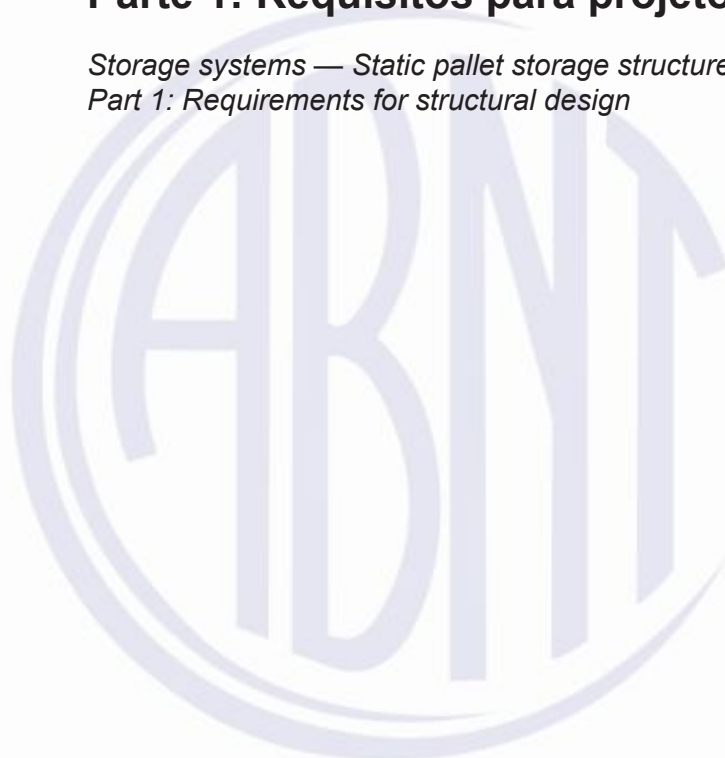


---

**Sistemas de armazenagem — Estrutura de  
armazenagem estática tipo porta-paletes  
Parte 1: Requisitos para projeto estrutural**

*Storage systems — Static pallet storage structure  
Part 1: Requirements for structural design*



ICS 53.080

ISBN 978-85-07-10049-2



ASSOCIAÇÃO  
BRASILEIRA  
DE NORMAS  
TÉCNICAS

Número de referência  
ABNT NBR 17150-1:2024  
140 páginas



© ABNT 2024

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](mailto:abnt@abnt.org.br)

[www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br)

Sumário	Página
Prefácio .....	xii
Introdução .....	xiii
1 Escopo .....	1
2 Referências normativas .....	1
3 Termos e definições .....	2
4 Símbolos .....	5
4.1 Letras maiúsculas e letras gregas.....	5
4.2 Subscritos .....	8
5 Bases de projeto .....	8
5.1 Requisitos .....	8
5.1.1 Requisitos básicos.....	8
5.1.2 Porta-paletes convencional sem contraventamento .....	9
5.1.3 Porta-paletes convencional com contraventamento .....	10
5.1.4 Vida útil para o projeto .....	12
5.1.5 Tolerâncias do piso.....	12
5.1.6 Interação piso-estrutura .....	12
5.2 Métodos de cálculo .....	15
5.2.1 Generalidades.....	15
5.2.2 Estado-limite último .....	15
5.2.3 Estado-limite de serviço .....	15
5.3 Imperfeições .....	15
5.3.1 Generalidades.....	15
5.3.2 Imperfeição global.....	16
5.3.3 Imperfeições no contraventamento.....	17
5.3.4 Imperfeições dos componentes .....	19
6 Ações e combinações de ações .....	19
6.1 Generalidades.....	19
6.2 Ações permanentes .....	19
6.2.1 Generalidades.....	19
6.2.2 Pesos de materiais e instalações .....	19
6.3 Ações variáveis .....	20
6.3.1 Generalidades.....	20
6.3.2 Unidades de carga a serem armazenadas .....	20
6.3.3 Carga vertical de posicionamento.....	21
6.3.4 Cargas horizontais de posicionamento .....	22
6.3.5 Efeitos de transelevadores com guia na estrutura .....	24
6.3.6 Cargas de piso e passarelas .....	25
6.3.7 Ações decorrentes da instalação .....	26
6.4 Ações devido a impacto (cargas acidentais).....	26
6.4.1 Generalidades.....	26
6.4.2 Ações verticais acidentais .....	27

Exemplar para uso exclusivo - Código Identificador #553498@552139# RNP:2612398694 (Pedido 894836 Impresso: 17/03/2024)

6.4.3 Cargas horizontais acidentais .....28

6.5 Cargas de vento .....28

6.6 Cargas de neve.....29

6.7 Ações sísmicas .....29

7 Fatores parciais e regras de combinações .....29

7.1 Generalidades.....29

7.2 Combinações de ações para o estado-limite último.....29

7.3 Combinações de ações para o estado-limite de serviço.....30

7.4 Coeficientes de ponderação de carga.....30

7.5 Coeficientes de ponderação de material .....31

7.6 Estabilidade *versus* tombamento .....32

7.7 Porta-paletes travados na estrutura do prédio .....32

8 Aço.....33

8.1 Generalidades.....33

8.1.1 Considerações preliminares .....33

8.1.2 Propriedades dos materiais .....33

8.1.3 Valores de cálculo dos coeficientes de ponderação de material  
(propriedades mecânicas gerais) .....33

8.1.4 Aços sem informações das propriedades mecânicas .....33

8.1.5 Aços não ensaiados.....34

8.2 Limite de escoamento médio das seções.....34

8.3 Seleção especial de material de produção .....34

8.4 Resistência à ruptura.....35

8.5 Tolerâncias dimensionais.....35

8.5.1 Generalidades.....35

8.5.2 Espessura do material .....35

8.5.3 Tolerâncias na espessura.....35

8.5.4 Largura e profundidade de uma seção formada a frio .....35

8.5.5 Retilidade dos membros .....36

8.5.6 Torção.....36

8.5.7 Tolerâncias para projeto e montagem .....36

8.6 Excentricidades de contraventamento .....37

8.7 Excentricidades entre as longarinas e as colunas .....38

8.8 Requisitos para travas de conectores de longarinas .....39

8.9 Durabilidade.....39

9 Análise estrutural .....39

9.1 Modelagem estrutural para análise e concepção básica .....39

9.2 Cálculo das propriedades da seção.....39

9.2.1 Generalidades.....39

9.2.2 Efeito dos raios de dobra .....40

9.2.3 Efeito de perfurações.....40

9.2.4 Efeito da flambagem distorcional na seção transversal .....41

9.2.5 Efeito da flambagem local.....42

Exemplar para uso exclusivo - Código Identificador #552139# RNP:2612398694 (Pedido 894836 Impresso: 17/03/2024)

9.3	Longarinas .....	43
9.3.1	Generalidades.....	43
9.3.2	Momento fletor resistente de cálculo de membros não sujeitos à flambagem lateral com torção .....	43
9.4	Dimensionamento da longarina.....	44
9.4.1	Generalidades.....	44
9.4.2	Cargas em longarinas.....	44
9.4.3	Momento fletor solicitante de cálculo para longarinas .....	45
9.4.4	Força cortante solicitante de cálculo para a longarina .....	45
9.4.5	Deformação de longarinas .....	46
9.4.6	Longarinas como parte do sistema de contraventamento em porta-paletes.....	47
9.4.7	Resistência de cálculo relacionada a forças transversais localizadas.....	48
9.4.8	Força cortante resistente de cálculo.....	48
9.4.9	Força cortante combinada com a força axial e o momento fletor.....	48
9.4.10	Requisitos adicionais para forças transversais localizadas.....	48
9.5	Dimensionamento do conector.....	48
9.5.1	Generalidades.....	48
9.5.2	Momento fletor solicitante de cálculo dos conectores .....	49
9.5.3	Força cortante solicitante de cálculo para conectores .....	49
9.5.4	Momento fletor e força cortante de cálculo para conectores .....	49
9.6	Longarinas sujeitas à flexão e torção .....	50
9.6.1	Generalidades.....	50
9.6.2	Flambagem lateral com torção em longarinas .....	50
9.7	Compressão, tração e flexão em barras .....	50
9.7.1	Barras comprimidas não perfuradas.....	50
9.7.2	Barras perfuradas comprimidas .....	50
9.7.3	Dimensionamento de barras submetidas à força axial de tração .....	51
9.7.4	Dimensionamento de barras submetidas a força axial de compressão.....	51
9.7.5	Dimensionamento de barras submetidas à flexão composta.....	57
9.8	Projeto de emendas .....	57
9.9	Projeto das placas de base .....	58
9.9.1	Generalidades.....	58
9.9.2	Área efetiva $A_{bas}$ para placas de base .....	58
9.10	Materiais do piso .....	59
9.10.1	Pisos de concreto .....	59
9.10.2	Outros materiais de piso .....	60
9.10.3	Projeto de ancoragens.....	60
9.11	Projeto de distanciadores .....	60
10	Análise global de porta-paletes .....	61
10.1	Considerações gerais .....	61
10.1.1	Generalidades.....	61
10.1.2	Análise bidimensional .....	61
10.1.3	Análise tridimensional avançada.....	62

10.2 Procedimento de cálculo ..... 62

10.2.1 Ações..... 62

10.2.2 Procedimento ..... 62

10.2.3 Momento de rotação característico do conector ..... 65

10.2.4 Momento de rotação característico da ligação com o piso ..... 65

10.3 Análise de porta-paletes com e sem contraventamento na direção do corredor ..... 65

10.4 Análise de porta-paletes contraventado e não contraventado na direção transversal ao corredor ..... 67

10.4.1 Generalidades..... 67

10.4.2 Estabilidade fora de plano..... 68

10.5 Métodos para análise global ..... 69

10.5.1 Efeitos da geometria deformada da estrutura..... 69

10.5.2 Método de análise ..... 70

10.6 Método simplificado para análise de estabilidade na direção transversal ao corredor ..... 72

10.7 Projeto das colunas ..... 72

10.7.1 Generalidades..... 72

10.7.2 Forças axiais e momentos fletores de cálculo..... 72

11 Estado-limite de serviço ..... 73

11.1 Generalidades..... 73

11.2 Estado-limite de serviço para porta-paletes..... 73

12 Marcação e identificação..... 73

13 Métodos de ensaio e avaliação dos resultados ..... 73

13.1 Generalidades..... 73

13.2 Requisitos para ensaios ..... 74

13.2.1 Equipamentos..... 74

13.2.2 Condições de suporte..... 75

13.2.3 Aplicação da carga..... 75

13.2.4 Incrementos da carga de ensaio..... 75

13.2.5 Montagem das amostras de ensaio..... 75

13.2.6 Relatórios dos ensaios ..... 75

13.3 Interpretação dos resultados dos ensaios ..... 76

13.3.1 Definição da carga de falha..... 76

13.3.2 Correção dos resultados dos ensaios ..... 76

13.3.3 Determinação dos valores característicos ..... 76

13.3.4 Valores característicos para uma família de resultados de ensaios ..... 77

13.3.5 Correções para cargas ou momentos de falha ..... 78

Anexo A (normativo) Métodos de ensaios..... 80

A.1 Ensaios de materiais..... 80

A.1.1 Ensaio de tração..... 80

A.1.2 Ensaio de dobramento..... 80

A.2 Ensaios em componentes e ligações..... 81

A.2.1 Ensaio de compressão em coluna curta..... 81

A.2.1.1 Princípio ..... 81



A.2.1.2	Disposição e método de ensaio – Alternativa 1 .....	81
A.2.1.3	Disposição e método de ensaio – Alternativa 2 .....	82
A.2.1.4	Correção das observações .....	83
A.2.1.5	Expressão dos resultados.....	83
A.2.2	Ensaio de compressão em colunas – Verificação dos efeitos da flambagem distorcional .....	83
A.2.2.1	Princípio .....	83
A.2.2.2	Disposição e procedimento .....	84
A.2.2.3	Determinação dos resultados dos ensaios .....	84
A.2.3	Ensaio de compressão em colunas – Determinação da curva de flambagem.....	84
A.2.3.1	Princípio .....	84
A.2.3.2	Disposição do ensaio .....	84
A.2.3.3	Procedimento .....	86
A.2.3.4	Correções das observações .....	87
A.2.3.5	Obtenção da curva da coluna .....	87
A.2.4	Ensaio de flexão em conectores de extremidade de longarinas.....	88
A.2.4.1	Princípio .....	88
A.2.4.2	Disposição de ensaio.....	89
A.2.4.3	Procedimento .....	91
A.2.4.4	Correção das observações .....	91
A.2.4.5	Correção dos resultados e procedimento para determinar curvas .....	92
A.2.5	Ensaio de folga em conectores .....	95
A.2.5.1	Princípio .....	95
A.2.5.2	Disposição do ensaio .....	95
A.2.5.3	Procedimento .....	95
A.2.5.4	Correções das observações .....	96
A.2.5.5	Expressão dos resultados.....	96
A.2.6	Alternativa “B”: uso de duas longarinas em balanço e uma coluna central.....	96
A.2.6.1	Disposição do ensaio .....	96
A.2.6.2	Método do ensaio .....	97
A.2.6.3	Correção das observações .....	98
A.2.6.4	Expressão dos resultados.....	98
A.2.7	Ensaio de cisalhamento em conectores e travas de conectores.....	98
A.2.7.1	Princípio .....	98
A.2.7.2	Disposição do ensaio .....	98
A.2.7.3	Procedimento .....	100
A.2.7.4	Correções das observações .....	100
A.2.7.5	Expressão dos resultados.....	100
A.2.8	Ensaio da conexão com o piso.....	100
A.2.8.1	Princípio .....	100
A.2.8.2	Disposição do ensaio .....	100
A.2.8.3	Procedimento .....	102
A.2.8.4	Correções das observações .....	102

A.2.8.5 Expressão dos resultados.....103

A.2.9 Ensaio da rigidez ao cisalhamento dos montantes .....103

A.2.9.1 Princípio .....103

A.2.9.2 Disposição do ensaio .....103

A.2.9.3 Procedimento .....104

A.2.9.4 Correções das observações .....105

A.2.9.5 Expressão dos resultados.....105

A.2.10 Ensaio de flexão em seções de colunas.....106

A.2.10.1 Princípio .....106

A.2.10.2 Disposição do ensaio .....106

A.2.10.3 Procedimento .....106

A.2.10.4 Correções das observações .....107

A.2.10.5 Expressão dos resultados.....107

A.2.11 Ensaio de flexão em longarinas.....107

A.2.11.1 Princípio .....107

A.2.11.2 Disposição do ensaio .....107

A.2.11.3 Procedimento .....108

A.2.11.4 Correções das observações .....108

A.2.11.5 Expressão dos resultados.....109

A.2.12 Ensaio em emendas de colunas.....109

A.2.12.2 Disposição do ensaio .....109

A.2.12.3 Procedimento .....110

A.2.12.4 Correções das observações .....111

A.2.12.5 Expressão dos resultados.....111

Anexo B (informativo) Método analítico de deslocamento amplificado para verificação da estabilidade na direção do corredor .....112

B.1 Princípio .....112

B.2 Análise elástica linear.....113

B.3 Valor crítico elástico .....113

Anexo C (informativo) Equações aproximadas para o cálculo de um porta-paletes regular na direção do corredor .....115

C.1 Equação aproximada para construção regular .....115

C.2 Momentos fletores adicionais devido ao carregamento-padrão .....117

C.3 Momento de cálculo.....118

C.4 Cargas de cálculo nas colunas externas .....119

Anexo D (normativo) Folga do montante.....120

D.1 Generalidades.....120

D.2 Tipos de contraventamento do montante .....120

D.3 Folga.....121

Anexo E (informativo) Imprecisão de posição .....123

Anexo F (informativo) Cargas equivalentes de longarinas.....124

Anexo G (informativo) Método simplificado para a análise da estabilidade na direção perpendicular ao corredor em circunstâncias em que há distribuição uniforme de compartimentos de carga ao longo da altura do montante.....126



G.1	Generalidades.....	126
G.2	Flambagem global de montantes .....	126
G.3	Rigidez ao cisalhamento do montante.....	127
G.4	Fator $\beta$ de amplificação .....	127
Anexo H (informativo) Controle de fabricação do produto (CFP) .....		131
H.1	Frequência de ensaios.....	131
H.2	Ensaio de dobra em longarinas e conectores.....	131
H.3	Ensaio de dobra .....	131
Anexo I (informativo) Orientação para a determinação do comprimento crítico para o ensaio de flambagem por distorção .....		132
I.1	Introdução.....	132
I.2	Comprimento em relação aos vínculos na disposição do ensaio.....	132
I.3	Método para a determinação do comprimento crítico de flambagem distorcional ....	133
I.3.1	Etapa 1.....	133
I.3.2	Etapa 2.....	133
I.3.3	Etapa 3.....	136
I.3.4	Etapa 4.....	136
I.3.5	Etapa 5.....	136
I.3.6	Etapa 6.....	136
Anexo J (informativo) Propriedades da seção equivalente .....		138
Bibliografia.....		140

## Figuras

Figura 1 – Arranjos de montantes .....	4
Figura 2 – Exemplo de um porta-paletes convencional sem contraventamento .....	9
Figura 3 – Exemplo de um porta-paletes convencional com contraventamento.....	10
Figura 4 – Modo de deslocamento assimétrico em porta-paletes de dupla entrada .....	11
Figura 5 – Vista em planta do deslocamento assimétrico de um porta-paletes de dupla entrada.....	11
Figura 6 – Esquema de cargas nos contraventamentos de um porta-paletes de simples entrada.....	12
Figura 7 – Exemplo de inter-relação entre laje de piso e deflexão do porta-paletes.....	14
Figura 8 – Rotação do piso ocorrida de forma simétrica .....	15
Figura 9 – Imperfeições globais de contraventamento para sistemas com contraventamento total ou parcial .....	17
Figura 10 – Imperfeição global no contraventamento .....	18
Figura 11 – Imperfeição local no contraventamento.....	18
Figura 12 – Cargas horizontais de transelevadores com guias.....	24
Figura 13 – Excentricidades no contraventamento .....	37
Figura 14 – Excentricidade na direção transversal ao corredor.....	38
Figura 15 – Determinação da seção transversal mínima.....	41
Figura 16 – Flambagem distorcional controlada por enrijecedores de bordas simples .....	42

Figura 17 – Flambagem distorcional não controlada por enrijecedores de borda simples.....	42
Figura 18 – Carga aplicada por meio dos dois membros externos do palete.....	43
Figura 19 – Modelo para cálculo aproximado da deformação da longarina.....	47
Figura 20 – Exemplos de longarinas que podem ou não estar sujeitas à flambagem lateral por torção.....	50
Figura 21 – Exemplos de longarinas com flambagem por torção lateral suscetível a ser crítica .....	50
Figura 22 – Modos de flambagem no plano do contraventamento .....	54
Figura 23 – Estruturas contraventadas na direção do corredor.....	55
Figura 24 – Exemplos de ligações de barras de contraventamento com restrição.....	56
Figura 25 – Área efetiva para projeto da placa de base.....	59
Figura 26 – Carregamento típico parcial para análise na direção do corredor .....	63
Figura 27 – Modelo estrutural para a estabilidade na direção do corredor de um porta-paletes sem contraventamento .....	66
Figura 28 – Modelo estrutural para estabilidade na direção do corredor de um porta-paletes contraventado .....	67
Figura 29 – Modelo estrutural de montante para a estabilidade na direção transversal ao corredor .....	68
Figura A.1 – Peça de ensaio de dobramento transversal após dobra .....	81
Figura A.2 – Arranjo do ensaio de coluna curta.....	82
Figura A.3 – Arranjo alternativo para ensaio de compressão em colunas .....	85
Figura A.4 – Arranjo alternativo para ensaio de compressão em colunas .....	86
Figura A.5 – Arranjo para o ensaio de flexão do conector .....	90
Figura A.6 – Obtenção da rigidez do conector .....	93
Figura A.7 – Determinação da curva média de rotação $\times$ momento.....	94
Figura A.8 – Linearização típica da curva média.....	95
Figura A.9 – Resultado típico do ensaio .....	96
Figura A.10 – Arranjo típico do ensaio .....	97
Figura A.11 – Disposição para ensaio de cisalhamento do conector .....	99
Figura A.12 – Disposição para ensaio da conexão com o piso .....	101
Figura A.13 – Forças e deformações no ensaio de conexão com o piso .....	102
Figura A.14 – Arranjo do ensaio para medir a rigidez ao cisalhamento dos montantes armados.....	104
Figura A.15 – Curva carga deformação.....	105
Figura A.16 – Disposição do ensaio .....	106
Figura A.17 – Exemplo de modelo de ensaio de longarina com carga aplicada.....	108
Figura A.18 – Disposição do ensaio .....	110
Figura B.1 – Base do método de deslocamento amplificado.....	112
Figura D.1 – Resultado típico do ensaio .....	120
Figura D.2 – Conexão do contraventamento .....	121
Figura D.3 – Definição gráfica do $d$ e $\alpha$ .....	122
Figura E.1 – Excentricidade de carga.....	123
Tabela F.1 – Coeficiente de ponderação de carga para longarinas .....	124

Figura G.1 – Concepção para a análise simplificada da estabilidade na direção transversal ao corredor .....	128
Figura I.1 – Comprimentos para o ensaio de flambagem distorcional .....	133
Figura I.2 – Diferentes perfurações da alma que podem afetar a restrição distorcional dos flanges, e, portanto, afetam $\alpha$ .....	134
Figura I.3 – Seção transversal equivalente sobre a seção sombreada da face frontal $t_{red}$ .....	135
Figura I.4 – Detalhes para a modelagem de um elemento plano da seção vertical .....	135
Figura I.5 – Exemplo do gráfico mostrando a mudança do modo de flambagem variando com o comprimento .....	136
Figura J.1 – Geometria original do perfil .....	138
Figura J.2 – Perfil com furações simplificadas .....	138
Figura J.3 – Perfil com faixas de espessura equivalente .....	139
<b>Tabelas</b>	
Tabela 1 – Limites de deformação do piso considerado quase rígido .....	13
Tabela 2 – Imperfeições globais .....	16
Tabela 3 – Total de ações horizontais ao nível do trilho-guia .....	24
Tabela 4 – Coeficientes de ponderação de carga $\gamma_f$ .....	31
Tabela 5 – Coeficientes de ponderação de material $\gamma_M$ .....	32
Tabela 6 – Tolerâncias na largura $b_o$ de elementos planos enrijecidos .....	36
Tabela 7 – Tolerâncias na largura $b_o$ de elementos planos não enrijecidos .....	36
Tabela 8 – Fator K (comprimento de flambagem = K x comprimento do sistema) .....	48
Tabela 9 – Métodos de análise .....	70
Tabela 10 – Ensaio para fins de material e projeto .....	74
Tabela 11 – Coeficiente $k_s$ baseado em fractil 95 % a um nível de confiança de 75 % .....	77
Tabela G.1 – Rigidez ao cisalhamento para montantes .....	129

## 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 17150-1 foi elaborada pela Comissão de Estudo Especial de Sistemas de Armazenagem (ABNT/CEE-069). O Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 12, de 20.12.2023 a 18.01.2024.

A ABNT NBR 17150-1 é baseada nas EN 15512:2020 e EN 15620:2021.

