos considerados no projeto de estruturas	18
6.2.1 Cargas principais	19
6.2.2 Cargas devido ao movimento vertical	19
6.2.3 Cargas devido aos movimentos horizontais S_H	23
6.2.4 Cargas devido aos efeitos climáticos	27
6.3 Casos de solicitação	35
6.3.1 Caso I: equipamento em operação normal sem vento	36
6.3.2 Caso II: equipamento em operação com vento limite de serviço	36
6.3.3 Caso III: equipamento submetido a solicitações excepcionais	36
6.3.4 Selecionando o coeficiente de amplificação M_x	37
6.4 Efeitos sísmicos	38
6.5 Solicitações consideradas no projeto de mecanismos	38
6.5.1 Solicitações tipo S_M	38
6.5.2 Solicitações tipo S_R	38
6.6 Casos de solicitação	39
6.6.1 Caso I – Serviço normal sem vento	39
6.6.2 Caso II – Serviço normal com vento	40
6.6.3 Solicitação III – Cargas excepcionais	40
6.6.4 Cálculo de S_M para os diferentes movimentos	41
Anexo A (informativo) Harmonização das classes de utilização de equipamentos e mecanismos	43
A.3 Como exemplo de aplicação é apresentado o seguinte caso: Ponte rolante com carro giratório	47
A.3.1 A classe de utilização para a ponte rolante deve ser U5	47
A.3.2 As proporções α_i devem ser estimadas conforme descrito a seguir	47
Anexo B (informativo) Cálculo de solicitações devido à aceleração de movimentos horizontais	48
B.1 Método	48

B.1.1	Dados básicos	48
B.1.2	Procedimento	48
B.1.3	Forças de inércia a serem consideradas no projeto da estrutura.....	50
B.1.4	Justificativa.....	50
B.2	Explicação do método	50
B.2.1	Descrição do sistema físico	50
B.2.2	Cálculo de solicitações no caso de movimento linear	50
B.2.2.1	Dados gerais.....	50
B.2.2.2	Efeito das forças de inércia sobre a carga	53
B.2.2.3	Efeito das forças de inércia sobre as estruturas do equipamento	58
B.2.3	Cálculo de cargas no caso de movimento de giro.....	59
B.2.4	Cálculo de cargas no caso de movimento da lança	59
B.2.5	Sistemas com aceleração controlada	59
B.2.6	Conclusões gerais	60
Anexo C	(normativo) Reações transversais devido ao movimento do equipamento	61
C.1	Modelagem do equipamento.....	61
C.2	Relação entre as forças tangenciais e os deslocamentos.....	62
C.3	Forças devido ao enviesamento (<i>skewing</i>)	63
C.4	Forças tangenciais, F_x e F_y	64
C.5	Ângulo de enviesamento α	66
 Figuras		
Figura 1	– Exemplos de espectro de carga.....	9
Figura 2	– Espectro de carga em forma escalonada.....	10
Figura 3	– Variação da tensão em função do tempo durante cinco ciclos de tensão	18
Figura 4	– Fator Ψ	20
Figura 5	– Curva de elevação e descida quando S_L e S_G possuem sinais opostos.....	23
Figura 6	– Coeficiente λ	25
Figura 7	– Distribuição das cargas laterais nas rodas	25
Figura 8	– Esbelteza aerodinâmica.....	30
Figura 9	– Relação de espaçamento.....	31
Figura 10	– Elementos inclinados em relação à direção do vento	35
Figura B.1	– Modelo do equipamento	52
Figura B.2	– Valor de Ψ_h	56
Figura B.3	– Diagrama de cargas na estrutura	58
Figura C.1	– Diferentes combinações de pares de rodas.....	61
Figura C.2	– Posição dos pares de rodas	62
Figura C.3	– Forças tangenciais e deslocamentos	63
Figura C.4	– Forças que agem no equipamento na posição enviesada	64
Figura C.5	– Cargas FG_y e $F_{y1.1}/F_{y2.1}$ relativas aos sistemas AFF para equipamentos com rodas flangeadas.....	65

Tabelas

Tabela 1 – Classes de utilização	8
Tabela 2 – Classes de espectro.....	10
Tabela 3 – Grupos de equipamentos	10
Tabela 4 – Exemplos de classificação de equipamentos em grupo	11
Tabela 5 – Classes de utilização	12
Tabela 6 – Classes de espectro.....	13
Tabela 7 – Grupos de mecanismos.....	13
Tabela 8 – Orientação para o grupo de classificação do mecanismo.....	14
Tabela 9 – Classes de utilização	16
Tabela 10 – Classes de espectro.....	17
Tabela 11 – Grupos de componentes	18
Tabela 12 – Valores de β_2 e Ψ_{\min}	20
Tabela 13 – Valores de V_h para estimativa de Ψ_{\min}	21
Tabela 14 – Tempos de aceleração e valores da aceleração.....	24
Tabela 15 – Coeficiente dinâmico para esforço devido aos para-choques	27
Tabela 16 – Pressão do vento de projeto em operação.....	28
Tabela 17 – Vento fora de serviço	29
Tabela 18 – Coeficientes aerodinâmicos.....	32
Tabela 19 – Coeficientes de redução.....	33
Tabela 20 – Valores do coeficiente de amplificação M_x	38
Tabela 21 – Valores do coeficiente de amplificação q_m	39
Tabela A.1 – Duração total do uso (T) dos equipamentos de elevação em horas	44
Tabela A.2 – Duração total de uso T_i (em horas) dos mecanismos em termos de T e α_i	44
Figura A.1 – Classes de utilização para equipamentos e mecanismos	46
Tabela A.3 – Duração total de uso T_i (em horas) e classe de utilização dos mecanismos	47
Tabela B.1 – Valores de T_1	57
Tabela C.1 – Valores de ξ_{1i} , ξ_{2i} , v_{1i} e v_{2i}	65

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 8400-1 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos (ABNT/CB-004), pela Comissão de Estudo de 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 8400-1 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 8400-1 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 8400-1 é o seguinte:

Scope

This Standard, besides the classification on groups, establishes the loads and load combinations which must be taken into account when designing hoisting appliances or parts of hoisting appliances, and also the strength and stability conditions to be observed for the various load combinations.

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*



Introdução

É necessário distinguir a grande variedade de equipamentos abrangidos pelas normas de projeto. É óbvio que um equipamento de elevação de carga com ciclo de trabalho rápido e altas velocidades não é projetado do mesmo modo que outro equipamento de pequeno porte para tarefas ocasionais. Para este equipamento não pode haver dúvidas quanto à necessidade de executar todas as verificações que parecem necessárias, para garantir a segurança do equipamento. Portanto, o fabricante deve decidir, em cada caso específico, quais partes do equipamento que ele está projetando devem ser analisadas e aquelas para as quais o cálculo é desnecessário. Isto porque ele teria com antecedência a certeza de que os cálculos somente confirmam um resultado favorável. Como é o caso de um componente padronizado que está sendo utilizado e que já foi devidamente verificado ou para verificações específicas previstas neste Documento Técnico, que certamente levam a um resultado favorável, dependendo da aplicação.

Se forem considerados, por exemplo, os cálculos para verificação à fadiga, é muito fácil observar que certas verificações são desnecessárias para equipamentos de serviços leves ou moderados, pois elas sempre levam à conclusão de que os casos mais desfavoráveis são aqueles resultantes da verificação da segurança em relação ao limite elástico, ruptura ou estabilidade.

Estas considerações mostram que os cálculos realizados de acordo com as normas de equipamentos elevação de carga podem tomar uma forma muito diferente de acordo com o tipo de equipamento que está sendo projetado. No caso de uma máquina simples ou de uma máquina que contém componentes padronizados, podem ser realizados de forma resumida, sem prejudicar a conformidade da máquina com os princípios estabelecidos nas normas de projeto.

Algumas explicações são desejáveis para o comprador, que pode se sentir desorientado pela extensão do documento e confuso ao se deparar com a variedade de opções apresentadas que, todavia, é necessária se for levada em consideração a grande diversidade de problemas a serem resolvidos.

Na verdade, a única questão importante para o comprador é especificar o serviço que ele espera de seu equipamento e, se possível, fornecer alguma indicação do regime de trabalho dos vários movimentos.

Equipamentos de elevação e movimentação de carga — Regras para projeto

Parte 1: Classificação e cargas sobre as estruturas e mecanismos

1 Escopo

Esta Norma, além da classificação em grupos, estabelece as cargas e suas combinações a serem levadas em consideração ao projetar equipamentos ou partes de equipamentos de elevação de carga, bem como as condições de resistência e estabilidade a serem observadas para as várias combinações de carga.

Esta Norma não é aplicável 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 para manuseio de materiais em 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 edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 8400-2, *Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto – Parte 2: Verificação das estruturas ao escoamento, fadiga e estabilidade*

ABNT NBR 8400-3, *Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto – Parte 3: Verificação à fadiga e seleção de componentes dos mecanismos*

ABNT NBR 8400-5, *Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto – Parte 5: Cargas para ensaio e tolerâncias de fabricação*

3 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e definições.

3.1

carga de trabalho

peso da carga útil içada, mais o peso dos acessórios, como blocos de roldanas, ganchos, barras de carga, garras etc.

3.2

peso morto

peso morto dos componentes atuando sobre um determinado elemento, excluindo a carga de trabalho

4 Símbolos e abreviaturas

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

Símbolo	Unidade	Designação
A	m^2	Área exposta ao vento
A1 a A8	–	Grupos do equipamento (estrutura)
A_e	m^2	Área do contorno da estrutura treliçada
A	mm	Distância entre os eixos das rodas ou truques Dimensão da estrutura no cálculo da carga do vento
B	mm	Largura da treliça no cálculo da carga do vento
B0 a B10	–	Classes de utilização dos elementos estruturais
b	mm	Altura da seção da viga exposta ao vento
D	m	Diâmetro de seção na determinação do fator de forma
d	mm	Largura da seção paralela à direção do vento no cálculo da carga do vento
E1 a E8	–	Grupos de componentes
F	N	Força do vento
F_c	N	Projeção da carga do cabo sobre o eixo x durante o deslocamento
F_{cm}	N	Força de inércia devido à carga durante o deslocamento
$F_{cm\acute{a}x.}$	N	Valor máximo de F_c
g	m/s^2	Aceleração da gravidade, $9,80665 m/s^2$
I	kgm^2	Momento de inércia da massa no movimento de giro
I_i	kgm^2	Momento de inércia da massa de um elemento em rotação
I_m	kgm^2	Momento de inércia da massa de todos os elementos em rotação
j_0	m/s^2	Aceleração em movimentos horizontais
J_m	m/s^2	Aceleração/desaceleração média em movimentos horizontais

Símbolo	Unidade	Designação
K_2	–	Coefficiente para calcular a força na direção do vento para vigas e torres treliçadas
k_m	–	Coefficiente do espectro para mecanismos
k_p	–	Coefficiente do espectro para equipamentos de movimentação de carga
L_{fb}	–	Comprimento de flambagem global de uma barra
$M1$ a $M8$	–	Grupos de mecanismos
m	kg	Massa equivalente para o cálculo de cargas devido aos movimentos horizontais Massa total do equipamento
m_o	kg	Massa do equipamento sem carga
m_l	kg	Massa da carga
m_e	kg	Massa equivalente para o cálculo de cargas devido ao movimento horizontal
m	kg	Carga
$m_{lmáx.}$	kg	Carga nominal de trabalho
N_c	–	Número de ciclos de elevação para cálculo da duração total de uso
n	–	Número de ciclos de elevação
$n_{máx.}$	–	Número de ciclos de elevação que determinam a duração total do uso
$P1$ a $P4$	–	Classes de espectro para componentes
p	mm	Vão do equipamento
$Q1$ a $Q4$	–	Classes de espectro para os equipamentos
q_m	–	Coefficiente de majoração para mecanismo
q	N/mm ²	Pressão dinâmica do vento
r	–	Número de níveis de carregamento
S	N	Força
S	m ²	Área de todos os elementos das vigas e torres das estruturas treliçadas
S_G	–	Solicitações devido ao peso próprio, com carga constante
S_H	–	Solicitações devido aos movimentos horizontais
S_{HE}	–	Reações transversais devido ao enviesamento do equipamento
S_L	–	Solicitações devido à carga de trabalho
S_M	–	Solicitações devido aos torques dos motores e freios sobre o mecanismo
$S_{Mmáx.I}$	N	Solicitação máxima tipo SM no caso I
$S_{Mmáx.II}$	N	Solicitação máxima tipo SM no caso II

Símbolo	Unidade	Designação
$S_{M\text{máx.III}}$	N	Solicitação máxima tipo SM no caso III
S_{MA}	—	Solicitações tipo SM devido à aceleração ou frenagem
$S_{MC\text{máx}}$	—	Solicitações tipo SM devido ao torque máximo do motor
S_{MF}	—	Solicitações tipo SM devido às forças de atrito
S_{MG}	—	Solicitações tipo SM devido ao deslocamento vertical de elementos móveis de um equipamento de elevação, excluindo a carga de trabalho
S_{ML}	—	Solicitações tipo S_M devido ao deslocamento vertical da carga de trabalho
S_{MW}	—	Solicitações tipo S_M devido ao efeito do vento limite de serviço
S_{MW8}	—	Solicitações tipo S_M devido ao efeito do vento para $q = 80 \text{ N/m}^2$
S_{MW25}	—	Solicitações tipo S_M devido ao efeito do vento para $q = 250 \text{ N/m}^2$
S_R	—	Solicitações tipo S_R devido às forças não equilibradas por torques
$S_{R\text{máx.I}}$	—	Solicitações máximas tipo S_R no caso I
$S_{R\text{máx.II}}$	—	Solicitações máximas tipo S_R no caso II
$S_{R\text{máx.III}}$	—	Solicitações máximas tipo S_R no caso III
S_{RA}	—	Solicitações tipo S_R devido às acelerações/desacelerações
S_{RG}	—	Solicitações tipo S_R devido ao peso próprio dos elementos do equipamento
S_{RL}	—	Solicitações tipo S_R devido à carga de trabalho
S_{RW}	—	Solicitações tipo S_R devido ao vento
$S_{RW\text{máx.}}$	—	Solicitações tipo S_R devido ao vento fora de serviço
S_{RW25}	—	Solicitações tipo S_R devido ao efeito do vento para $q = 250 \text{ N/m}^2$
S_T	—	Solicitações devido ao efeito do para-choque
S_W	—	Solicitações devido ao vento em serviço
$S_{W\text{máx.}}$	—	Solicitações devido ao vento fora de serviço
S_p	mm^2	Área de todos os elementos das vigas treliçadas e torres
T	h	Duração total do uso do equipamento
T	J	Energia cinética total no movimento de elevação
$T_0 \text{ a } T_9$	—	Classes de utilização dos mecanismos
T_i	s	Período de oscilação
T_i	h	Duração total do uso do mecanismo
T_m	s	Duração média da aceleração ou desaceleração
t	s	Tempo ao calcular as solicitações devido ao movimento horizontal

Símbolo	Unidade	Designação
$t_1, t_2 \dots$ t_i, t_r	s	Duração dos diferentes níveis de carregamento
t_d	s	Duração da desaceleração ao calcular as cargas devido ao movimento horizontal
t_{mc}	s	Duração média do ciclo de elevação
U0 a U9	—	Classes de utilização do equipamento
V_L	m/s	Velocidade de elevação
V_s	m/s	Velocidade teórica do vento
v_t	m/s	Velocidade nominal de translação do equipamento
v	m/s	Velocidade de regime horizontal do ponto de suspensão de carga
W_i	s ⁻¹	Velocidade angular de um elemento do mecanismo em relação ao seu centro de rotação ao calcular as cargas devido ao movimento horizontal
x	m	Coordenada do ponto de suspensão do cabo de elevação ao longo de um eixo paralelo à direção de translação
X_1	m	Coordenada da posição do centro de gravidade da carga suspensa ao longo de um eixo que possui a mesma direção, sentido e origem que o eixo de x
z	m	Coordenada que expressa o deslocamento horizontal da carga em relação ao equipamento
z_d	m	Deslocamento da carga durante o movimento de translação do equipamento
z_m	m	Deslocamento da carga durante o movimento de translação do equipamento
α_i	—	Relação de duração de uso do mecanismo durante um ciclo de elevação para a duração média do ciclo
α_m	—	Ângulo de inclinação do cabo durante a aceleração do equipamento
β	—	Coefficiente de tempo relativo à aceleração do equipamento
β_{crit}	—	Valor crítico de β
M_x	—	Coefficiente de majoração de carga dependente do grupo do equipamento
q_m	—	Coefficiente de majoração de carga dependente do grupo de mecanismo
η	—	Coefficiente de redução no cálculo da força do vento
θ	—	Ângulo do vento em relação ao eixo longitudinal do elemento
λ	—	Coefficiente aplicado para determinar as forças transversais nos movimentos de translação
μ	—	Constante de massa no cálculo de cargas devido à aceleração do movimento horizontal

Símbolo	Unidade	Designação
ξ	—	Coefficiente determinado experimentalmente, dependendo do tipo de equipamento, para calcular o coeficiente dinâmico
ρ_1	—	Coefficiente utilizado para determinar a carga de ensaio dinâmico
σ_{inf}	N/mm ²	Tensão mínima na determinação do espectro de tensão
σ_m	N/mm ²	Média aritmética de todas as tensões superiores e inferiores durante a duração total do uso
σ_{sup}	N/mm ²	Tensão superior na determinação do espectro de tensão
$\sigma_{\text{supmáx.}}$	N/mm ²	Tensão superior máxima na determinação do espectro de tensão
$\sigma_{\text{supmín.}}$	N/mm ²	Tensão superior mínima na determinação do espectro de tensão
ψ	—	Coefficiente dinâmico para movimento de elevação
ψ_h	—	Coefficiente dinâmico ao calcular cargas devido à aceleração de movimentos horizontais
ω	s ⁻¹	Velocidade angular do eixo ao calcular as cargas devido ao movimento horizontal
$\omega_1, \omega_2, \omega_r$	s ⁻¹	Frequências de oscilação durante o balanço da carga
ω_m	s ⁻¹	Velocidade angular do motor

5 Condições gerais

Quanto ao serviço a ser executado pelo equipamento, dois fatores devem ser especificados, ou seja:

- a classe de utilização, conforme determinado em 6.1.2.2;
- o espectro de carga, conforme determinado em 6.1.2.3.

Para obter o número de ciclos de elevação que determina a classe de utilização, o comprador pode, por exemplo, encontrar:

- o número de ciclos de elevação que o equipamento terá, em média, a cada dia de utilização;
- o número médio de dias de uso ao ano;
- o número de anos após o qual o equipamento pode ser considerado como tendo necessidade de substituição.

De forma similar, o espectro de carga pode ser calculado por uma equação simplificada (ver 6.1.2.3).

Em nenhum caso os cálculos requerem um alto grau de precisão, sendo mais de natureza de estimativas do que cálculos precisos. Além disso, os números de ciclos de elevação que determinam as classes de utilização não constituem valores assegurados. Eles são meramente valores-guia que servem como base para os cálculos de fadiga e correspondem à vida média esperada com um grau de segurança razoável, contanto que o equipamento projetado de acordo com as regras de projetos

atuais, seja utilizado sob as condições especificadas pelo cliente em seu edital de concorrência e que também seja operado e mantido regularmente em conformidade com as instruções do fabricante.

Caso o comprador não seja capaz de determinar a classe de utilização e o espectro de carga, ele pode limitar-se somente a declarar o grupo de estrutura no qual o equipamento deve ser classificado. Um guia para a escolha do grupo é fornecido na Tabela 4, que não é obrigatório, porém fornece exemplos simples que, por comparações, pode facilitar a seleção.

No caso de mecanismos, também devem ser especificados:

- a classe de utilização, conforme especificado em 6.1.3.2;
- o espectro de carga, conforme especificado em 6.1.3.3.

A mesma observação se aplica em relação ao equipamento como um todo.

As Tabelas A.1 a A.3 podem ser utilizadas para facilitar a determinação da classe de utilização. Com base na classe de utilização do equipamento, estas tabelas possibilitam a determinação do número total de horas de trabalho para o mecanismo, de acordo com a duração média de um ciclo de trabalho e a relação entre o tempo operacional do mecanismo e a duração do ciclo completo.

A Tabela 8 pode ser utilizada como um guia pelo comprador que deseja simplesmente escolher um grupo para cada um dos mecanismos que quer combinar com o equipamento.

Como regra geral, o comprador não precisa fornecer outras informações para o projeto do equipamento, exceto para o descrito a seguir:

- a área das cargas içadas expostas ao vento, se esta área for maior que aquelas estabelecidas em 6.2.4.1.2;
- o valor da velocidade do vento, onde as condições locais são consideradas para requerer um projeto para um vento fora do serviço maior que aquele estabelecido em 6.2.4.1.2.