O Escopo em inglês da ABNT NBR 17150-1 é o seguinte:

## Scope

*This Standard establishes the structural design, specification and calculation requirements for pallet-type storage systems, with side members with plug connectors, made from steel elements, intended for the storage of cargo units, and subject to predominantly static loads .*

*This Standard applies to braced and non-braced systems.*

*This Standard also applies to additional structures, in which the component profiles of storage structures are used as main structural elements.*

**NOTE 1** *This Standard covers construction requirements for self-supporting storage buildings not included in ABNT NBR 8800 and ABNT NBR 14762.*

**NOTE 2** *The numerical values for partial factors and other reliability parameters indicated in this Standard are basic data that provide an adequate level of safety, ensuring an acceptable level of manpower and adequate quality management.*

*This Standard does not apply to generic types of storage structures, dynamic storage systems, Drive, Cantilever or shelving.*

*This Standard also does not apply to specific requirements for the design and installation of storage structures in seismic areas.*

## Introdução

Sistemas de armazenagem tipo porta-paletes são estruturas de apoio para a armazenagem de mercadorias em armazéns. Os produtos a serem armazenados são geralmente dispostos em paletes ou em recipientes do tipo caixas ou contentores.

Os porta-paletes são montados a partir de componentes de aço, incluindo os montantes verticais, sendo cada um formado por duas colunas contraventadas entre si, por vigas, comumente denominadas longarinas, e podem ter planos de apoio colocados sobre as longarinas. São utilizadas ligações especiais entre as longarinas e colunas e o sistemas de contraventamento, de modo a criar uma estrutura tridimensional estável, formando corredores que permitam o acesso às mercadorias.

Apesar de os componentes serem semelhantes, eles somente são padronizados para cada fabricante individualmente. Estes componentes diferem dos componentes tradicionais de estruturas metálicas, formados por colunas e vigas, nos seguintes aspectos:

- a) os perfis de colunas dos montantes são perfurados continuamente em toda a sua extensão, sendo utilizadas ligações por encaixe entre as longarinas e as colunas;
- b) componentes estruturais para porta-paletes geralmente são elementos fabricados em chapas de aço com pequena espessura e formados a frio.





# Sistemas de armazenagem — Estrutura de armazenagem estática tipo porta-paletes

## Parte 1: Requisitos para projeto estrutural

### 1 Escopo

Esta Norma estabelece os requisitos de projeto estrutural, especificações e cálculo para os sistemas de armazenagem tipo porta-paletes, com longarinas com conectores de encaixe, fabricados a partir de elementos de aço, destinados à armazenagem de unidades de carga e sujeitos a cargas predominantemente estáticas.

Esta Norma se aplica aos sistemas contraventados e aos sistemas não contraventados.

Esta Norma também se aplica às estruturas adicionais, nas quais os perfis componentes de estruturas de armazenagem são utilizados como elementos estruturais principais.

NOTA 1 Esta Norma abrange os requisitos de construção de edifícios de armazenagem do tipo autoportantes, não constantes nas ABNT NBR 8800 e ABNT NBR 14762.

NOTA 2 Os valores numéricos para os fatores parciais e outros parâmetros de confiabilidade indicados nesta Norma são dados básicos que fornecem um nível adequado de segurança, assegurando um nível aceitável de mão de obra e um gerenciamento adequado da qualidade.

Esta Norma não se aplica aos tipos genéricos de estruturas de armazenagem, nem ao sistema dinâmico de armazenagem, *Drive*, *Cantilever* ou prateleiras.

Esta Norma também não se aplica aos requisitos específicos para projeto e instalação de estruturas de armazenagem em áreas sísmicas.

Esta Norma não se aplica às estruturas de armazenagem em condição de incêndio. Para estes casos consultar a ABNT NBR 14323.

### 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 8800, *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*

ABNT NBR 14762:2010, *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*

ABNT NBR 8681, *Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*

ABNT NBR 6123, *Forças devidas ao vento em edificações*

ABNT NBR 14827, *Chumbadores instalados em elementos de concreto ou alvenaria. Determinação da resistência à tração e ao cisalhamento*

ABNT NBR 15421, *Projetos de estruturas resistentes a sismos – Procedimento*

ABNT NBR 17150-2:2024, *Sistemas de armazenagem – Estrutura de armazenagem estática tipo porta-paletes – Parte 2: Folgas e tolerâncias para projetos*

ABNT NBR ISO 7438, *Materiais metálicos – Ensaio de dobramento*

ABNT NBR ISO 6892-1, *Materiais metálicos – Ensaio de tração – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*

ISO 10326, *Mechanical vibration – Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration*

EN 10143, *Continuously hot-dip coated steel sheet and strip. Tolerances on dimensions and shape*

EN 10162, *Cold rolled steel sections. Technical delivery conditions. Dimensional and cross-sectional tolerances*

EN 15620, *Steel static storage systems – Adjustable pallet racking – Tolerances, deformation and clearances*

EN 15629, *Steel static storage systems – The specification of storage equipment*

EN 15635, *Steel static storage systems – Application and maintenance of storage equipment*

EN 1991-1-1:2002, *Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings*

EN 1993-1-1:2006, *Eurocode 3 – Actions on structures – Part 1-5: General rules and rules for buildings*

EN 1993-1-3, *Eurocode 3 – Design of steel structures – General rules*

### 3 Termos e definições

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

#### 3.1

##### **ação acidental**

ação, normalmente de curta duração, porém de magnitude significativa, que é improvável que ocorra em uma determinada estrutura durante a vida útil projetada

#### 3.2

##### **material-base**

chapas de aço planas ou tiras de bobinas, produzidas por laminação a quente ou a frio, a partir das quais os componentes das estruturas tipo porta-paletes são produzidos

#### 3.3

##### **lote de aço**

quantidade de aço, com as mesmas especificações, produzida por um único fornecedor, de uma única vez

**3.4****longarina**

elemento estrutural constituído por um perfil horizontal com conectores nas extremidades para fixação nas colunas e que, em pares, no mesmo plano horizontal, suporta o peso das unidades de carga

**3.5****conector de extremidade da longarina**

conector que pode ser soldado ou formado como parte integrante das longarinas, provido de elementos que se encaixem em furos ou fendas nas colunas dos montantes

**3.6****carga de compartimento**

carga que pode ser carregada em um compartimento de um porta-paletes por um lado

**3.7****porta-paletes de simples entrada**

linha de porta-paletes acessível a partir de um único corredor de operação

**3.8****porta-paletes com dupla entrada**

linhas de porta-paletes adjacentes e ligadas por distanciadores com acessibilidade por dois corredores de operação

**3.9****análise global**

determinação de um conjunto consistente de forças internas, momentos e deslocamentos que representam toda a estrutura tridimensional de suporte de cargas, em equilíbrio com um conjunto particular de ações sobre esta estrutura

**3.10****membro perfurado**

membro com vários orifícios espaçados regularmente ao longo do seu comprimento

**3.11****carga de posicionamento**

carga causada por operações de armazenagem de uma unidade de carga na estrutura porta-paletes, considerando as boas práticas de uso

**3.12****contraventamento vertical**

sistema de contraventamento no plano vertical, paralelo ao corredor principal da estrutura porta-paletes, ligando montantes adjacentes

**3.13****elemento enrijecido**

porção da seção transversal conectada ao restante dela, ao longo de suas bordas longitudinais

**3.14****elemento não enrijecido**

porção da seção transversal conectada ao restante dela, ao longo de uma borda longitudinal apenas

3.15

**deslocamento horizontal**

deformação de segunda ordem de uma estrutura, que ocorre devido a qualquer desaprumo inicial dela

3.16

**unidade de carga**

item de armazenagem individual que pode ser colocado ou retirado de uma estrutura em apenas uma operação

3.17

**montante**

arranjo de duas colunas, geralmente com seções perfuradas, unidas por um sistema de contraventamento, formando um sistema treliçado vertical

NOTA Exemplos de arranjos ou formas de montantes são indicados na Figura 1.

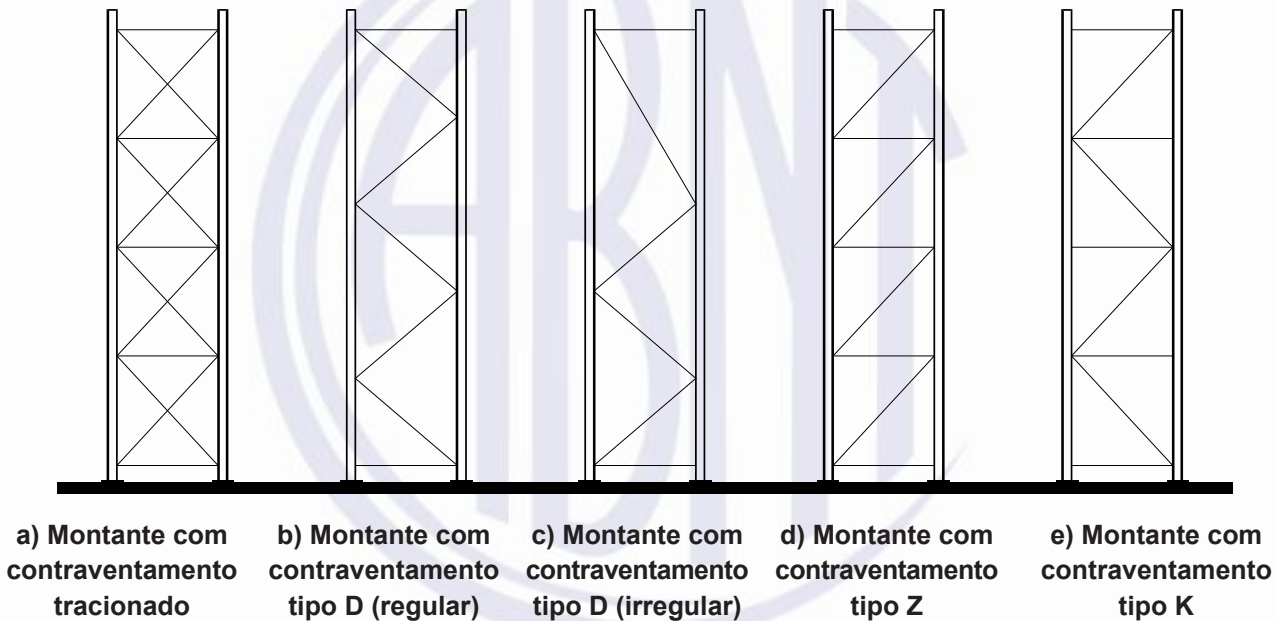


Figura 1 – Arranjos de montantes

3.18

**módulo de porta-paletes**

conjunto composto por dois montantes adjacentes e pelos pares de longarinas que os unem

3.19

**direção longitudinal**

direção paralela ao corredor operacional do porta-paletes

3.20

**direção transversal**

direção perpendicular ao corredor operacional do porta-paletes

3.21

**corredor**

espaço mínimo entre duas estruturas de armazenagem ou entre a estrutura e quaisquer obstáculos limitantes (paredes, colunas, faixas limitadoras etc.), destinado ao trânsito de pessoas, equipamentos e cargas

**3.22****corredor operacional**

espaço mínimo útil entre as unidades de carga ou entre as unidades de carga e quaisquer obstáculos limitantes (paredes, colunas, faixas limitadoras etc.), destinado ao trânsito de equipamentos e cargas

**3.23****corredor entre estruturas**

espaço mínimo entre duas estruturas de armazenagem

**4 Símbolos**

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

**4.1 Letras maiúsculas e letras gregas**

$F_{Qa}$  Valor da ação acidental

$A$  Área da seção transversal

$A_{ef}$  Área efetiva da seção transversal

$A_g$  Área bruta da seção transversal

$F_{Qah}$  Valor da ação acidental horizontal

$F_{Qav}$  Valor da ação acidental vertical

$b$  Profundidade (ou largura) do montante

$b_p$  Largura plana teórica do elemento

$E$  Módulo de elasticidade

$e_{ef}$  Largura efetiva de apoio da placa de base

$e$  Excentricidades

$F$  Força, valor da ação

$f_{ck}$  Resistência característica do concreto à compressão

$f_t$  Resistência ao escoamento observada em uma amostra de ensaio

$f_u$  Resistência à ruptura do aço

$f_y$  Resistência ao escoamento do aço

$f_{ya}$  Resistência ao escoamento média

$f_{yb}$  Resistência ao escoamento básica ( $= f_y$ )

$G$  Módulo de elasticidade transversal

$F_G$  Valor característico de cargas permanentes (cargas mortas)

$h$  Altura

$I$	Momento de inércia
$J$	Constante de torção da seção transversal bruta
$C_w$	Constante de empenamento
$K$	Fator de comprimento efetivo
$k_b$	Rigidez do conector longarina-coluna (viga-coluna)
$k_s$	Coeficiente relacionado com o número de ensaios realizados
$L$	Vão
$l$	Comprimento
$\ell$	Comprimento efetivo ou comprimento de flambagem
$M$	Momento fletor
$N$	Força axial
$N_{Sd}$	Força axial solicitante de cálculo
$N_{Rd}$	Força axial resistente de cálculo
$n$	Número de ensaios realizados
$n_f$	Número de montantes na direção paralela ao corredor em uma mesma linha de módulos
$n_s$	Número de níveis de longarinas
$F_Q$	Valor característico da ação variável
$Q_f$	Carga concentrada no piso
$F_{Qh}$	Valor da ação lateral máxima especificada pelo transelevador
$F_{Qph}$	Valor da ação de posicionamento horizontal
$F_{Qpv}$	Valor da ação de posicionamento vertical
$F_{Qu}$	Peso da unidade de carga
$q$	Valor da ação variável uniformemente distribuída
$R_m$	Valor médio dos resultados ajustados dos ensaios
$R_t$	Carga de ruptura/falha observada
$r$	Raio de giração
$r_0$	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção
$s_n$	Desvio-padrão dos resultados normalizados dos ensaios
$t$	Espessura do material



$t_c$	Espessura real do material, excluindo-se os recobrimentos (pintura ou outros)
$t_t$	Espessura real observada no corpo de prova de um ensaio
$V$	Força de cisalhamento
$F_V$	Carga vertical
$F_{Vcr}$	Valor elástico crítico da carga vertical
$W$	Módulo de resistência elástico da seção
$\alpha_{fy}$	Fator de correção para a resistência ao escoamento
$\alpha_i$	Fator de imperfeição
$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica linear
$\beta_m, \beta_\theta$ e $\beta_\Delta$	Coefficientes de ponderação de carga para longarinas
$\beta_e$	Fator de correção para espessura
$\beta$	Fator de amplificação para efeitos de segunda ordem
$\gamma$	Coefficiente de ponderação parcial de resistência ou das ações
$\gamma_A$	Coefficiente de ponderação para cargas acidentais
$\gamma_f$	Coefficiente de ponderação para cargas
$\gamma_G$	Coefficiente de ponderação para cargas permanentes
$\gamma_M$	Coefficiente de ponderação para materiais
$\gamma_Q$	Coefficiente de ponderação para cargas variáveis
$\delta$	Deslocamento, flecha
$\theta$	Rotação
$\lambda$	Índice ou parâmetro de esbeltez
$\bar{\lambda}$	Índice de esbeltez adimensional
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Densidade
$\phi$	Imperfeição de segunda ordem
$\phi_0$	Imperfeição inicial de segunda ordem
$\phi_1$	Folga do conector longarina-coluna
$\chi$	Fator de redução de tensões para flambagem

## 4.2 Subscritos

b	flambagem
c	compressão, capacidade
cr	crítico
d	de cálculo
db	flambagem distorcional
FT	flexo-torção
g	bruto
i	número do ensaio
k	característico, nominal
LT	lateral com torção
m	valor principal
n	valor corrigido
Rd	resistência de cálculo
Sd	solicitação de cálculo
Ser	serviço
T	torção
t	valor observado do ensaio

## 5 Bases de projeto

### 5.1 Requisitos

#### 5.1.1 Requisitos básicos

Porta-paletes são produtos padronizados que demandam procedimentos de ensaios específicos, uma vez que a utilização apenas dos métodos analíticos (cálculo convencional) pode não ser suficiente. Os procedimentos de ensaio encontram-se no Anexo A.

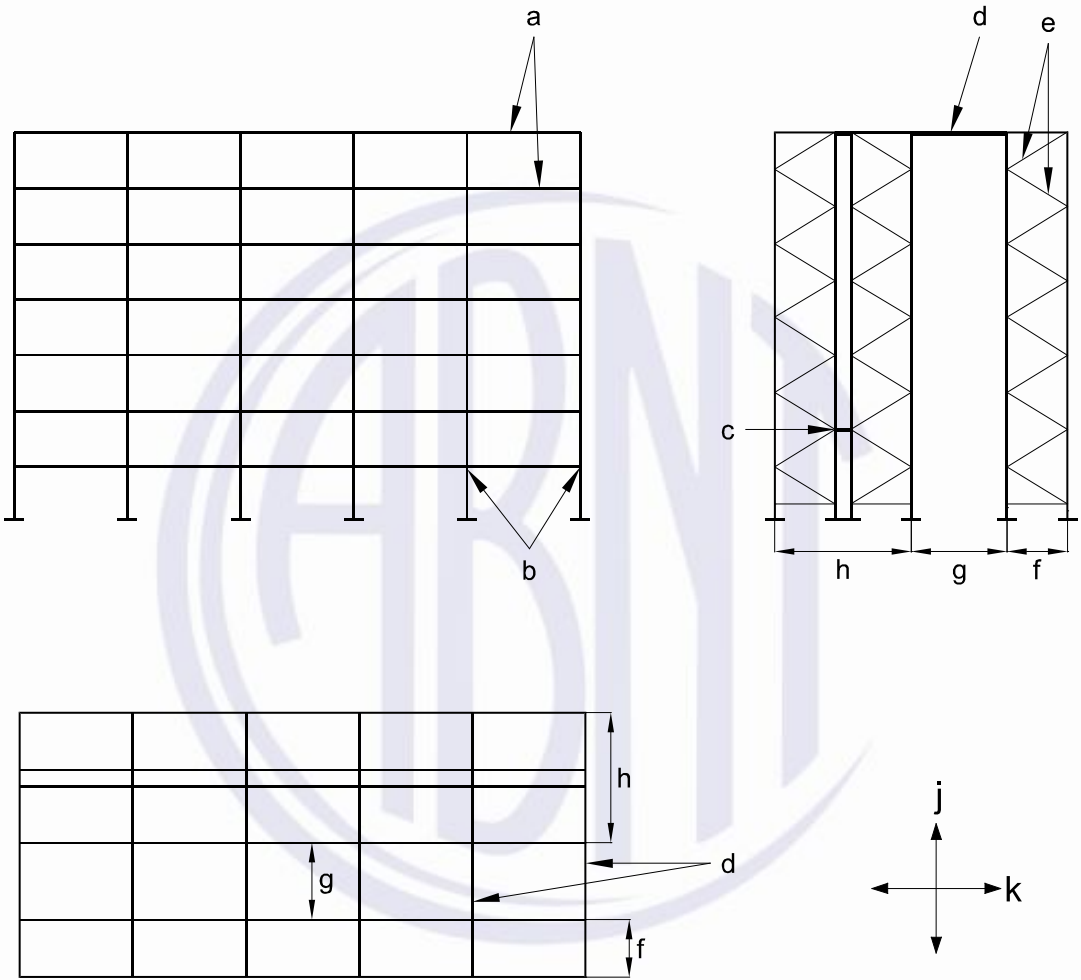
Quando não for especificado nesta Norma, os procedimentos de cálculo devem atender às ABNT NBR 14762 e ABNT NBR 8800.

O projeto deve ser executado levando em consideração as tolerâncias especificadas na ABNT NBR 17150-2 e a operação descrita na EN 15635.

NOTA Para os porta-paletes em zonas sísmicas, ver a ABNT NBR 15421.

5.1.2 Porta-paletes convencional sem contraventamento

A configuração de um porta-paletes sem contraventamento é apresentada na Figura 2. A estabilidade longitudinal do porta-paletes é obtida pela rigidez dos conectores das longarinas. Na direção transversal, a estabilidade é dada pelo contraventamento dos montantes, os quais, em caso de porta-paletes de dupla entrada, devem estar unidos entre si por distanciadores distribuídos ao longo de sua altura.



Legenda

- a longarinas
- b montantes
- c distanciadores
- d travamento superior (se necessário)
- e contraventamento do montante
- f porta-paletes de simples entrada
- g corredor
- h porta-paletes de dupla entrada
- j direção transversal
- k direção longitudinal

Figura 2 – Exemplo de um porta-paletes convencional sem contraventamento

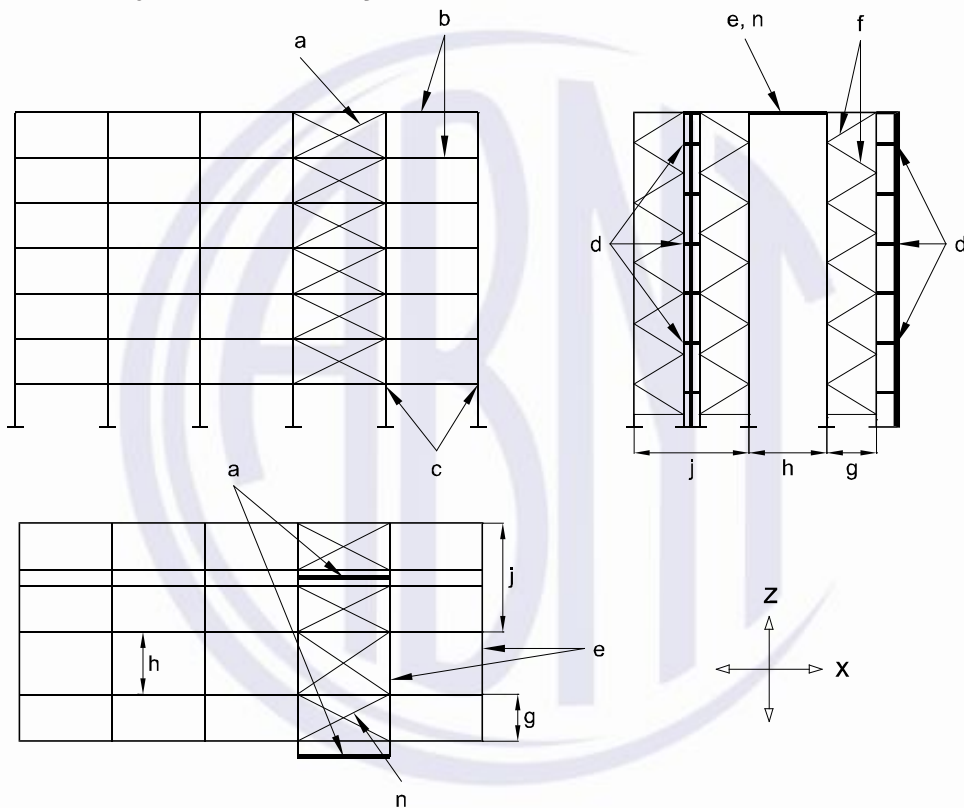
5.1.3 Porta-paletes convencional com contraventamento

Em um porta-paletes com contraventamento (ver Figura 3), as forças que atuam nos planos frontal e traseiro devem ser transmitidas ao contraventamento principal, na parte traseira da estrutura, como apresentado nas Figuras 4 a 6.

O efeito estabilizador do contraventamento vertical é transmitido diretamente às colunas traseiras e às colunas frontais pelo contraventamento horizontal.

A estabilidade transversal é dada pelo contraventamento dos montantes.

Pode-se contraventar longitudinalmente os porta-paletes até determinada altura. Neste caso, deve-se levar em conta no projeto as considerações para os casos com e sem contraventamento.

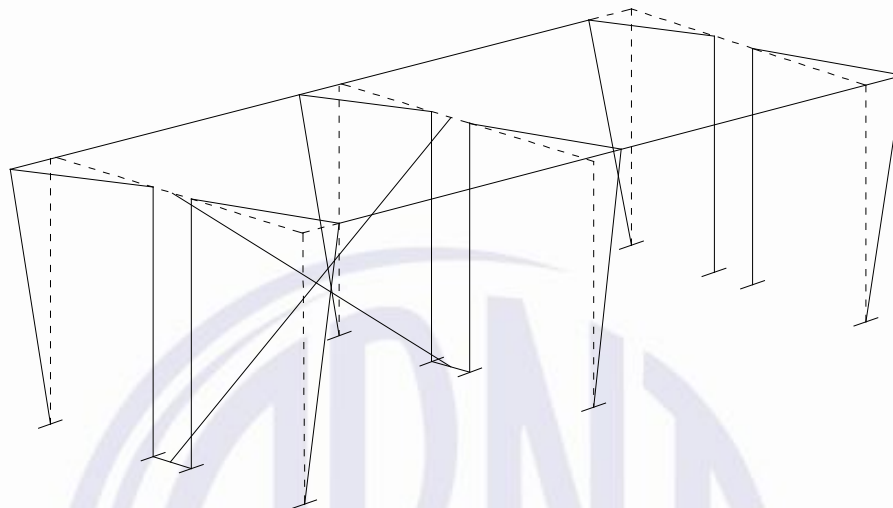


Legenda

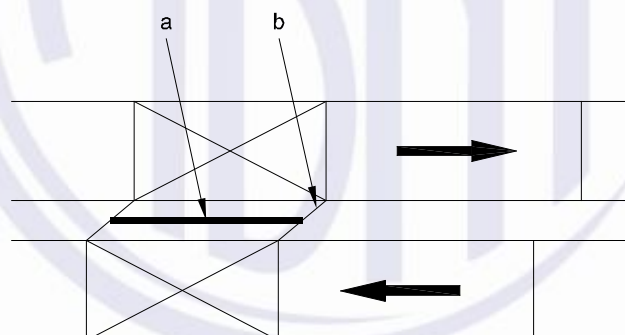
- a contraventamento vertical
- b longarinas
- c montantes
- d distanciadores
- e travamento superior (se necessário)
- f contraventamento do montante
- g porta-paletes de simples entrada
- h corredor
- j porta-paletes de dupla entrada
- z direção transversal ao corredor
- m direção longitudinal ao corredor
- n contraventamento horizontal

Figura 3 – Exemplo de um porta-paletes convencional com contraventamento

Em porta-paletes com contraventamento de dupla entrada, o contraventamento horizontal deve ser projetado de forma que impossibilite o aparecimento de deslocamentos assimétricos, nos quais uma das fileiras deforme-se longitudinalmente em um sentido e a outra no sentido oposto, fazendo com que o contraventamento vertical perca a sua eficiência, conforme as Figuras 4 e 5.



**Figura 4 – Modo de deslocamento assimétrico em porta-paletes de dupla entrada**

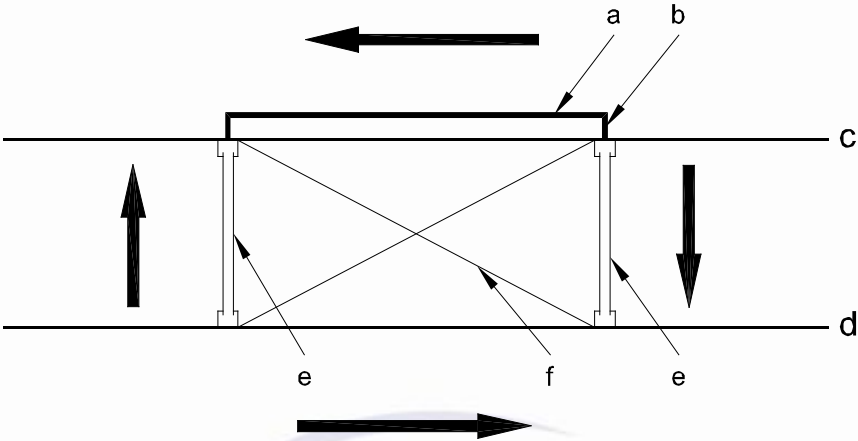


#### Legenda

- a contraventamento vertical
- b distanciadores de contraventamento

**Figura 5 – Vista em planta do deslocamento assimétrico de um porta-paletes de dupla entrada**

Em porta-paletes contraventados de simples entrada, o projeto deve assegurar que o contraventamento seja completamente eficaz, conforme a Figura 6, especialmente quando os paletes sobressaem pela parte posterior do porta-paletes.



**Legenda**

- a contraventamento vertical
- b mísulas de contraventamento
- c plano traseiro do porta-paletes
- d plano frontal do porta-paletes
- e montante
- f contraventamento horizontal

**Figura 6 – Esquema de cargas nos contraventamentos de um porta-paletes de simples entrada**

**5.1.4 Vida útil para o projeto**

Para determinar a capacidade de carga do porta-paletes, deve-se considerar uma vida útil projetada de pelo menos dez anos. No entanto, isto não pode ser interpretado como garantia quanto à vida útil real do porta-paletes.

**NOTA** A vida útil da maioria dos porta-paletes é determinada pelo desgaste e danos sofridos durante o uso, e pela corrosão. Isto pode ser previsto na etapa de projeto e não é escopo desta Norma. Assume-se que o porta-paletes seja utilizado adequadamente e que qualquer dano sofrido seja imediatamente reparado. Recomenda-se consultar as EN 15629 e EN 15635.

**5.1.5 Tolerâncias do piso**

Para o projeto de porta-paletes, os desvios de nivelamento do piso sobre o qual ele é colocado, podem ser desprezados sempre que o estado do piso estiver dentro dos limites especificados na ABNT NBR 17150-2:2024, 5.1.

**5.1.6 Interação piso-estrutura**

**5.1.6.1 Generalidades**

As propriedades de deformação do piso devem ser consideradas no projeto de porta-paletes, conforme 5.1.6.3 e 5.1.6.4.

O projetista do porta-paletes deve informar, quando solicitado, as ações do porta-paletes sobre o piso.

**NOTA 1** O piso é a fundação do porta-paletes e a EN 15629 contém orientações ao especificador.



NOTA 2 A deformação do piso pode ocorrer devido a uma série de fatores como ações aplicadas pelo porta-paletes, equipamento de movimentação de carga etc.

NOTA 3 Os limites para rotação do piso ( $\theta_{\text{PISO}}$ ) estão definidos na Tabela 1. Para fins de cálculo, são considerados apenas os excessos.

NOTA 4 Para orientações relativas à interface entre porta-paletes e apoio do armazém, recomenda-se consultar os itens [15], [16] e [17] da Bibliografia.

#### 5.1.6.2 Parâmetros do piso

A menos que especificado de outra forma, os seguintes parâmetros devem ser usados pelo projetista de porta-paletes:

- a) a resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) deve ser igual ou superior a 25 MPa;
- b) o piso deve atender aos parâmetros de 5.1.6.3;
- c) a espessura do piso deve estar em conformidade com a espessura definida no projeto de ancoragem de montantes, protetores verticais, sistema de contraventamento etc.;
- d) não há movimentação nas juntas do piso.

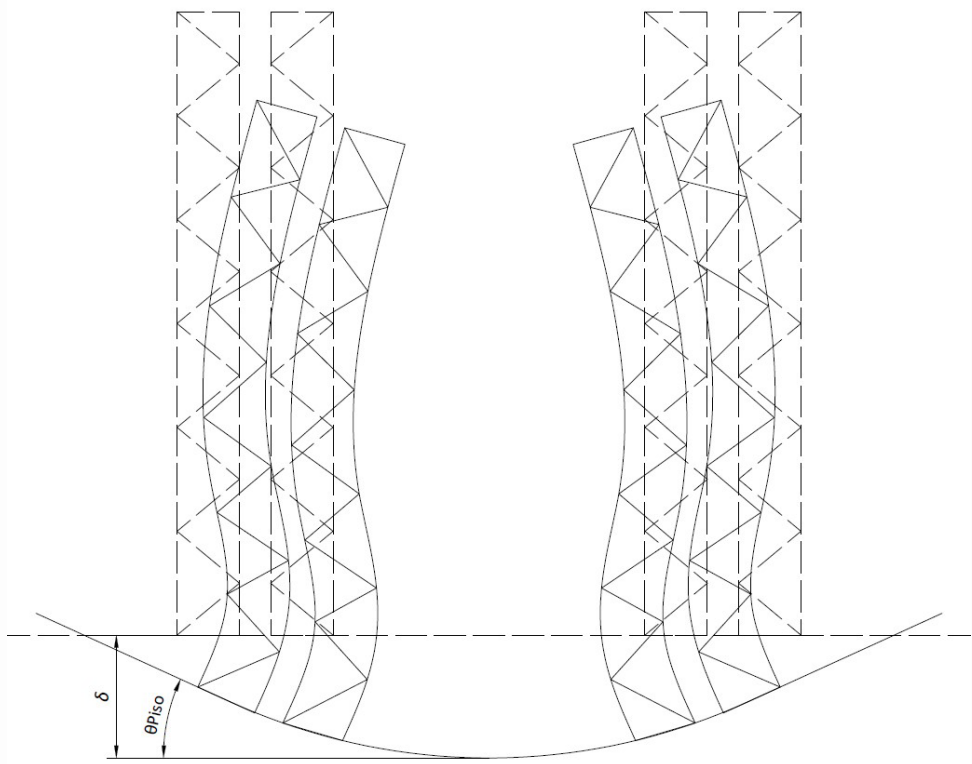
#### 5.1.6.3 Limites de deformação do piso para montantes parafusados

Se a rotação do piso ( $\theta_{\text{PISO}}$ ) for menor que o limite dado na Tabela 1, então, o piso pode ser considerado como uma fundação rígida e, para fins de projeto de porta-paletes, não é necessário considerar a deformação do piso.

Se a deformação do piso ultrapassar o limite especificado na Tabela 1, somente a deformação que ultrapassar o limite deve ser considerada.

**Tabela 1 – Limites de deformação do piso considerado quase rígido**

Desaprumo máximo na montagem	Limite de rotação $\theta_{\text{PISO}}$ no estado-limite de serviço (ver Figura 7)
1/350	1/700
1/500	1/1 000
1/750	1/1 500
1/1 000	1/2 000
NOTA O desaprumo 1/350 está relacionado com a classe 400; o de 1/500 e 1/750 com a classe 300 e 1/1.000 com as classes 100 e 200. Para informações adicionais, ver a ABNT NBR 17150-2.	



**Legenda**

$\theta_{PISO}$  rotação do piso  
 $\delta$  deflexão do piso

**Figura 7 – Exemplo de inter-relação entre laje de piso e deflexão do porta-paletes**

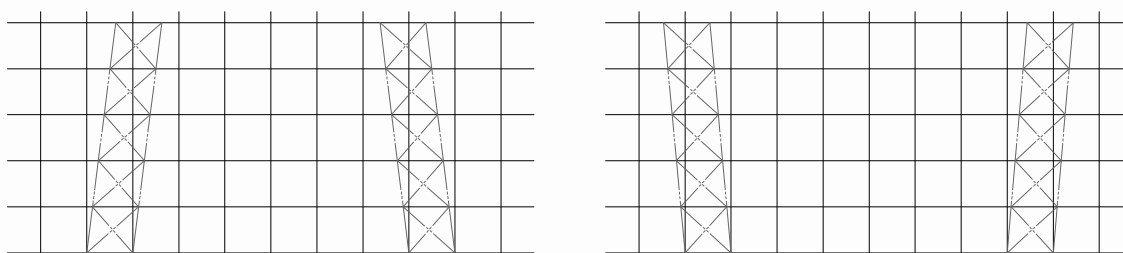
**5.1.6.4 Limites de deformação do piso para montantes soldados**

Para todos os porta-paletes com montantes soldados, a deformação do piso superior a  $\theta_{PISO} = 1/2\ 000$  deve ser considerada no projeto.

**5.1.6.5 Inclusão das deformações do piso na análise**

Um dos seguintes métodos deve ser escolhido:

- a) método 1: o porta-paletes e o piso são modelados juntos;
- b) método 2: uma abordagem iterativa em cooperação com o projetista do piso. Nesta abordagem, a deformação na base do piso é incluída na análise e as reações aplicadas no piso são calculadas. O projetista do piso recalcula as deflexões do mesmo. O projeto do porta-paletes é repetido com as novas deflexões. Este processo é repetido até que a diferença entre deflexões sucessivas seja inferior a 5 %, ponto em que o dimensionamento pode ser considerado como corrigido (ver Figura 8);
- c) método 3: se os montantes não estiverem conectados entre si na direção transversal ao corredor (por exemplo, por travamento superior ou passarelas apoiadas no porta-palete, ver Figura 7), a análise no sentido transversal ao corredor pode ser realizada com o prumo dos montantes e induzidos pela rotação do piso somando-se ao desaprumo conforme 9.3.2.



**Figura 8 – Rotação do piso ocorrida de forma simétrica**

## 5.2 Métodos de cálculo

### 5.2.1 Generalidades

O projeto da estrutura ou de alguma das suas partes deve ser executado por meio de um dos métodos desta Norma (ver Anexos B e C). Em todos os casos, os detalhes dos componentes e as ligações devem ser projetados de forma a não afetar negativamente qualquer outra parte da estrutura.

### 5.2.2 Estado-limite último

O estado-limite último corresponde à máxima capacidade de carga e geralmente caracteriza-se por:

- a) resistência (incluindo plastificação, ruptura, flambagem e transformação em um mecanismo);
- b) estabilidade frente ao tombamento e deslocamento lateral,
- c) deformação local excessiva; e
- d) ruptura por fadiga.

**NOTA** Esta Norma não contempla esclarecimentos sobre fadiga. Assume-se que os porta-paletes não sejam submetidos à fadiga, portanto esta Norma não se aplica ao projeto de instalações submetidas a ciclos altos de carga, ou que incorporem detalhes que os façam vulneráveis a ciclos baixos de fadiga sem considerar o efeito da carga repetida.

### 5.2.3 Estado-limite de serviço

A verificação do estado-limite de serviço assegura o comportamento adequado dos elementos em condições de serviço. Devem ser consideradas deformações e flechas que afetem a aparência ou o uso efetivo da estrutura.

As deformações devem ser calculadas considerando os efeitos de segunda ordem e a rigidez rotacional de qualquer ligação semirrígida.

## 5.3 Imperfeições

### 5.3.1 Generalidades

Os efeitos das imperfeições globais devem ser considerados na análise global através de uma imperfeição inicial ou através de um sistema fechado de forças equivalentes.

A influência das imperfeições deve ser considerada na análise, levando-se em conta os seguintes elementos:

- a) imperfeições em sistemas não contraventados na direção longitudinal ao corredor, conforme 5.3.2;
- b) imperfeições em sistemas contraventados, conforme 5.3.3;

- c) imperfeições locais do contraventamento, conforme 5.3.3.3;
- d) imperfeições dos componentes, conforme 5.3.5.

A forma assumida de imperfeições globais e imperfeições dos componentes podem ser obtidas do modo de flambagem elástica de uma estrutura no plano de flambagem considerado.

5.3.2 Imperfeição global

5.3.2.1 Generalidades

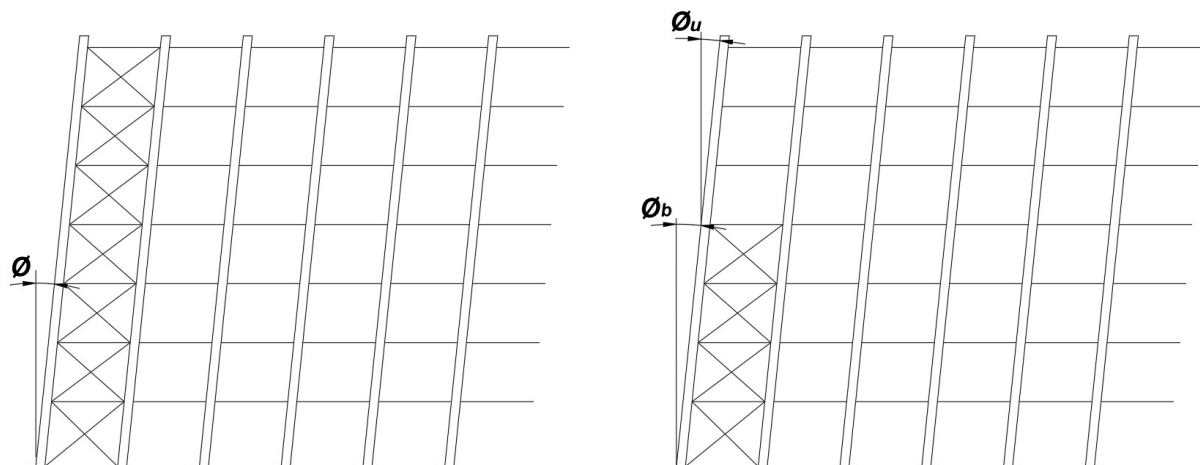
A imperfeição global inicial por deslocamento horizontal  $\phi_{elu}$  para o estado-limite último e  $\phi_{els}$  para o estado-limite de serviço deve ser determinada através da Tabela 2.

Tabela 2 – Imperfeições globais

Característica	Direção longitudinal ao corredor		Transversal ao corredor
	Não contraventado	Contraventado	Contraventado
Estado-limite último	$\phi_{elu} = \phi_0 \alpha_h \alpha_{da} + \phi_{I,CL}$ $\phi_0 \alpha_h \alpha_{da} \geq 1/500$	$\phi_{elu} = \phi_0 \alpha_h \alpha_{da}$ $\phi_0 \alpha_h \alpha_{da} \geq 1/500$	$\phi_{elu} = \phi_0 \alpha_h \alpha_{da} + \phi_{I,mt}$ $\phi_{elu} \geq 1/500$
Estado-limite de serviço	$\phi_{els} = \phi_s + \phi_{I,CL}$	$\phi_{els} = \phi_s$	$\phi_{els} = \phi_s + \phi_{I,mt}$
<b>Legenda</b>  $\phi_0$ valor-base $\phi_0 = 3/2 \phi_s$ $\phi_s$ máximo desaprumo especificado dividido pela altura (ver 8.5.7.2) $\phi_{I,CL}$ folga entre o conector da longarina e a coluna determinada de acordo com A.2.5 (se já inclui a curva de rigidez então = 0). $\phi_{I,mt}$ folga da conexão entre o contraventamento do montante e a coluna determinada de acordo com A.2.8 ou Anexo D. $\alpha_h$ fator de redução para a altura $h$ aplicado para as colunas. $\alpha_h = 1$ $\alpha_{da}$ fator de redução para o número de montantes no alinhamento. $\alpha_{da} = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{n_{da}} \right)}$ (1) $\alpha_{ca}$ é o fator de redução para o número de montantes conectados na direção transversal ao corredor. $\alpha_{ca} = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{n_{ca}} \right)}$ $n_{da}$ é o número de montantes no alinhamento. $n_{ca}$ é o número de montantes conectados na direção transversal ao corredor (exemplo: através de travamento superior, distanciadores, ou pisos intermediários).			

### 5.3.2.2 Imperfeições em porta-paletes parcialmente contraventados na direção longitudinal ao corredor

A imperfeição inicial  $\phi_{elu}$  para a parte contraventada e não contraventada da estrutura (ver Figura 9) deve ser como especificada em 5.3.2.



**Figura 9 – Imperfeições globais de contraventamento para sistemas com contraventamento total ou parcial**

### 5.3.3 Imperfeições no contraventamento

#### 5.3.3.1 Generalidades

As imperfeições no contraventamento aplicam-se tanto aos montantes (direção transversal), quanto aos porta-paletes contraventados na direção longitudinal.

Para a estabilidade lateral, os efeitos das imperfeições nos porta-paletes com contraventamento devem ser considerados incluindo uma imperfeição geométrica no porta-paletes (ver Figura 10).

As imperfeições globais devem ser consideradas conforme 5.3.3.2 e as imperfeições locais conforme 5.3.3.3. Não é necessário estudar estas imperfeições conjuntamente.

#### 5.3.3.2 Imperfeições no contraventamento vertical e suas ligações

As imperfeições constantes nesta subseção devem ser incluídas na análise global.

A imperfeição na direção vertical devido ao deslocamento lateral deve ser determinada pela seguinte equação:

$$\phi = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{n_f}\right)} 2\phi_s \quad (2)$$

onde

$$\phi \leq 2\phi_s \text{ e } \phi_s \geq 1/500 .$$

No sentido paralelo ao corredor,  $n_f$  é igual ao número de montantes em uma linha de módulos de porta-paletes.

No sentido transversal,  $n_f$  pode ser adotado como o número de montantes unidos entre si (por exemplo, por um travamento superior, distanciadores ou níveis intermediários de pisos) e trabalhando juntos.

NOTA Uma análise racional pode permitir o uso de mais de uma linha de montantes no sentido transversal (por exemplo, devido ao travamento superior ou à existência de pisos intermediários).

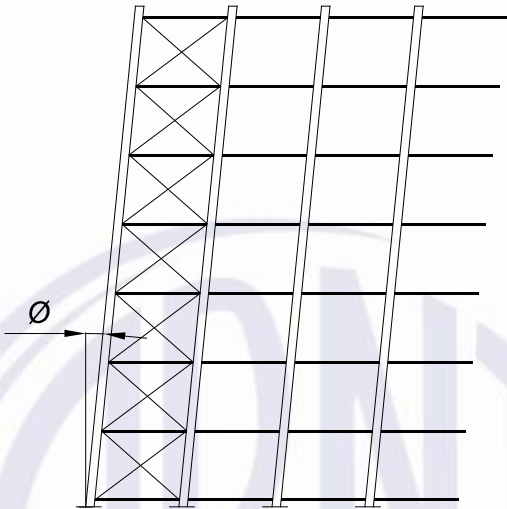


Figura 10 – Imperfeição global no contraventamento

5.3.3.3 Imperfeição local no contraventamento

As imperfeições locais originam sistemas de forças de equilíbrio (ver Figura 11) que devem ser consideradas somente no projeto dos componentes dos contraventamentos e suas ligações. Pode-se utilizar uma análise de primeira ordem.