6 Classificação e cargas

6.1 Classificação das estruturas, mecanismos e componentes

6.1.1 Plano geral de classificação

6.1.1.1 O projeto de um equipamento de elevação e seus componentes deve levar em consideração as tarefas que devem ser executadas durante seu uso. Para esta finalidade, a classificação em grupo inclui:

- a) o equipamento em geral;
- b) os mecanismos individuais em geral;
- c) os componentes estruturais e mecânicos.

6.1.1.2 Esta classificação tem dois critérios como base:

- a) a duração total do uso do item considerado;
- b) a carga no gancho, solicitação ou espectros de tensão aos quais o item é submetido.

6.1.2 Classificação do equipamento em geral

6.1.2.1 Sistema de classificação

Os equipamentos em geral estão classificados em oito grupos, designados pelo símbolo A1, A2..., A8, respectivamente (ver 6.1.2.4), com base em dez classes de utilização e quatro espectros de carga.

6.1.2.2 Classes de utilização

A duração do uso de um equipamento de elevação significa o número de ciclos de levantamento que o equipamento executa. Um ciclo de levantamento é a sequência completa de operações, iniciando com a carga sendo elevada e terminando no momento em que o equipamento está pronto para elevar a próxima carga.

A duração total do uso é uma duração de uso calculada, considerada como um valor-guia, iniciando quando o equipamento é colocado em operação e terminando quando finalmente é retirado da operação.

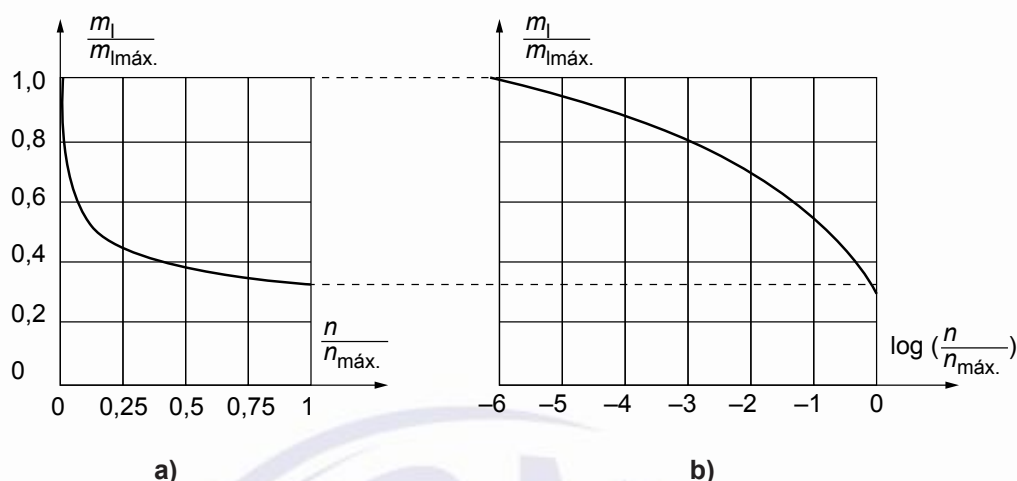
Com base na duração total do uso, existem 10 classes de utilização, designadas pelos símbolos U_0 , U_1 , ..., U_9 . Estas classes são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de utilização

Símbolo	Duração total do uso				
	(número $n_{\text{máx.}}$ de ciclos de elevação)				
U_0			$n_{\text{máx.}}$	<	16 000
U_1	16 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	32 000
U_2	32 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	63 000
U_3	63 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	125 000
U_4	125 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	250 000
U_5	250 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	500 000
U_6	500 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	1 000 000
U_7	1 000 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	2 000 000
U_8	2 000 000	<	$n_{\text{máx.}}$	<	4 000 000
U_9	4 000 000	<	$n_{\text{máx.}}$		

6.1.2.3 Espectro de carga

O espectro de carga caracteriza o número total de cargas içadas durante a duração total do uso (ver 6.1.2.2) de um equipamento. É uma função de distribuição $y = f(x)$, expressando a fração x ($0 \leq x \leq 1$) da duração total do uso, durante a qual a razão da carga içada para a carga nominal de trabalho atinge pelo menos um determinado valor y ($0 \leq y \leq 1$). Exemplos de um espectro de carga são fornecidos na Figura



Legenda

m_l cargas expressas em kilograma (kg)

$m_{l\text{máx.}}$ carga nominal de trabalho expressa em kilograma (kg)

n número de ciclos de içamento em relação ao qual a carga içada é maior ou igual a m_l

$n_{\text{máx.}}$ número de ciclos de içamento que determina a duração total do uso

Figura 1 – Exemplos de espectro de carga

A cada espectro é atribuído um fator de espectro k_p , definido por:

$$k_p = \int_0^1 y^d dx$$

Para a finalidade de classificação do grupo, o expoente d é considerado, por convenção, como igual a 3.

Em muitas aplicações a função $f(x)$ pode ser aproximada por uma função consistindo em um determinado número r de intervalos (ver Figura 2), compreendendo respectivamente os ciclos de içamento n_1, n_2, \dots, n_r . A carga pode ser considerada praticamente constante e igual a m_{li} , durante os ciclos n_i do i -ésimo intervalo. Se $n_{\text{máx.}}$ representar a duração total do uso e $m_{l\text{máx.}}$ a maior entre as cargas m_{li} , existe a seguinte relação:

$$n_1 + n_2 + \Lambda + n_r = \sum_{i=1}^r n_i = n_{\text{máx.}}$$

ou de modo aproximado:

$$k_p = \left(\frac{m_{l1}}{m_{l\text{máx.}}} \right)^3 \times \left(\frac{n_1}{n_{\text{máx.}}} \right) + \left(\frac{m_{l2}}{m_{l\text{máx.}}} \right)^3 \times \left(\frac{n_2}{n_{\text{máx.}}} \right) + \Lambda + \left(\frac{m_{lr}}{m_{l\text{máx.}}} \right)^3 \times \left(\frac{n_r}{n_{\text{máx.}}} \right)$$

$$k_p = \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{m_{li}}{m_{l\text{máx.}}} \right)^3 \times \left(\frac{n_i}{n_{\text{máx.}}} \right) \right]$$

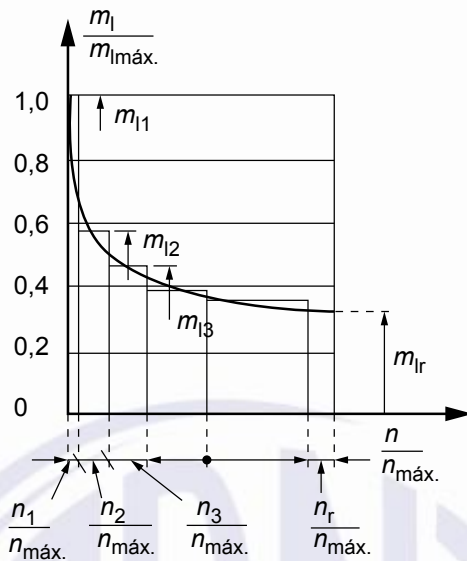


Figura 2 – Espectro de carga em forma escalonada

De acordo com o seu espectro de carga, um equipamento de elevação é classificado em uma das quatro classes de espectro Q1, Q2, Q3, Q4 especificadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Classes de espectro

Símbolo	Fator de espectro k_p				
Q1			k_p	<	0,125
Q2	0,125	<	k_p	<	0,250
Q3	0,250	<	k_p	<	0,500
Q4	0,500	<	k_p	<	1,000

6.1.2.4 Classificação dos equipamentos de elevação em grupos

A classificação dos equipamentos de elevação em grupos em geral é determinada conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Grupos de equipamentos

Classe de espectro de carga	Classe de utilização									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Q1	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

6.1.2.5 Exemplo de classificação de um equipamento em grupo

Orientações relacionadas à classificação dos equipamentos de elevação são indicadas na Tabela 4.

Como equipamentos do mesmo tipo podem ser utilizados de várias formas, o agrupamento mostrado na Tabela 4 pode ser considerado somente um modelo. Em especial, quando vários grupos são mostrados como apropriados para um equipamento de um determinado tipo, é necessário verificar, com base na duração total do uso calculada do equipamento e no espectro de carga, em quais classes de utilização e de espectro ele deve ser classificado e consequentemente em qual grupo.

Tabela 4 – Exemplos de classificação de equipamentos em grupo

Tipo de equipamento		Detalhes relacionados à natureza do uso ^a	Grupo do equipamento (ver 6.1.2.4)	Classe da elevação
Referência	Indicação			
1	Equipamentos operados manualmente	–	A1 – A2	HC1
2	Equipamentos de montagem e desmontagem	–	A1 – A2	HC1/HC2
3	Equipamentos para casa de força	–	A2 – A4	HC1
4	Equipamentos para oficina em geral	Gancho	A3 – A5	HC2/HC3
	Equipamentos industriais em geral			
5	Equipamentos para carregamento de fundição	Garra ou eletroímã	A6 – A8	HC3/HC4
6	Equipamentos para manuseio de panela de metal líquido	–	A6 – A8	HC2/HC3
7	Ponte rolante estripadora	–	A8	HC3/HC4
8	Equipamentos para decapagem	–	A8	HC4
	Equipamentos para carregamento de forno elétrico			
9	Equipamentos para forjaria	–	A6 – A8	HC4
10	Equipamentos para contêineres (pontes e pórticos rolantes)	Gancho ou “spreader” (barra de carga)	A5 – A6	HC2
11	Equipamentos com dispositivo de içamento	Garra, caçamba, tenaz ou eletroímã	A6 – A8	HC3/HC4
	Equipamento para descarregamento de navio com dispositivo de içamento			
12	Equipamentos para doca seca, equipamentos para estaleiro naval	Gancho	A3 – A5	HC2
13	Equipamentos portuários	Gancho	A5 – A6	HC2
14	Equipamentos portuários com dispositivo de içamento	Garra, caçamba, tenaz ou eletroímã	A6 – A8	HC3/HC4
15	Guindaste giratório	Gancho	A2 – A3	HC1/HC2
^a Somente alguns casos de uso típicos são mostrados como orientação nesta coluna.				

6.1.3 Classificação dos mecanismos individuais

6.1.3.1 Sistema de classificação

Os mecanismos individuais em geral são classificados em oito grupos, designados respectivamente pelos símbolos $M1$, $M2$, ..., $M8$ (ver 6.1.3.4), com base nas 10 classes de utilização e nos quatro espectros de carga.

6.1.3.2 Classes de utilização

A duração do uso de um mecanismo é o tempo no qual ele se encontra em movimento.

A duração total do uso é uma duração calculada, considerada um valor-guia aplicado até o tempo de substituição do mecanismo. Esta duração é expressa em horas.

Com base na duração total do uso, existem 10 classes de utilização, designadas pelos símbolos $T0$, $T1$, $T2$, ..., $T9$. Estas classes estão estabelecidas na Tabela 5.

Tabela 5 – Classes de utilização

Símbolo	Duração total do uso T				
	(h)				
$T0$			T	$<$	200
$T1$	200	$<$	T	$<$	400
$T2$	400	$<$	T	$<$	800
$T3$	800	$<$	T	$<$	1600
$T4$	1 600	$<$	T	$<$	3 200
$T5$	3 200	$<$	T	$<$	6 300
$T6$	6 300	$<$	T	$<$	12 500
$T7$	12 500	$<$	T	$<$	25 000
$T8$	25 000	$<$	T	$<$	50 000
$T9$	50 000	$<$	T		

6.1.3.3 Espectro de carga

O espectro de carga caracteriza a magnitude das cargas que atuam sobre um mecanismo durante sua duração total do uso. É uma função de distribuição $y = f(x)$, expressando a fração x ($0 \leq x \leq 1$) da duração total do uso, durante a qual o mecanismo é submetido a uma carga que atinge pelo menos uma fração y ($0 \leq y \leq 1$) da carga máxima (ver Figura 1).

A cada espectro é atribuído um fator de espectro k_m , determinado por:

$$k_m = \int_0^1 y^d dx$$

Para finalidade de classificação do grupo, d é considerado, por convenção, igual a 3

Em muitas aplicações a função $f(x)$ pode ser aproximada por uma função consistindo de um determinado número r de intervalos (ver Figura 2) das respectivas durações t_1, t_2, \dots, t_r , as cargas S podem ser

consideradas praticamente constantes e iguais a S_i durante o intervalo t_i . Se T representar a duração total de uso e $S_{máx.}$ a maior das cargas S_1, S_2, \dots, S_r , existe uma relação:

$$t_1 + t_2 + \Lambda + t_r = \sum_{i=1}^r t_i$$

ou de modo aproximado:

$$k_m = \left(\frac{S_1}{S_{máx.}} \right)^3 \times \left(\frac{t_1}{T} \right) + \left(\frac{S_2}{S_{máx.}} \right)^3 \times \left(\frac{t_2}{T} \right) + \Lambda + \left(\frac{S_r}{S_{máx.}} \right)^3 \times \left(\frac{t_r}{T} \right) = \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{S_i}{S_{máx.}} \right)^3 \times \left(\frac{t_i}{T} \right) \right]$$

Dependendo do espectro de carga, um mecanismo é classificado em uma das quatro classes de espectro $L1, L2, L3$ e $L4$, apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Classes de espectro

Símbolo	Fator de espectro k_m				
$L1$		<	k_m	<	0,125
$L2$	0,125	<	k_m	<	0,250
$L3$	0,250	<	k_m	<	0,500
$L4$	0,500	<	k_m	<	1,000

6.1.3.4 Classificação de mecanismos individuais em grupo

Com base na classe de utilização e na classe de espectro, os mecanismos individuais estão classificados em um dos oito grupos $M1, M2, \dots, M8$, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Grupos de mecanismos

Classe de espectro de carga	Classe de utilização									
	$T0$	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$T5$	$T6$	$T7$	$T8$	$T9$
$L1$	$M1$	$M1$	$M1$	$M2$	$M3$	$M4$	$M5$	$M6$	$M7$	$M8$
$L2$	$M1$	$M1$	$M2$	$M3$	$M4$	$M5$	$M6$	$M7$	$M8$	$M8$
$L3$	$M1$	$M2$	$M3$	$M4$	$M5$	$M6$	$M7$	$M8$	$M8$	$M8$
$L4$	$M2$	$M3$	$M4$	$M5$	$M6$	$M7$	$M8$	$M8$	$M8$	$M8$

6.1.3.5 Orientação para classificação de mecanismos individuais em grupo

Orientação para a classificação do grupo de um mecanismo individual são fornecidas na Tabela 8.

Como equipamentos do mesmo tipo podem ser utilizados de várias formas, as sugestões de classificação na Tabela 8 podem ser consideradas somente um modelo.

Em especial, quando vários grupos são mostrados como apropriados para um mecanismo de um determinado tipo, é necessário verificar, com base na duração total do uso calculada do mecanismo e no espectro de carga, em qual classe de utilização (ver 6.1.3.2) e espectro (ver 6.1.3.3) ele deve ser classificado e, consequentemente, em qual grupo de mecanismo (ver 6.1.3.4).

Tabela 8 – Orientação para o grupo de classificação do mecanismo (continua)

Tipo de equipamento		Detalhes relativos à natureza do uso ^a	Tipo de mecanismo				
Referência	Designação		Elevação	Giro	Elevação da lança	Transversal	Translação
1	Equipamentos operados manualmente	–	M1	–	–	M1	M1
2	Equipamentos de montagem e desmontagem	–	M2 - M3	M2 - M3	–	M1 - M3	M2 - M3
3	Equipamentos para casa de força	–	M2	–	–	M2	M2
4	Equipamentos para oficina em geral	Gancho	M6	M4	–	M4	M5
	Equipamentos industriais em geral						
5	Equipamentos para carregamento de fundição	Garra ou eletroímã	M8	M6	–	M6 - M7	M7 - M8
	Equipamentos para pátio de sucata						
6	Equipamentos para manuseio de panela de metal líquido	–	M7 - M8	–	–	M4 - M5	M6 - M7
7	Ponte rolante estripadora	–	M8	M6	–	M7	M8
8	Equipamentos para decapagem	–	M8	M6	–	M7	M8
	Equipamentos para carregamento de forno elétrico						
9	Equipamentos para forjaria	–	M8	–	–	M5	M6

Tabela 8 (conclusão)

Tipo de equipamento		Detalhes relativos à natureza do uso ^a	Tipo de mecanismo				
Referência	Designação		Elevação	Giro	Elevação da lança	Transversal	Translação
10	Equipamentos para contêineres (pontes e pórticos rolantes)	Gancho ou <i>spreader</i> (barra de carga)	M6 - M7	M5 - M6	M3 - M4	M6 - M7	M4 - M5
11	Equipamentos com dispositivo de içamento	Garra, caçamba, tenaz ou eletroímã	M8	M5 - M6	M3 - M4	M7 - M8	M4 - M5
	Equipamento para descarregamento de navio com dispositivo de içamento	—	—	—	—	—	—
12	Equipamentos para doca seca	Gancho	M5 - M6	M4 - M5	M4 - M5	M4 - M5	M5 - M6
	Equipamentos para estaleiro naval	—	—	—	—	—	—
13	Equipamentos portuários	Gancho	M6 - M7	M5 - M6	M5 - M6	—	M3 - M4
14	Equipamentos portuários com dispositivo de içamento	Garra, caçamba, tenaz ou eletroímã	M7 - M8	M6 - M7	M6 - M7	—	M4 - M5
15	Guindaste giratório	Gancho	M2 - M3	M1 - M2	M1 - M2	—	—
^a Somente alguns casos de uso típicos são mostrados como orientação nesta Tabela.							

6.1.4 Classificação dos componentes

6.1.4.1 Sistema de classificação

Os componentes estruturais e mecânicos estão classificados em oito grupos, designados pelos símbolos *E1*, *E2*, ..., *E8*, respectivamente, com base nas 11 classes de utilização e quatro classes de espectro de tensão.

6.1.4.2 Classes de utilização

A duração do uso de um componente significa o número de ciclos de tensão ao qual o componente é submetido.

Um ciclo de tensão é um conjunto completo de tensões sucessivas, iniciando no momento em que a tensão sob avaliação excede a tensão σ_m apresentada na Figura 3 e terminando no momento em que esta tensão estiver prestes a exceder pela primeira vez σ_m na mesma direção. Portanto, a Figura 3 representa a tendência da tensão σ ao longo da duração de uso, igual a cinco ciclos de tensão.

A duração total do uso é uma duração de uso calculada, considerada um valor-guia aplicado até o tempo de substituição do componente.

No caso de componentes estruturais, o número de ciclos de tensão está sempre relacionado com o número de ciclos de levantamento do equipamento. Determinados componentes podem ser submetidos a vários ciclos de tensão durante um ciclo de levantamento, dependendo de sua posição na estrutura. No entanto, a relação em questão pode ser diferente de um componente para o outro. Uma vez que esta relação seja conhecida, a duração total do uso do componente é derivada da duração total do uso que determinou a classe de utilização do equipamento.

Quanto aos componentes mecânicos, a duração total do uso é derivada da duração total do uso do mecanismo ao qual o componente sob avaliação pertence, levando em consideração a velocidade da rotação e/ou outras circunstâncias que afetem sua operação. Com base na duração total do uso, existem 11 classes de utilização, designadas pelos símbolos B_0 , B_1 , ..., B_{10} . Estas classes estão especificadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Classes de utilização

Símbolo	Duração total do uso (número n de ciclos de tensão)				
B_0			n	<	16 000
B_1	16 000	<	n	<	32 000
B_2	32 000	<	n	<	63 000
B_3	63 000	<	n	<	125 000
B_4	125 000	<	n	<	250 000
B_5	250 000	<	n	<	500 000
B_6	500 000	<	n	<	1 000 000
B_7	1 000 000	<	n	<	2 000 000
B_8	2 000 000	<	n	<	4 000 000
B_9	4 000 000	<	n	<	8 000 000
B_{10}	8 000 000	<	n		

6.1.4.3 Espectro de tensão

O espectro de tensão caracteriza a magnitude da carga atuando sobre o componente durante sua duração total de uso. É uma função de distribuição $y = f(x)$, expressando a fração x ($0 \leq x \leq 1$) da duração total do uso (ver 6.1.4.2), durante a qual o componente é submetido a uma tensão que atinge pelo menos uma fração y ($0 \leq y \leq 1$) da tensão máxima.

A cada espectro de tensão é atribuído um fator de espectro k_{sp} , determinado por:

$$k_{sp} = \int_0^1 y^c dx$$

Onde c é um expoente que dependendo das propriedades do material envolvido, da forma e do tamanho do componente em questão, da sua rugosidade superficial e do seu grau de corrosão (ver ABNT NBR 8400-3).