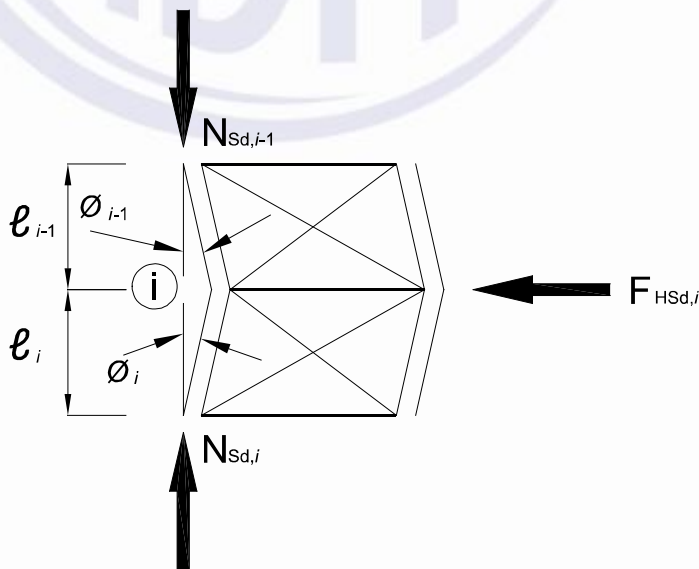


Figura 11 – Imperfeição local no contraventamento

Para colunas sem emenda  $\varnothing_0 = 1/400$

Para colunas com emenda  $\varnothing_0 = 1/200$



O cálculo é realizado conforme as seguintes equações:

$$\ell_i \geq \ell_{i-1}; \varnothing_{i-1} = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{n_u} \right)} \varnothing_0 \text{ mas } \leq \varnothing_0 \quad (3)$$

$$\text{e } \varnothing_i = \varnothing_{i-1} \frac{\ell_{i-1}}{\ell_i}$$

onde

$n_u$  é o número de colunas por cada bloco de contraventamento.

$$\ell_i \leq \ell_{i-1}; \varnothing_i = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{n_u} \right)} \text{ mas } \leq \varnothing_0 \quad (4)$$

$$\text{e } \varnothing_{i-1} = \varnothing_i \frac{\ell_i}{\ell_{i-1}}$$

A imperfeição geométrica inicial pode ser aplicada como uma força horizontal  $H_{Sd,i}$ :

$$F_{HSD,i} = N_{Sd,i-1} \varnothing_{i-1} + N_{Sd,i} \varnothing_i \quad (5)$$

onde

$F_{HSD,i}$  é a soma das forças de todas as colunas unidas;

$N_{Sd}$  é a força axial de cálculo em um componente

Se  $\ell_i = \ell_{i-1}$ ;  $N_{Sd,i} = N_{Sd,i-1}$ ;  $\varnothing_1 = \varnothing_{i-1}$ ; então;  $F_{HSD,i} = 2N_{Sd,i} \varnothing_i$ .

### 5.3.4 Imperfeições dos componentes

Dependendo do tipo de análise estrutural, os efeitos das imperfeições devem ser incluídos, seja aplicando os coeficientes de flambagem correspondentes, conforme 9.7.4.2, ou aplicando o método da análise global, conforme 10.1.3.

## 6 Ações e combinações de ações

### 6.1 Generalidades

Todas as ações desta Seção devem ser consideradas individualmente ou em combinação no projeto da estrutura.

### 6.2 Ações permanentes

#### 6.2.1 Generalidades

As ações permanentes compreendem o peso de toda a estrutura, incluindo fechamento, pisos, teto, escadas e equipamentos fixos de serviço.

#### 6.2.2 Pesos de materiais e instalações

Na estimativa das cargas permanentes para fins de cálculo, devem ser utilizados os pesos reais dos materiais e instalações. O peso dos equipamentos fixos de serviço, como tubulações e sistemas

de combate a incêndio, alimentadores elétricos, sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, deve ser determinado e levado em conta sempre que o equipamento for suportado por elementos estruturais do porta-paletes.

## **6.3 Ações variáveis**

### **6.3.1 Generalidades**

Onde aplicável, o projeto deve considerar as ações das seguintes cargas variáveis:

- a) unidades de carga;
- b) cargas verticais de posicionamento;
- c) cargas horizontais de posicionamento;
- d) cargas de equipamentos apoiados ou guiados na estrutura;
- e) cargas de pisos e passarelas;
- f) esforços nos guarda-corpos;
- g) ações de imperfeições (isto é, montante, contraventamento, membro, carregamento);
- h) impacto e cargas acidentais;
- i) cargas de vento;
- j) cargas de neve;
- k) ações sísmicas.

Ações variáveis de outros equipamentos ligados à estrutura devem ser determinadas e consideradas no projeto.

### **6.3.2 Unidades de carga a serem armazenadas**

As unidades de carga devem ser determinadas de acordo com a EN 15629.

A análise global e o projeto podem ser realizados usando o valor especificado de peso para as unidades de carga e assumindo que o porta-paletes esteja uniformemente carregado em todos os módulos. Esta abordagem só pode ser utilizada nas seguintes situações:

- a) o sistema de gerenciamento do armazém pode identificar de forma confiável as unidades de carga superiores ao valor especificado e controlar a sua distribuição dentro da estrutura de armazenagem;
- b) o peso especificado da unidade de carga não pode ser inferior a 80 % do peso máximo da unidade de carga;
- c) todas as longarinas estão projetadas para suportar o peso máximo da unidade de carga;

- d) no cálculo da coluna, deve-se considerar a distribuição de carga mais desfavorável, quando o peso máximo da unidade de carga deve ser aplicado às posições de armazenagem superiores até a carga especificada por módulo;
- e) a carga por módulo utilizada nas análises global e de projeto não é excedida.

Se a imperfeição de posicionamento não for sistemática, mas aleatória, o aumento de tensão e deformação devido a imperfeições de carregamento no limite de tolerância de colocação pode ser ignorado, se não exceder 12 % em comparação com a longarina carregada simetricamente. Quando o aumento de tensão e deformação for superior a 12 %, o efeito no cálculo da longarina deve ser levado em conta, conforme indicado a seguir.

Quando a imperfeição de colocação não for sistemática e a precisão de colocação aleatória for prevista, então este efeito deve ser considerado no cálculo da longarina pela seguinte equação:

$$F_{Q,k'} = \eta F_{Q,k} \quad (6)$$

se $\rho \leq 1,12$	então	$\eta = 1$
se $1,12 < \rho \leq 1,24$	então	$\eta = 2\rho - 1,24$
se $\rho > 1,24$	então	$\eta = \rho$

onde

$$\rho = \frac{F_{Q,k,e}}{F_{Q,k}}$$

$F_{Q,k}$  é a carga na longarina em que o palete é colocado na posição planejada;

$F_{Q,k,e}$  é a carga na longarina em que o palete é colocado com o desalinhamento máximo.

$\rho$  é a relação entre  $F_{Q,k}$  e  $F_{Q,k,e}$

### 6.3.3 Carga vertical de posicionamento

As cargas mínimas verticais de posicionamento indicadas a seguir devem ser aplicadas em situações em que as unidades de carga sejam colocadas no porta-paletes:

- a) se os produtos forem colocados com equipamento mecânico:

Em sistemas de unidade de carga única (isto é, quando existe apenas uma unidade de carga por nível no módulo) ou de múltiplas unidades de carga colocadas simultaneamente, as longarinas, os braços de suporte (se existirem) e as ligações de extremidade devem ser projetados para uma carga vertical adicional descendente,  $F_{Qpv}$ , de 25 % da unidade de carga máxima, colocados na posição mais desfavorável, para a determinação do momento ou do esforço de cisalhamento.

- b) se as mercadorias forem carregadas manualmente:

As longarinas ou os braços de suporte (se existirem) e as ligações de extremidade devem ser projetados para uma carga vertical adicional descendente,  $F_{Qpv}$ , de 100 % do peso da unidade de carga máxima, colocados na posição mais desfavorável, para a determinação do momento ou do esforço de cisalhamento.

A carga de posicionamento não precisa ser aplicada ao serem verificadas deformações da longarina ou ao serem projetados montantes e outros componentes.

### 6.3.4 Cargas horizontais de posicionamento

#### 6.3.4.1 Generalidades

Em aplicações em que as unidades de carga são colocadas no porta-paletes, a carga mínima horizontal  $F_{Qph}$  (ações variáveis) deve ser aplicada tanto no sentido transversal como no sentido paralelo ao corredor, no local mais desfavorável. Essa carga mínima horizontal deve ser aplicada em uma direção somente e não em ambas as direções simultaneamente.

A carga mínima horizontal de posicionamento  $F_{Qph}$  não pode ser confundida com uma carga de impacto resultante do mau uso do porta-paletes.

Uma sobrecarga acidental deve ser levada em consideração (ver 6.4), mas não precisa ser considerada ao mesmo tempo como a carga horizontal de posicionamento  $F_{Qph}$ .

#### 6.3.4.2 Efeitos dos métodos operacionais

Para determinar a carga horizontal de posicionamento  $F_{Qph}$ , devem ser utilizados os seguintes métodos operacionais:

- a) quando as mercadorias são colocadas com equipamentos mecânicos operados manualmente (por exemplo, empilhadeiras):
  - 1) para os porta-paletes de até 3 m de altura,  $F_{Qph}$  deve ser uma carga de 0,5 kN, aplicada a qualquer altura até o topo do porta-paletes;
  - 2) para os porta-paletes com altura superior a 6 m,  $F_{Qph}$  é o pior caso entre uma carga de 0,25 kN, aplicada no topo da estrutura, e uma carga de 0,5 kN, aplicada a qualquer altura até 3 m;
  - 3) para os porta-paletes com altura entre 3 m e 6 m,  $F_{Qph}$  é o pior caso entre uma carga aplicada no topo da estrutura, cuja magnitude é determinada por interpolação linear entre 6.3.4.2-a)-1) e 6.3.4.2-a)-2), ou uma carga de 0,5 kN, aplicada em qualquer altura até 3 m;
- b) quando as mercadorias são colocadas por um equipamento de armazenagem e recuperação automática,  $F_{Qph}$  e sua posição devem ser especificadas pelo fornecedor do equipamento de movimentação de materiais. No entanto, não podem ser inferiores a 0,25 kN;
- c) no caso de utilização de limitador de profundidade, deve ser claramente determinado que se trata de limitador de segurança ou de limitador de posicionamento, e a carga de cálculo  $F_{Qph}$  deve ser determinada pelo especificador. Os equipamentos mecânicos operados manualmente devem estar sujeitos a um valor mínimo de  $0,25 F_{Q,u}$  no plano do montante, onde  $F_{Q,u}$  é o peso da unidade de carga;

Para os limitadores de profundidade e as estações de depósito com dispositivos de posicionamento, devem ser consideradas as ações variáveis. Já para os limitadores de segurança, devem ser consideradas as ações acidentais. As ações decorrentes de ambas as situações devem ser utilizadas com os fatores de carga relevantes.

NOTA 1 Os limitadores de posicionamento são considerados indesejáveis, porque encorajam o uso indevido. Em algumas circunstâncias eles são especificados para os porta-paletes convencionais, para

ajudar o empilhador no posicionamento. No entanto, as forças resultantes destas operações são de grande magnitude, e é complexo quantificar com precisão.

NOTA 2 Os limitadores de segurança podem ser especificados para os sistemas automatizados (transelevadores), para atender à EN 528.

NOTA 3 Para mais informações sobre limitadores de posicionamento e limitadores de segurança, ver 6.6 da EN 15629.

d) conforme especificado nesta subseção, a carga horizontal de posicionamento  $F_{Qph}$  deve ser considerada ao se projetarem os seguintes componentes do porta-paletes, na região próxima do limitador de profundidade (estes efeitos são todos locais):

- 1) o próprio limitador de profundidade;
- 2) o conector do limitador de profundidade com o componente do porta-paletes em que ele está fixado (longarina ou coluna);
- 3) a parte da coluna ou da longarina à qual o limitador de profundidade está diretamente conectado;
- 4) o contraventamento do montante na região desta parte da coluna.

Devido aos efeitos de amortecimento e espalhamento, uma carga horizontal de posicionamento  $F_{Qph}$  reduzida pode ser considerada como:

$F_{Qph} = 0,1 F_{Q,u}$  (para o projeto de ancoragem da estrutura, assumindo-se que a estrutura esteja descarregada com  $F_{Qph}$  atuando sobre ela na posição mais elevada);

$F_{Qph} = 0,1 F_{Q,u}$  (para o projeto geral do montante – contraventamento e coluna, assumindo-se que  $F_{Qph}$  atue em um conjunto de contraventamento na posição mais alta do porta-paletes);

e) se os produtos forem armazenados manualmente:

$$F_{Qph} = 0,25 \text{ kN}$$

#### 6.3.4.3 Aplicação da força horizontal de posicionamento na direção do corredor

Na direção do corredor, a carga horizontal de posicionamento  $F_{Qph}$  surge nos níveis da longarina e amplifica o deslocamento devido às imperfeições da estrutura.

Para evitar a criação de casos de carga desnecessários, a carga concentrada  $F_{Qph}$  pode ser substituída por uma carga total de  $2 F_{Qph}$ , distribuída uniformemente sobre todos os níveis da longarina.

#### 6.3.4.4 Aplicação da força horizontal de posicionamento na direção transversal ao corredor

Na direção transversal ao corredor, o local mais desfavorável para a carga de posicionamento  $F_{Qph}$  deve ser:

- a) na região do topo do montante localizado entre dois nós do contraventamento, a fim de maximizar as forças no sistema de contraventamento e o momento de flexão na direção transversal; neste caso, o local do esforço crítico é geralmente no trecho mais baixo da coluna entre os pontos de contraventamento. Se o espaçamento das diagonais não for uniforme, outros locais também devem ser investigados;

NOTA Para determinar os momentos fletores de cálculo, não é necessário realizar uma análise global do montante completo. É suficiente adicionar momentos fletores positivos e negativos de magnitude  $F_{Qph} \cdot l/6$ .



- b) no centro do vão da longarina no plano horizontal, de modo a fornecer o momento de flexão máximo do eixo secundário; este caso não necessita ser incorporado na análise global na direção transversal. Considera-se que uma carga de  $0,5 F_{Qph}$  seja suportada por uma única longarina no plano horizontal por meio do eixo neutro. É permitido ignorar a interação com a carga vertical que origina o  $F_{Qph}$ .

Se a instalação for projetada para as cargas a serem roladas ou deslizadas na posição, as cargas de posicionamento  $F_{Qph}$  geradas pelo processo de carregamento devem ser determinadas e usadas no projeto.

6.3.5 Efeitos de transelevadores com guia na estrutura

No caso de estruturas operadas por transelevadores, a probabilidade de todos os transelevadores aplicarem cargas horizontais na mesma direção e na mesma posição na estrutura simultaneamente diminui, à medida que o número de transelevadores aumenta. Portanto, se os montantes estiverem ligados sobre os corredores, a força horizontal total  $F_{Qh,t}$  ao nível do trilho-guia deve ser o valor dado na Tabela 3.

Tabela 3 – Total de ações horizontais ao nível do trilho-guia

Número de transelevadores	$F_{Qh,t}$
1 ou 2	$\sum F_{Qh}$
3	$0,85 \sum F_{Qh}$
4	$0,70 \sum F_{Qh}$
$\geq 5$	$3 F_{Qh}$

**Legenda**

$F_{Qh}$  valor da ação lateral máxima especificada pelo transelevador

$F_{Qh,t}$  soma reduzida ( $\sum$ ) das forças  $F_{Qh}$  que atuam no trilho-guia superior do transelevador, que está ligada a um membro que une todas as colunas dos montantes, conforme a Figura 12

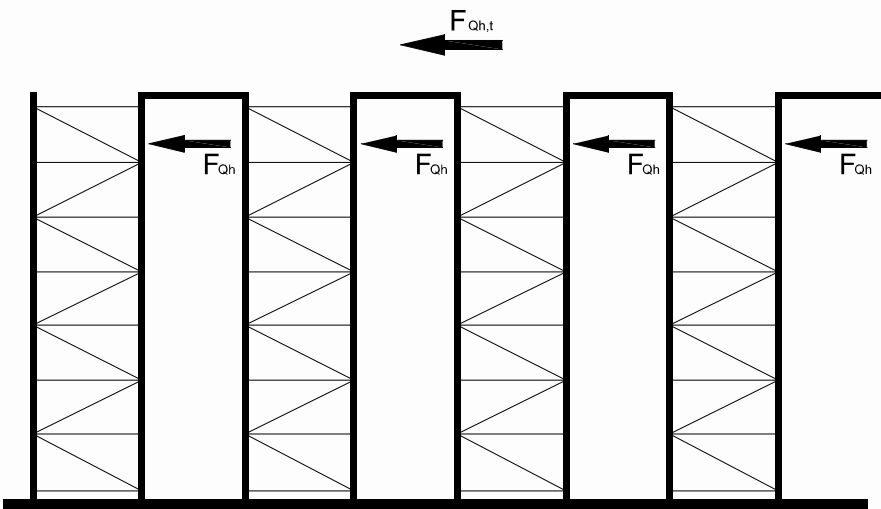


Figura 12 – Cargas horizontais de transelevadores com guias



Se a carga horizontal  $F_{Qh}$  for especificada como resultado de uma força excêntrica unilateral aplicada ao trilho do transelevador, os valores indicados na Tabela 3 não podem ser usados.

O  $F_{Qh,t}$  deve ser avaliado para a posição mais desfavorável do transelevador. No entanto, pode ser distribuído ao longo de vários montantes na direção do corredor por meio de planos de contraventamento.

A carga horizontal do equipamento com guia na estrutura deve ser considerada em combinação com a carga de posicionamento, se esta for a pior das situações.

Se um sistema de guiamento na estrutura incluir transelevadores que operem além da sua extremidade ou em pista curva, deve-se consultar o fabricante sobre as forças horizontais a serem suportadas pela estrutura.

Quando os equipamentos de armazenagem e de recuperação forem utilizados, as forças acidentais resultantes de um transelevador que atravessa uma curva à velocidade de projeto devem ser consideradas.

Devem ser consideradas as forças acidentais de impacto na direção do corredor, se houver, ocasionadas por um transelevador batendo em um amortecedor montado em uma estrutura.

### 6.3.6 Cargas de piso e passarelas

Para o cálculo de pisos e passarelas, devem ser consideradas as cargas distribuídas ou concentradas mais desfavoráveis, conforme a seguir:

a) em pavimentos e passarelas destinados apenas a pessoas e com largura não superior a 1,2 m:

- $q = 2,5 \text{ kN/m}^2$  (carga distribuída);
- $F_{Qf} = 2,0 \text{ kN}$  (carga concentrada aplicada sobre um quadrado de  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ).

As cargas indicadas nesta alínea representam a carga de cálculo em qualquer módulo, para o cálculo local das longarinas e colunas.

A carga global da estrutura pode ser reduzida para  $q = 1,0 \text{ kN/m}^2$ , para a verificação da estabilidade global.

b) em pavimentos destinados à armazenagem, ou em que equipamentos de movimentação manual possam circular, ou com mais de 1,2 m de largura:

- $q = 3,5 \text{ kN/m}^2$  (carga distribuída);
- $F_{Qf} = 3,0 \text{ kN}$  (carga concentrada aplicada sobre um quadrado de  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ );

c) em escadas com largura inferior a 1,2 m:

- $q = 3,0 \text{ kN/m}^2$  (carga distribuída);
- $F_{Qf} = 3,0 \text{ kN}$  (carga concentrada aplicada sobre um quadrado de  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ );

d) em escadas com largura superior a 1,2 m:

- $q = 3,5 \text{ kN/m}^2$  (carga distribuída);
- $F_{Qf} = 3,0 \text{ kN}$  (carga concentrada aplicada sobre um quadrado de  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ );

e) quando os equipamentos em movimento aplicam forças dinâmicas à estrutura, estes efeitos devem ser considerados ações quase estáticas com o fator de carga relevante (ver EN 1991-1-1:2002, 6.3).

As forças estáticas equivalentes devem ser multiplicadas pelos seguintes fatores dinâmicos, a fim de diferenciar entre as cargas verticais efetivas de cada roda dos diferentes tipos de equipamento de movimentação:

- 1) equipamento de movimentação controlado com operador desembarcado e com velocidade inferior a  $5 \text{ km/h} = 1,2$ ;
- 2) equipamento de movimentação com operador embarcado e com velocidade inferior a  $7,5 \text{ km/h} = 1,4$ ;
- 3) equipamento de movimentação com operador embarcado e com velocidade inferior a  $10 \text{ km/h} = 2,0$ .

A carga concentrada deve ser colocada na posição mais desfavorável.

O carregamento-padrão em pisos e passarelas não precisa ser considerado.

Devem ser considerados os efeitos das forças horizontais aplicadas pelos equipamentos e a forma como estas forças são assimiladas pela estrutura.

Se as cargas resultantes de materiais armazenados ou o sistema de armazenagem suportado pelo piso excederem os valores declarados, a carga real deve ser utilizada. Particular atenção deve ser dada às cargas concentradas, aplicadas pelas colunas do sistema de armazenagem.

As áreas de piso e de passarela são usadas frequentemente para uma armazenagem não oficial. Os valores indicados nesta subseção devem ser considerados cargas mínimas de cálculo. Em áreas com altura livre maior do que a média, recomenda-se avaliar o uso de cargas de cálculo maiores do que as especificadas.

NOTA Para as situações que não se enquadrem nesta subseção, consultar a ABNT NBR 6120.

### 6.3.7 Ações decorrentes da instalação

Nos casos em que as instruções de montagem determinarem o uso de cabos de segurança, devem ser fornecidos pontos de ancoragem adequados, capazes de suportar uma queda acidental. Podem ocorrer deformações residuais dos membros, em caso de queda, que devem ser substituídos.

## 6.4 Ações devido a impacto (cargas acidentais)

### 6.4.1 Generalidades

As cargas variáveis e as cargas de posicionamento especificadas em 6.3 devem ser consideradas, levando-se em conta as condições normais de impacto. Devem ser previstas disposições estruturais para utilizações e cargas que envolvam vibração anormal ou forças dinâmicas.

Os danos de impacto causados por empilhadeiras ou outros equipamentos em movimento contra os montantes dos porta-paletes devem ser evitados. O treinamento adequado do operador e as medidas de segurança devem ser adotados. As diretrizes mínimas para a proteção das colunas de esquina devem ser os seguintes:

- a) um protetor de coluna com altura mínima de 400 mm deve ser posicionado na extremidade inferior da coluna, em cada corredor do porta-paletes;
- b) um protetor de coluna deve ser instalado nas colunas localizadas em todas as interseções do corredor com a rua lateral;
- c) o protetor de coluna deve ser projetado para uma absorção de energia de pelo menos 400 Nm, em qualquer direção, a qualquer altura entre 0,10 m e 0,40 m;
- d) o protetor de coluna deve ser posicionado de tal forma que, após a sua deformação por absorção de um impacto, a coluna não seja danificada;
- e) a proteção da estrutura porta-paletes pode ser projetada teoricamente. Como alternativa, ensaios podem ser efetuados para efeitos de aceitação. Os ensaios devem basear-se em massa a ser lançada contra o protetor, para simular a exigência de absorção de energia de 400 Nm.

NOTA 1 As colunas que não sejam de esquina podem ser protegidas na direção transversal ao corredor, por opção do usuário.

NOTA 2 Não é necessária a proteção das colunas de porta-paletes operados por equipamentos de movimentação guiados mecanicamente.

NOTA 3 Como alternativa à utilização de protetores de coluna, a instalação pode ser projetada para resistir à remoção completa de uma seção inferior de uma coluna.

NOTA 4 Ações acidentais de empilhadeiras são apresentadas na EN 1991-1-7. Estas ações não se aplicam aos veículos industriais com a configuração, as folgas e a operação em conformidade com as da ABNT NBR 17150-2 e a EN 15635.

#### 6.4.2 Ações verticais acidentais

Os componentes do porta-paletes diretamente acima de uma unidade de carga devem ser capazes de absorver uma força vertical acidental  $F_{Qav}$ . Em geral, esta força deve ser aplicada na extremidade de uma longarina, para verificar se o conector não desencaixa. As cargas de posicionamento ascendentes são ações variáveis acidentais e devem ser consideradas com um fator de carga  $\gamma_a$ , de acordo com o descrito em 7.4.