Em muitas aplicações, a função $f(x)$ pode ser aproximada por uma função que consiste de um certo número r de passos, que compreendem respectivamente ciclos de tensão n_1, n_2, \dots, n_r . A tensão σ pode ser considerada praticamente constante e igual a σ_i durante n_i ciclos. Se n representa o número total de ciclos e $\sigma_{m\acute{a}x.}$ a maior das tensões $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ então existe uma relação:

$$n_1 + n_2 + \dots + n_r = \sum_{i=1}^r n_i = n$$

e

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_r$$

É obtida uma equação aproximada:

$$k_{sp} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{m\acute{a}x.}} \right)^c \times \left(\frac{n_1}{n} \right) + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{m\acute{a}x.}} \right)^c \times \left(\frac{n_2}{n} \right) + \dots + \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{m\acute{a}x.}} \right)^c \times \left(\frac{n_r}{n} \right) = \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{m\acute{a}x.}} \right)^c \times \left(\frac{n_i}{n} \right) \right]$$

O somatório é truncado para os primeiros $n_i \geq 2 \cdot 10^6$. Este n_i é assumido como n_r e é substituído por $n_r = 2 \cdot 10^6$ ciclos.

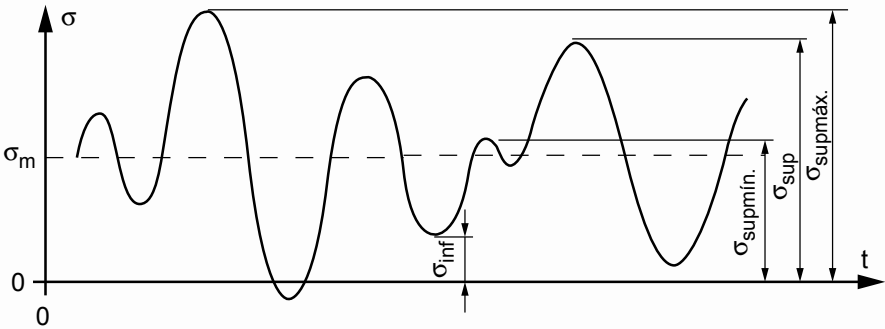
Dependendo do seu espectro de tensão, um componente é classificado em uma das classes de espectro $P1, P2, P3, P4$, apresentadas na Tabela 10¹.

Tabela 10 – Classes de espectro

Símbolo	Fator de espectro k_{sp}				
$P1$		<	k_{sp}	<	0,125
$P2$	0,125	<	k_{sp}	<	0,250
$P3$	0,250	<	k_{sp}	<	0,500
$P4$	0,500	<	k_{sp}	<	1,000

Para componentes estruturais, as tensões a serem consideradas para determinar o fator de espectro são as diferenças $\sigma_{sup} - \sigma_m$ entre as tensões superiores σ_{sup} e a tensão média σ_m . Estes conceitos são determinados pela Figura 3 e representam a variação da tensão ao longo do tempo, durante cinco ciclos de tensão.

¹ Há componentes estruturais e mecânicos, como os sujeitos à ação por mola, que são submetidos a solicitações, quase ou totalmente independentes da carga de trabalho. Deve-se dar atenção especial à classificação destes componentes. Na maioria dos casos, k_{sp} é igual a 1 e pertence à classe $P4$.



Legenda

- σ_{sup} tensão superior
- $\sigma_{supmáx.}$ tensão superior máxima
- $\sigma_{supmín.}$ tensão superior mínima
- σ_{inf} tensão inferior
- σ_m média aritmética de todas as tensões superiores e inferiores durante a duração total do uso

Figura 3 – Variação da tensão em função do tempo durante cinco ciclos de tensão

No caso de componentes mecânicos, considerar $\sigma_m = 0$. As tensões a serem introduzidas no cálculo do fator do espectro, sendo então, as tensões totais que ocorrem na seção relevante do componente.

6.1.4.4 Classificação do grupo de componentes

Com base nas suas classes de utilização e classes de espectro, os componentes em geral estão classificados em um dos oito grupos $E1, E2, \dots, E8$, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Grupos de componentes

Classe de espectro de tensão	Classe de utilização										
	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
P1	E1	E1	E1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
P2	E1	E1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E8
P3	E1	E1	E2	E3	E4	E5	E5	E7	E6	E8	E8
P4	E1	E2	E2	E4	E5	E6	E7	E8	E8	E8	E8

6.2 Carregamentos considerados no projeto de estruturas

Os cálculos estruturais devem ser conduzidos determinando as tensões desenvolvidas em um equipamento durante sua operação. Estas tensões devem ser calculadas com base nas cargas estabelecidas abaixo:

- a) as cargas principais atuantes sobre a estrutura do equipamento, que presume-se esteja parado, nas condições mais desfavoráveis de carregamento;
- b) cargas devido aos movimentos verticais;

- c) cargas devido aos movimentos horizontais;
- d) cargas devido aos efeitos climáticos.

As várias cargas, os fatores a serem aplicados e o método prático de conduzir os cálculos são examinados. As especificações fornecidas a seguir são utilizadas:

- carga de trabalho: peso da carga útil içada, mais o peso dos acessórios (blocos de roldanas, ganchos, barras de carga, garras etc.);
- peso morto: peso morto dos componentes atuando sobre um determinado elemento, excluindo a carga de trabalho.

6.2.1 Cargas principais

As cargas principais incluem:

- a) as cargas devido ao peso morto dos componentes: S_G ;
- b) as cargas devido à carga de trabalho: S_L ;
- c) todas as partes móveis consideradas na posição mais desfavorável.

Cada elemento estrutural deve ser projetado para a posição do equipamento e magnitude da carga de trabalho (entre zero e a carga nominal de trabalho) que cause a tensão máxima ² no elemento em questão.

6.2.2 Cargas devido ao movimento vertical

Estas cargas originam-se com o içamento da carga de trabalho mais ou menos repentinamente, de acelerações (ou desacelerações) do movimento de elevação e do choque vertical das cargas devido ao deslocamento sobre trilhos.

6.2.2.1 Cargas devido à elevação da carga de trabalho

As oscilações causadas pela elevação da carga devem ser levadas em consideração, multiplicando-se as cargas pelo fator denominado “coeficiente dinâmico” Ψ .

No caso de elevação de uma carga em uma superfície sem restrição, os efeitos dinâmicos da transferência da carga do solo para o equipamento devem ser levados em consideração pela multiplicação da força gravitacional devido à massa da carga içada por um fator Ψ (ver Figura 4).

A massa da carga içada inclui as massas da carga útil, dos dispositivos de manuseio e de uma porção da massa dos cabos de elevação suspensos ou correntes etc.

² Em certos casos, a tensão máxima pode ser obtida sem carga de trabalho.

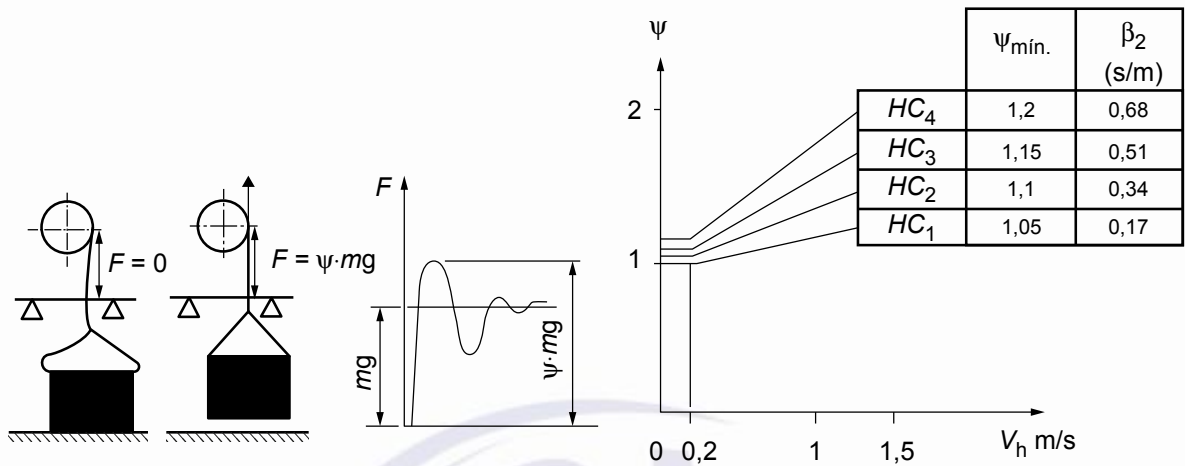


Figura 4 – Fator Ψ

O fator Ψ deve ser obtido conforme descrito a seguir:

$$\Psi = \Psi_{\min.} + \beta_2 \times V_h$$

onde $\Psi_{\min.}$ e β_2 são fornecidos na Tabela 12 para a classe de elevação apropriada. Os equipamentos são classificados segundo as classes de elevação HC1 a HC4, de acordo com suas características dinâmicas. A Tabela 4 fornece indicação para seleção da classe de elevação, a qual depende dos tipos de equipamentos específicos. Do mesmo modo, os valores para Ψ podem ser determinados por experimentos ou por análise dinâmica sem referência à classe de elevação.

V_h , expresso em metros por segundo (m/s) é a velocidade de elevação em regime constante, relacionada ao meio de içamento. Os valores de V_h são fornecidos na Tabela 13 em função da velocidade máxima de elevação da carga $V_{h\cdot\max.}$.

Tabela 12 – Valores de β_2 e $\Psi_{\min.}$

Classe de elevação do equipamento	β_2	$\Psi_{\min.}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

Tabela 13 – Valores de V_h para estimativa de Ψ_{\min} .

Caso de solicitação (ver 6.3.3)	Tipo de acionamento de elevação e seu método de operação				
	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5
Caso I, Caso II	$V_{h\cdot\max.}$	$V_{h\cdot cs}$	$V_{h\cdot cs}$	$0,5 \times V_{h\cdot\max.}$	$V_h = 0$
Caso III	–	$V_{h\cdot\max.}$	–	$V_{h\cdot\max.}$	$0,5 \times V_{h\cdot\max.}$

onde

HD1 é o mecanismo de elevação que não pode ser operado com velocidade baixa;

HD2 é uma velocidade baixa para o acionamento de elevação que pode ser selecionada pelo operador do equipamento;

HD3 é o sistema de controle de acionamento de elevação que assegura o uso de uma velocidade baixa estável até que a carga seja içada do solo;

HD4 é um controle de variação contínua de velocidade que pode ser utilizado pelo operador do equipamento;

HD5 é o sistema que após pré-tensionar o mecanismo de elevação, gera uma variação contínua de velocidade, independentemente do operador do equipamento;

$V_{h\cdot\max.}$ é a velocidade nominal de elevação;

$V_{h\cdot cs}$ é a velocidade mais baixa de elevação ou primeiro ponto de velocidade que pode ser selecionado pelo operador.

O valor máximo a ser adotado para a velocidade de elevação aplicável nesta equação é 1,5 m/s. Para velocidades mais elevadas, o coeficiente dinâmico Ψ não é aumentado.

O coeficiente dinâmico Ψ é menor quando a carga de elevação é suportada por um elemento que tem alguma flexibilidade, como em guindastes de lança.

Para casos de projeto (por exemplo, pórticos rolantes), o valor de Ψ calculado para uma determinada classe de elevação de pontes rolantes deve ser utilizado para o trecho entre os apoios, visto que a rigidez da estrutura neste trecho é comparável com a de uma viga de ponte rolante, enquanto o trecho em balanço pode ter uma classificação inferior.

6.2.2.2 Cargas devido à aceleração (ou desaceleração) do mecanismo de elevação e cargas de choque vertical durante o deslocamento sobre trilhos

Como o coeficiente Ψ considera que o grau de impacto sobre a carga de trabalho é a maior carga de choque, as cargas devido à aceleração (ou desaceleração) do movimento de elevação e as reações verticais devido ao deslocamento ao longo de trilhos, supondo que estão apropriadamente assentados, são desconsideradas ³.

³ Isto indica que as juntas dos trilhos estão em boas condições. O efeito prejudicial em equipamentos de elevação de trilhos em condições precárias é grande, tanto para a estrutura quanto para o mecanismo, e é necessário enfatizar que as juntas dos trilhos devem ser mantidas em boas condições. Nenhum coeficiente de choque de carga pode compensar danos causados por juntas com defeitos. Com relação aos equipamentos de alta velocidade, a melhor solução é soldar os trilhos por um processo adequado, para eliminar totalmente o choque que ocorre quando o equipamento passa pelas juntas.

6.2.2.3 Caso especial

Em casos especiais, as solicitações devido ao peso próprio são de sinal oposto àquelas devido à carga de trabalho. Neste caso, a comparação deve ser feita entre o valor da solicitação obtida na condição de “equipamento com carga”, com o coeficiente dinâmico Ψ aplicado à carga de trabalho e o valor obtido na condição “sem carga”, levando em consideração as oscilações resultantes da descida da carga.

A solicitação máxima ao descarregar a carga é obtida pela seguinte equação:

$$\bar{S}_G + \frac{\bar{S}_L (\psi - 1)}{2}$$

que é comparada com a solicitação para a condição de “equipamento com carga” determinada pela seguinte equação:

$$\bar{S}_G + \psi \bar{S}_L$$

onde

\bar{S}_G o valor algébrico das cargas devido ao peso próprio;

\bar{S}_L o valor algébrico das cargas devido à carga de trabalho.

O componente é finalmente dimensionado com base no valor mais desfavorável.

NOTA Esta equação é baseada no fato de que o coeficiente dinâmico determina a amplitude máxima das oscilações geradas na estrutura quando a carga é suspensa. A amplitude da oscilação é fornecida por:

$$\bar{S}_L (\psi - 1)$$

Presume-se que a amplitude da oscilação gerada na estrutura, quando a carga é descarregada é a metade da oscilação causada pela elevação.

Portanto, a condição crítica de carregamento é:

$$\bar{S}_G + \frac{\bar{S}_L (\psi - 1)}{2}$$

que deve ser comparada com a condição de carregamento fornecida por:

$$\bar{S}_G + \psi \bar{S}_L$$

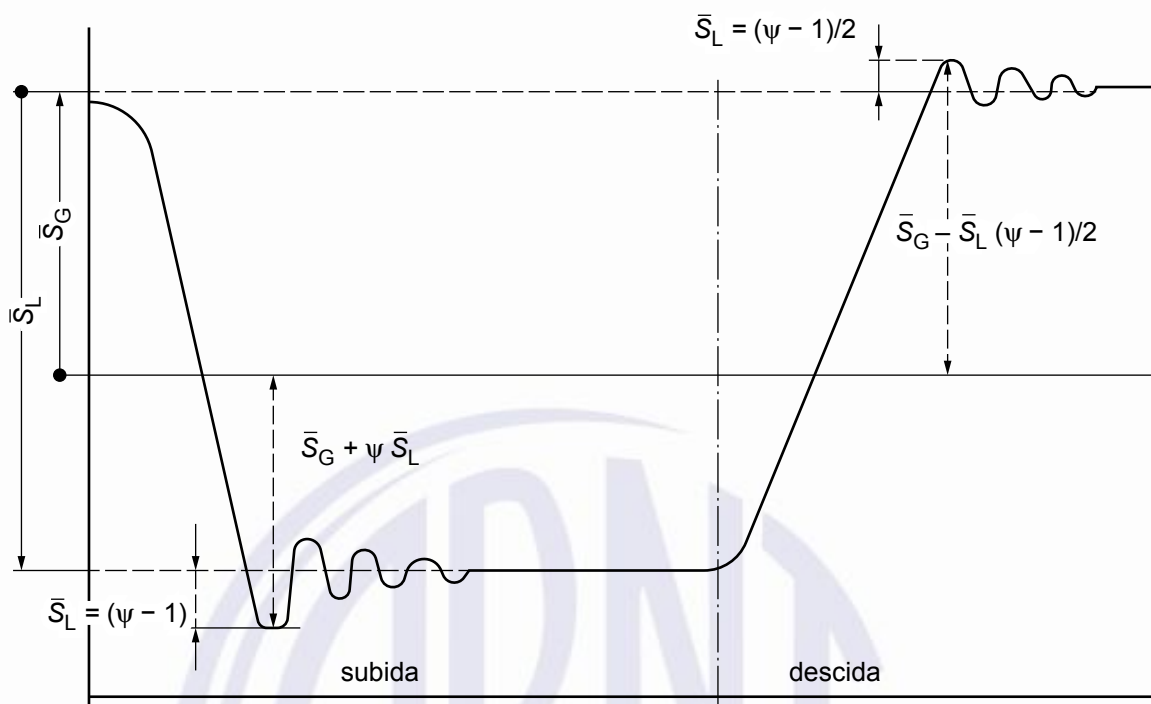


Figura 5 – Curva de elevação e descida quando S_L e S_G possuem sinais opostos

6.2.3 Cargas devido aos movimentos horizontais S_H

As cargas devido aos movimentos horizontais são as seguintes:

- efeitos de inércia devido à aceleração (ou desaceleração) transversal, deslocamento, rotação ou movimento da lança, que podem ser calculados nos termos do valor da aceleração (ou desaceleração);
- efeitos da força centrífuga;
- reações horizontais transversais resultantes da ação de rolagem ou enviesamento;
- efeitos de amortecimento.

6.2.3.1 Efeitos horizontais devido à aceleração (ou desaceleração)

As cargas devido às acelerações ou desacelerações transmitidas aos elementos móveis na partida ou frenagem são calculadas para os vários elementos estruturais.

6.2.3.1.1 Movimento transversal e longitudinal

Para estes movimentos, o cálculo deve ser realizado considerando a força horizontal paralela ao trilho, aplicada à pista das rodas motrizes.

As cargas devem ser calculadas em termos do tempo de aceleração ou desaceleração, assumido de acordo com as condições operacionais e com as velocidades a serem atingidas.

A partir dos tempos é deduzido o valor da aceleração, em metros por segundo ao quadrado (m/s^2), a ser utilizado para calcular a força horizontal de acordo com as massas a serem movimentadas.

Se os valores da velocidade e aceleração não forem especificados pelo usuário, os tempos de aceleração correspondentes às velocidades a serem atingidas podem ser selecionados de acordo com as três condições operacionais descritas abaixo:

- equipamentos de velocidade baixa a moderada com grande extensão de deslocamento;
- equipamentos de velocidade moderada a alta para aplicações normais;
- equipamentos de alta velocidade com aceleração alta. Neste caso, quase sempre é necessário acionar todas as rodas.

A Tabela 14 fornece os valores dos tempos de aceleração e das acelerações para as três condições acima.

Tabela 14 – Tempos de aceleração e valores da aceleração

Velocidade a ser atingida m/s	Velocidade baixa e moderada com deslocamento longo		Velocidade moderada e alta (aplicações normais)		Alta velocidade com acelerações altas	
	Tempo de aceleração s	Aceleração m/s ²	Tempo de aceleração s	Aceleração m/s ²	Tempo de aceleração s	Aceleração m/s ²
4,00			8,0	0,50	6,0	0,67
3,15			7,1	0,44	5,4	0,58
2,50			6,3	0,39	4,8	0,52
2,00	9,1	0,22	5,6	0,35	4,2	0,47
1,60	8,3	0,19	5,0	0,32	3,7	0,43
1,00	6,6	0,15	4,0	0,25	3,0	0,33
0,63	5,2	0,12	3,2	0,19		
0,40	4,1	0,098	2,5	0,16		
0,25	3,2	0,078				
0,16	2,5	0,064				

A força horizontal a ser considerada não pode ser inferior a 1/30 nem superior a 1/4 da carga sobre as rodas acionadas ou frenadas.

6.2.3.1.2 Movimentos de elevação da lança e rotação

Para movimentos de elevação da lança e rotação, os cálculos devem ser baseados na aceleração ou desaceleração, com torque aplicado ao eixo motor dos mecanismos.

As taxas de aceleração dependem do equipamento. Para um guindaste normal um valor de aceleração entre 0,1 m/s² e 0,6 m/s², de acordo com a velocidade e o raio, pode ser escolhido para aceleração na extremidade da lança, de maneira que um tempo de aceleração entre 5 s a 10 s seja atingido.

NOTA O método para calcular os efeitos da aceleração dos movimentos horizontais é fornecido no Anexo B.

6.2.3.2 Efeitos da força centrífuga

No caso de guindastes de lança, a força centrífuga devido ao giro deve ser considerada. Na prática, ela é suficiente para determinar a força horizontal exercida na ponta da lança devido à inclinação do cabo que sustenta a carga e em geral desprezar os efeitos da força centrífuga sobre os outros elementos do guindaste.

6.2.3.3 Reações transversais devido ao movimento do equipamento

Quando duas rodas ou dois truques rolam ao longo de um trilho, o binário formado pelas forças horizontais perpendiculares ao trilho deve ser considerado. As forças componentes deste binário são obtidas multiplicando a carga vertical exercida sobre as rodas ou truques pelo coeficiente λ , que depende da proporção do vão p para a distância entre eixos a (ver Figura 6).

Conforme mostrado no gráfico da Figura 6, este coeficiente gira em torno de 0,05 e 0,2 para proporções p/a entre 2 e 8.