Esta força vertical acidental ( $F_{Qav}$ ) é determinada conforme a seguir:

- a) se as mercadorias forem colocadas com equipamentos mecânicos operados manualmente (por exemplo, empilhadeiras):

$$F_{Qav} = 5,0 \text{ kN}$$

- b) se as mercadorias forem colocadas com equipamento mecânico automático (por exemplo, transelevadores):

$$F_{Qav} = 0,5 Q_u$$

mas  $F_{Qav} \geq 0,25 \text{ kN}$

e  $F_{Qav} \leq 5,0 \text{ kN}$

onde

$F_{Qu}$  é o peso da unidade de carga

Os requisitos para as cargas de posicionamento ascendentes devem ser verificados por cálculo ou por ensaios, de acordo com A.2.8.

#### 6.4.3 Cargas horizontais acidentais

As seguintes situações são consideradas uma sobrecarga acidental na direção horizontal:

- a) se as mercadorias forem colocadas com equipamento mecânico operado manualmente, mas não guiado (por exemplo, empilhadeiras) do chão até 0,4 m de altura da coluna na lateral do corredor:

- $F_{Qah} = 2,5 \text{ kN}$ , na direção transversal ao corredor;
- $F_{Qah} = 1,25 \text{ kN}$ , na direção paralela ao corredor.

Essas cargas devem ser tratadas como se estivessem ocorrendo separadamente (ver EN 15635);

NOTA A sobrecarga acidental indicada pode ser absorvida pela coluna ou pode exigir que esta seja reforçada ou protegida.

- b) se as mercadorias forem colocadas com equipamento mecânico automático (por exemplo, transelevadores) ou com equipamento de manuseio guiado manualmente (por exemplo, empilhadeiras bilaterais ou trilaterais):

- $F_{Qah} = 0,5 \text{ kN}$  na direção paralela ao corredor ou na direção transversal ao corredor (sobrecarga acidental).

O valor especificado de  $F_{Qah}$  pode não ser aceitável para certos tipos de equipamento. O maquinário a ser utilizado deve ser verificado e conferido (isto é, durante um mau funcionamento a carga pode aumentar até que a embreagem no dispositivo de entrega deslize).

#### 6.5 Cargas de vento

Quando necessário, as cargas do vento devem ser determinadas de acordo com a ABNT NBR 6123.

Quando um porta-paletes é exposto ao vento, os efeitos de redução de carga de vento devido aos módulos adjacentes total ou parcialmente carregados não podem ser considerados. Cada linha de módulos (entre corredores adjacentes) deve ser projetada para resistir à pressão total, à sucção e às forças de atrito do vento.

Para uma instalação de porta-paletes com fechamento (por exemplo, painéis), os conjuntos montados não precisam ser capazes de resistir a mais do que a força do vento calculada para a montagem completa.

Considera-se que a estrutura total ou parcialmente carregada seja impermeável ao vento nas áreas carregadas, a menos que o efeito da permeabilidade possa ser quantificado.

NOTA Ao serem determinadas as deformações-limite para o bom funcionamento do equipamento automático, pode ser utilizado um valor mais baixo que o da carga de vento, quando especificado pelo fornecedor do equipamento.

## 6.6 Cargas de neve

Quando necessário, as cargas de neve devem ser determinadas de acordo com estudos regionais relevantes.

## 6.7 Ações sísmicas

Quando necessário, as ações sísmicas devem ser determinadas de acordo com a ABNT NBR 15421.

# 7 Fatores parciais e regras de combinações

## 7.1 Generalidades

O peso das unidades de carga e as imperfeições globais da estrutura devem constituir uma única ação. As cargas de posicionamento constituem uma ação separada.

As imperfeições globais e as cargas de posicionamento devem ser combinadas em uma direção de cada vez. A combinação de imperfeições ou de cargas de posicionamento em uma direção com imperfeições ou cargas de posicionamento na direção ortogonal não precisa ser considerada.

## 7.2 Combinações de ações para o estado-limite último

Os valores de cálculo das ações devem ser combinados utilizando-se as seguintes equações, adotando-se o maior valor:

- a) apenas para a ação variável mais desfavorável:

$$\sum \gamma_g F_{Gi,k} + \gamma_q F_{Q1,k} \quad (7)$$

- b) para todas as ações variáveis desfavoráveis que podem ocorrer simultaneamente:

$$\sum \gamma_g F_{Gi,k} + 0,9 \sum_{i \geq 1} \gamma_q F_{Qi,k} \quad (8)$$

- c) para a carga acidental:

$$\sum \gamma_{ga} F_{Gi,k} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{qa} F_{Qi,k} + \gamma_a F_{Qa,k} \quad (9)$$

onde

$F_{Gi,k}$  é o valor característico da ação permanente (carga morta);



$F_{Q1,k}$  é o valor característico de uma das cargas variáveis;

$F_{Qj,k}$  é o valor característico de uma carga variável típica;

$F_{Qa,k}$  é o valor característico de uma carga acidental;

$\gamma_g$  é o fator parcial para cargas permanentes;

$\gamma_q$  é o fator parcial para cargas variáveis;

$\gamma_a$  é o fator parcial para cargas acidentais.

### 7.3 Combinações de ações para o estado-limite de serviço

Os valores de cálculo das ações devem ser combinados utilizando-se os fatores de combinação  $\psi_0$  indicados na ABNT NBR 8681. Para o porta-paletes, podem ser utilizadas as regras de combinação simplificadas indicadas nas Equações (6), (7) e (8), adotando-se o maior valor:

a) apenas para a ação variável mais desfavorável:

$$\sum \gamma_g F_{Gi,k} + \gamma_q F_{Q1,k} \quad (10)$$

b) para todas as ações variáveis desfavoráveis:

$$\sum \gamma_g F_{Gi,k} + 0,9 \gamma_{q_{i \geq 1}} \sum F_{Qj,k} \quad (11)$$

A notação está determinada em 7.2.

As cargas de posicionamento não precisam ser consideradas no estado-limite de serviço.

O peso das unidades de carga pode variar até um valor máximo que seja empregado no projeto. O calculista deve determinar um valor de cálculo para o peso da unidade de carga (ou diferentes valores de peso da unidade de carga para o cálculo do montante e/ou para a análise global no sentido longitudinal), que não pode ser excedido (ver EN 15629). Isso pode resultar na especificação de pesos de cálculo que são conservadores, justificando assim as combinações de carga com fator de combinação de 0,9.

NOTA A menos que existam condições incomuns, é normal que as mercadorias a serem armazenadas e as imperfeições globais constituam a ação com maior efeito.

### 7.4 Coeficientes de ponderação de carga

Os coeficientes de ponderação de carga  $\gamma_f$  são dados na Tabela 4.



Tabela 4 – Coeficientes de ponderação de carga  $\gamma_f$ 

Ações	Estado-limite último	Estado-limite de serviço
Cargas permanentes $\gamma_g$		
— com efeito desfavorável	1,25	1,0
— com efeito favorável	1,0	1,0
Cargas variáveis $\gamma_q$		
Unidades de carga	1,4	1,0
Unidades de carga em sistemas operados por transelevadores	1,4 ou 1,3 <sup>a</sup>	1,0
Cargas de posicionamento	1,4	1,0
Outras cargas variáveis	1,5	1,0
Cargas acidentais		
$\gamma_a$	1,0	
$\gamma_{ga}$	1,0	
$\gamma_{qa}$	1,0	
<sup>a</sup> Aplicável a um sistema de armazenagem operado por transelevador que inclua a pesagem de todas as unidades de carga e a rejeição de todas aquelas que estejam pesando mais do que a carga de cálculo. Neste caso, o fator de carga pode ser reduzido de 1,4 para 1,3.		
<p>NOTA A incerteza estatística quanto à magnitude do peso das unidades de carga é consideravelmente menor do que a das ações variáveis convencionais na construção civil (vento, neve, carga de piso etc.). Além disso, o usuário exerce um alto nível de controle no funcionamento do sistema. Consequentemente, as unidades de carga têm um coeficiente de ponderação de carga entre o determinado para as cargas variáveis e o estabelecido para as ações permanentes. A principal incerteza no desempenho relacionado à carga de um porta-paletes está na interação com o equipamento de carregamento. Considera-se que estes efeitos são incorporados nas cargas acidentais e nas cargas de posicionamento que refletem o resultado provável de boas práticas (ver 6.3).</p>		

## 7.5 Coeficientes de ponderação de material

Os coeficientes de ponderação de material  $\gamma_M$  para o estado-limite último e para o estado-limite de serviço são dados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes de ponderação de material  $\gamma_M$

Resistência	Estado-Limite Último	Estado-Limite de Serviço
	RC2 <sup>a</sup>	
Resistência das seções transversais seja qual for a classe $\gamma_{M0}$	1,1 <sup>b</sup>	1,0
Resistência do membro à instabilidade avaliada pela verificação do membro $\gamma_{M1}$	1,1	1,0
Resistência das ligações $\gamma_{M2}$	1,25	1,0
Resistência das ligações sujeitas a testes e controle de qualidade (por exemplo, conectores da extremidade da longarina, ver o Anexo H) $\gamma_{M2}$	1,1	1,0
<sup>a</sup> Esses fatores são baseados na classe de confiabilidade 2 (RC2). Outras classes de confiabilidade podem ser usadas se apropriado, ver EN 1990. <sup>b</sup> O coeficiente de ponderação de material $\gamma_{M0}$ pode ser diferente do indicado na Tabela 5, sendo tomado como 1,0 para o estado limite último (ELU) mediante certificado de qualidade da matéria-prima utilizada (aço), conforme ABNT NBR 14762:2010, 4.1.1, e submissão aos ensaios para validação das propriedades mecânicas no recebimento, conforme ABNT NBR 11888:2015 Versão Corrigida:2018, 7.2.3 e ABNT NBR ISO 6892-1.		

7.6 Estabilidade versus tombamento

Utilizando um coeficiente de ponderação de carga correspondente ao estado-limite último, deve-se verificar se a estrutura vazia é estável sob a ação de uma única carga horizontal de posicionamento, na posição mais desfavorável.

A carga horizontal de posicionamento deve ser anulada pelo peso próprio do porta-paletes e pela ancoragem no piso.

Em todos os montantes, as placas de base devem ser fixadas às colunas no esquadro e fixadas ao piso com calços ou preenchimento executado com argamassa de concreto não retrátil, necessário para assegurar que os montantes estejam solidamente suportados por toda a área da placa de base. O calço deve ser de aço e deve ser impedido de se deslocar em relação à placa de base.

7.7 Porta-paletes travados na estrutura do prédio

Se o porta-paletes for travado na estrutura do edifício, as duas estruturas podem impor forças uma sobre a outra. Estas forças devem ser calculadas e o proprietário do edifício ou seu representante deve ser informado dessas forças e de sua localização.

## 8 Aço

### 8.1 Generalidades

#### 8.1.1 Considerações preliminares

Os valores nominais das propriedades dos materiais apresentados devem ser adotados como valores característicos nos cálculos para a fabricação dos componentes de porta-paletes. Os aços devem ser adequados para a conformação a frio, solda e galvanização, quando necessário.

Os aços especificados devem possuir qualificação estrutural de acordo com a ABNT NBR 14762: 2010, 4.1.

Podem ser utilizados outros aços, desde que:

- a) suas propriedades mecânicas sejam equivalentes às do aço relacionado na ABNT NBR 14762:2010, 4.1 e 4.2;
- b) os referidos aços admitam conformação a frio, atendam aos requisitos do ensaio de conformação de A.1.2 e a relação entre a resistência de ruptura à tração e a resistência ao escoamento à tração satisfaça a expressão  $f_u/f_y \geq 1,08$ , na qual  $f_y$  é a resistência ao escoamento à tração do material e  $f_u$  é a resistência de ruptura à tração do material.

#### 8.1.2 Propriedades dos materiais

Os valores nominais da resistência ao escoamento  $f_y$  e da resistência à ruptura  $f_u$  para o aço estrutural devem ser obtidos:

- a) adotando os valores  $f_y = R_{eh}$  e  $f_u = R_m$  direto do padrão do produto relevante;
- b) usando a simplificação dada em 8.1.5; e
- c) usando o regime de ensaios especificado em 8.1.4.

NOTA  $R_{eh}$  é o limite elástico mínimo do aço.

#### 8.1.3 Valores de cálculo dos coeficientes de ponderação de material (propriedades mecânicas gerais)

As seguintes propriedades do aço devem ser adotadas no projeto:

- a) módulo de elasticidade:  $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ ;
- b) módulo de elasticidade transversal:  $G = E/[2(1 + \nu)]\text{ N/mm}^2$ ;
- c) coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,3$ ;
- d) coeficiente de dilatação térmica linear:  $\alpha = 12 \times 10^{-6}$  por graus Celsius;
- e) densidade:  $\rho = 7\,850\text{ kg/m}^3$ .

#### 8.1.4 Aços sem informações das propriedades mecânicas

##### 8.1.4.1 Generalidades

No caso dos aços desta categoria, pode ser empregada uma série de ensaios de tração para justificar os valores a serem utilizados ou pode ser empregado um valor-limite inferior à resistência ao escoamento.

#### 8.1.4.2 Ensaios adicionais em aço

As propriedades mecânicas dos materiais de base devem ser medidas a partir de ensaios de tração, de acordo com A.1.1.

Os resultados dos ensaios de tração devem ser objeto de controle estatístico (ver 13.3.3).

Para as bobinas, deve ser realizado o seguinte procedimento:

- a) ensaios para determinar as propriedades mecânicas mínimas especificadas para o aço utilizado na produção;
- b) ensaios para justificar a utilização no projeto de uma resistência ao escoamento superior ao valor especificado;
- c) ensaios para demonstrar ductilidade adequada.

A frequência mínima de ensaio deve ser de um ensaio para cada bobina original (após corte e redução a frio, se a redução a frio for parte do processo). As amostras devem ser tomadas longitudinalmente, a partir do meio da largura perto da extremidade da bobina.

Os resultados dos ensaios mecânicos devem ser analisados estatisticamente, de acordo com 13.3.3, a fim de obter valores característicos da tensão ou da resistência de ruptura à tração do material para uso no projeto. No caso de pelo menos 100 resultados de ensaio terem sido acumulados durante um longo período, os que excederem 100 e que tiverem mais de 12 meses de fabricação devem ser retirados das análises (ver Anexo A).

Para chapas e perfis dobrados, devem ser utilizadas as propriedades mecânicas indicadas em 8.1.5 para aços não ensaiados.

#### 8.1.5 Aços não ensaiados

Os seguintes valores de  $f_{yb}$  devem ser assumidos, se a classe de aço não for especificada ou se o material de base não estiver disponível para ensaios:

- a) perfis laminados a quente: 180 N/mm<sup>2</sup>;
- b) outros aços: 140 N/mm<sup>2</sup>.

### 8.2 Limite de escoamento médio das seções

Quando necessário, o limite de escoamento médio ( $f_{ya}$ ) é determinado para os membros, conforme a ABNT NBR 14762.

### 8.3 Seleção especial de material de produção

Quando uma bobina de material for selecionada para uma aplicação específica, sem a utilização do ensaio do material, e a resistência utilizada no projeto exceder a resistência nominal para esse material, o valor máximo da resistência de cálculo não pode ser superior a 90 % do valor fornecido no relatório de ensaio da bobina.

## 8.4 Resistência à ruptura

A fratura frágil de material com espessura inferior a 6 mm não precisa ser considerada para temperaturas até - 35 °C, para chapas de aço sem imersão a quente, de acordo com esta Norma.

Para os aços não ensaiados abrangidos em 8.1.5, o limite de 6 mm de espessura deve ser reduzido para 2 mm.

NOTA Mais informações sobre este assunto podem ser encontradas na EN 1993-1-10.

## 8.5 Tolerâncias dimensionais

### 8.5.1 Generalidades

Os limites de tolerância dimensionais das seções e dos elementos devem estar em conformidade com a EN 10162.

As tolerâncias dimensionais e a massa das seções de aço perfilado, dos perfis estruturais tubulares e das chapas devem estar em conformidade com a especificação de produto, a menos que sejam especificadas tolerâncias mais severas.

Para a análise estrutural e projeto, devem ser utilizados os valores nominais das dimensões.

### 8.5.2 Espessura do material

As regras de cálculo indicadas nesta Norma devem ser limitadas à seguinte espessura do núcleo  $t_c$ , excluindo os revestimentos, salvo indicação em contrário:

$$0,5 \text{ mm} \leq t_c \leq 8,0 \text{ mm}$$

A utilização de aço mais fino não é excluída, mas a capacidade de carga deve ser determinada por ensaios adequados. Se forem utilizados componentes com aços mais espessos, eles devem ser utilizados de acordo com a ABNT NBR 14762. As expressões de cálculo para placas de base (ver 9.9) podem ser usadas com espessura de material maior que 8 mm.

### 8.5.3 Tolerâncias na espessura

As regras de cálculo para os elementos conformados a frio são baseadas em tolerâncias de espessura de metade das tolerâncias especificadas na ISO 10326. Quando forem utilizadas tolerâncias maiores, os valores nominais de espessura devem ser ajustados para manter a confiabilidade equivalente (ver a EN 1993-1-3).

No caso de material com revestimento contínuo em metal, com espessura nominal  $\leq 1,5$  mm, fornecido com as tolerâncias especiais limitadas às indicadas na EN 10143, a espessura de cálculo  $t$  deve ser considerada igual à espessura nominal do núcleo  $t_c$ .

No caso de chapas e tiras de aço com recobrimento metálico, por imersão a quente, em conformidade com a EN 10147, a espessura do núcleo  $t_c$  deve ser conforme indicado na EN 1993-1-3.

NOTA A espessura da proteção de zinco é geralmente de 0,04 mm para 275 g/m<sup>2</sup>.

### 8.5.4 Largura e profundidade de uma seção formada a frio

A largura e a profundidade dos elementos planos de uma seção devem atender aos requisitos das Tabelas 6 e 7.



Tabela 6 – Tolerâncias na largura  $b_o$  de elementos planos enrijecidos

Dimensões em milímetros

Espessura $t$	Largura $b_o \leq 50$	Largura $50 < b_o \leq 100$	Largura $100 < b_o \leq 220$
$t < 3,0$	$\pm 0,75$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$
$3,0 \leq t < 5,0$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,25$
$5,0 \leq t \leq 8,0$	$\pm 1,00$	$\pm 1,25$	$\pm 1,50$

Tabela 7 – Tolerâncias na largura  $b_o$  de elementos planos não enrijecidos

Dimensões em milímetros

Espessura $t$	Largura $b_o \leq 40$	Largura $40 < b_o \leq 80$	Largura $80 < b_o \leq 120$
$t < 3,0$	$\pm 1,20$	$\pm 1,50$	$\pm 1,50$
$3,0 \leq t < 5,0$	$\pm 1,50$	$\pm 1,50$	$\pm 2,00$
$5,0 \leq t \leq 8,0$	$\pm 2,00$	$\pm 2,00$	$\pm 2,00$

8.5.5 Retilidade dos membros

O desvio máximo inicial de um membro da linha reta exata deve ser inferior a 1/400 do comprimento do membro, medido em relação às duas extremidades.

8.5.6 Torção

A torção inicial de um elemento “conforme instalado” deve ser, no meio do vão, inferior a 1°/m para as seções simétricas e a 1,5°/m para as seções assimétricas.

8.5.7 Tolerâncias para projeto e montagem

8.5.7.1 Generalidades

Todas as tolerâncias são determinadas na situação “como construída” antes da operação do sistema de armazenagem. A deformação sob carga deve ser medida após a aplicação da primeira carga imposta.

8.5.7.2 Verticalidade

O máximo desaprumo de qualquer coluna, em qualquer direção, não pode exceder os valores estabelecidos na ABNT NBR 17150-2, medido sem carregamento, imediatamente após a instalação.

Se o projetista especificar uma imperfeição inicial diferente da especificada na ABNT NBR 17150-2, o processo de instalação deve ser controlado para assegurar que os pressupostos do projeto sejam alcançados na prática.

NOTA O máximo desaprumo é uma imperfeição do montante que influencia o projeto.



## 8.6 Excentricidades de contraventamento

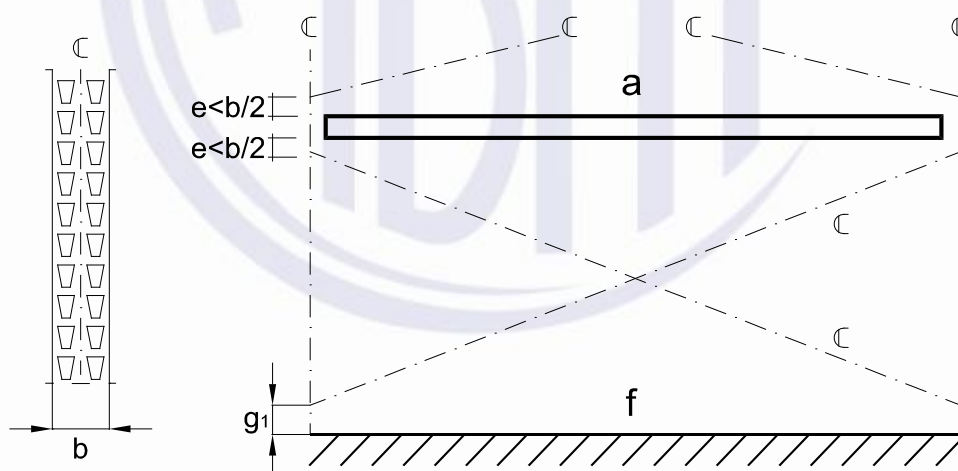
Se as excentricidades entre as linhas do sistema excederem os limites especificados a seguir, elas devem ser incluídas na análise global, e os momentos secundários resultantes devem ser incluídos no projeto do componente.

Os efeitos das excentricidades de contraventamento podem ser desprezados, se as seguintes condições forem atendidas.

- o ponto de interseção dos eixos centrais de um membro horizontal e de uma diagonal estiver localizado dentro de uma dimensão  $e$  igual à metade da largura da coluna  $b$  (ver Figura 13-a));
- a excentricidade  $g_1$  não for superior a 2,0 vezes a largura da coluna e a excentricidade  $g_2$  não for superior a 1,5 vez a profundidade da coluna, conforme a Figura 13-b). Quando as longarinas forem usadas como membros horizontais, o ponto de interseção deve ser tomado como a interseção dos eixos centrais de uma diagonal e como a face superior ou inferior da longarina.

NOTA 1 É uma boa prática que o ângulo de inclinação da diagonal com relação à horizontal fique entre  $20^\circ$  e  $70^\circ$ .

NOTA 2 Caso em 8.6 seja requerida uma análise global, incluindo excentricidades na direção transversal ao corredor, as bases são consideradas rotuladas, a menos que a rigidez de base seja determinada pelo ensaio de acordo com A.2.8.

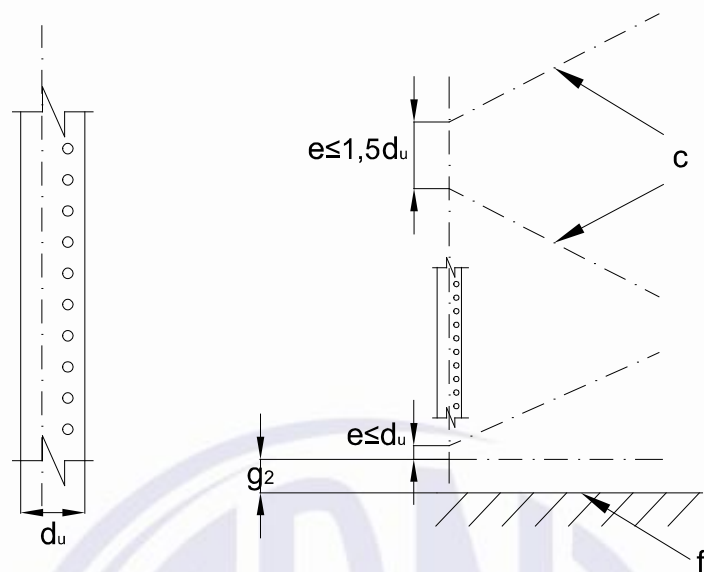


### Legenda

- a longarina
- b largura da coluna
- c eixos do sistema de contraventamento
- e distância do nó do contraventamento até a face superior ou inferior da longarina
- f piso
- $g_1$  distância do piso até o nó inferior do contraventamento de fundo

#### a) Excentricidades no contraventamento de fundo

**Figura 13 – Excentricidades no contraventamento (continua)**



**Legenda**

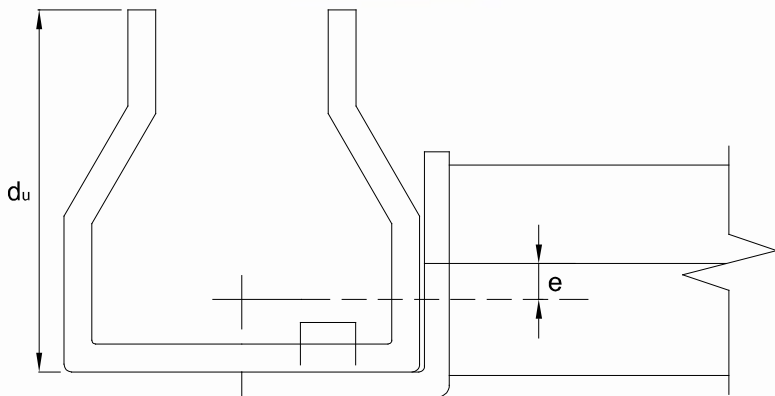
- $c$  eixos do sistema de contraventamento
- $d_u$  profundidade da coluna
- $e$  excentricidade entre os contraventamentos
- $f$  piso
- $g_2$  distância do piso até o nó inferior do contraventamento do montante

**b) Excentricidades no contraventamento do montante**

**Figura 13 (conclusão)**

**8.7 Excentricidades entre as longarinas e as colunas**

O eixo central da longarina pode não coincidir com o eixo central da coluna. Isto resulta em uma excentricidade e na direção transversal ao corredor, conforme a Figura 14.



**Legenda**

- $d_u$  profundidade da coluna
- $e$  excentricidade

**Figura 14 – Excentricidade na direção transversal ao corredor**

A excentricidade “e” na Figura 14 pode ser desprezada quando e for menor que  $0,25 d_U$ .

A excentricidade e na Figura 14 pode ser importante e deve ser incluída tanto na análise global como no projeto do membro se, por exemplo, as longarinas estiverem ligadas à parte externa das colunas.

## 8.8 Requisitos para travas de conectores de longarinas

Em porta-paletes, todos os conectores de extremidade de longarina devem ser equipados com travas que impeçam o conector de desencaixar, quando sujeito a uma carga vertical de baixo para cima (isto é, quando aplicado acidentalmente por equipamento de manuseio). A trava deve ser concebida para uma força de cisalhamento vertical ascendente, tratada como uma sobrecarga acidental, conforme 6.4.2.

## 8.9 Durabilidade

A fim de assegurar a durabilidade da estrutura em condições relevantes para a sua vida útil, devem ser considerados os seguintes fatores na fase de projeto:

- a) ambiente;
- b) grau de exposição;
- c) forma dos membros e detalhes estruturais;
- d) se a manutenção de revestimentos protetivos pode ser realizada.

Em caso de ligação de materiais diferentes, deve-se evitar a corrosão devido ao contato de metais diferentes.

As camadas de revestimento normais devem conferir à estrutura uma vida útil de dez anos até a primeira manutenção, em condições internas secas, a menos que haja danos resultantes de colisão ou uso indevido. Condições externas ou ambiente corrosivo requerem tratamento especial.

## 9 Análise estrutural

### 9.1 Modelagem estrutural para análise e concepção básica

O modelo de cálculo e os pressupostos básicos para os cálculos devem refletir o comportamento estrutural no respectivo estado-limite, com precisão adequada, e refletir o tipo de comportamento previsto da seção transversal, dos elementos, das ligações e dos carregamentos.

O método usado para a análise deve ser consistente com a concepção de projeto.

### 9.2 Cálculo das propriedades da seção

#### 9.2.1 Generalidades

A seguir são feitas referências aos grupos de propriedades de seção que são determinados:

- a) propriedades de seção bruta são as propriedades da seção sem qualquer redução por perfurações ou flambagem local; as propriedades da seção bruta são geralmente usadas em cálculos globais para esforços internos e deformações;

- b) propriedades de seção mínima são as propriedades de um elemento perfurado correspondente à seção transversal bruta, com a redução máxima devido ao efeito das perfurações; a redução para o efeito de perfurações é indicada em 9.2.3;
- c) propriedades da seção efetiva são as propriedades da seção reduzida, considerando a flambagem local.

Algumas seções de colunas têm uma gama de perfurações que, devido ao seu tamanho, número ou disposição, causam uma redução significativa no momento de inércia da seção. Nestes casos, o projetista deve estar ciente das implicações e um momento de inércia apropriado reduzido deve ser usado nos cálculos globais.

### 9.2.2 Efeito dos raios de dobra

As seguintes propriedades de seção podem ser calculadas com base na hipótese de cantos pontiagudos, sem redução para as perfurações ou para as larguras efetivas da seção transversal de elementos comprimidos:

- a)  $J$  é a constante de torção da seção transversal bruta;
- b)  $C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal bruta;
- c)  $x_0$  e  $y_0$  são as distâncias com relação aos eixos  $x$  e  $y$ , do centro de torção até o centro de gravidade da seção transversal bruta;
- d)  $r_x$  e  $r_y$  são os raios de giração da seção transversal bruta em relação aos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente;
- e)  $r_o$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

A influência dos cantos arredondados em todas as outras propriedades da seção devem ser calculadas de acordo com a geometria real da seção transversal.

### 9.2.3 Efeito de perfurações

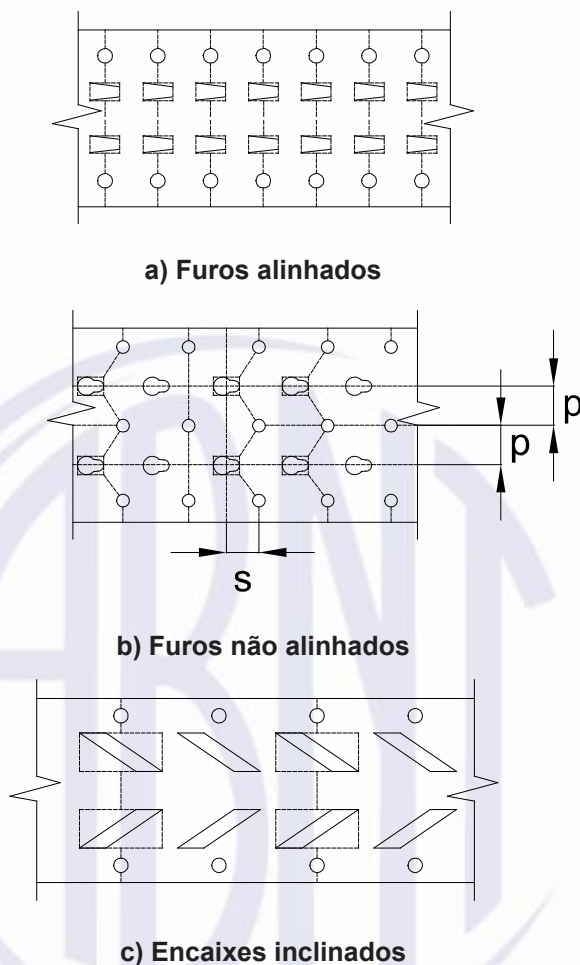
No caso dos elementos comprimidos, os efeitos das perfurações devem ser considerados pelo método de ensaio relevante desta Norma. Para os elementos tracionados, deve ser utilizado o procedimento de cálculo indicado a seguir.

No caso de furos alinhados, a área mínima deve corresponder ao comprimento mínimo da seção, reduzido pelos furos em qualquer seção transversal, perpendicular à direção da tensão no elemento, conforme a Figura 15-a).

No caso de furos não alinhados, a área mínima deve corresponder ao comprimento mínimo da seção como especificado anteriormente ou à seção transversal bruta reduzida pelas áreas de seção transversal de todos os furos, em qualquer linha em ziguezague que se estenda progressivamente ao longo do elemento, menos  $s^2t/(4p)$ , para cada espaço de medição na cadeia de furos, conforme a Figura 15-b) adotando-se o menor valor, onde:

- a)  $s$  é o espaçamento entre os centros de dois furos consecutivos, medido paralelamente ao eixo do membro;
- b)  $p$  é o espaçamento dos mesmos dois furos, medido perpendicularmente ao eixo do membro.

No caso de encaixes inclinados, a área mínima deve ser a seção transversal reduzida pela projeção da perfuração na seção transversal, conforme a Figura 15-c).



**Figura 15 – Determinação da seção transversal mínima**

## 9.2.4 Efeito da flambagem distorcional na seção transversal

### 9.2.4.1 Generalidades

Os elementos comprimidos de seção transversal aberta estão sujeitos a três modos de flambagem, que são, por ordem de comprimento de onda:

- flambagem local;
- flambagem distorcional;
- flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção.

**NOTA** Para os membros com comprimento efetivo intermediário, como geralmente são encontrados nos montantes de porta-paletes típicos, o modo distorcional é provavelmente o mais crítico.

### 9.2.4.2 Efeito da flambagem distorcional no membro perfurado

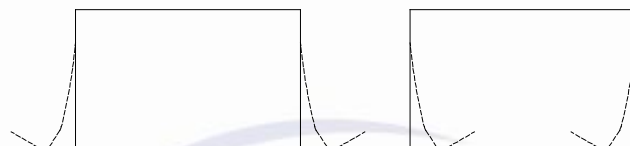
Se o membro for perfurado, o seu desempenho em relação à flambagem distorcional deve ser determinado por ensaio.

### 9.2.4.3 Efeito da flambagem distorcional no membro não perfurado

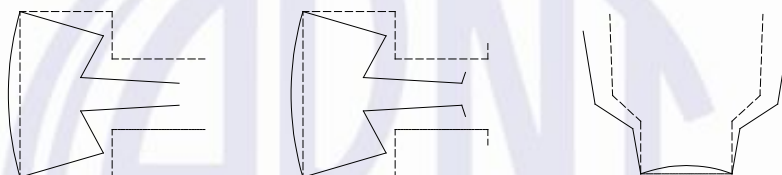
#### 9.2.4.3.1 Generalidades

Se o membro não for perfurado, os efeitos da flambagem distorcional devem ser determinados conforme a ABNT NBR 14782.

As Figuras 16 e 17 exemplificam dois comportamentos típicos de flambagem distorcional.



**Figura 16 – Flambagem distorcional controlada por enrijecedores de bordas simples**



**Figura 17 – Flambagem distorcional não controlada por enrijecedores de borda simples**

#### 9.2.4.3.2 Métodos de análise da estabilidade elástica

Os métodos adequados de análise incluem:

- análise de elementos finitos de segunda ordem;
- análise de faixas finitas de segunda ordem;
- teoria generalizada de vigas.

A flambagem distorcional é extremamente sensível às condições de extremidade (engastadas ou simplesmente apoiadas em relação ao modo distorcional). Deve-se ter cuidado para assegurar que as condições de contorno em análise ou em ensaio correspondam às do elemento ensaiado.

**NOTA** O comprimento de flambagem para flambagem distorcional é significativamente mais longo do que o para flambagem local. Isto significa que a flambagem distorcional geralmente não é identificada por um ensaio convencional de coluna curta. Além disso, se um ensaio de coluna curta apresentar um modo de falha distorcional, é provável que o comprimento seja insuficiente para determinar a carga de flambagem distorcional mínima (ver A.2.2).

### 9.2.5 Efeito da flambagem local

As propriedades de seção efetiva utilizadas na determinação das resistências devem ser calculadas para os membros não perfurados de acordo com a ABNT NBR 14762, ou devem ser determinados por ensaios de coluna curta, de acordo com A.2.1.

Os elementos comprimidos com perfurações devem ser concebidos com base em ensaios (ver A.2.1 a A.2.3).

As relações-limite de largura/espessura estão determinadas na ABNT NBR 14762.



## 9.3 Longarinas

### 9.3.1 Generalidades

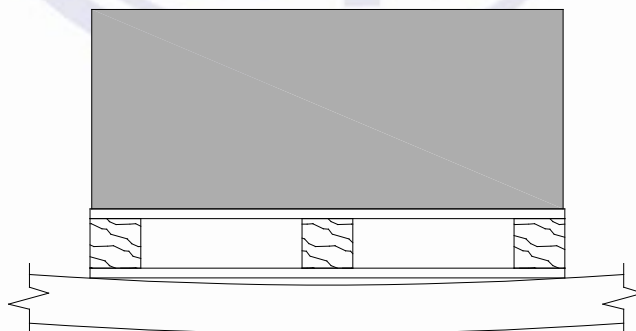
Quando aplicável, o dimensionamento dos elementos de porta-paletes conformados a frio deve considerar:

- a) efeitos de flambagem local, distorcional e global;
- b) enrugamento da alma, flexão local das mesas e outros efeitos de forças transversais localizadas;
- c) comportamento não elástico;
- d) efeito “*shear lag*”;
- e) torção.

NOTA 1 As longarinas de seção transversal aberta, nas quais o plano de dobragem não é um plano de simetria, estão sujeitas a uma combinação de flexão e torção, e são também particularmente propensas à flambagem lateral. Elas também são restringidas, em certa medida, pelas cargas que elas suportam. A resistência e a rigidez destas longarinas e de longarinas em que os fenômenos desta Subseção não são tratados de forma analítica confiável, são determinadas com maior precisão por ensaios (A.2.11).

As longarinas com comprimentos relativamente longos e ou com relação altura/largura de sua seção relativamente grande devem ter a sua estabilidade à torção verificada, particularmente sob as condições normais nos ciclos de carga e descarga. O fenômeno do deslocamento lateral incremental deve ser considerado.

Um palete com a sua carga pode ser mais rígido do que as longarinas que o suportam. Neste caso, quando se verificam as longarinas para o enrugamento de alma, deve-se assumir que toda a carga seja aplicada às longarinas por meio dos dois membros exteriores do palete, como mostrado na Figura 18.



**Figura 18 – Carga aplicada por meio dos dois membros externos do palete**

NOTA 2 A orientação sobre a importância das imprecisões de posicionamento é dada no Anexo E.

### 9.3.2 Momento fletor resistente de cálculo de membros não sujeitos à flambagem lateral com torção

O momento de resistência das longarinas não sujeitas à flambagem lateral com torção deve ser calculado de acordo com a ABNT NBR 14762:2010, Seção 9.

## 9.4 Dimensionamento da longarina

### 9.4.1 Generalidades

O comprimento da longarina pode ser considerado como a distância entre as linhas centrais de duas colunas adjacentes. No entanto, para análise de verificações, o comprimento da longarina pode ser tomado como a distância entre as faces de duas colunas adjacentes. Como alternativa, a longarina pode ser ligada à coluna por um braço rígido, que representa a excentricidade real da ligação utilizada.

A especificação do comprimento da longarina nesta subseção deve estar de acordo com a avaliação dos resultados de ensaio do conector.

As longarinas devem ser verificadas tanto no estado-limite último e no estado-limite de serviço, como a seguir:

- a) estado-limite último: as longarinas devem atender ao descrito em 9.5 e 9.6, quando estiverem sujeitas às cargas referidas em 10.2;
- b) estado-limite de serviço: os limites de deformação são dados em 11.2.

A folga do conector da longarina é medida de acordo com o ensaio de A.2.5, e é normalmente pequena o suficiente para ser desconsiderada no projeto das longarinas. No entanto, o projetista deve estar ciente de que nem sempre é esse o caso e que deve ser tomada a devida precaução quanto à folga excessiva que pode levar a deformações inaceitáveis no estado de serviço e gerar flexão adicional na longarina.

### 9.4.2 Cargas em longarinas

É usual considerar que a carga nas longarinas seja uniformemente distribuída, exceto especificado em contrário. Em porta-paletes contraventados contra o deslocamento longitudinal, os coeficientes indicados no Anexo F podem ser utilizados para converter o arranjo de carga real em uma carga uniformemente distribuída equivalente.

**NOTA** O momento fletor no centro do vão e a deformação central não são afetados por efeitos de deslocamento.

O projetista deve identificar casos especiais de materiais armazenados que possam impor cargas adicionais sobre as longarinas. Por exemplo, os pneus ou barris podem impor carga horizontal, bem como carga vertical.

Deve ser dada atenção às cargas pontuais dos suportes de palete que podem causar deformação na alma da longarina. Um palete com a sua carga unitária pode ser mais rígido do que as longarinas que o suportam. Neste caso, ao verificar a deformação da alma da longarina ou a deformação da alma combinada com a flexão, pode-se assumir que toda a carga seja repassada às longarinas por meio dos dois elementos exteriores do palete.

Quando as longarinas suportarem cargas axiais como parte de um sistema de contraventamento, elas devem ser verificadas de acordo com 9.4.6.

### 9.4.3 Momento fletor solicitante de cálculo para longarinas

#### 9.4.3.1 Generalidades

Se a rigidez do conector da longarina for considerada, então os momentos fletores solicitantes de cálculo podem ser obtidos diretamente dos resultados de uma análise de segunda ordem, considerando os coeficientes de ponderação de carga (ver Tabela 4).

NOTA Em estruturas contraventadas e não contraventadas, uma análise de primeira ordem pode fornecer uma estimativa satisfatória do momento fletor solicitante de cálculo na longarina, no estado-limite último.

Pode ser utilizado o dimensionamento no regime plástico das longarinas, mesmo que a estabilidade global seja justificada com base no regime elástico, desde que seja considerada a capacidade de rotação do conector da longarina.

#### 9.4.3.2 Dimensionamento aproximado

Um dimensionamento alternativo para uma seção de longarina com carga simétrica deve considerar a longarina mais carregada do seu tipo, com o momento fletor solicitante de cálculo no centro do vão, conforme a seguir:

$$M_{Sd} = \frac{W_d L}{8} \beta_m \left[ 1 - \frac{2/3 \beta_\theta}{\beta_m \left[ 1 + \frac{2EI_b}{k_e L} \right]} \right] \quad (12)$$

$$\text{sendo } k_e = \frac{k_b}{\left[ 1 + \frac{k_b h}{3EI_c} \right]} \quad (13)$$

onde

$W_d$  é a carga total de cálculo sobre a longarina;

$L$  é o vão entre as faces das colunas;

$h$  é a altura entre níveis;

$k_b$  é a rigidez do conector da longarina até a coluna;

$I_b$  é o momento de inércia da longarina;

$I_c$  é o momento de inércia da coluna.

NOTA  $\beta_\theta$  e  $\beta_m$  estão de acordo com o Anexo F.

### 9.4.4 Força cortante solicitante de cálculo para a longarina

Nos porta-paletes contraventados, a força cortante solicitante de cálculo para a longarina deve ser obtida a partir de uma análise global de primeira ordem ou de segunda ordem.

Nos porta-paletes não contraventados, a força cortante solicitante de cálculo deve ser obtida a partir de uma análise de segunda ordem.

Se for utilizada uma análise de primeira ordem, as forças cortantes solicitantes de cálculo na longarina devido ao deslocamento lateral devem ser majoradas pelo fator:

$$\beta = \frac{F_{Vcr}}{F_{Vcr} - F_{Vsd}} \quad (14)$$

onde

$F_{Vsd}$  é o valor de cálculo da carga vertical no montante;

$F_{Vcr}$  é o valor crítico elástico da carga vertical para falha em um modo de deslocamento lateral.

A força cortante solicitante de cálculo é a soma das forças cortantes solicitantes devidas ao deslocamento lateral no porta-paletes.

Em porta-paletes com configuração e cargas regulares, quando as placas de base são rotuladas, o cálculo da força cortante solicitante de cálculo deve ser realizado conforme a seguir:

$$V_{sd} = \frac{W_d}{2} + \frac{2\varnothing W_d h (3n_s - 1)}{4L} \beta \quad (15)$$

Em porta-paletes com configuração e carga regulares, quando as placas de base são semirrígidas, o cálculo do esforço de cisalhamento de cálculo pode ser realizado conforme a seguir:

$$V_{sd} = \frac{W_d}{2} + \frac{2\varnothing W_d h (2n_s - 1)}{4L} \beta \quad (16)$$

onde

$\varnothing$  é a imperfeição do deslocamento;

$n_s$  é o número de níveis de longarinas.

#### 9.4.5 Deformação de longarinas

No estado-limite de serviço, a deformação máxima de qualquer longarina deve ser obtida a partir de uma análise de primeira ou segunda ordem, que leve em conta o carregamento-padrão.

Para os porta-paletes com configuração e carga regulares, a deformação máxima de uma longarina pode ser calculada conforme a seguir:

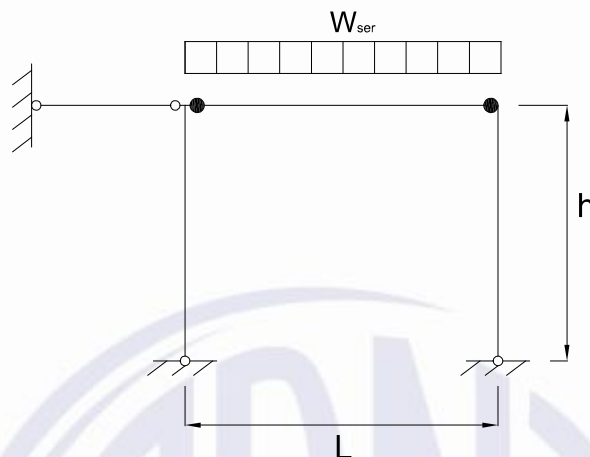
$$\Delta_{máx} = \frac{5W_{ser}L^3}{384EI_b} \beta_{\Delta} \left[ 1 - \frac{0,8\beta_{\theta}}{\beta_{\Delta} \left[ 1 + \frac{2EI_b}{k_e L} \right]} \right] \quad (17)$$

onde

$W_{ser}$  é a carga total por longarina no estado-limite de serviço;

$\beta_{\theta}$  e  $\beta_{\Delta}$  estão de acordo com o Anexo F.

O modelo utilizado para a Equação 17 é mostrado na Figura 19. Alternativamente, se as deformações forem calculadas a partir de uma análise global da estrutura completa no estado-limite de serviço, o projeto deve ser baseado na longarina que apresenta a deformação máxima.