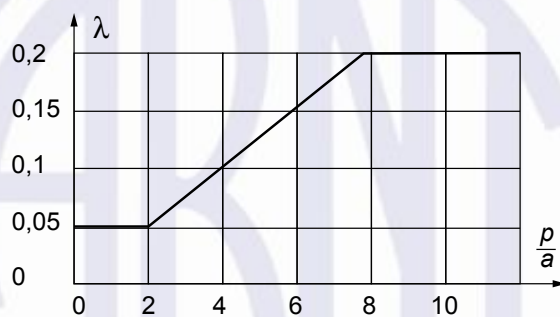


Figura 6 – Coeficiente λ

Por distância entre eixos, é entendido como a distância entre os centros das rodas mais afastadas para equipamentos com até quatro rodas por trilho, ou a distância entre os centros dos pinos equalizadores, no caso de equipamentos com sistemas de truques e mais de quatro rodas por trilho. Quando roletes-guia horizontais são utilizados, a distância entre os eixos a deve ser a distância entre os pontos de contato do trilho e os roletes-guia.

Quando houver até oito rodas no mesmo trilho, a distância a deve ser considerada entre os centros do último par de rodas de cada canto (ver Figura 7).

Para um número acima de oito rodas por trilho, deve ser considerado o centro das três últimas rodas de cada canto.

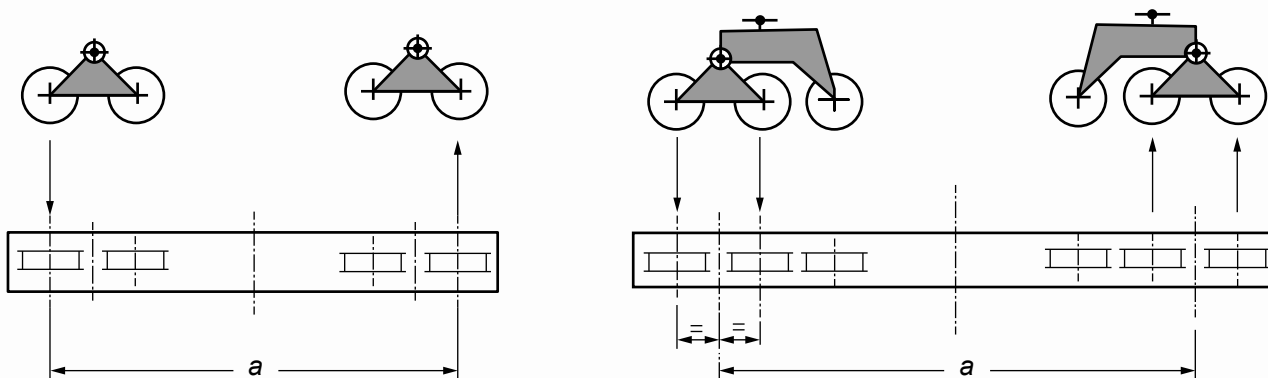


Figura 7 – Distribuição das cargas laterais nas rodas

Para o dimensionamento da estrutura da ponte, do carro e de componentes como truques ou vigas equalizadoras, a carga lateral máxima deve ser considerada aplicada igualmente a todas as rodas, mesmo para as rodas internas que são mostradas como não carregadas na Figura 7.

6.2.3.4 Reações transversais devido ao enviesamento do equipamento S_{HE}

Um método para calcular as reações transversais devido ao movimento do equipamento é fornecido no Anexo C, no caso de enviesamento da ponte. Este tipo de solicitação pode ser tratado como um caso excepcional (ver 6.3.3).

6.2.3.5 Efeitos de choque

Este caso deve ser considerado quando o impacto devido à colisão com para-choque é aplicado à estrutura e quando é aplicado à carga suspensa.

6.2.3.5.1 Efeitos de choque na estrutura

Uma distinção deve ser feita entre:

- a) o caso no qual a carga suspensa pode oscilar; e
- b) o caso no qual as guias rígidas impedem a oscilação.

No primeiro caso, as seguintes regras devem ser aplicadas:

Para velocidades horizontais abaixo de 0,4 m/s (24 m/min), os efeitos de choque não podem ser considerados.

Para velocidades excedendo 0,7 m/s (42 m/min), as reações geradas na estrutura pelas colisões com o para-choque devem ser consideradas.

Admite-se que o para-choque seja capaz de absorver a energia cinética do equipamento (sem a carga de trabalho) em uma fração da velocidade nominal V_t , fixada em 0,7 V_t .

Entretanto, para velocidades superiores a 1 m/s (60 m/min), o uso de dispositivos desaceleradores que atuam nas extremidades do caminho de rolamento é permitido, desde que a ação destes dispositivos seja automática e desde que eles produzam uma desaceleração efetiva do equipamento, sempre reduzindo a velocidade para o valor predeterminado mais baixo antes de alcançar os para-choques.

Neste caso, a velocidade reduzida obtida após a redução é utilizada para o valor de V_t ao se calcular o efeito de choque ⁴.

No segundo caso, onde a carga não pode oscilar, o efeito de amortecimento é calculado da mesma maneira, porém levando em consideração o valor da carga de trabalho.

As cargas resultantes geradas na estrutura devem ser calculadas com base na desaceleração imposta ao equipamento pelo para-choque.

⁴ Deve-se enfatizar que um dispositivo verificado e eficaz deve ser instalado. Um simples interruptor de limite cortando a alimentação de energia para o motor não é motivo suficiente para indicar velocidade reduzida para o cálculo do efeito de choque.

A massa equivalente dos elementos em rotação do mecanismo de translação também deve ser considerada ao determinar a força nos para-choques.

A menos que um método mais apurado para determinação das tensões seja utilizado, a força dos para-choques deve ser multiplicada por um fator dinâmico, conforme descrito na Tabela 15, no dimensionamento das estruturas do carro ou do equipamento.

Tabela 15 – Coeficiente dinâmico para esforço devido aos para-choques

Área abaixo da curva característica de força x curso do para-choque aproximada a	Coeficiente dinâmico relativo à colisão com	
	Equipamento	Carro
Triângulo	1,25	1,35
Quadrado	1,50	1,60

6.2.3.5.2 Efeito de choque sobre a carga suspensa

Impactos devido à colisão entre a carga e os obstáculos fixos são levados em consideração somente para equipamentos onde a carga seja rigidamente guiada. Neste caso, os esforços gerados por esta colisão são considerados.

Os esforços sobre a estrutura podem ser calculados considerando que a força horizontal aplicada ao nível da carga seja capaz de fazer duas rodas do carro levantarem.

6.2.4 Cargas devido aos efeitos climáticos

As cargas devido aos efeitos climáticos são aquelas resultantes da ação do vento, de cargas de neve e de variações da temperatura.

6.2.4.1 Ação do vento

Este item está relacionado às cargas do vento sobre a estrutura do equipamento.

É fornecido um método simplificado de cálculo e é assumido que o vento pode soprar horizontalmente em qualquer direção a uma velocidade constante e que há uma reação estática para as cargas que o vento aplica sobre a estrutura do equipamento.

6.2.4.1.1 Pressão do vento

A pressão do vento é fornecida por

$$q = 0,613 V_s^2$$

onde

q é a pressão dinâmica, expressa em newtons por metro quadrado (N/m²);

V_s é a velocidade do vento projetada, expressa em metros por segundo (m/s).

6.2.4.1.2 Condições do vento no projeto

Duas condições de vento de projeto, descritas a seguir, são consideradas no cálculo das cargas sobre os equipamentos.

6.2.4.1.2.1 Vento operacional (em serviço)

Este é o vento máximo no qual o equipamento é projetado para operar. Presume-se que as cargas do vento sejam aplicadas na condição menos favorável em combinação com as cargas de serviço apropriadas. As pressões do vento no projeto operacional e as velocidades correspondentes são fornecidas na Tabela 16. Presume-se que as cargas sejam constantes com a altura do equipamento ⁵.

Pressupõe-se que as velocidades operacionais e as acelerações nominais não sejam necessariamente alcançadas sob condições de vento extremas.

Tabela 16 – Pressão do vento de projeto em operação

Tipo de equipamento	Pressão do vento operacional N/m ²	Velocidade do vento operacional m/s
Equipamentos de içamento facilmente protegidos contra a ação do vento ou projetados exclusivamente para uso em vento leve Operações de montagem	125	14
Todos os tipos de equipamentos normais instalados ao ar livre	250	20
Equipamentos que devem continuar a operar com ventos fortes ^a	500	28
^a Por exemplo, equipamentos do tipo 10 e 11 descritos na Tabela 4.		

6.2.4.1.2.2 Ação do vento sobre a carga

A ação do vento sobre a carga suspensa para um equipamento que maneja cargas variadas deve ser determinada a partir da seguinte equação:

$$F = 2,5 \times A \times q$$

onde

F é a força exercida pelo vento sobre a carga no gancho, expressa em newtons (N);

q é a pressão do vento de operação da Tabela 16, expressa em newtons por metro quadrado (N/m²);

A é a área máxima das partes expostas da carga suspensa, expressa em metros quadrados (m²).

⁵ Quando um dispositivo de medição da velocidade do vento precisar ser fixado a um equipamento, este normalmente deve ser colocado no ponto mais elevado do equipamento. Nos casos onde a velocidade do vento em determinado nível for mais significativa para a segurança do equipamento, o fabricante deve estabelecer a altura na qual o dispositivo deve ser colocado.

Quando a área A não for conhecida, um valor mínimo de $0,5 \text{ m}^2$ por tonelada de carga nominal de trabalho deve ser utilizado.

Quando um equipamento for projetado para manejar cargas somente de um tamanho e forma específicos, a carga do vento deve ser calculada para as dimensões e configurações apropriadas.

Excepcionalmente, quando um equipamento necessitar manejar cargas com uma grande área de superfície, é admissível que o fabricante determine a velocidade do vento inferior ao especificado na Tabela 16, para a qual as cargas não podem ser manejadas.

6.2.4.1.2.3 Vento fora de serviço

Este é o vento máximo (tempestade) para o qual o equipamento é projetado para permanecer estável na condição fora de operação, conforme indicado pelo fabricante. A velocidade varia com a altura do equipamento acima do nível do solo, a localização geográfica e o grau de exposição aos ventos habituais.

Para os equipamentos utilizados ao ar livre, a pressão do vento teórica normal e a velocidade correspondente para a condição fora de serviço são indicadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Vento fora de serviço

Altura acima do nível do solo m	Pressão do vento de projeto fora de serviço N/m^2	Velocidade aproximada equivalente do vento de projeto fora de serviço m/s
0 a 20	800	36
20 a 100	1 100	42
Mais de 100	1 300	46

Ao calcular as cargas do vento para condições fora de serviço, a pressão do vento pode ser considerada como constante ao longo dos intervalos da altura vertical na Tabela 17. Alternativamente, pode-se admitir que a pressão do vento de projeto na parte superior do equipamento seja constante sobre a altura total.

Quando os equipamentos precisarem estar permanentemente instalados ou ser utilizados por períodos prolongados em áreas onde as condições do vento sejam extremamente severas, os valores acima podem ser alterados por um acordo entre o fabricante e o comprador baseado em dados meteorológicos.

6.2.4.1.3 Cálculos da carga do vento

Para muitas estruturas parciais e completas e para elementos individuais utilizados em estruturas de equipamentos, a carga do vento é calculada a partir da seguinte equação:

$$F = A \times q \times C_f$$

onde

F é a carga do vento, expressa em newtons (N);

A é a área frontal efetiva da peça sob consideração, expressa em metros quadrados (m^2);

q é a pressão do vento correspondente à condição do projeto apropriado, expressa em newtons por metro quadrado (N/m^2);

C_f é o coeficiente aerodinâmico na direção do vento para a peça sob consideração.

A carga total do vento sobre a estrutura é entendida como a soma das cargas sobre os seus componentes.

Para determinar os requisitos de força e estabilidade do equipamento, a carga total do vento deve ser considerada.

A magnitude da carga do vento a ser considerada no projeto de mecanismos é fornecida na ABNT NBR 8400-3 sobre o projeto deles.

6.2.4.1.4 Coeficientes aerodinâmicos

6.2.4.1.4.1 Elementos e estruturas individuais

Os coeficientes aerodinâmicos para elementos individuais, estruturas de vigas treliçadas e casa de máquinas são fornecidos na Tabela 18. Os valores para elementos individuais variam de acordo com a esbelteza aerodinâmica e, no caso de seções de vigas caixão, com a proporção da seção. A esbelteza aerodinâmica é definida pelas seguintes relações:

$$\frac{l}{b} \text{ ou } \frac{l}{D}$$

onde

l é o comprimento do elemento, expresso em metros (m);

b ou D é a altura da seção transversal exposta ao vento, expressa em metros (m), conforme mostrado na Figura 8.

Para vigas treliçadas, os comprimentos de elementos individuais são considerados entre os centros dos pontos de junção adjacentes (nós).

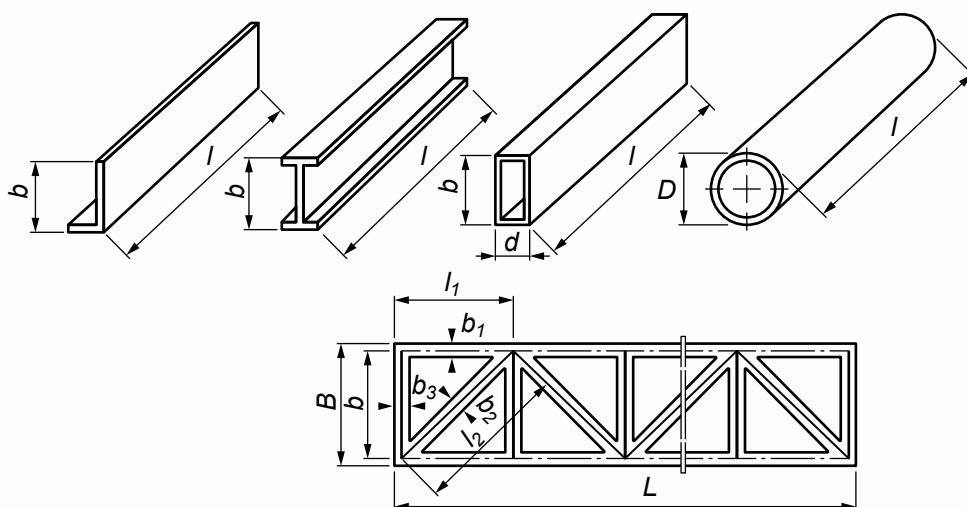


Figura 8 – Esbelteza aerodinâmica

A relação de solidez (área das partes sólidas / área delimitada) é calculada pela equação:

$$\frac{A}{A_e} = \sum_1^n \left[\frac{l_i \times b_i}{L \times B} \right]$$

A relação de espaçamento é calculada por:

$$\frac{a}{b} \text{ ou } \frac{a}{B}$$

onde

a, b e B são as dimensões da estrutura apresentadas na Figura 9. Para “ a ” considerar o menor valor possível na geometria da face exposta.

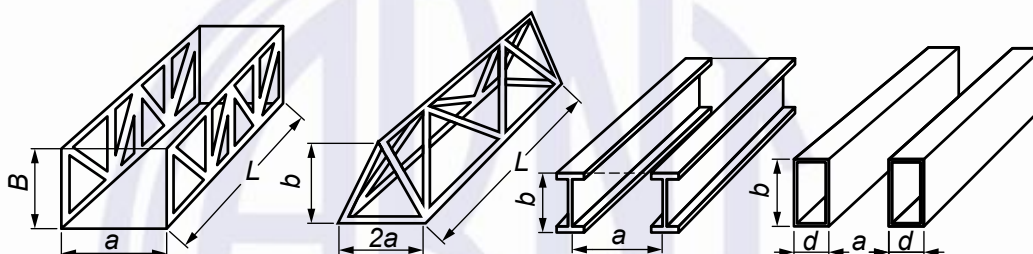


Figura 9 – Relação de espaçamento

A relação da seção é estabelecida por:

$$\frac{b}{d}$$

onde

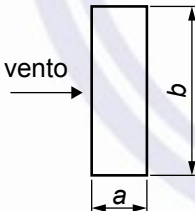
b e d são as dimensões da estrutura apresentadas na Figura 9. A carga do vento sobre estruturas de vigas treliçadas pode ser calculada com base nos coeficientes para os elementos individuais que são fornecidos na parte superior da Tabela 18. Neste caso, a esbelteza aerodinâmica de cada elemento deve ser considerada. Alternativamente, os coeficientes globais para as estruturas treliçadas fabricadas de seções circulares e planas são fornecidos na parte intermediária da Tabela 18.

Quando uma estrutura de treliça é fabricada de seções circulares e planas ou de seções circulares nos dois regimes de fluxo ($D \times V_S < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ e $D \times V_S \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$), os coeficientes aerodinâmicos apropriados são aplicados às áreas frontais correspondentes.

Quando placas de união de tamanho normal são utilizadas na construção da estrutura treliçada, não é necessária nenhuma compensação para a área adicional apresentada pelas placas, desde que os comprimentos dos elementos individuais sejam tomados entre os centros dos pontos de junção.

Coefficientes aerodinâmicos obtidos de ensaios de túnel de vento ou de escala real também podem ser utilizados.

Tabela 18 – Coeficientes aerodinâmicos

Tipo	Descrição	Esbelteza aerodinâmica l/b ou l/D ^a						
		≤ 5	10	20	30	40	50	> 50
Elementos individuais	Seções laminadas	1,15	1,15	1,3	1,4	1,45	1,5	1,6
	Seções quadradas vazadas até 356 mm e retangulares de 254 mm \times 457 mm	1,4	1,45	1,5	1,55	1,55	1,55	1,6
	Outras seções	1,05	1,05	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
	Seções circulares onde:							
	$D \times V_S < 6 \text{ m}^2/\text{s}$	1,30	1,35	1,6	1,65	1,70	1,80	1,80
	$D \times V_S \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90
	$D \times V_S \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	0,60	0,65	0,70	0,70	0,75	0,80	0,80
	b/d							
	Seções quadradas vazadas acima de 356 mm e retangulares de 254 mm \times 457 mm	2	1,55	1,75	1,95	2,10	2,20	
		1	1,40	1,55	1,75	1,85	1,90	
		0,5	1,0	1,20	1,30	1,35	1,40	
	0,25	0,80	0,90	0,90	1,0	1,0		
								
Estruturas de vigas treliçadas	Seções com laterais planas	1,70						
	Seções circulares onde:							
	$D \times V_S < 6 \text{ m}^2/\text{s}$	1,10						
	$D \times V_S \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	0,80						
Casas de máquinas etc.	Estruturas retangulares totalmente fechadas apoiadas sobre o solo ou base sólida	1,10						

^a Ver Figura 8.

6.2.4.1.4.2 Estruturas de múltiplos elementos- Coeficientes de redução

Quando estruturas ou elementos paralelos são posicionados para que ocorra proteção, as cargas de vento na estrutura ou elemento na direção do vento e sobre as partes desprotegidas são calculadas utilizando os coeficientes aerodinâmicos apropriados. A carga do vento sobre as partes desprotegidas é multiplicada por um fator de redução η , fornecido na Tabela 19. Os valores de η variam com as relações de solidez e espaçamento conforme apresentado em 6.2.4.1.4.1.

Tabela 19 – Coeficientes de redução

Relação de espaçamento a/b	Relação de solidez A/A_e					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	0,75	0,40	0,32	0,21	0,15	0,10
1,0	0,92	0,75	0,59	0,43	0,25	0,10
2,0	0,95	0,80	0,63	0,50	0,33	0,20
4,0	1,0	0,88	0,76	0,66	0,55	0,45
5,0	1,0	0,95	0,88	0,81	0,75	0,68
6,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Quando um número de estruturas ou membros idênticos é espaçado de forma equidistante, um atrás do outro, de modo que cada estrutura proteja a que está atrás, presume-se que o efeito de redução aumente até a nona estrutura e permaneça constante dali em diante. As cargas do vento são calculadas conforme descrito a seguir:

a) na 1ª estrutura

$$F_1 = A \times q \times C_f, \text{ expressa em newtons (N)}$$

b) na 2ª estrutura

$$F_2 = \eta \times A \times q \times C_f, \text{ expressa em newtons (N)}$$

c) na n^{a} estrutura (onde n é de 3 a 8)

$$F_n = \eta^{(n-1)} \times A \times q \times C_f \text{ expressa em newtons (N)}$$

d) na 9ª estrutura e subsequentes

$$F_9 = \eta^8 \times A \times q \times C_f \text{ expressa em newtons (N)}$$

Deste modo, a carga total do vento é:

quando houver até nove estruturas

$$F_{\text{total}} = [1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \dots + \eta^{(n-1)}] A \times q \times C_f, \text{ expressa em newtons (N)}$$

$$= \left[\frac{(1 - \eta^n)}{(1 - \eta)} \right] \times A \times q \times C_f$$

NOTA Assume-se que o termo η^x utilizado na equação de F_{total} é assumido ter um limite inferior de 0,10. É considerado como 0,10 sempre que $\eta^x < 0,10$.

6.2.4.1.4.3 Torres treliçadas

No cálculo da carga de vento sobre torres quadradas, na falta de um cálculo detalhado, a área sólida da face na direção do vento é multiplicada pelos seguintes coeficientes aerodinâmicos gerais:

a) para torres compostas por seções de laterais planas: $1,7 (1 + \eta)$

b) para torres compostas por seções circulares

$$\text{onde } D \times V_s < 6 \text{ m}^2/\text{s}: \quad 1,1 (1 + \eta)$$

$$\text{onde } D \times V_s \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}: \quad 1,4$$

O valor de η é extraído da Tabela 18 para $a/b = 1$ de acordo com a relação de solidez da face na direção do vento.

A carga máxima do vento sobre uma torre quadrada ocorre quando o vento incide sobre o vértice. Na falta de um cálculo detalhado, esta carga pode ser considerada como 1,2 vez aquela desenvolvida com o vento atuando em um lado.

6.2.4.1.4.4 Elementos inclinados em relação à direção do vento

Aplica-se aos seguintes elementos:

a) elementos individuais, estruturas etc.

Quando o vento incide em ângulo em relação ao eixo longitudinal de um elemento ou superfície de uma estrutura, a carga na direção do vento é obtida da seguinte equação:

$$F = A \times q \times C_f \times \sin^2 \theta, \text{ expressa em newtons (N)}$$

As cargas perpendiculares ao eixo do elemento e à direção do vento são obtidas respectivamente pelas equações:

$$F_N = A \times q \times C_f \times \sin \theta, \text{ expressa em newtons (N)}$$

$$F_P = A \times q \times C_f \times \sin \theta \times \cos \theta, \text{ expressa em newtons (N)}$$

onde

F , A , q e C_f são estabelecidos em 6.2.4.1.3; e

θ é o ângulo do vento ($\theta < 90^\circ$) para o eixo longitudinal ou superfície (ver Figura 10).

b) Torres e estruturas treliçadas.

Quando o vento incide em ângulo em relação ao eixo longitudinal de uma torre ou estrutura treliçada, a carga na direção do vento é obtida da seguinte equação:

$$F = A \times q \times C_f \times K_2, \text{ expressa em newtons (N)}$$

onde

F , A , q e C_f são estabelecidos em 6.2.4.1.3; e

$$K_2 = \frac{\theta}{\left[50 \left(1,7 - \frac{S_p}{S} \right) \right]}$$

que não pode ser inferior a 0,35 ou superior a 1.

- θ é o ângulo do vento, expresso em graus ($\theta < 90^\circ$), em relação ao eixo longitudinal da estrutura treliçada ou torre;
- S_p é a área, expressa em metros quadrados (m^2), dos elementos de contraventamento da estrutura treliçada ou torre projetada no plano perpendicular à direção do vento;
- S é a área, expressa em metros quadrados (m^2), de todos os elementos de contraventamento e elementos principais da estrutura ou torre, projetada no seu plano perpendicular à direção do vento.

O valor de K_2 é considerado 0,35 sempre que o valor calculado for $< 0,35$ e 1,0 sempre que o valor calculado for $> 1,0$.

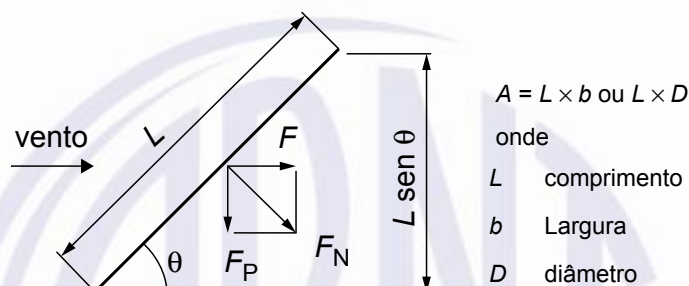


Figura 10 – Elementos inclinados em relação à direção do vento

6.2.4.2 Carga da neve

As cargas da neve devem ser desprezadas nos cálculos de dimensionamento de equipamentos de elevação de carga.

6.2.4.3 Variações de temperatura

Tensões devido às variações de temperatura devem ser consideradas somente em casos especiais de elementos que não podem se expandir.

Nestes casos, a faixa de temperatura máxima deve ser de -10°C a 50°C .

Cargas diversas - Cargas suportadas por plataformas. As escadas de acesso, cabine do operador e plataformas devem ser projetadas para suportar as seguintes cargas concentradas:

- 3 000 N para escadas e plataformas de manutenção onde materiais possam ser colocados;
- 1 500 N para escadas e plataformas destinadas somente ao o acesso de pessoas;
- 300 N como a força horizontal que pode ser exercida sobre o corrimão e o rodapé.

Estas cargas não podem ser utilizadas nos cálculos das vigas.

6.3 Casos de solicitação

Três casos diferentes de solicitação devem ser considerados para efeito do dimensionamento:

- caso I: serviço normal sem vento;
- caso II: serviço normal com vento limite de serviço;
- caso III: solicitações excepcionais.

Com as várias cargas determinadas de acordo com 6.2, deve-se levar em consideração a probabilidade de exceder a tensão calculada que resulta de métodos imperfeitos de cálculos e contingências imprevistas, aplicando um coeficiente M_x que varia de acordo com o grupo de classificação do equipamento.

Os valores deste coeficiente M_x são indicados em 6.3.4.

6.3.1 Caso I: equipamento em operação normal sem vento

Devem ser levados em consideração:

- a) as cargas estáticas devido ao peso próprio S_G ;
- b) as cargas de serviço S_L multiplicada pelo coeficiente dinâmico Ψ ;
- c) dois efeitos horizontais S_H mais desfavoráveis entre aqueles estabelecidos em 6.2.3, excluindo os efeitos de choque.

Todas estas cargas devem ser multiplicadas por um coeficiente de amplificação M_x especificado em 6.3.4:

$$M_x (S_G + \Psi \times S_L + S_H)$$

Em casos onde o movimento de deslocamento ocorre somente para posicionar o equipamento e este normalmente não é utilizado para movimentar cargas, o efeito deste movimento não pode ser combinado com outro movimento horizontal. Por exemplo, este é o caso dos equipamentos de cais que, uma vez posicionados, manejam uma série de cargas.

6.3.2 Caso II: equipamento em operação com vento limite de serviço

As cargas do caso I às quais são adicionados os efeitos do vento limite de operação S_W , estabelecidas em 6.2.4.1.2.1 (Tabela 16), e, onde aplicável, o efeito da variação da temperatura, são conforme a seguir:

$$M_x (S_G + \Psi \times S_L + S_H) + S_W$$

NOTA Os efeitos dinâmicos da aceleração e desaceleração não possuem os mesmos valores no caso II e no caso I, pois, quando o vento está atuando, os tempos de aceleração ou frenagem não são os mesmos da condição estática.

6.3.3 Caso III: equipamento submetido a solicitações excepcionais

6.3.3.1 As solicitações excepcionais ocorrem nos seguintes casos:

- a) equipamento fora de serviço com vento máximo;
- b) equipamento operando e submetido ao efeito dinâmico de impacto no para-choque;
- c) equipamento em operação e submetido ao efeito dinâmico de desaceleração produzida pela atuação de freios com elevados torques em situação de emergência. Este é o caso de equipamentos fortemente influenciados pela ação do vento que requerem freios mecânicos com elevados torques, porém normalmente utilizados somente para estacionar o equipamento;
- d) equipamento submetido aos ensaios indicados na ABNT NBR 8400-5.

6.3.3.2 Uma das seguintes combinações mais críticas deve ser considerada:

- as cargas S_G devido ao peso próprio e a carga $S_{Wmáx.}$ devido ao vento máximo, conforme mencionado em 6.2.4.1.2.2 (incluindo as reações das ancoragens);
- as cargas S_G devido ao peso próprio e S_L devido à carga de trabalho, mais o efeito de impacto no para-choque, somado ao S_T mais elevado conforme mencionado em 6.2.3.5, ou o efeito dinâmico de desaceleração produzida pela atuação de freios com elevados torques em situação de emergência, em equipamentos que operam expostos a ventos;
- as cargas S_G devido ao peso próprio e a solicitação devido ao produto $\Psi \rho_1 S_L$ sendo que ρ_1 é o coeficiente pelo qual a carga de serviço é multiplicada para o ensaio dinâmico, conforme a ABNT NBR 8400-5, Tabela 1;
- as cargas S_G devido ao peso próprio e S_L devido à carga de trabalho, mais as solicitações decorrentes do enviesamento da ponte.

Estes casos são expressos pelas seguintes equações:

$$S_G + S_{Wmáx}$$

$$S_G + S_L + S_T^6 \text{ ou } S_G + S_L + S_{Hmáx}$$

$$S_G + \Psi \times \rho_1 \times S_L$$

$$S_G + S_L + S_{HE}$$

NOTA 1 Observa-se que as verificações em relação ao limite elástico sob a condição c) somente precisam ser realizadas nos casos onde a carga de trabalho, ao atuar sozinha, produz tensões na direção oposta à causada pelo peso próprio.

NOTA 2 Ao utilizar dispositivos de redução de velocidade antes do impacto com o para-choque sob as condições mencionadas em 6.2.3.5.1, S_T usar a solicitação mais elevada resultante da desaceleração causada anteriormente pelo dispositivo de desaceleração ou daquela finalmente causada pelo impacto no para-choque.

NOTA 3 No caso III de solicitação, a verificação em relação ao limite elástico não garante a segurança do equipamento e deve-se verificar também a flambagem localizada de placas e a global de barras, conforme Anexo C da ABNT NBR 8400-2.

6.3.4 Selecionando o coeficiente de amplificação M_x

O valor do coeficiente de amplificação M_x depende da classificação do grupo do equipamento e são selecionados da Tabela 20.

⁶ Solicitações resultantes da carga de trabalho são consideradas, porém o efeito horizontal da oscilação da carga resultante do choque é desprezado, pois esta oscilação somente atua sobre a estrutura quando os outros efeitos já foram praticamente absorvidos. Isto não se aplica às cargas guiadas rigidamente (que não oscilam).

Tabela 20 – Valores do coeficiente de amplificação M_x

Grupo do equipamento	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
M_x	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

6.4 Efeitos sísmicos

Geralmente as estruturas dos equipamentos de elevação não precisam ser verificadas para efeitos sísmicos brasileiros.

Entretanto, se regulamentações oficiais ou especificações especiais assim determinar, regras ou recomendações especiais podem ser aplicadas a equipamentos em áreas sujeitas a terremotos.

Isto deve ser informado ao fornecedor pelo usuário da instalação, que também deve fornecer os espectros sísmicos correspondentes.

6.5 Solicitações consideradas no projeto de mecanismos

Os mecanismos são submetidos a dois tipos de solicitação:

- as solicitações, representadas pelo símbolo S_M , que dependem diretamente dos torques exercidos pelos motores ou freios sobre os mecanismos;
- as solicitações, representadas pelo símbolo S_R , que não dependem da ação do motor ou do freio, porém que são determinadas pelas reações que atuam sobre as partes mecânicas e que não são balanceadas pelo torque que atua sobre os eixos de acionamento ⁷.

6.5.1 Solicitações tipo S_M

As solicitações deste tipo a serem consideradas são:

- solicitações S_{MG} , correspondentes ao deslocamento vertical do centro de gravidade de partes móveis do equipamento, exceto a carga de trabalho;
- solicitações S_{ML} , correspondentes ao deslocamento vertical da carga de trabalho;
- solicitações S_{MF} , correspondentes às forças de atrito que não foram consideradas no cálculo da eficiência do mecanismo;
- solicitações S_{MA} , associadas à aceleração (ou frenagem) do movimento;
- solicitações S_{MW} , correspondentes ao efeito do vento de operação assumido para o equipamento.

6.5.2 Solicitações tipo S_R

As solicitações deste tipo a serem consideradas são:

- solicitações S_{RG} devido ao peso dos componentes que atuam sobre a parte em consideração;

⁷ Em um movimento de translação, por exemplo, as solicitações devido à reação vertical sobre rodas e as cargas transversais que solicitam o eixo das rodas não são transmitidas para os componentes do mecanismo de acionamento.

- b) solicitações S_{RL} devido à carga de trabalho, conforme determinado em 6.2, para estruturas;
- c) solicitações S_{RA} devido às acelerações e desacelerações dos vários movimentos do equipamento ou suas partes, conforme calculado de acordo com 6.2.3.1, para estruturas, desde que a magnitude destas cargas não seja desprezível, quando comparado às cargas S_{RG} e S_{RL} ;
- d) solicitações S_{RW} devido ao vento-limite de operação S_w ou ao vento máximo $S_{wmáx.}$ (ver 6.2.4.1), desde que a ordem de grandeza destas magnitudes não seja desprezível.

6.6 Casos de solicitação

Três casos de solicitação devem ser considerados nos dimensionamentos:

- a) caso I: serviço normal sem vento;
- b) caso II: serviço normal com vento;
- c) caso III: cargas excepcionais.

A solicitação máxima deve ser determinada para cada caso de solicitação que serve como base para os cálculos.

NOTA Os casos I e II são iguais para mecanismos que não sofrem influência da ação do vento.

As várias solicitações são determinadas conforme indicado em 6.5. Deve-se levar em consideração a probabilidade de exceder a tensão calculada que resulta de métodos imperfeitos de cálculos e contingências imprevistas, aplicando-se um coeficiente de majoração q que varia de acordo com o grupo de classificação do mecanismo. Os valores deste coeficiente q_m são indicados na Tabela 21.

Tabela 21 – Valores do coeficiente de amplificação q_m

Grupos dos mecanismos	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
q_m	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,25	1,30

6.6.1 Caso I – Serviço normal sem vento

6.6.1.1 Cargas tipo S_M

A solicitação máxima $S_{Mmáx.I}$ do tipo S_M (ver 5.5) é determinada pela combinação das cargas S_{MG} , S_{ML} , S_{MF} e S_{MA} , especificadas em 6.5.1, podendo ser expressa pela seguinte equação:

$$S_{Mmáx.I} = (S_{MG} + S_{ML} + S_{MF} + S_{MA}) \times q_m$$

NOTA Destacar que não é a combinação dos valores máximos de cada um dos termos nesta relação que deve ser considerada, mas sim o valor resultante da combinação mais desfavorável que realmente pode ocorrer em operação.

6.6.1.2 Cargas tipo S_R

A solicitação máxima $S_{Rmáx.I}$ do tipo S_R (ver 6.5) é determinada pela combinação das cargas S_{RG} , S_{RL} e S_{RA} , especificadas em 6.5.2, podendo ser expressa pela seguinte equação:

$$S_{Rmáx.I} = (S_{RG} + S_{RL} + S_{RA}) \times q_m$$

A NOTA de 6.6.1.1 também é aplicável a esta subseção.

6.6.2 Caso II – Serviço normal com vento

6.6.2.1 Solicitações tipo S_M

A solicitação máxima $S_{M\text{máx.II}}$ do tipo S_M (ver 6.5) é determinada pela combinação das solicitações S_{MG} , S_{ML} e S_{MF} , especificadas em 6.5.1 com uma das duas combinações seguintes:

- a) a solicitação S_{MA} e a carga S_{MW8} correspondendo ao vento de 80 N/m²;
- b) a solicitação S_{MW25} correspondendo ao vento de 250 N/m².

O maior dos dois valores expressos pelas relações especificadas a seguir é adotado:

$$S_{M\text{máx.II}} = (S_{MG} + S_{ML} + S_{MF} + S_{MA} + S_{MW8}) \times q_m$$

ou

$$S_{M\text{máx.II}} = (S_{MG} + S_{ML} + S_{MF} + S_{MW25}) \times q_m$$

A NOTA de 6.6.1.1 também é aplicável a esta subseção.

6.6.2.2 Solicitações tipo S_R

A solicitação máxima $S_{R\text{máx.II}}$ do tipo S_R (ver 6.5) é determinada pela combinação das solicitações S_{RG} , S_{RL} e S_{RA} , especificadas em 6.5.2, com S_{RW25} que corresponde ao vento de 250 N/m², conforme a seguinte equação:

$$S_{R\text{máx.II}} = (S_{RG} + S_{RL} + S_{RA} + S_{RW25}) \times q_m$$

A NOTA de 6.6.1.1 também é aplicável a esta subseção.

6.6.3 Solicitação III – Cargas excepcionais

6.6.3.1 Solicitações tipo S_M

A solicitação máxima $S_{M\text{máx.III}}$ do tipo S_M , estabelecida em 6.5 é determinada considerando a carga máxima que o motor realmente é capaz de transmitir para o mecanismo, admitindo as limitações devido às condições operacionais práticas.

Os valores de $S_{M\text{máx.III}}$ são especificados em 6.6.4.

6.6.3.2 Cargas tipo S_R

Visto que as consequências de uma sobrecarga devido à colisão com para-choque ou obstrução são muito menos graves para o mecanismo do que para a estrutura, a solicitação excepcional a ser considerada é aquela fornecida em 6.3.3, referente às estruturas.

Com isso tem-se: $S_{R\text{máx.III}} = (S_{RG} + S_{RW\text{máx.}})$

Em casos onde meios adicionais de ancoragem ou estaiamento são utilizados para assegurar a imobilidade ou estabilidade sob vento máximo, o efeito destes dispositivos sobre o mecanismo deve ser levado em consideração, onde aplicável.

6.6.4 Cálculo de S_M para os diferentes movimentos

Os mecanismos dos equipamentos de elevação desempenham uma das seguintes funções:

- deslocamentos puramente verticais do centro de gravidade das massas em movimento (por exemplo, movimentos de elevação);
- deslocamentos puramente horizontais nos quais o centro de gravidade das massas em movimento normalmente muda horizontalmente (por exemplo, direção, translação, giro ou movimentos de lança contrabalanceados);
- movimentos combinando uma elevação do centro de gravidade das massas em movimentos com um deslocamento horizontal (por exemplo, movimentos de lança não contrabalanceados).

6.6.4.1 Movimento de elevação

Para solicitação tipos S_M , a equação da solicitação máxima se resume a:

- Casos I e II:

$$S_{M\text{máx.I}} = (S_{ML} + S_{MF}) \times q_m$$

Para ambos os casos a solicitação devido à aceleração da elevação é desprezada por ser pequena comparada à S_{ML} .

- Caso III:

$$1,6(S_{ML} + S_{MF})$$

Levando-se em consideração as regras gerais de 6.6.3.1, presume-se que as cargas máximas que podem ser transmitidas aos mecanismos de elevação para a maioria dos equipamentos de elevação de carga são limitadas na prática à solicitação $S_{M\text{máx.I}}$, multiplicada por 1,6⁸.

Contudo, para equipamentos de classe de elevação *HC3/HC4* com velocidades elevadas de içamento, por exemplo, acima de 1 m/s, o valor máximo a ser considerado é fornecido pela equação de 6.2.2.1.1 calculado para a velocidade máxima de operação. O uso de motores excessivamente potentes deve ser evitado.

6.6.4.2 Movimentos horizontais

- Caso I – A equação da solicitação máxima se resume a:

$$S_{M\text{máx.I}} = (S_{MF} + S_{MA}) \times q_m$$

⁸ Em um movimento de elevação sob condições operacionais normais, é impossível transmitir ao mecanismo solicitações maiores do que aquelas devido à elevação da carga de trabalho, visto que os efeitos da aceleração são insignificantes. Uma solicitação maior poderia resultar somente de erro de manejo (avaliação incorreta da carga ou bloqueio da carga, etc.). Com base na experiência obtida de muitos anos de prática com equipamentos de elevação muito diferentes, atualmente é aceito que um coeficiente de 1,6 ofereça a segurança adequada para a maioria dos equipamentos.

b) Caso II – Adotar o maior valor das seguintes equações:

$$S_{M\text{m}\acute{a}x.II} = (S_{MF} + S_{MA} + S_{MW8}) \times q_m$$

ou

$$S_{M\text{m}\acute{a}x.II} = (S_{MF} + S_{MW25}) \times q_m$$

c) Caso III

Para $S_{M\text{m}\acute{a}x.III}$, a solicitação correspondente ao torque máximo do motor (ou do freio) é adotada, exceto se as condições operacionais limitarem o torque realmente transmitido pelo deslizamento das rodas sobre os trilhos ou pelo uso de meios limitadores adequados (por exemplo, acoplamento hidráulico, limitador de torque etc). Neste caso, o valor realmente transmitido deve ser adotado ⁹.

6.6.4.3 Movimentos combinados

a) Casos I e II:

Para os casos I e II, a solicitação $S_{M\text{m}\acute{a}x.II}$ ¹⁰ é determinada pela equação geral dada em 6.6.1.1 e 6.6.2.1.

b) Caso III:

A solicitação causada pela aplicação do torque máximo do motor $S_{MC\text{m}\acute{a}x.III}$ pode ser adotada para o valor máximo de $S_{M\text{m}\acute{a}x.III}$. Este valor, com frequência excessivamente alto, é sempre aceitável, pois ele aumenta a segurança.