#### Legenda

- conexão semirrígida
- h altura do nível da longarina com relação ao piso
- L vão
- $W_{ser}$  carga de serviço

**Figura 19 – Modelo para cálculo aproximado da deformação da longarina**

#### 9.4.6 Longarinas como parte do sistema de contraventamento em porta-paletes

Para os sistemas de porta-paletes com contraventamento, as longarinas têm uma função adicional de amarrar o montante com o contraventamento e, como resultado, transferir uma carga adicional de compressão ou tração.

**NOTA** As longarinas com elementos de contraventamento são, muitas vezes, o caso determinante para o projeto de sistemas com transelevadores.

Quando se considera a combinação de flexão e compressão axial, podem ser utilizados os seguintes procedimentos:

- a) quando o plano estiver totalmente carregado, não é necessário verificar a flambagem;
- b) quando o plano estiver descarregado, o comprimento de flambagem da longarina pode ser considerado  $L_b = L$ ;
- c) quando o plano estiver parcialmente carregado, o comprimento de flambagem da longarina pode ser conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Fator K (comprimento de flambagem = K x comprimento do sistema)

Número de unidades de carga por compartimento	K para uma longarina por vão	K para duas longarinas por vão
n de n	Não necessita checar a flambagem	Não necessita checar a flambagem
1 de 2	0,6	0,5
1 de 3 no meio do vão	1,0	0,9
2 de 3	0,6	0,5
2 de 4 no meio do vão	0,7	0,6
3 de 4	0,5	0,45

9.4.7 Resistência de cálculo relacionada a forças transversais localizadas

O dimensionamento das longarinas em relação ao enrugamento da alma, resultante de uma força transversal localizada ou de uma reação de apoio, deve ser feito de acordo a ABNT NBR 14762:2010, Anexo D.

9.4.8 Força cortante resistente de cálculo

A determinação da força cortante resistente de cálculo deve ser feita de acordo com a ABNT NBR 14762:2010, 9.8.3.

9.4.9 Força cortante combinada com a força axial e o momento fletor

O dimensionamento da longarina em relação à força cortante combinada com força axial e momento fletor deve ser feito de acordo com a ABNT NBR 14762:2010, 9.8.4.

9.4.10 Requisitos adicionais para forças transversais localizadas

Caso o projetista identifique outros estados-limite relacionados a forças transversais localizadas, requisitos adicionais para análise podem ser encontrados na EN 1993-1-3.

9.5 Dimensionamento do conector

9.5.1 Generalidades

Os conectores da longarina devem atender às seguintes condições no estado-limite último:

- a) o momento fletor solicitante de cálculo do conector não pode exceder ao momento fletor resistente de cálculo do conector;
- b) a força cortante solicitante de cálculo nos conectores não pode exceder a força cortante resistente de cálculo do conector;
- c) se os ensaios na direção inversa apresentarem resultados de rigidez e resistência inferiores a 50 % dos valores medidos na direção positiva, os valores reais devem ser medidos para utilização no cálculo.



### 9.5.2 Momento fletor solicitante de cálculo dos conectores

Para os porta-paletes contraventados, o momento fletor solicitante de cálculo dos conectores deve ser calculado por uma análise global de primeira ou segunda ordem.

Para os porta-paletes não contraventados, o momento fletor solicitante de cálculo dos conectores deve ser obtido diretamente da análise de segunda ordem.

O dimensionamento do conector pode ser baseado no momento fletor calculado na face lateral da coluna, ao invés de na linha de centro da coluna.

Se for utilizada uma análise de primeira ordem, os momentos no conector devido ao deslocamento lateral devem ser aumentados pelo seguinte fator, conforme o Anexo B:

$$\beta = \frac{F_{Vcr}}{(F_{Vcr} - F_{VSd})} \quad (18)$$

O conector deve ser projetado para a soma dos esforços de flexão, devido ao deslocamento lateral no porta-paletes.

Alternativamente, os momentos do conector em um porta-paletes regular podem ser calculados assumindo-se que, sob cargas devidas ao deslocamento lateral, pontos de inflexão ocorrem nas longarinas e colunas nos pontos médios de todos os membros.

Para uma estrutura com placas de base rotuladas, o momento de cálculo para o conector é:

$$M_{Sd} = \frac{W_d L}{12} \left[ \frac{\beta_\theta}{1 + \frac{2EI_b}{k_b L}} \right] + \frac{\varnothing W_d h (3n_s - 1)}{4} \beta \quad (19)$$

Quando as placas de base do porta-paletes são semirrígidas, com uma rigidez igual ou superior à rigidez do conector da longarina, o momento de cálculo para o conector pode ser calculado conforme a seguir:

$$M_{Sd} = \frac{W_d L}{12} \left[ \frac{\beta_\theta}{1 + \frac{2EI_b}{k_b L}} \right] + \frac{\varnothing W_d h (2n_s - 1)}{4} \beta \quad (20)$$

onde

$\beta_\theta$  é especificado no Anexo F.

### 9.5.3 Força cortante solicitante de cálculo para conectores

A força cortante solicitante de cálculo para conectores é a mesma da longarina, conforme 9.4.4.

### 9.5.4 Momento fletor e força cortante de cálculo para conectores

Se a força cortante solicitante de cálculo na face da coluna,  $V_{Sd}$ , for maior do que  $M_{Rd}/a$  (ver A.2.4), o seguinte requisito deve ser atendido:

$$M_d / M_{Rd} + (V_{Sd} - M_{Rd} / a) / V_{Rd} \leq 1,0$$

## 9.6 Longarinas sujeitas à flexão e torção

### 9.6.1 Generalidades

Quando os esforços resultarem em tensões de torção, o projeto deve ser feito com base em ensaios ou, alternativamente, por cálculo conforme a ABNT NBR 8800:2008, 5.5.2.

NOTA A combinação adequada de tensões de torção e flexão é de obtenção complexa. Os efeitos dos apoios típicos de palete na restrição da torção das longarinas podem ser considerados e, no caso usual de uma longarina com uma seção simétrica ou fechada, as tensões de torção resultantes da carga excêntrica podem ser desconsideradas. Recomenda-se o ensaio de flexão para as longarinas com seção transversal aberta e/ou longarinas esbeltas juntamente com longarinas de seção transversal aberta assimétrica.

### 9.6.2 Flambagem lateral com torção em longarinas

O momento resistente de cálculo  $M_{Rd}$  das longarinas sujeitas à flambagem lateral com torção deve ser determinado por ensaios de acordo com A.2.11 ou por cálculo, conforme a ABNT NBR 14762:2010,9.8.

As Figuras 20 e 21 fornecem orientações sobre as seções típicas de longarinas que podem ou não estar sujeitas à flambagem lateral com torção.

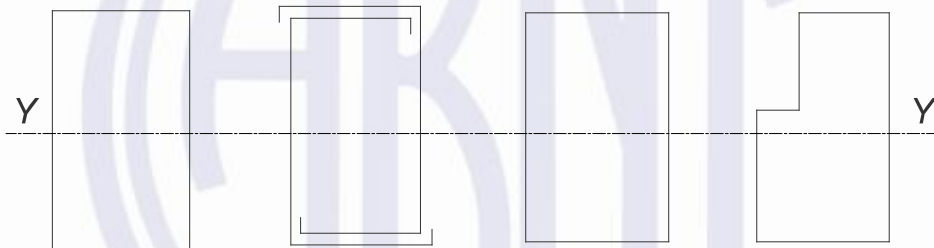


Figura 20 – Exemplos de longarinas que podem ou não estar sujeitas à flambagem lateral por torção

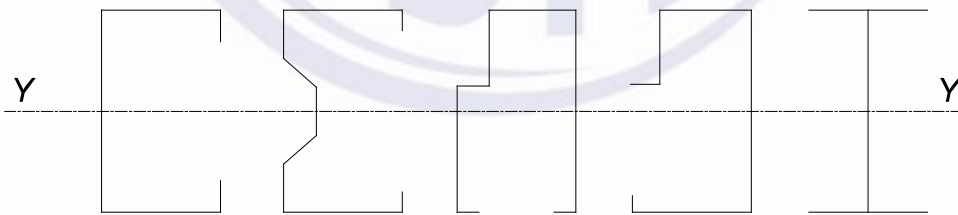


Figura 21 – Exemplos de longarinas com flambagem por torção lateral suscetível a ser crítica

## 9.7 Compressão, tração e flexão em barras

### 9.7.1 Barras comprimidas não perfuradas

As barras comprimidas não perfuradas devem ser concebidas por cálculo ou ensaio, de acordo com esta Norma.

### 9.7.2 Barras perfuradas comprimidas

O dimensionamento para as barras comprimidas perfuradas deve levar em conta a presença de conjuntos regulares de furos ou ranhuras. Três procedimentos alternativos estão disponíveis:

- a) projeto por ensaio, conforme A.2.1 e A.2.3;

- b) um procedimento totalmente teórico que considere de maneira adequada as perfurações (por exemplo, usando elementos finitos), juntamente com flambagem local, global e distorcional, bem como imperfeições. O modo como são consideradas as imperfeições deve ser validado por ensaio.

NOTA Está implícito que o dimensionamento de barras perfuradas continuamente requer ensaios; contudo, isto não pretende restringir o desenvolvimento de procedimentos analíticos (por exemplo, utilizando elementos finitos) para prever o desempenho de barras que contêm conjuntos regulares de furos ou ranhuras. Quando a análise racional puder ser demonstrada como suficiente, ela pode ser utilizada como uma alternativa aos procedimentos de ensaios pertinentes.

- c) o seguinte procedimento de dimensionamento, que se baseia na utilização da área efetiva determinada experimentalmente,  $A_{ef}$ , de acordo com A.2.1, modificado para a flambagem distorcional como exposto a seguir:

- 1) um ensaio de flambagem distorcional deve ser realizado de acordo com A.2.2, em um comprimento de coluna igual ao comprimento do passo da treliça vertical (comprimento destravado do montante) mais próximo de 1 m, para dar um valor de resistência de cálculo  $N_{db,Rd}$ .

Quando um montante tem uma distância variável entre nós, cada comprimento de treliça entre nós deve ser verificado. O número de ensaios pode ser minimizado pelo uso de análise de elementos finitos. Os resultados do ensaio devem ser utilizados para validar o modelo de elementos finitos;

- 2) a resistência de cálculo  $N_{b,Rd}$ , para este comprimento de coluna, na ausência de flambagem distorcional, deve ser calculada utilizando a área efetiva e os valores nominais da resistência ao escoamento e da espessura, considerando a flambagem por flexão e por flexo-torção, de acordo com 9.7.4 e 9.7.5. O comprimento de flambagem por flexão deve ser igual à distância entre os eixos dos apoios da barra, e o comprimento de flambagem por torção deve ser metade do comprimento do perfil da amostra;
- 3) a razão  $\varepsilon = N_{db}/N_{b,Rd}$  é então determinada. Se  $\varepsilon \geq 1,0$ , não pode ser feito qualquer ajuste à área efetiva ( $A_{ef}$ );
- 4) se  $\varepsilon < 1,0$ , o valor da área efetiva  $A_{ef}$  deve ser reduzida a um novo valor, para o qual o valor calculado de  $N_{b,Rd}$  é igual ao valor obtido a partir do ensaio de flambagem distorcional,  $N_{db,Rd}$  e  $\varepsilon = 1$ . Este novo valor da área efetiva  $A_{ef}$  deve ser utilizado em todos os cálculos subsequentes.

### 9.7.3 Dimensionamento de barras submetidas à força axial de tração

A força axial de tração resistente de cálculo deve ser determinada de acordo com a ABNT NBR 14762:2010, 9.6.

### 9.7.4 Dimensionamento de barras submetidas a força axial de compressão

#### 9.7.4.1 Flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção

A força axial de compressão resistente de cálculo para os efeitos de flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção deve ser determinada de acordo com a ABNT NBR 14762:2010, 9.7.

#### 9.7.4.2 Comprimento de flambagem

O comprimento de flambagem  $\ell$  para uma determinada barra, que é um elemento de um sistema, deve ser determinado como o comprimento de uma coluna com a mesma seção transversal e com ambas as extremidades rotuladas, com a mesma carga crítica de Euler, como o sistema em análise.

Se a força axial e o momento fletor no plano de flambagem de uma barra forem determinados com base em uma análise de segunda ordem, estes esforços já são considerados com o incremento dos efeitos de segunda ordem, e o comprimento de flambagem pode ser considerado igual ao comprimento do sistema. Quando a análise global de segunda ordem for usada, é permitido utilizar o comprimento de flambagem no plano para o projeto da barra no modo sem deslocamento lateral.

Um procedimento adequado deve determinar a carga crítica elástica sem deslocamento da estrutura e, em seguida, para cada nível, calcular o comprimento efetivo para uso com a curva de flambagem da coluna apropriada.

NOTA 1 A determinação do comprimento de flambagem nesta Subseção é aplicável aos membros de estruturas contraventadas e aos montantes para os quais não é possível realizar uma análise de segunda ordem.

NOTA 2 O comprimento de flambagem  $\ell$  de uma barra comprimida pode ser determinado por análise teórica ou por ensaio, considerando o comportamento do montante completo e a natureza das restrições proporcionadas nas ligações de elementos de travamento das colunas do montante (contraventamento) ou de outros elementos de restrição.

NOTA 3 Em geral, os comprimentos do sistema, juntamente com os comprimentos de flambagem para flexão e torção resultantes, nas direções longitudinal e transversal ao corredor, não são os mesmos. Existe também a possibilidade de emendas e mudanças de seção transversal entre os nós de ligação. Na direção transversal ao corredor, são criados problemas adicionais por alterações da distribuição de carga axial entre os nós de ligação. Não é possível dar orientação prescritiva relativa ao projeto do componente comprimido que inclua todas as possibilidades. Se uma análise tridimensional avançada for usada de acordo com 10.1.3, este problema não ocorre. Em outros casos, o projeto é baseado em duas análises ortogonais independentes, e o projetista pode, portanto, precisar analisar a determinação de comprimentos efetivos apropriados para o projeto da barra. Em geral, em uma estrutura contraventada ou em uma estrutura não contraventada, nas quais os esforços da barra foram determinados com base na análise de segunda ordem, isto não pode exceder o comprimento efetivo do sistema.

Se o comprimento de flambagem não tiver sido determinado pela análise global, devem ser utilizados os seguintes valores do fator de comprimento efetivo  $K$ , em que:

$$\ell = KL$$

onde

$L$  é o comprimento do sistema (isto é, o comprimento entre os pontos de ligação do contraventamento relativo ao modo de flambagem em consideração).

Deve-se atender ao seguinte, em relação ao comprimento de flambagem:

- para qualquer barra com ambas as extremidades ligadas em relação ao modo de flambagem considerado:  $K = 1$ ;

b) para o comprimento inferior de uma coluna de um montante na direção transversal ao corredor, em que:

- 1) os elementos do contraventamento estão ligados a ambos os flanges da coluna;
- 2) as excentricidades do nó atendem ao descrito em 8.6 e 8.7;
- 3) uma placa de base está montada na coluna;
- 4) o piso é de concreto:  $K = 0,9$

Se as condições em 9.7.4.2-b), 1) e 2), forem atendidas:

$$K = 1.$$

$L$  = altura do piso ao ponto do segundo nó (indicação  $h$  na Figura 22-a) e Figura 22-b)).

Em uma estrutura contraventada, se o nó inferior não estiver perto do piso (ver 8.6), o comprimento entre o piso e o primeiro nó deve ser considerado livre para deslocamento.

c) para as outras partes da coluna em um montante com contraventamento na direção transversal ao corredor:

$$K = 1,0.$$

$L$  = distância entre os pontos de nós (indicação  $h_p$  na Figura 22-a) e Figura 22-b)).

d) para barras horizontais e diagonais do contraventamento de um montante, desde que o elemento de contraventamento seja soldado com um cordão de pelo menos 20 mm em ambos os flanges das colunas:

$$K = 0,9, \text{ apenas para flambagem no plano transversal ao corredor.}$$

Para todos os outros casos,  $K = 1,0$ .

Se as ligações na extremidade de uma barra do contraventamento não coincidirem com as linhas do sistema, isto é, se a excentricidade não atender ao descrito em 8.6, a barra deve ser projetada para carga axial e flexão combinadas.

e) para estruturas contraventadas na direção longitudinal ao corredor, o fator  $K$  é o mesmo que para a direção transversal ao corredor, conforme 9.7.4.2-b) e 9.7.4.2-c). Para o trecho inferior da coluna, há três casos a serem considerados (ver Figura 23):

- Caso 1: o nó do contraventamento não coincide com o nó das longarinas (isto é, não atende aos requisitos de 8.6) –  $L$  = altura do piso ao primeiro nível de longarina (indicação  $h$  na Figura 23);
- Caso 2: a longarina inferior está a uma altura relativa ao piso similar à altura entre as demais longarinas dos níveis superiores –  $L$  = altura do piso ao primeiro nível de longarinas (indicação  $h$  na Figura 23);
- Caso 3: o nó da longarina inferior ou do contraventamento está próximo do piso (ver 8.6) –  $L$  = altura do piso ao segundo nível de longarina ou ao nível de longarina acima do nó do contraventamento (indicação  $h$  na Figura 23).

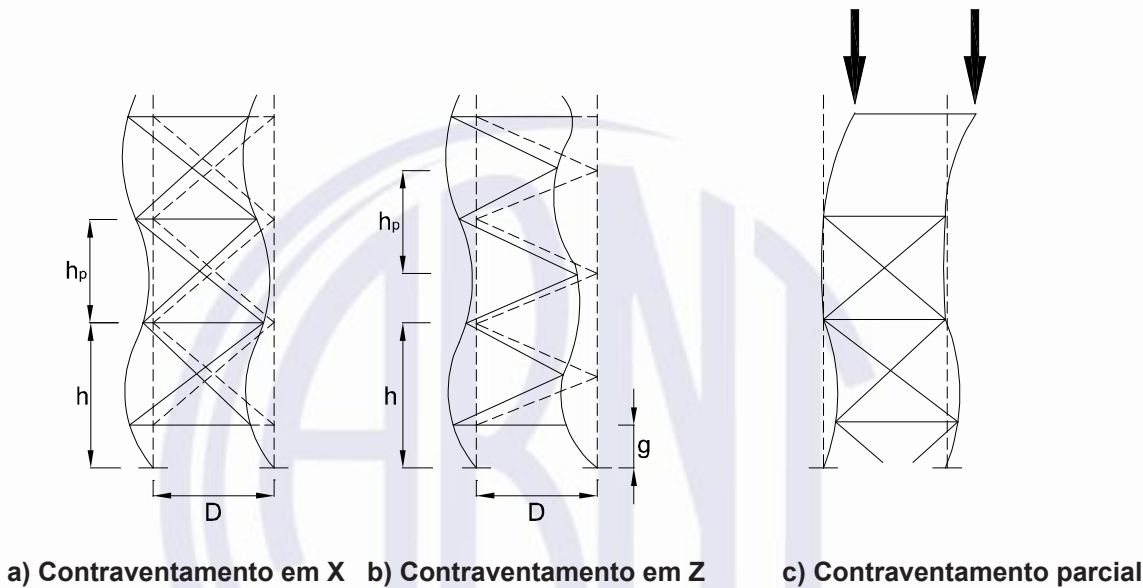
Para outros comprimentos de coluna,  $L$  = altura entre dois níveis de longarinas.



Em uma estrutura contraventada na direção longitudinal ao corredor, se o nó inferior não estiver de acordo com 8.6, o comprimento entre o piso e o primeiro nó deve ser considerado livre para deslocamento;

f) para estruturas sem contraventamento no sentido do corredor:

Quando a estabilidade global ocorre por meio de uma análise de segunda ordem, aumentam-se os momentos fletores e, portanto, é prudente utilizar  $K = 1$ , com os valores de  $L$  dados 9.7.4.2-e).



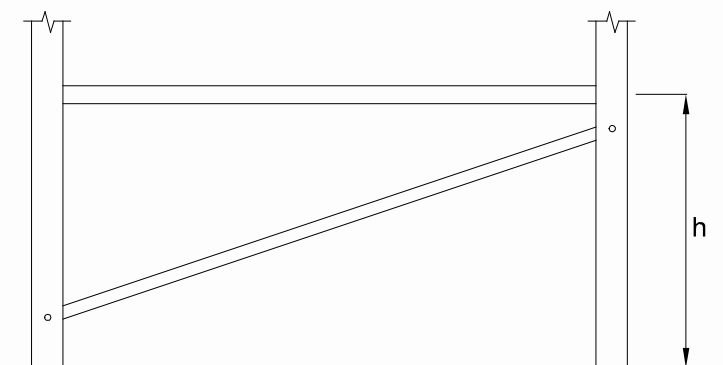
**Legenda**

- $D$  espaçamento de colunas em um montante
- $g$  excentricidade
- $h$  altura do segundo nó em relação ao piso no lado mais desfavorável
- $h_p$  comprimento do elemento plano mais longo

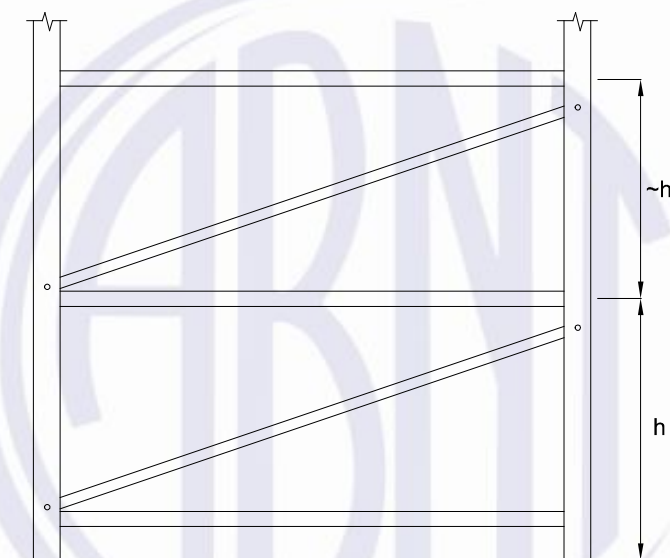
A situação da Figura 22-c) ocorre com frequência e deve-se ter cuidado com a estabilidade da parte superior sem contraventamento dos montantes.