Ele deve ser utilizado quando a potência envolvida para elevar os centros de gravidade de massas em movimento for insignificante, quando comparada à potência necessária para superar os efeitos das acelerações ou do vento.

Inversamente, quando o efeito das acelerações ou do vento for desprezível em comparação com o efeito de deslocamento dos centros de gravidade de massas em movimento vertical, este valor é muito alto e $S_{M\text{m}\acute{a}x.III}$ pode ser calculado pela seguinte equação:

$$S_{M\text{m}\acute{a}x.III} = 1,6 S_{M\text{m}\acute{a}x.II}$$

Entre estes dois valores limitadores, cada caso individual deve ser examinado de acordo com o motor escolhido, o método de partida e as magnitudes relativas das solicitações devido aos efeitos da inércia e do vento por um lado e aquelas devido à elevação dos centros de gravidade por outro lado.

Sem exceção, quando as condições operacionais limitarem o torque realmente transmitido ao mecanismo (ver 6.6.4.2), este torque limitador deve ser adotado como o valor de $S_{MC\text{m}\acute{a}x}$, se este valor for menor que os valores estabelecidos acima.

⁹ Enquanto no caso de movimentos de elevação as cargas normalmente transmitidas ao mecanismo são limitadas pela carga suspensa, nos movimentos horizontais o torque máximo do motor sempre pode ser transmitido para o mecanismo, se não houver limitação mecânica. Por este motivo, um modo diferente de avaliar $S_{M\text{m}\acute{a}x.III}$ foi especificado, levando-se em consideração que se trata de um movimento de elevação ou outro movimento.

¹⁰ Ou $S_{M\text{m}\acute{a}x.I}$, no caso de equipamentos não submetidos ao vento.

Anexo A (informativo)

Harmonização das classes de utilização de equipamentos e mecanismos

A.1 Este Anexo demonstra um método pelo qual é possível, em muitos casos, obter a classe de utilização de mecanismos a partir da classe dos equipamentos em geral e, a partir de determinados parâmetros, caracterizar o serviço a ser executado.

A.2 O ponto de partida é a duração média de t_{mc} (em segundos) de um ciclo de elevação, conforme determinado em 6.1.4.2. Portanto, este é o tempo necessário para executar todas as operações neste ciclo.

A duração total do uso T do equipamento, expresso em horas (h), é fornecida pela seguinte equação:

$$T = N_c \times t_{mc} / 3\,600$$

onde

N_c é o número de ciclos de elevação que determina a classe de utilização do equipamento.

A Tabela A.1 fornece os valores de T para durações de ciclos de 30 s a 480 s, de acordo com a classe de utilização do equipamento. O número de ciclos de elevação é o número máximo para esta classe de utilização, entretanto, estes valores são ajustados para 15 625, 31 250 e 62 500, respectivamente, para as classes $U0$, $U1$ e $U2$, para reduzir o número de valores diferentes para T .

O próximo passo é determinar, para cada mecanismo, a proporção α_i entre a duração do uso do mecanismo durante um ciclo de elevação e a duração média t_{mc} do ciclo.

A Tabela A.2 fornece as durações totais do uso T_i do mecanismo, dependendo da duração total do uso do equipamento e para diversos valores convencionais da proporção α_i . A Tabela A.2 também mostra a classe de utilização do mecanismo. As diversas classes são representadas pelas áreas escalonadas.

É, portanto, suficiente determinar a classe de utilização do equipamento consultando a Tabela A.1, a duração média do ciclo de elevação t_{mc} e os valores de α_i , para obter as classes de utilização dos mecanismos.

A partir das curvas do nomograma na Figura A.1, as classes de utilização para os mecanismos em termos destes três parâmetros podem ser encontradas diretamente.

Tabela A.1 – Duração total do uso (T) dos equipamentos de elevação em horas

Duração média de um ciclo de elevação t_{mc} s	Classes de utilização dos equipamentos									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
30	130	260	520	1 040	2 085	4 165	8 335	16 665	33 335	> 33 335
45	195	390	780	1 565	3 125	6 250	12 500	25 000	50 000	> 50 000
60	260	520	1 040	2 085	4 165	8 335	16 665	33 335	66 665	> 66 665
75	325	650	1 300	2 605	5 210	10 415	20 835	41 665	83 335	> 83 335
90	390	780	1 565	3 125	6 250	12 500	25 000	50 000	100 000	> 100 000
120	520	1 040	2 085	4 165	8 335	16 665	33 335	66 665	133 335	> 133 335
150	650	1 300	2 605	5 210	10 415	20 835	41 665	83 335	166 665	> 166 665
180	780	1 565	3 125	6 250	12 500	25 000	50 000	100 000	200 000	> 200 000
240	1 040	2 085	4 165	8 335	16 665	33 335	66 665	133 335	> 200 000	
300	1 300	2 605	5 210	10 415	20 835	41 665	83 335	166 665	> 200 000	
360	1 565	3 125	6 250	12 500	25 000	50 000	100 000	200 000	> 200 000	
420	1 825	3 645	7 290	14 585	29 165	58 335	116 665	> 200 000		
480	2 085	4 165	8 335	16 665	33 335	66 665	133 335	> 200 000		

Tabela A.2 – Duração total de uso T_i (em horas) dos mecanismos em termos de T e α_i

T h	Valores de α_i						Classe de utilização para o mecanismo
	1,00	0,63	0,40	0,25	0,16	0,10	
130	130	82	52	33	21	13	T0
195	195	123	78	49	31	20	
260	260	164	104	65	42	26	
325	325	205	130	81	52	33	
390	390	246	156	98	62	39	
520	520	328	208	130	83	52	
650	650	410	260	163	104	65	
780	780	491	312	195	125	78	
1 040	1 040	655	416	260	166	104	
1 300	1 300	819	520	325	208	130	
1 565	1 565	986	626	391	250	157	
1 825	1 825	1 150	730	456	292	183	
2 085	2 085	1 314	834	521	334	209	T1
2 605	2 605	1 641	1 042	651	417	261	
3 125	3 125	1 969	1 250	781	500	313	
3 645	3 645	2 296	1 458	911	583	365	
4 165	4 165	2 624	1 666	1 041	666	417	T2
5 210	5 210	3 282	2 084	1 303	834	521	
6 250	6 250	3 938	2 500	1 563	1 000	625	
7 290	7 290	4 593	2 916	1 823	1 166	729	
8 335	8 335	5 251	3 334	2 084	1 334	834	T3
10 415	10 415	6 561	4 166	2 604	1 666	1 042	
12 500	12 500	7 875	5 000	3 125	2 000	1 250	
14 585	14 585	9 189	5 834	3 646	2 334	1 459	
16 665	16 665	10 499	6 666	4 166	2 666	1 667	T4
20 835	20 835	13 126	8 334	5 209	3 334	2 084	
25 000	25 000	15 750	10 000	6 250	4 000	2 500	
29 165	29 165	18 374	11 666	7 291	4 666	2 917	
33 335	33 335	21 001	13 334	8 334	5 334	3 334	T5
41 665	41 665	26 249	16 666	10 416	6 666	4 167	
50 000	50 000	31 500	20 000	12 500	8 000	5 000	
58 335	58 335	36 751	23 334	14 584	9 334	5 834	
66 665	66 665	41 999	26 666	16 666	10 666	6 667	T6
83 335	83 335	52 501	33 334	20 834	13 334	8 334	
100 000	100 000	63 000	40 000	25 000	16 000	10 000	
116 665	116 665	73 499	46 666	29 166	18 666	11 667	
133 335	133 335	84 001	53 334	33 334	21 334	13 334	T7
166 665	166 665	104 999	66 666	41 666	26 666	16 667	
200 000	200 000	126 000	80 000	50 000	32 000	20 000	
> 200 000	> 200 000	> 126 000	> 80 000	> 50 000	> 32 000	> 20 000	
							T8
							T9

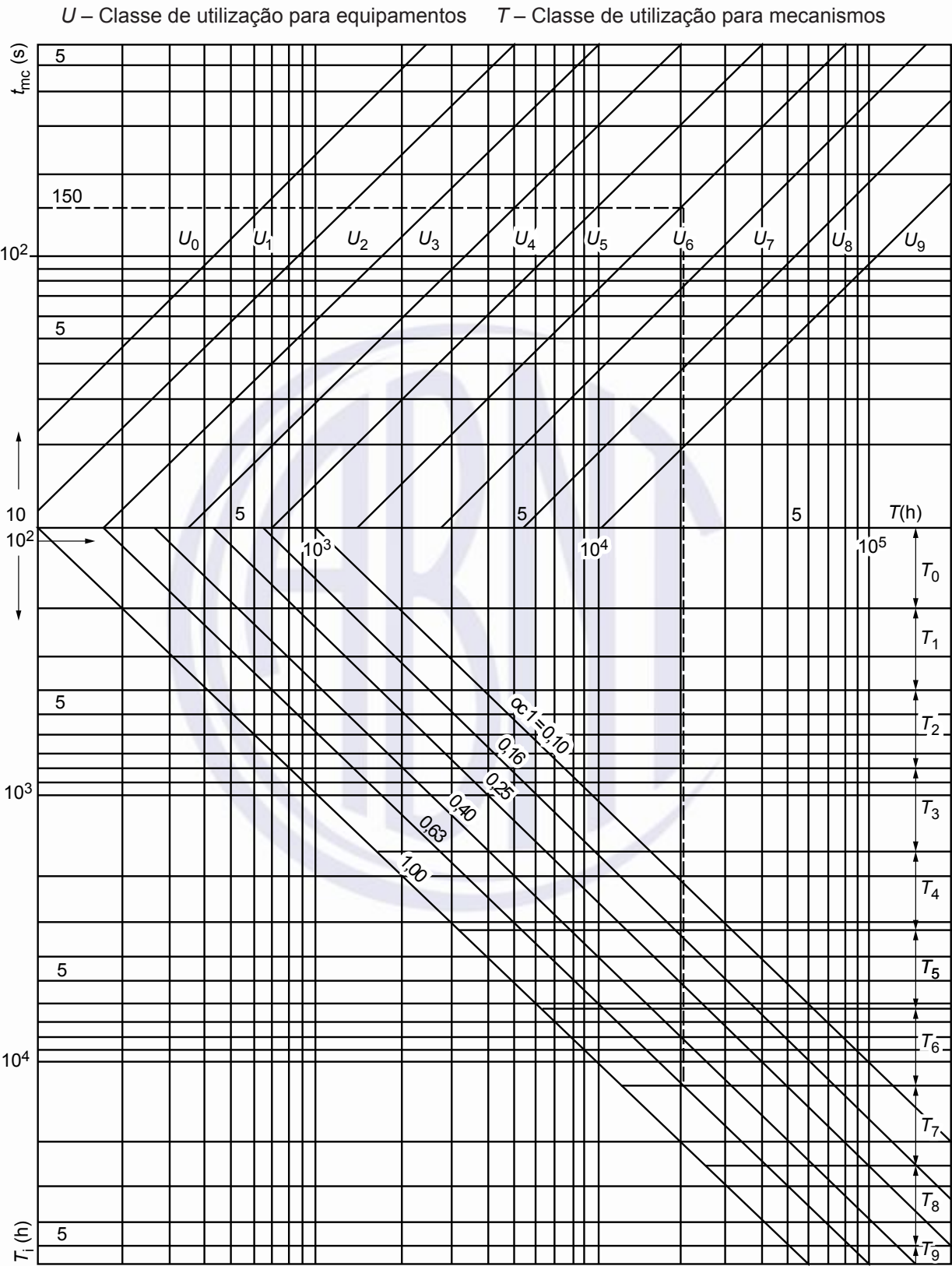


Figura A.1 – Classes de utilização para equipamentos e mecanismos

A.3 Como exemplo de aplicação é apresentado o seguinte caso: Ponte rolante com carro giratório

A.3.1 A classe de utilização para a ponte rolante deve ser U5

Um ciclo de elevação inclui as seguintes operações:

- elevação da carga;
- translação;
- giro;
- descida da carga;
- desacoplar a carga do gancho;
- elevação em vazio;
- giro;
- translação;
- descida em vazio;
- acoplar uma nova carga ao gancho.

O tempo médio para concluir o ciclo deve ser estimado em 150 s.

A.3.2 As proporções α_i devem ser estimadas conforme descrito a seguir

- elevação (elevação e descida): $\alpha_i = 0,63$
- giro (duas direções): $\alpha_i = 0,25$
- translação (duas direções): $\alpha_i = 0,10$

A Tabela A.1 fornece o valor de T para classe U5 e $t_{mc} = 150$ s:

$$T = 20\,835 \text{ h}$$

Para os vários mecanismos, a Tabela A.2 fornece para $T = 20\,825$ h, as seguintes durações totais T_i e classes de utilização (Tabela A.3):

Tabela A.3 – Duração total de uso T_i (em horas) e classe de utilização dos mecanismos

— elevação ($\alpha_i = 0,63$):	$T_i = 13\,126 \text{ h}$	T7
— giro ($\alpha_i = 0,25$):	$T_i = 5\,209 \text{ h}$	T5
— translação ($\alpha_i = 0,10$):	$T_i = 2\,084 \text{ h}$	T4

A partir das curvas na Tabela A.1 chega-se às mesmas conclusões com base na ordenada $t_{mc} = 150$ s (linha tracejada).

Anexo B (informativo)

Cálculo de solicitações devido à aceleração de movimentos horizontais

B.1 Método

B.1.1 Dados básicos

A velocidade horizontal estável do ponto de suspensão da carga no final do período de aceleração ou no início do período de frenagem, dependendo de um processo de aceleração ou frenagem estiver sendo considerado é representada por v .

Uma força horizontal imaginária na mesma direção de v , aplicada ao ponto de suspensão da carga e produzindo o mesmo efeito que o torque de aceleração ou desaceleração aplicado pelo motor ou freio sobre o movimento considerado, é representada por F .

B.1.2 Procedimento

As diferentes quantidades especificadas a seguir devem ser calculadas em sequência.

a) massa equivalente (m)

A inércia de todas as partes móveis exceto a carga, no movimento em consideração, é substituída por uma massa equivalente única m que assume-se esteja concentrada no ponto de suspensão da carga e fornecida pela seguinte relação:

$$m = m_0 + \sum_i \left[\frac{(I_i \times w_i^2)}{v^2} \right]$$

onde

m_0 é a massa total de todos os elementos, exceto a carga, sofrendo o mesmo movimento linear puro que o ponto de suspensão da carga;

I_i é o momento de inércia de uma peça sofrendo uma rotação durante o movimento em consideração, considerado sobre o eixo de rotação; e

w_i é a velocidade angular da peça referida, em relação ao seu eixo de rotação, correspondente à velocidade linear v do ponto de suspensão da carga.

O somatório \sum_i abrange todas as peças em rotação (estrutura, mecanismos, motor) durante o movimento considerado. Entretanto, no caso de mecanismos, a inércia dos componentes, exceto aqueles diretamente acoplados ao eixo do motor, pode ser ignorada.

b) aceleração média ou desaceleração (J_m):

A aceleração média é dada pela equação:

$$J_m = F / (m + m_1)$$

onde

m_1 é a massa da carga, expressa em quilograma (kg).

c) duração média da aceleração ou desaceleração (T_m):

É calculada pela fórmula:

$$T_m = v / J_m$$

d) forças de inércia média:

A aceleração correspondente à aceleração J_m no ponto de suspensão da carga é calculada para cada peça do componente em movimento. Multiplicando esta aceleração pela massa do componente considerado, obtém-se a força de inércia média atuante.

No caso específico da própria carga, esta força de inércia F_{cm} deve ser obtida por:

$$F_{cm} = m_1 \times J_m$$

e) período de oscilação T_1 :

É calculado pela fórmula:

$$T_1 = 2 \times \pi \times \sqrt{\frac{l}{g}}$$

onde

l é o comprimento de suspensão da carga, expresso em metros (m), quando a mesma está na sua posição mais elevada, sendo que valores de l abaixo de 2,00 m não precisam ser considerados; e

g é a aceleração da gravidade, expressa em metros por segundo ao quadrado (m/s²).

f) determinação do valor de Ψ_h :

Para a obtenção do valor de Ψ_h é necessário primeiro calcular os valores de μ e β .

O valor de μ é obtido da relação:

$$\mu = m_l / m$$

Quando o sistema que aciona o movimento controla a aceleração e a desaceleração e o mantém a um valor constante, μ é adotado como igual a zero, independentemente das massas m e m_1 .

Por outro lado o valor de β é obtido da relação:

$$\beta = T_m / T_1$$

Com os valores obtidos para μ e β , o gráfico da Figura B.2 é utilizado para obter o valor Ψ_h correspondente.

B.1.3 Forças de inércia a serem consideradas no projeto da estrutura

As forças de inércia que consideram os efeitos dinâmicos e que devem, portanto, ser consideradas nos cálculos estruturais são obtidas a seguir:

- a) a força de inércia devido à carga é dada pelo produto: $\Psi_h \times F_{cm}$;
- b) a força de inércia sobre as peças em movimento, exceto a carga, deve ser considerada como sendo duas vezes as forças de inércia médias.

B.1.4 Justificativa

Uma justificativa do método fornecido em B.1 se encontra em B.2.

B.2 Explicação do método

B.2.1 Descrição do sistema físico

- a) Um equipamento de elevação é um sistema físico que consiste essencialmente de: massas concentradas (carga no gancho, contrapesos etc) e massas distribuídas (vigas, cabos etc);
- b) elementos elásticos entre as massas (vigas, cabos etc).

Se este sistema, originalmente em estado de equilíbrio, for submetido a uma variação de carga, ele não tende progressivamente para uma nova condição de equilíbrio, mesmo se a nova carga aplicada for constante. Ao contrário, o sistema se manifesta em movimento de oscilação mais ou menos complexo em torno desta nova condição de equilíbrio. Durante este movimento, as várias cargas e tensões internas do sistema algumas vezes podem exceder consideravelmente os valores que teriam ocorrido se o sistema estivesse em equilíbrio estático sob a influência da nova carga.

Esta situação se inicia durante a aceleração ou desaceleração (frenagem) de um movimento horizontal de um equipamento de elevação. Desta forma, a partir de uma posição de repouso, se um equipamento ou parte de um equipamento iniciar um movimento de translação ou rotação, as partes do componente do sistema sofrem acelerações e, portanto, são submetidas às forças de inércia. Uma vez que a velocidade de regime é atingida, a aceleração cessa, as forças de inércia desaparecem e a carga externa sofre uma nova variação.

O ângulo que um sistema de rotação gira (por exemplo, a parte rotativa de um guindaste) durante o tempo em que as forças de inércia são aplicadas geralmente é relativamente pequeno. Assim sendo, nenhum erro notável é envolvido se for presumido que cada ponto no sistema segue uma trajetória reta durante este tempo. Além disso, não há diferença de princípio entre o tratamento utilizado para movimentos lineares e movimentos de rotação. adiantem B2.2 o movimento linear é examinado em mais detalhes na sequência, enquanto B.2.3 abrange a rotação.

B.2.2 Cálculo de solicitações no caso de movimento linear

B.2.2.1 Dados gerais

É examinado agora o caso particular de frenagem do movimento de translação de ponte rolante ao carregar uma carga suspensa no cabo de elevação. Outros casos encontrados na prática podem ser tratados de forma similar.

Considerando a Figura B.1, aplicam-se os seguintes símbolos:

m_1	massa da carga suspensa;
m	massa total da ponte rolante incluindo o carro (consultar nota abaixo sobre a inércia do motor e do mecanismo que aciona o movimento);
x	coordenada que estabelece a posição da ponte ao longo do seu caminho de rolamento (mais precisamente, x representa a coordenada do ponto de suspensão do cabo de elevação ao longo de um eixo paralelo à direção de translação);
x_1	coordenada que estabelece a posição do centro de gravidade da carga suspensa ao longo de um eixo na mesma direção, sentido e origem que o eixo de x ;

$z = x_1 - x$ coordenada que expressa o deslocamento horizontal da carga em relação à ponte.

Supondo que no instante $t = 0$, a ponte rolante esteja se movendo no sentido positivo do eixo x a uma velocidade v e que a carga esteja em repouso em relação à ponte, então:

$$(z = z' = 0, \text{ com: } z' = dz/dt)$$

Se o freio for aplicado no mecanismo de translação no instante $t = 0$, isso dará origem, a partir daquele instante, a uma força de frenagem horizontal paralela, porém de sentido oposto ao eixo x em cada ponto, onde uma roda motriz está em contato com o trilho. Para simplificar, supondo que o carro esteja localizado no meio do vão das vigas principais da ponte rolante. Entende-se por simetria que a força total em cada trilho é a mesma. Designando sua projeção sobre o eixo x como $F/2$ (com $F > 0$), a força de frenagem total atuando sobre o sistema em movimento (ponte mais carga) é igual a F em valor absoluto.

Se o sistema fosse composto por massas rigidamente interconectadas, isto resultaria em uma desaceleração de valor absoluto J_m fornecido pela seguinte equação:

$$J_m = F / (m + m_1) \quad (\text{B.1})$$

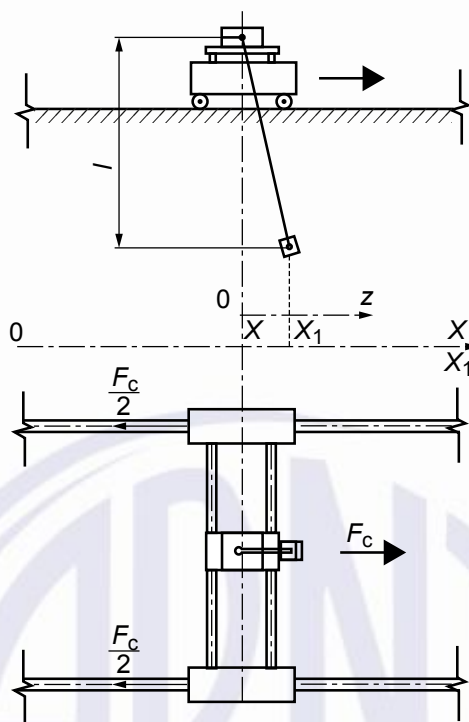


Figura B.1 – Modelo do equipamento

Entretanto, não se pode esquecer que F tem origem no torque de frenagem aplicado ao mecanismo de translação, que não pode somente frear a inércia do deslocamento da ponte, mas também a inércia rotativa do motor de acionamento e os mecanismos envolvidos. De modo geral, pode-se desprezar a inércia rotativa de todos os componentes exceto daqueles integrados com o eixo do motor. Entretanto, a inércia dos componentes integrados ao eixo do motor deve ser considerada e a equação B.1 permanece contanto que m incorpore uma massa equivalente m_e fornecida pela seguinte equação:

$$m_e \times v^2 = I_m \times \omega_m^2 \quad (\text{B.2})$$

onde

I_m é o momento de inércia de todos os componentes integrados com o eixo do motor, incluindo o próprio motor;

ω_m é a velocidade angular do motor que corresponde à velocidade de translação v da ponte.

Sob o efeito da desaceleração J_m , o cabo de suspensão não é capaz de manter sua posição vertical. Sua nova posição de equilíbrio é inclinada para a vertical em um ângulo α_m , fornecida pela seguinte equação:

$$\alpha_m = \arctg\left(\frac{J_m}{g}\right) \quad (\text{B.3})$$

onde

g é a aceleração da gravidade.

Neste caso, o cabo exerce uma força horizontal sobre o equipamento cuja projeção F_{cm} sobre o eixo x é fornecida por:

$$F_{cm} = m_1 \times J_m \quad (\text{B.4})$$

O sistema não é rígido, e a desaceleração não é constante e, portanto, não é fornecida pela equação B.1. A carga e seu cabo de suspensão adotam um movimento oscilante e a força horizontal desenvolvida pelo cabo sobre a ponte pode assumir valores que diferem muito da equação B.4.

A desaceleração do sistema dá origem às forças de inércia que atuam sobre cada componente da ponte e do carro, porém, devido à elasticidade das vigas, o sistema irá sofrer um movimento de oscilação durante o qual a tensão será submetida às flutuações que devem ser avaliadas.

B.2.2.2 Efeito das forças de inércia sobre a carga

Ao determinar o movimento que a carga executa após o freio ser aplicado, pode-se desprezar o movimento do ponto de suspensão devido à flexibilidade da viga em um plano horizontal. Na verdade, a amplitude deste movimento é muito pequena quando comparada à amplitude da oscilação da carga. Portanto, os cálculos podem ser realizados com a ponte rolante sendo considerada um sistema que não é submetido à deformação.

A projeção de F_C sobre o eixo x da força exercida pelo cabo sobre a ponte rolante é fornecida pela seguinte relação:

$$F_C = m_1 \times g \left[\frac{(x_1 - x)}{l} \right] = m_1 \times g \times \frac{z}{l} \quad (\text{B.5})$$

onde

l é o comprimento de suspensão da carga, expresso em metros (m).

Deve ser observado que F_C é proporcional ao deslocamento z da carga em relação à posição de equilíbrio inicial, como se fosse uma força de restauração elástica.

As equações do movimento são as seguintes:

$$m_1 \times x'' = m_1 \times g \left[\frac{(x_1 - x)}{l} \right] \quad (\text{B.6})$$

$$m \times x'' = m_1 \times g \left[\frac{(x_1 - x)}{l} \right] - F \quad (\text{B.7})$$

Assumindo-se que $x = 0$, para $t = 0$, as condições iniciais são as seguintes:

Para $t = 0$,

$$x_1 = x = 0 \quad (\text{B.8})$$

$$x''_1 = x' = 0 \quad (\text{B.9})$$

$$z = x_1 - x = 0 \quad (\text{B.10})$$

$$z' = x'_1 - x' = 0 \quad (\text{B.11})$$

seja

$$\frac{g}{l} = \omega_1^2 \quad (\text{B.12})$$

$$\left(\frac{m_1}{m} \right) \times \left(\frac{g}{l} \right) = \omega_2^2 \quad (\text{B.13})$$

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = \omega_r^2 \quad (B.14)$$

$$\frac{F}{m} = J_0 \quad (B.15)$$

As equações B.6 e B.7 então se tornam:

$$x'' + z'' + \omega_1^2 \times z = 0 \quad (B.16)$$

$$x'' + \omega_2^2 \times z = -J_0 \quad (B.17)$$

onde

$$z'' + \omega_r^2 \times z = J_0 \quad (B.18)$$

Com as condições iniciais das equações B.8 a B.11, a solução para estas equações é fornecida por:

$$z = \left(\frac{J_0}{\omega_r^2} \right) \times [1 - \cos(\omega_r \times t)] \quad (B.19)$$

$$x' = v - \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_r^2} \right) \times J_0 \times t - \left(\frac{\omega_2^2}{\omega_r^2} \right) \times \frac{J_0}{\omega_r} \times \sin(\omega_r \times t) \quad (B.20)$$

A equação completa para x não interessa diretamente.

Estabelecendo

$$\frac{J_0}{\omega_r^2} = z_m \quad (B.21)$$

Observa-se que z_m é a posição de equilíbrio que pode ser assumida pela carga durante uma desaceleração constante da ponte rolante igual ao valor J_m estabelecido pela equação B.1, ou seja, durante a desaceleração que seria obtida com a aplicação da força de frenagem F à massa total (ponte rolante mais carga) em movimento, sendo esta massa assumida como um sistema rígido. O valor $z = z_m$ que determina o deslocamento da carga corresponde à força horizontal F_{cm} , estabelecida pela equação B.4, exercida pelo cabo sobre a ponte rolante. A comparação entre as equações B.5, B.19 e B.21 mostra que:

$$F_c = F_{cm} \times [1 - \cos(\omega_r t)] \quad (B.22)$$

Se o período de desaceleração da ponte rolante durar um tempo t_d tal que:

$$\omega_r \times t_d \geq \pi \quad (B.23)$$

deve ser observado que F_c temporariamente torna-se duas vezes F_{cm} , ou seja, seu valor máximo $F_{cm\max.}$ é fornecido pela seguinte equação:

$$F_{cm\max.} = 2 \times F_{cm} \quad (B.24)$$

Se a condição da equação B.23 não for atendida, isto significa que a ponte rolante parou antes da carga atingir o deslocamento máximo $z = 2 z_m$. Entretanto, após a ponte rolante parar, a carga geralmente irá continuar a oscilar, então o cabo irá continuar a exercer uma força horizontal variável sobre a mesma, e o valor máximo que pode ser alcançado deve ser buscado.

Após a ponte rolante parar, o movimento da carga é determinado pela equação:

$$z = z_d \times \cos[(\omega_1 \times (t - t_d))] + \left(\frac{z'_d}{\omega_1}\right) \times \text{sen}[\omega_1 \times (t - t_d)] \quad (\text{B.25})$$

com

$$z_d = z_m \times [1 - \cos(\omega_r t_d)] \quad (\text{B.26})$$

$$z' = \omega_r z_m \times \text{sen}(\omega_r \times t_d) \quad (\text{B.27})$$

onde

t_d é o menor valor positivo de t que torna a equação B.20 para x' igual a zero.

O valor máximo $F_{cm\acute{a}x.}$, assumido por F_c , é então fornecido pela seguinte equação:

$$F_{cm\acute{a}x.} = F_{cm} \times \sqrt{[1 - \cos(\omega_r \times t_d)]^2 + \frac{\omega_r^2}{\omega_1^2} \text{sen}^2(\omega_r \times t_d)} \quad (\text{B.28})$$

De modo geral, entende-se que:

$$\frac{F_{cm\acute{a}x.}}{F_{cm}} = \psi_h \quad (\text{B.29})$$

A determinação de Ψ_h é simplificada pelas seguintes quantidades:

$T_m = v / J_m$ é o tempo que a fase de desaceleração da ponte rolante duraria se a desaceleração fosse constante e o sistema em movimento não fosse submetido à deformação;

$T_1 = 2 \times \pi / \omega_1$ é o período de oscilação do sistema de pêndulo formado pela carga suspensa (ponte rolante parada).

$$T_1 = 2 \times \pi \sqrt{\frac{I}{g}}$$

O valor de Ψ_h depende somente de dois parâmetros não dimensionais μ e β definidos pelas seguintes equações :

$$\mu = \frac{m_1}{m} \quad (\text{B.30})$$

$$\beta = \frac{T_m}{T_1} \quad (\text{B.31})$$

Deve ser observado que a equação B.20 pode também ser escrita como:

$$x' = v \left[1 - \frac{(\omega_r \times t) + \mu \text{sen}(\omega_r \times t)}{2 \times \pi \times \beta \sqrt{1 + \mu}} \right] \quad (\text{B.32})$$

e portanto

$$\frac{(\omega_r \times t) + \mu \text{sen}(\omega_r \times t)}{2 \times \pi \times \beta \sqrt{1 + \mu}} \quad (\text{B.33})$$

Esta equação possibilita a determinação do valor de $\omega_r \times t_d$ para ser utilizado na equação B.28.

O gráfico na Figura B.2 representa os valores de Ψ_h em relação a β para os diversos valores de μ . para a curva $\mu = 0$, ver B.2.5.

Se $\mu < 1$ (que é geralmente o caso com o movimento de translação de uma ponte rolante, como no exemplo em consideração), uma análise do problema mostra que Ψ_h não pode exceder 2. Este valor é atingido durante a fase de desaceleração da ponte rolante se a condição da equação B.23 for atendida, que equivale a β atingir ou exceder um determinado valor crítico, β_{crit} dependente de μ . Acima deste valor crítico no entanto, Ψ_h , permanece constante e igual a 2, qualquer que seja o valor de β .

Se $\mu > 1$ (que poderia ser o caso com os movimentos transversais, no qual m essencialmente representa somente a massa do carro, ou com os movimentos de rotação), a mesma análise mostra que, desde que β atinja ou exceda um determinado valor crítico β_{crit} dependente de μ , Ψ_h pode exceder 2 e atingir um valor máximo fornecido por:

$$\Psi_h = \sqrt{2 + \mu + \frac{1}{\mu}} \quad (B.34)$$

Este valor máximo pode ser atingido somente durante o movimento de oscilação da carga subsequente à imobilização do seu ponto de suspensão. O valor crítico β_{crit} ocorre quando a ponte rolante é parada antes da condição da equação B.23 ser atendida, ou antes de F_c atingir $2F_{cm}$. Entretanto, qualquer valor de β maior que β_{crit} leva a equação B.23 a ser atendida e F_c necessariamente passa o valor $2F_{cm}$, quando $\Psi_h > 2$. Também deve ser observado que se o valor de $\beta > \beta_{crit}$ foi calculado adotando v igual à velocidade máxima de regime do movimento, com a velocidade no instante do início da frenagem dada pela equação:

$$v \times \frac{\beta_{crit}}{\beta}$$

necessariamente irá levar Ψ_h ao valor máximo fornecido pela equação B.34. Este é o motivo pelo qual, no gráfico da Figura B.2, os valores de Ψ_h foram mantidos para todos os valores de β maiores que β_{crit} .

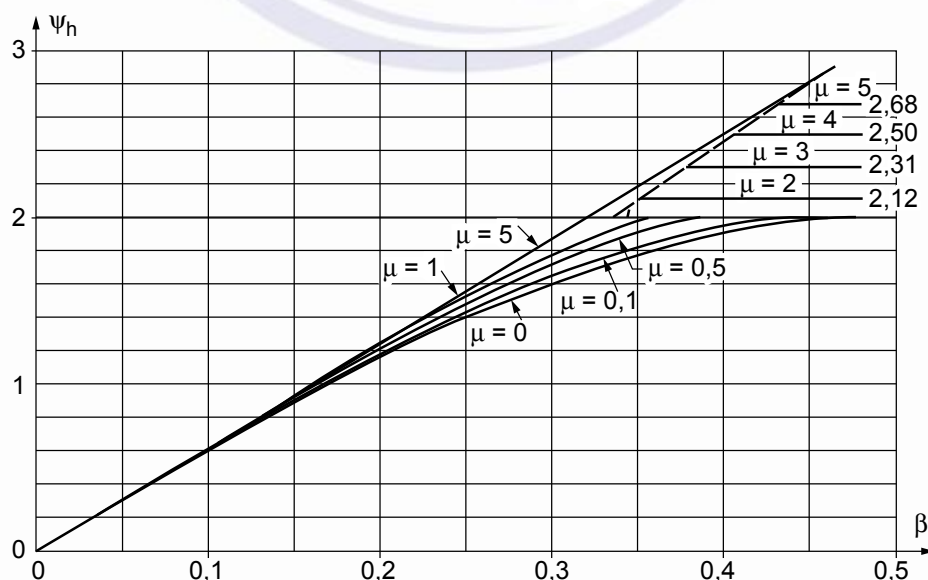


Figura B.2 – Valor de Ψ_h

Quanto à escolha de T_1 , deve-se observar que o risco valores altos de Ψ_h serem atingidos é tão grande quanto o comprimento da suspensão l da carga tornar-se mais curta, pois β atinge seu valor crítico

mais rapidamente. Portanto, os cálculos devem ser realizados supondo que a carga está próxima de sua posição mais elevada. Na prática, o valor de l sempre gira em torno de 2 m e 8 m. A Tabela B.1 fornece os valores de T_1 para alguns valores de l .

Tabela B.1 – Valores de T_1

l m	T_1 s
2	2,84
3	3,47
4	4,01
5	4,49
6	4,91
7	5,31
8	5,67

Deve-se examinar o efeito da força horizontal $F_{cm\acute{a}x}$ sobre as condições das cargas sustentadas pela estrutura.

Esta força realmente existe, tanto que é transmitida diretamente por alguns componentes, como o carro, e estes devem ser projetados para suportá-la. Portanto, a configuração da carga atuando sobre a estrutura do equipamento como um todo, merece atenção.

Considerando-se o caso onde $F_{cm\acute{a}x}$ ocorre antes da ponte rolante parar, seria incorreto considerar a ponte rolante como uma viga suportada nas duas extremidades e submetida no seu centro à força $F_{cm\acute{a}x}$. Não se pode esquecer o fato de que cada um dos dois pontos de apoio pode transmitir somente uma reação $F/2$. Os diagramas sucessivos na Figura B.3 ilustram como o problema deve ser examinado. O diagrama “a” representa a condição ideal de equilíbrio, na qual o sistema em geral é submetido a uma desaceleração J_m (ou uma “aceleração $x = -J_m$ ”) e na qual o cabo desenvolve uma força F_{cm} . Cada elemento do material d_m do sistema, portanto, sofre uma força de inércia $J_m \times d_m$. O diagrama “a” é uma sobreposição do diagrama “b” e diagrama “c”. O diagrama “b” está relacionado à carga devido às forças de inércia sobre a ponte rolante (ver B.2.2.3), enquanto que o diagrama “c” mostra o efeito da carga devido ao cabo. A força real desenvolvida pelo cabo não é a força F_{cm} representada no diagrama “c”, porém a força:

$$F_{cm\acute{a}x} = \Psi_h \times F_{cm} \quad (B.35)$$

Visto que os pontos de apoio (rodas frenadas) não são capazes de aumentar sua reação, o excesso de força $(\Psi_h - 1) F_{cm}$ pode resultar somente em uma aceleração suplementar x'' , expressa por:

$$x'' = (\Psi_h - 1) \times \frac{F_{cm}}{m} \quad (B.36)$$

que se traduz por uma carga distribuída $-x'' \times d_m$ sobre todos os elementos do material da ponte rolante. O diagrama “d” consequentemente representa a configuração da carga a ser considerada ao serem projetadas as vigas.

Considerando-se o caso no qual $F_{cm\acute{a}x}$ aumenta após a ponte rolante parar, as rodas frenadas não têm mais que dedicar parte da capacidade de reação para absorver as forças de inércia sobre a

ponte rolante e devem ser consideradas fixas. Deste modo, a viga deve ser projetada como se fosse apoiada em cada extremidade e submetida à força $F_{cm\max}$. no seu centro O último caso é que deve ser considerado, pois quando F_c atinge o seu valor máximo $2F_{cm}$ antes da ponte rolante parar, esta força ainda pode aumentar durante o movimento de pêndulo que ocorre após a parada.

Todas as considerações anteriores ainda permanecem se, ao invés de considerar uma fase de frenagem, considerar uma fase de aceleração da ponte rolante, durante a qual a velocidade é aumentada por um torque de acionamento constante desde o repouso até a velocidade estável.

B.2.2.3 Efeito das forças de inércia sobre as estruturas do equipamento

Nos cálculos desenvolvidos até aqui no Anexo B a estrutura foi considerada perfeitamente rígida. Porém ela possui um grau de elasticidade e, conseqüentemente, também assume um movimento oscilante durante o período de frenagem e após a parada. Como a estrutura é composta essencialmente por massas distribuídas, ao invés de massas concentradas, geralmente é muito difícil determinar o movimento teoricamente e estes cálculos são justificados somente no caso de equipamentos muito grandes, nos quais as forças de inércia desempenham um papel significativo.

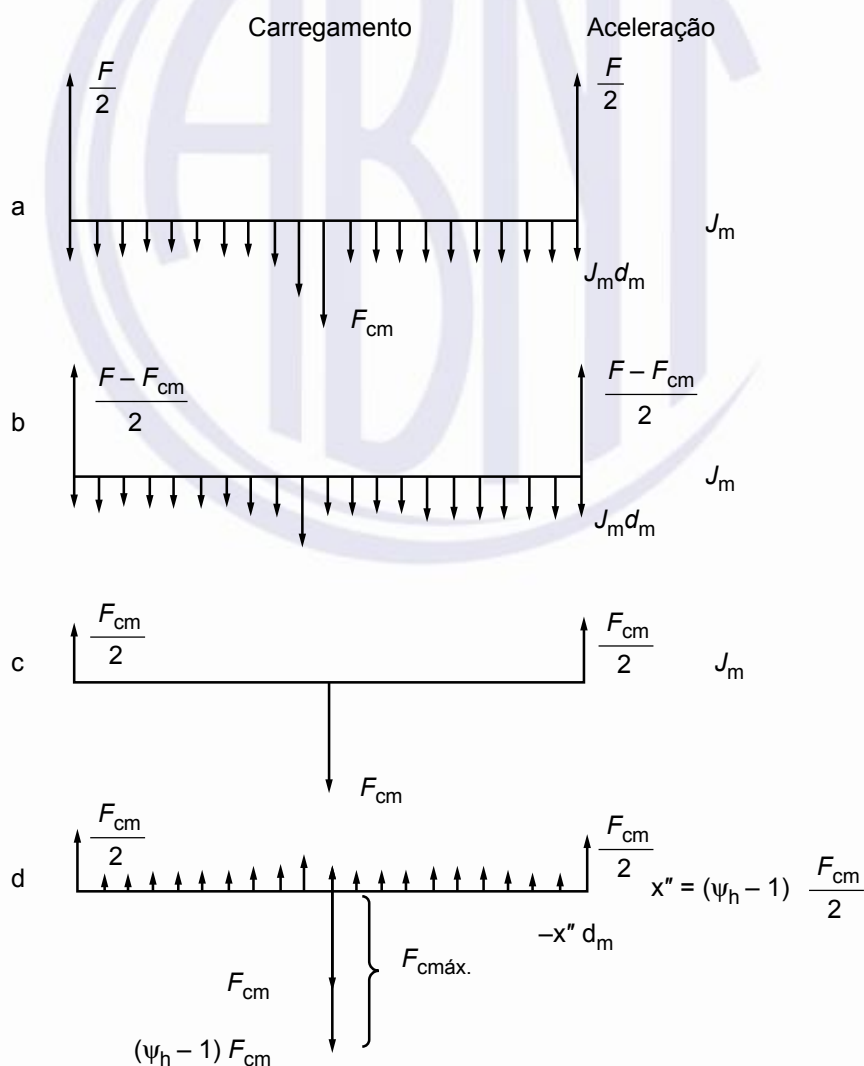


Figura B.3 – Diagrama de cargas na estrutura

Na maioria dos casos é suficiente representar a estrutura como sendo um sistema oscilante simples que possui forças elásticas proporcionais à extensão e submetido à aceleração geral do sistema de

referência. De acordo com a equação B.5, as considerações desenvolvidas em B.2.2.2 também podem ser aplicadas aqui. Entretanto, o período natural das oscilações (comparável ao período T_1 de B.2.2.2) sempre é consideravelmente menor do que aquele de uma carga suspensa, não excedendo alguns décimos de segundo na maioria dos casos. O resultado disso é que o parâmetro correspondente a β sempre excede o valor crítico β_{crit} de modo que Ψ_h deve sempre ser adotado como igual a 2, sendo este o coeficiente aplicável às cargas de inércia calculadas com a desaceleração média J_m .

A única exceção que pode ser feita a esta regra é para fases de posicionamento onde o equipamento é acionado ou frenado em intervalos curtos.

Como os movimentos oscilantes da estrutura possuem uma alta frequência, as cargas máximas resultantes são temporariamente sobrepostas àquelas devido à carga suspensa.

B.2.3 Cálculo de cargas no caso de movimento de giro

No caso de movimento de giro, considerações similares às de B.2.2 podem ser desenvolvidas. Para calcular os efeitos das forças de inércia sobre a carga, somente é necessário determinar m a partir da seguinte equação:

$$m v^2 = I \omega^2 \quad (B.37)$$

onde

- v é a velocidade linear horizontal do ponto de suspensão da carga, expressa em metros por segundo (m/s);
- I é o momento de inércia de todas as partes em movimento (estrutura, mecanismos, motores) relacionadas a um determinado eixo, expresso em kg vezes metro ao quadrado (kgxm²);
- ω é a velocidade angular deste eixo que corresponde à velocidade v acima, expressa em radianos por segundo (rad/s).

B.2.4 Cálculo de cargas no caso de movimento da lança

No caso de movimento da lança, considerações similares às de B.2.2 podem ser desenvolvidas. É suficiente determinar m a partir da seguinte equação:

$$m v^2 = 2 T \quad (B.38)$$

onde

- v é a velocidade linear horizontal do ponto de suspensão da carga expressa em metros por segundo (m/s);
- T é energia cinética total das massas em movimento quando a velocidade linear horizontal do ponto de suspensão da carga é igual a v , expressa em joules (J).

B.2.5 Sistemas com aceleração controlada

Em alguns sistemas de controle, como inversores de frequência ou sistemas acionados hidraulicamente, as magnitudes das acelerações e desacelerações são determinadas pelas características do sistema e são mantidas constantes, independentemente das condições externas. Por este motivo, a oscilação

da carga não impede as condições de aceleração ou desaceleração do equipamento ou de parte do equipamento em movimento.

No exemplo tratado em B.2.2 isto é equivalente a assumir que x'' é uma determinada constante. Utilizando a equação B.16 e suas derivações, mostra-se que neste caso:

$$\Psi_h = 2 \sin(\beta \pi) \text{ para } \beta \leq 0,5 \quad (\text{B.39})$$

$$\Psi_h = 2 \text{ para } \beta > 0,5 \quad (\text{B.40})$$

Esta situação também é possível se for assumido que a massa m_1 seja infinitamente pequena quando comparada com m e, portanto, incapaz de impedir seu movimento. Deste modo, a equação B.39 é a curva limitante obtida fazendo μ tender a zero, e é representada na Figura B.2 pela curva $\mu = 0$.

As considerações em B.2.2.3 não são modificadas.

B.2.6 Conclusões gerais

Conhecendo o torque, a força de frenagem ou a aceleração, o primeiro passo para calcular a desaceleração ou aceleração média de J_m é obtida na suposição de que as várias partes da estrutura são perfeitamente rígidas e a carga está concentrada no seu ponto de suspensão. As forças de inércia que atuam sobre a carga e os vários elementos da estrutura são calculados utilizando esta aceleração. Estas forças são então multiplicadas por um determinado coeficiente Ψ_h para avaliar a elasticidade das diversas conexões.

Para as forças de inércia que atuam na estrutura, Ψ_h é sempre adotado igual a 2, exceto no caso especial mencionado em B.2.2.3 (fase de posicionamento), contanto que a justificativa possa ser fornecida para a redução.

No caso das forças de inércia que atuam sobre a carga, a massa m é calculada (incorporando, onde necessário, a massa equivalente à inércia do motor e do mecanismo) e o tempo de desaceleração ou aceleração média T_m é então determinado com base na velocidade máxima de regime do movimento. O valor de T_1 é dependente do comprimento de suspensão da carga em sua posição mais elevada e, portanto, é conhecido. Portanto, é possível determinar os parâmetros μ e β ($\beta = 0$ no caso de um sistema de aceleração controlado). A Figura B.2 fornece o valor correspondente de Ψ_h . Na maioria dos casos, a força máxima aparece ou pode aparecer após a conclusão da fase de frenagem ou de partida considerada. Seus efeitos sobre a estrutura podem ser verificados aplicando as leis da estática.

Deve ser observado que o cálculo desenvolvido em B.2.2.2 supõe que a carga esteja relativamente em repouso ($z = z' = 0$) no tempo inicial $t = 0$. Caso contrário, o movimento do sistema é afetado e Ψ_h pode atingir valores consideravelmente mais altos do que aqueles fixados. Esta situação pode ocorrer, por exemplo, quando um movimento é frenado por aplicações intermitentes do freio ou quando movimentos sucessivos ocorrem em intervalos de tempo razoavelmente curtos. Portanto, este método de cálculo não é excessivo de forma alguma existindo casos especiais nos quais seria bom tomar algum cuidado na sua aplicação.

Anexo C
(normativo)

Reações transversais devido ao movimento do equipamento

C.1 Modelagem do equipamento

Para permitir que uma estimativa das forças tangenciais entre as rodas e os trilhos e também das forças com os meios de guia lateral seja realizada, sendo em ambos os casos as mesmas causadas pelo enviesamento (*skewing*) do equipamento, um modelo simplificado do sistema mecânico é necessário. O equipamento é considerado em movimento a uma velocidade constante sem controle antienviesamento.

O modelo consiste em n pares de rodas alinhadas, das quais p pares estão acoplados. Um par de rodas individual (I) pode ser estabelecido, tanto como acoplado (A) mecânica ou eletricamente, ou montado independentemente (I) um do outro. A última condição também é válida no caso de acionamentos simples e independentes.

As rodas são dispostas em posições geométricas ideais em uma estrutura rígida que esteja se movimentando em um caminho de rolamento rígido. As diferenças dos diâmetros das rodas são desconsideradas neste modelo. Elas podem ser fixas (F) ou móveis (M) em relação ao movimento lateral. O grau de liberdade lateral pode, por exemplo, ser originado de uma perna articulada.

As diferentes combinações de pares de rodas alinhadas transversalmente são mostradas na Figura C.1.





Sistema	Acoplado (A)	Independente (I)
Fixo/fixo (F/F)		
Fixo/móvel (F/M)		

Figura C.1 – Diferentes combinações de pares de rodas

Na Figura C.2, a posição dos pares de rodas em relação à posição dos roletes-guia do equipamento, é determinada pela distância d_i .

NOTA Quando rodas flangeadas são utilizadas ao invés dos roletes-guia, $d_1 = 0$.

Assume-se que as forças gravitacionais devido às massas do equipamento com carga (mg) estejam atuando a uma distância μl do trilho 1 e que sejam distribuídas igualmente para as n rodas em cada lado do trilho do caminho de rolamento.

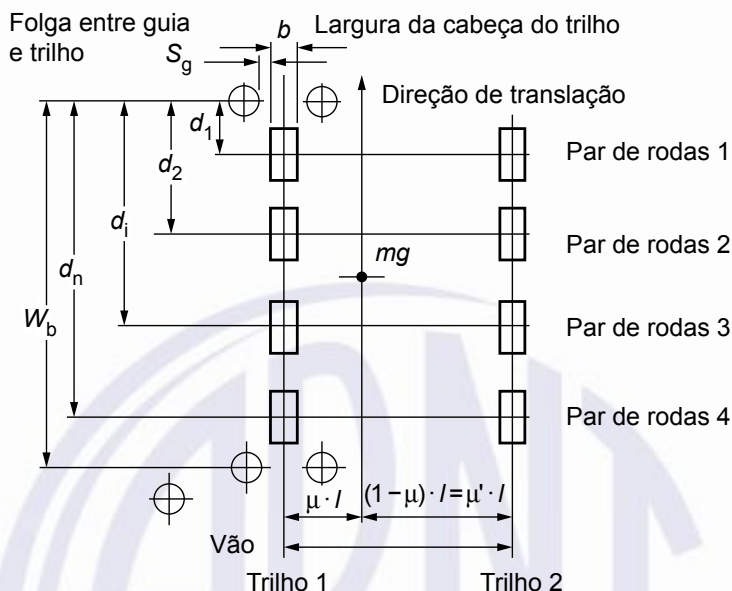


Figura C.2 – Posição dos pares de rodas

C.2 Relação entre as forças tangenciais e os deslocamentos

Assume-se que uma relação entre as forças tangenciais e os deslocamentos correspondentes ocorra entre a roda e o trilho. Uma vez que a roda tem que transferir os momentos de acionamento (M_y) para o trilho e seu movimento é restringido pelo sistema (equipamento e trilho), ela desliza nas direções longitudinal e lateral $[u(u_x, u_y)]$, correspondente às forças tangenciais (F_x, F_y) que reagem no equipamento (ver Figura C.3).

Em geral, há uma relação entre as distâncias de deslizamento (u_x, u_y), a distância de translação livre n_Ψ , a reação da roda F_z e as forças tangenciais ($F_x \times F_y$), conforme descrito a seguir:

$$F_x = f_x(s_x, s_y, p_c, \text{condições da superfície}) \times F_z$$

$$F_y = f_y(s_x, s_{yi}, p_c, \text{condições da superfície}) \times F_z$$

Os coeficientes de atrito da roda (f_x, f_y) dependem do deslizamento, ou seja, da relação entre o deslizamento e as distâncias de translação livre ($s_x = u_x / r_\Psi, s_y = u_y / r_\Psi$), na pressão de contato entre a roda e o trilho (p_c) e das condições da superfície do trilho. Para simplificar o cálculo, as seguintes equações empíricas podem ser utilizadas:

$$f_x = 0,3 \times \left[1 - e^{(-250 \times S_y)} \right], \text{ para } S_x \leq 0,015$$

$$f_y = 0,3 \times \left[1 - e^{(-250 \times S_y)} \right], \text{ para } S_y \leq 0,015$$

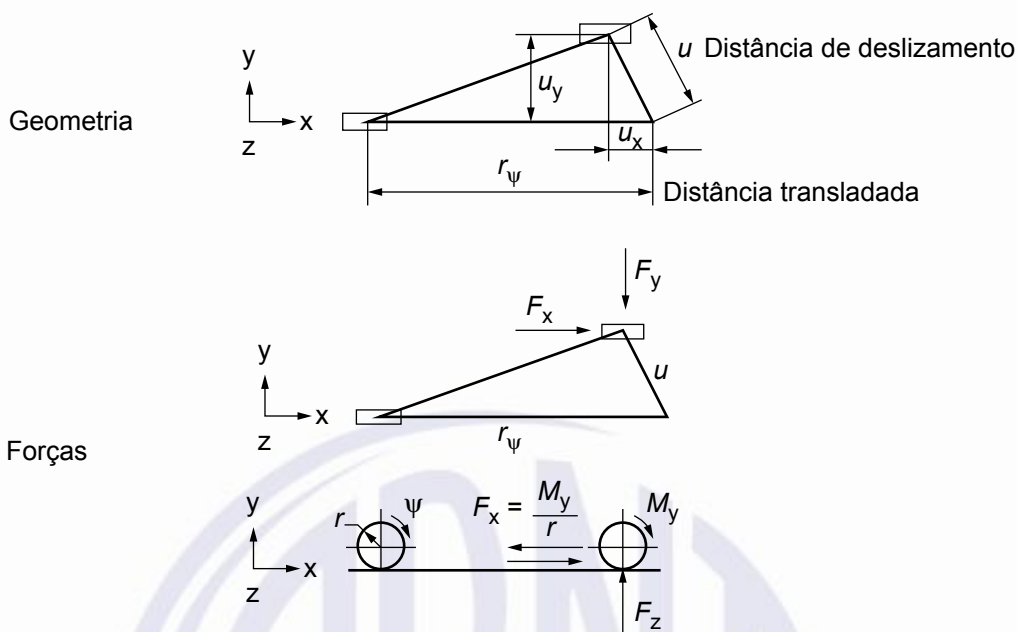


Figura C.3 – Forças tangenciais e deslocamentos

C.3 Forças devido ao enviesamento (*skewing*)

Assume-se que o modelo do equipamento translate em velocidade constante e seja enviesado com um de ângulo α , conforme mostrado na Figura C.4. O equipamento pode ser guiado horizontalmente por roletes-guia ou por rodas flangeadas, aos quais denominaremos meios de guia.

Uma força-guia F_y está em equilíbrio com as forças tangenciais da roda F_{x1i} , F_{y1j} , F_{x2i} , F_{y2j} , que são causadas pela rotação do equipamento em torno do polo de deslizamento instantâneo. Com o deslizamento lateral máximo $s_y = \alpha$ no meio de guia e uma distribuição linear do deslocamento lateral s_{yi} entre o meio de guia e o polo instantâneo de deslizamento, as forças de enviesamento correspondentes podem ser calculadas conforme descrito a seguir:

- a) distância entre o polo de deslizamento instantâneo e o meio de guia h

— para sistemas F/F, $h = \frac{(p \times \mu \times \mu' \times l^2 + \sum d_i^2)}{\sum d_i}$

— para sistemas F/M, $h = \frac{(p \times \mu \times l^2 + \sum d_i^2)}{\sum d_i}$

onde

p é o número de pares das rodas acopladas;

μ é a relação entre a distância do polo de deslizamento instantâneo ao trilho 1 e o vão do equipamento;

μ' é a relação entre a distância do polo de deslizamento instantâneo ao trilho 2 e o vão do equipamento;

l é o vão do equipamento, expresso em metros (m);

d_i é a distância do par de rodas i ao meio de guia, conforme estabelecido na Figura C.4, expressa em metros (m).

b) força aplicada pelo meio de guia, FG_v

$$FG_y = v \times f \times mg$$

onde

$$v = 1 - \Sigma d_i / (n \times h) \quad \text{para sistemas F/F;}$$

$$v = \mu' [1 - \Sigma d_i / (n \times h)] \quad \text{para sistemas F/M;}$$

$$f = 0,3 (1 - e^{-250\alpha}) \quad \text{onde } \alpha < 0,015 \text{ rad;}$$

mg é a força gravitacional devido à massa do equipamento carregado, expressa em newtons (N);

n é o número de rodas de cada lado do trilho do equipamento;

h é calculado em C.3.a).

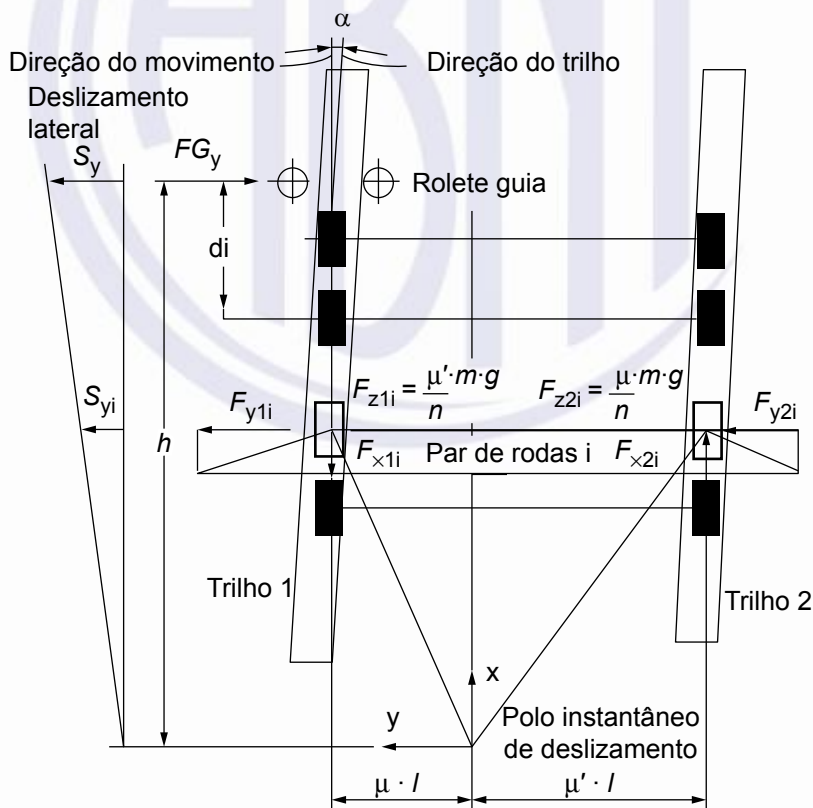


Figura C.4 – Forças que agem no equipamento na posição enviesada

C.4 Forças tangenciais, F_x e F_y

$$F_{x1i} = \xi_{1i} \times f \times mg$$

$$F_{x2i} = \xi_{2i} \times f \times mg$$

$F_{yx1i} = v_{1i} \times f \times mg$

$F_{yx2i} = v_{2i} \times f \times mg$

onde

f e mg são fornecidos em C.3 b);

ξ_{1i} , ξ_{2i} , v_{1i} e v_{2i} são fornecidos na Tabela C.1.

Tabela C.1 – Valores de ξ_{1i} , ξ_{2i} , v_{1i} e v_{2i}

Combinações de pares de rodas (ver Figura C.1)	$\xi_{1i} = \xi_{2i}$	v_{1i}	v_{2i}
AFF	$\mu\mu' l/nh$	$\frac{\mu'}{n} \left(1 - \frac{d_i}{h}\right)$	$\frac{\mu}{n} \left(1 - \frac{d_i}{h}\right)$
IFF	0		
AFM	$\mu\mu' l/nh$		0
IFM	0		

Para o caso de equipamentos com rodas flangeadas e sem roletes-guia, a força resultante sobre a roda externa é fornecida por:

$F_{y.máx.} = FG_y - F_{y1.1}$ (ver Figura C.5)

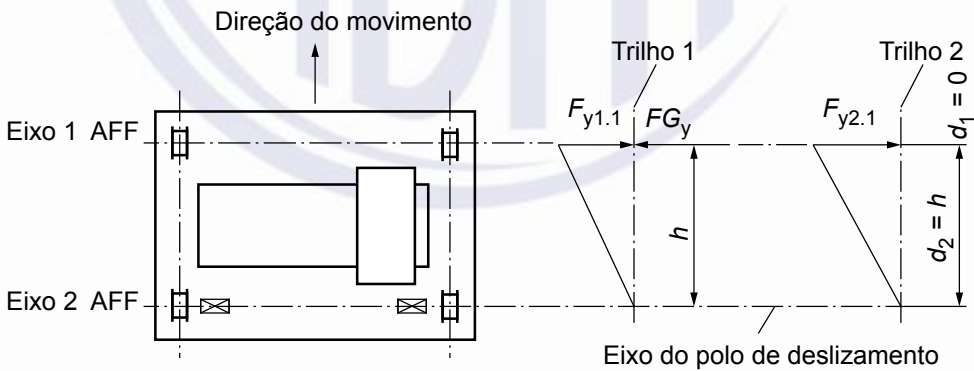


Figura C.5 – Cargas FG_y e $F_{y1.1}/F_{y2.1}$ relativas aos sistemas AFF para equipamentos com rodas flangeadas

Para o trilho 2, obtém-se:

$F_{y2.1} = FG_y - F_{y1.1}$

C.5 Ângulo de enviesamento α

O ângulo de enviesamento α , que não pode exceder 0,015 rad, deve ser escolhido levando-se em consideração a folga entre o meio de guia e o trilho, bem como uma variação dimensional razoável e o desgaste das rodas do equipamento e dos trilhos, conforme descrito a seguir:

$$\alpha = \alpha_g + \alpha_w + \alpha_t$$

onde

$\alpha_g = s_g/w_b$ é a parte do ângulo de enviesamento devido à folga entre o trilho e os roletes-guia ou à folga roda trilho;

s_g é a folga entre o trilho e os rolete-guia ou a folga roda trilho, expressa em milímetros (mm);

w_b é a distância entre os meios de guia, expressa em milímetros (mm);

$\alpha_w = 0,1(b/w_b)$ é a parte do ângulo de enviesamento devido ao desgaste;

b é a largura da cabeça do trilho, expressa em milímetros (mm);

$\alpha_t = 0,001 \text{ rad}$ é a parte do ângulo de enviesamento devido às tolerâncias.