**Figura 22 – Modos de flambagem no plano do contraventamento**

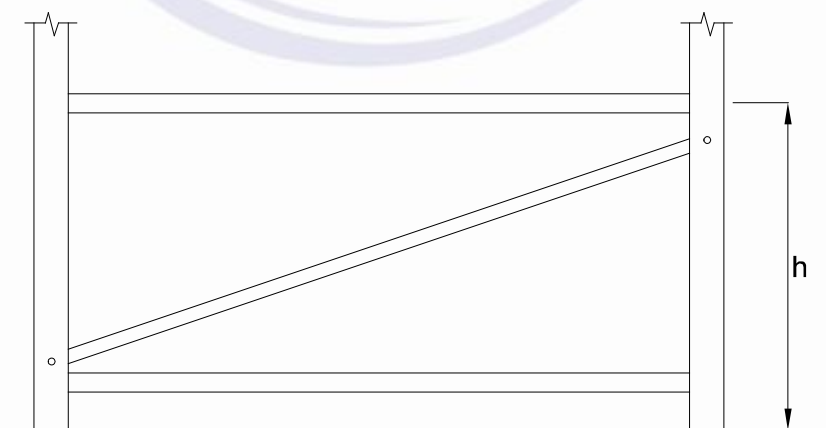




a) Caso 1: os nós do contraventamento não coincidem com os nós das longarinas



b) Caso 2: a altura entre o piso e a longarina inferior é similar à altura entre as longarinas superiores



c) Caso 3: o nó da longarina inferior ou do contraventamento está próximo do piso

**Figura 23 – Estruturas contraventadas na direção do corredor**

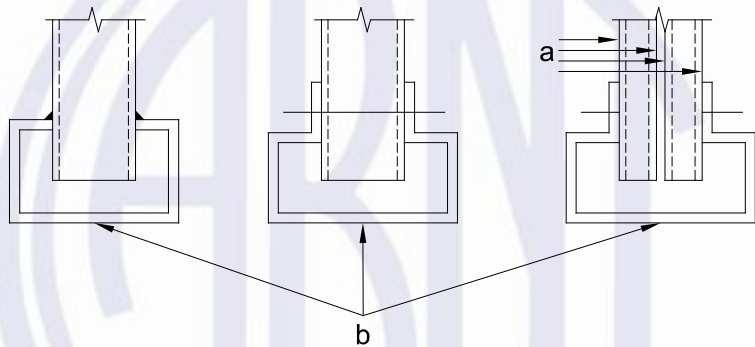
9.7.4.3 Comprimento de flambagem à torção

A menos que seja justificado por um método mais restritivo, deve ser utilizado o seguinte comprimento de flambagem à torção:

- a)  $L_{eT} = 1,0 \times$  distância entre os nós do contraventamento, quando as ligações proporcionam uma restrição de torção completa;
- b)  $L_{eT} = 0,5 \times$  distância entre os nós do contraventamento, quando as ligações proporcionam uma restrição de torção completa e uma restrição total de deformação.

NOTA Na prática, é complexa a obtenção de uma restrição completa de deformação por torção e por flexo-torção.

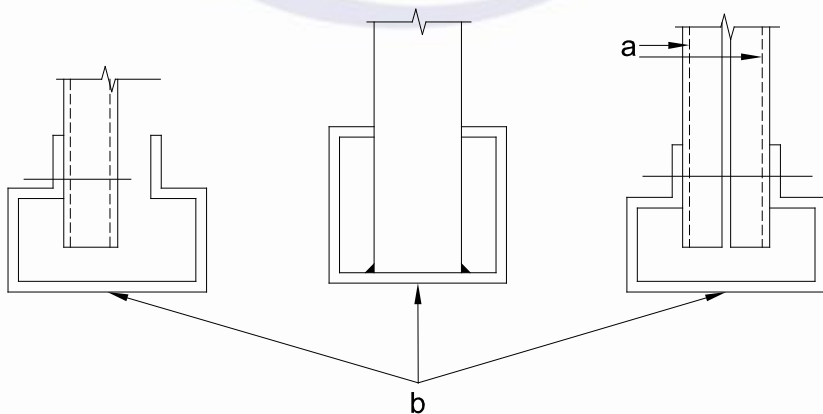
A Figura 24 fornece orientações sobre as ligações de barras de contraventamento com grande restrição.



Legenda

- a seções com fixação pelas almas de dois membros
- b colunas consideradas

a) Exemplos de ligações de barras de contraventamento com grande restrição



Legenda

- a almas
- b colunas consideradas

b) Exemplos de ligações de barras de contraventamento com restrição parcial

Figura 24 – Exemplos de ligações de barras de contraventamento com restrição

Para ligações com extremidades semelhantes às da Figura 24-a), que pode-se considerar que proporcionam grande restrição à deformação e torção,  $L_{e,T}$  deve ser considerado igual a 0,7 da distância entre os nós do contraventamento.

Para as ligações de extremidade semelhantes às da Figura 24-b), que pode-se considerar que proporcionam restrição parcial à deformação e torção,  $L_{e,T}$  deve ser considerado igual a 1,0 da distância entre os nós do contraventamento.

**NOTA** Os valores mais baixos de  $L_{e,T}$ , por exemplo, onde  $L_{e,T}$  é maior que  $0,5 \times$  a distância entre os nós do contraventamento, podem também ser obtidos pela comparação entre as equações teóricas de flambagem por torção e flambagem por flexo-torção, com resultados de ensaios de compressão em montantes especificados em A.2.3.

### 9.7.5 Dimensionamento de barras submetidas à flexão composta

A força axial solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo devem atender à expressão de interação conforme a ABNT NBR 14762:2010, 9.9.

## 9.8 Projeto de emendas

Emendas devem ser projetadas por cálculo ou por ensaios, de acordo com A.2.12, e devem atender ao seguinte:

- as emendas devem ter no mínimo a resistência do mais fraco dos elementos ligados, ou devem ser projetadas para uma força de compressão concêntrica  $N_{Sd}$  e um momento de flexão  $M_{j,Sd}$ ;
- emendas e ligações devem ser projetadas de modo que a força axial, a força de cisalhamento e o momento fletor possam ser transmitidos para as porções efetivas da seção transversal;
- se puder ser demonstrado por ensaio que a rigidez e o momento resistente das duas colunas ligadas pela emenda são iguais ou maiores do que a coluna de uma única peça e com o mesmo comprimento (ver A.2.12), é permitido desprezar a emenda na análise global;
- quando os detalhes de construção nas extremidades de um elemento gerarem dúvidas quanto ao ponto de ação da carga, uma excentricidade adequada deve ser considerada no cálculo de  $M_{exc}$ ;
- se uma emenda articulada for concebida no modelo global, somente a força axial e a força de cisalhamento podem ser verificadas, e a rigidez não precisa ser verificada.

A junta de emenda deve ser projetada para:

$$\frac{N_{Sd}}{A_{sp} f_y / \gamma_m} + \frac{M_{exc} + M_{j,Sd}}{M_{sp} / \gamma_m} \leq 1 \quad (21)$$

onde

$$M_{j,Sd} = M_{y,Sd} + N_{Sd} \left( \frac{1}{\chi} - 1 \right) \frac{W_{ef}}{A_{ef}} \sin \frac{\pi x}{\ell} \quad (22)$$

$\chi$  está de acordo com 9.7.4;

$A_{ef}$  é a área da seção transversal efetiva do membro mais fraco;

$W_{ef}$  é o módulo da seção transversal efetiva à flexão do membro mais fraco;

$x$  é a distância entre o ponto de inflexão na flambagem e a emenda ou conexão final;

$\ell$  é o comprimento efetivo;

$A_{sp}$  é a área de seção transversal líquida da emenda;

$M_{sp}$  é o momento resistente da emenda;

$M_{exc}$  é o momento devido às excentricidades.

As forças e os momentos internos devem ser considerados não inferiores a 10 % do momento resistente da seção mais fraca sobre os dois eixos e a uma força de cisalhamento igual a 1,5 % da capacidade de força normal da seção mais fraca, na direção de ambos os eixos. Se, na análise, a emenda for modelada como uma ligação não rotulada, o valor mínimo do momento não precisa ser aplicado.

## 9.9 Projeto das placas de base

### 9.9.1 Generalidades

Toda coluna deve ser fixada com uma placa de base e os controles devem ser feitos sobre a resistência da placa de base, a pressão de contato e o chumbador.

A determinação da pressão de contato e da placa de base pode ser realizada sob a ação geral da força normal. Qualquer momento de restrição pode ser desconsiderado.

A ligação da coluna ao piso é geralmente solicitada a compressão e flexão. No entanto, a influência deste momento fletor já está considerada na determinação da constante de mola da rotação C de acordo com A.2.7 A. Por isso, no projeto da placa base apenas a força de compressão deve ser verificada para um carregamento concêntrico.

### 9.9.2 Área efetiva $A_{bas}$ para placas de base

O projeto de uma placa de base concentricamente carregada deve considerar que a pressão de contato na área efetiva da placa de base está uniformemente distribuída. Na Figura 25, a área efetiva é indicada pela porção sombreada, em que a seguinte equação é utilizada:

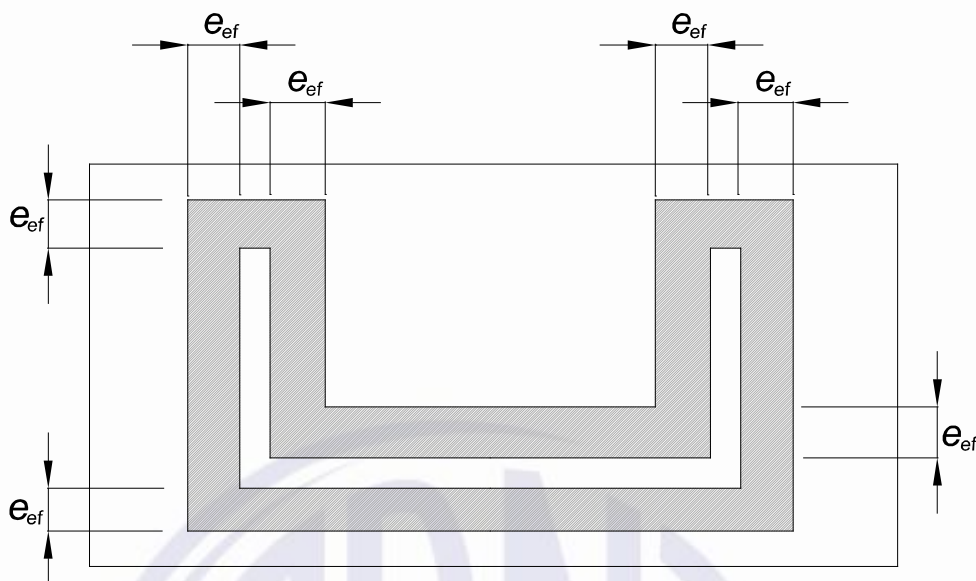
$$e_{ef} = t_b \sqrt{\frac{f_y}{3f_j}} \quad (23)$$

onde

$t_b$  é a espessura da placa de base;

$f_y$  é a resistência de cálculo da placa de base;

$f_j$  é a resistência de cálculo do material do piso (ver 9.10).



### Legenda

$e_{ef}$  largura efetiva de apoio da placa de base

**Figura 25 – Área efetiva para projeto da placa de base**

Quando a distância da face da coluna até a borda da placa de base for inferior a  $e_{ef}$ , deve ser utilizado um valor reduzido de  $e_{ef}$ , igual à distância entre a coluna e a borda da placa de base.

A força de compressão de cálculo da coluna no nível da placa base  $V_{Sd}$  deve satisfazer a relação:

$$V_{Sd} \leq f_j \cdot A_{bas} \quad (24)$$

onde

$A_{bas}$  é a área efetiva da placa de base especificada na Figura 25.

## 9.10 Materiais do piso

### 9.10.1 Pisos de concreto

No projeto da placa de base, a resistência de cálculo do concreto para a pressão de contato  $f_j$ , pode basear-se na resistência característica do corpo de prova cilíndrico  $f_{ck}$ , de modo que:

$$f_j = 2,5 \frac{f_{ck}}{\gamma_m} \quad (25)$$

onde

$f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto;

$\gamma_m$  é o fator parcial de material para o concreto = 1,5.

Quando o grau do concreto não é conhecido e uma inspeção visual indica que o material é adequado, o concreto pode ser considerado como tendo uma classe de resistência 20 MPa:  $f_{ck} = 20$  MPa.

Alternativamente, ensaios podem ser realizados para determinar a real resistência do concreto conforme a ABNT NBR 5739.

### **9.10.2 Outros materiais de piso**

No caso de pisos que não sejam feitos de concreto, deve ser consultado o fornecedor do material de pavimento em relação a sua capacidade de suporte. Na avaliação da resistência característica do material, deve ser dada a devida consideração à possibilidade de ocorrência de fluência e à influência da temperatura no comportamento do material. Deve ser dada atenção não apenas às camadas superficiais, mas também a quaisquer subcamadas do piso cujo desempenho possa influenciar o comportamento da placa base.

### **9.10.3 Projeto de ancoragens**

As forças de cálculo para as ligações com o piso devem ser calculadas para a combinação crítica de cargas do estado-limite último e as fixações devem ser projetadas de acordo com a ABNT NBR 14827 ou equivalente.

Cada ligação de coluna ao piso deve poder transferir uma força mínima sem majoração de 3 kN em tração e de 5 kN em cisalhamento.

NOTA Para ancoragens em concreto, os seguintes parâmetros são significativos:

- a) espessura do piso de concreto estrutural (uma camada de argamassa de revestimento sobre o piso não contribui para a resistência da ancoragem);
- b) qualidade do concreto;
- c) quantidade de armadura na porção superior do piso;
- d) se a ancoragem está na zona de tração ou compressão do concreto;
- e) distância entre ancoragens;
- f) distância entre a ancoragem e a borda do piso de concreto;
- g) diferença entre o tamanho do furo na placa de base e o diâmetro da ancoragem.

Quando o piso de concreto estiver colocado diretamente sobre o solo, as tensões de tração nas camadas superiores do concreto são geralmente pequenas e a porção superior do piso pode ser considerada como estando na zona de compressão.

### **9.11 Projeto de distanciadores**

Em porta-paletes de dupla entrada, devem ser projetados pelo menos dois distanciadores entre cada par de montantes adjacentes. Estes devem estar localizados o mais próximo possível dos pontos de nó dos montantes (pontos rígidos) para evitar esforços adicionais na coluna e espaçados conforme determinado em projeto. O distanciador mais baixo, normalmente, é montado próximo ao nível do segundo nó de contraventamento acima do piso, nas colunas internas; já o distanciador mais alto, próximo à última travessa (ver Figura 2). Deve ser previsto um distanciador adicional adjacente a toda emenda para evitar a rotação desse ponto.



Em casos de estruturas operadas como porta-paletes de dupla entrada, que contemplem alguma das configurações expostas a seguir, não é necessário o uso de distanciadores e as estruturas devem ser consideradas como porta-paletes de simples entrada.

- a) montantes adjacentes desalinhados;
- b) estruturas de fabricantes distintos;
- c) distância entre montantes adjacentes superior a 1 000 mm.

Cada distanciador deve ter uma capacidade de tração igual, pelo menos, à carga horizontal de posicionamento.

Se os distanciadores forem considerados na concepção, devem ser capazes de resistir às forças envolvidas.

## 10 Análise global de porta-paletes

### 10.1 Considerações gerais

#### 10.1.1 Generalidades

O projeto do sistema de porta-paletes deve ser verificado em duas fases. Na primeira etapa, uma análise global da estrutura deve ser feita para determinar a distribuição das forças e deslocamentos internos. Na segunda fase, os elementos individuais da estrutura devem ser verificados para assegurar que eles tenham resistência adequada no estado-limite último e que deformações inaceitáveis não se desenvolvem no estado-limite de serviço.

Para efeitos de análise global, devem ser utilizadas linhas de sistema coincidentes com os eixos de centroide da seção transversal bruta dos elementos ou com a seção transversal reduzida a partir da qual as propriedades são determinadas.

O sistema de porta-paletes é usualmente fabricado a partir de seções conformadas a frio e, portanto, podem ser utilizados métodos elásticos de análise global. Contudo, pode ser considerado na análise um comportamento não linear das ligações, contanto que a característica não linear utilizada seja baseada em resultados de ensaio que demonstrem capacidade de rigidez suficiente. Como alternativa, a análise elastoplástica pode ser utilizada se as seções submetidas a uma rótula plástica atenderem os critérios das EN 1993-1-1 e EN 1993-1-3 para o projeto em regime plástico, incluindo os requisitos de ductilidade especificados nestes documentos.

#### 10.1.2 Análise bidimensional

Embora o porta-paletes seja uma estrutura espacial, pode-se supor, para efeitos de análise global, que ele seja um conjunto de estruturas planas situadas nos planos verticais, paralelos e perpendiculares aos corredores e no plano horizontal, considerando-se que cada plano é inicialmente tomado para operar independentemente. As imperfeições em um plano podem ser desprezadas quando se realiza a análise global no outro plano. No entanto, no projeto dos membros, devem ser levados em conta os efeitos num plano que influenciam o comportamento no outro, utilizando equações de interação apropriadas.

Alternativamente, a análise pode basear-se em uma análise tridimensional detalhada de acordo com 10.1.3.

Os procedimentos descritos nesta seção aplicam-se tanto aos porta-paletes sem contraventamento como aos porta-paletes com contraventamento, conforme descrito em 5.1.2 e 5.1.3.

### 10.1.3 Análise tridimensional avançada

A análise global basear-se-á em uma análise detalhada de elementos finitos de segunda ordem tridimensional que tenha plenamente em conta todos os requisitos deste documento. O método utilizado deve estar de acordo com a EN 1993-1-1. A análise deve incluir as seguintes considerações:

- a) imperfeições globais nas direções paralela e transversal ao corredor;
- b) as imperfeições dos membros (membros previamente curvados) são as implícitas na EN 1993-1-1, 5.3.2, parágrafo (11). Se a curva de flambagem for determinada por ensaios de acordo com A.2.3, o valor de  $\alpha_{LT}$  deve ser determinado a partir dos resultados do ensaio por ajuste da curva;
- c) excentricidades das ligações, quando aplicável;
- d) flambagem à flexo-torção dos membros;
- e) influência da deformação devido ao empenamento na flambagem por torção (efeito Wagner), torção por empenamento e excentricidade do centro de cisalhamento.

Nesses casos, a flambagem local da barra deve ser ignorada no projeto detalhado desta, isto é, o fator de redução da tensão por flambagem  $\chi = 1$ .

## 10.2 Procedimento de cálculo

### 10.2.1 Ações

O valor de cálculo de uma ação no estado-limite de serviço e no estado-limite último deve ser obtido multiplicando a ação pelos fatores de carga dados em 7.4 e combinação de fatores dada em 7.2 e 7.3.

### 10.2.2 Procedimento

#### 10.2.2.1 Generalidades

A análise de um sistema de porta-paletes deve ser realizada considerando primeiramente a direção paralela e posteriormente a direção transversal ao corredor. Para o cálculo das colunas, as forças resultantes destas duas análises devem ser combinadas utilizando as fórmulas de interação dadas em 9.7. Os outros elementos devem ser concebidos com base em uma ou outra análise de estrutura plana, apropriada ao caso.

**NOTA** O projeto das colunas envolve a combinação da carga axial resultante dos materiais armazenados acrescida de quaisquer cargas axiais adicionais provenientes de cargas de posicionamento, com momentos fletores em torno de ambos os eixos da seção. Contudo, de acordo com 5.3.2, as imperfeições por deslocamento e as cargas de posicionamento podem ser consideradas em uma direção de cada vez.

#### 10.2.2.2 Combinações de carga para análise na direção do corredor

Na direção do corredor, a estrutura deve ser analisada para a seguinte combinação de cargas:

- a) peso próprio;
- b) carga imposta pelos materiais armazenados;
- c) carga imposta por passarelas ou pisos;

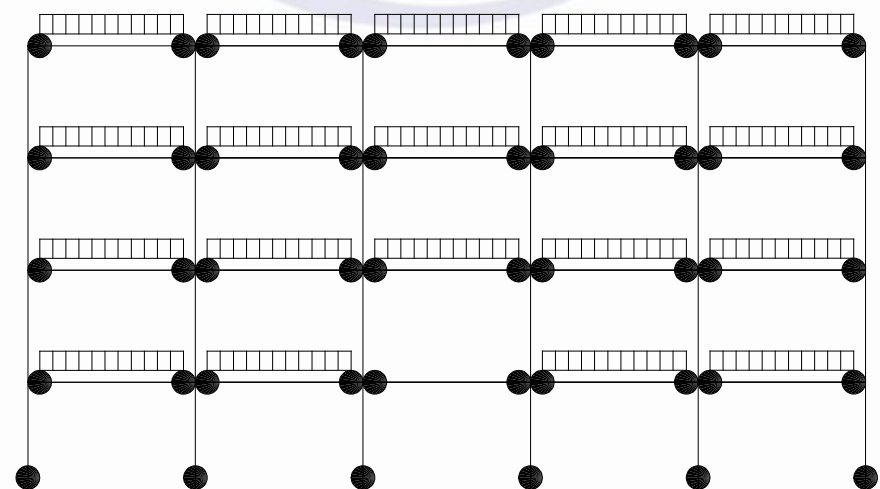
- d) ações resultantes de imperfeições na direção do corredor;
- e) carga imposta por equipamento de movimentação;
- f) ao considerar as cargas impostas a partir de materiais armazenados, o padrão de carga é considerado para cada um dos seguintes critérios;
- g) estabilidade global na direção do corredor;
- h) flexão e flambagem das colunas;
- i) deformação e momentos fletores das longarinas no meio do vão;
- j) momentos na ligação da longarina com a coluna.

Para a estabilidade global na direção do corredor, a estrutura totalmente carregada pode ser considerada com as ações resultantes de imperfeições, conforme especificado em 5.3.

Para o projeto das colunas, tanto a condição de carregamento total como a condição de carregamento parcial devem ser consideradas. Pode ser suficiente considerar, para um porta-paletes regular, o carregamento parcial como sendo a estrutura totalmente carregada com a exceção de um único plano descarregado perto do meio da estrutura no nível mais baixo como mostrado na Figura 26-a). Nos porta-paletes com contraventamento, também deve ser considerado um carregamento alternativo que origine uma curvatura nas colunas, conforme ilustrado na Figura 26-b).

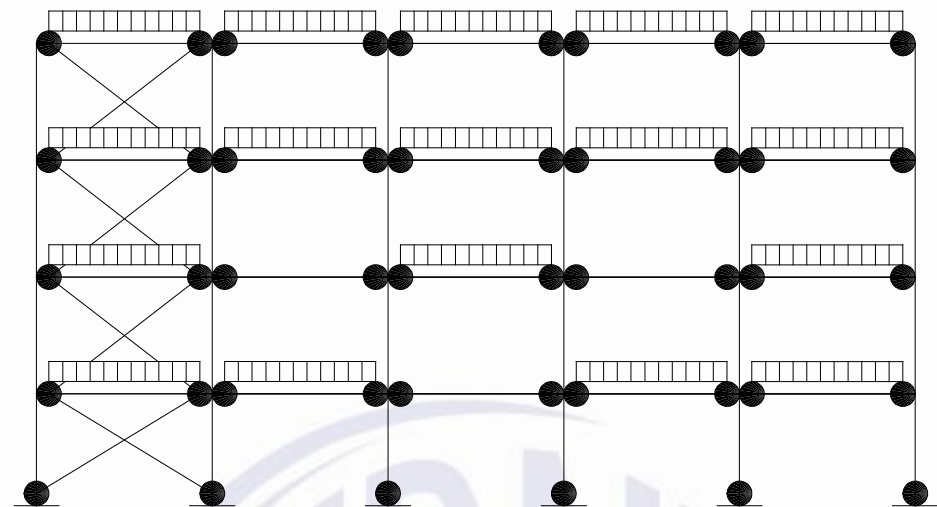
Se a longarina mais baixa estiver próxima do piso, pode ser mais crítico omitir a carga de um único plano no segundo nível e o caso mostrado na Figura 26-c) também deve ser considerado.

**NOTA** Esta análise origina cargas axiais primárias e momentos fletores nas colunas na direção do corredor. A análise de primeira ordem pode ser considerada para o projeto de casos de carregamento parcial, desde que estes resultados sejam combinados com os resultados de uma análise de segunda ordem na condição de totalmente carregado.

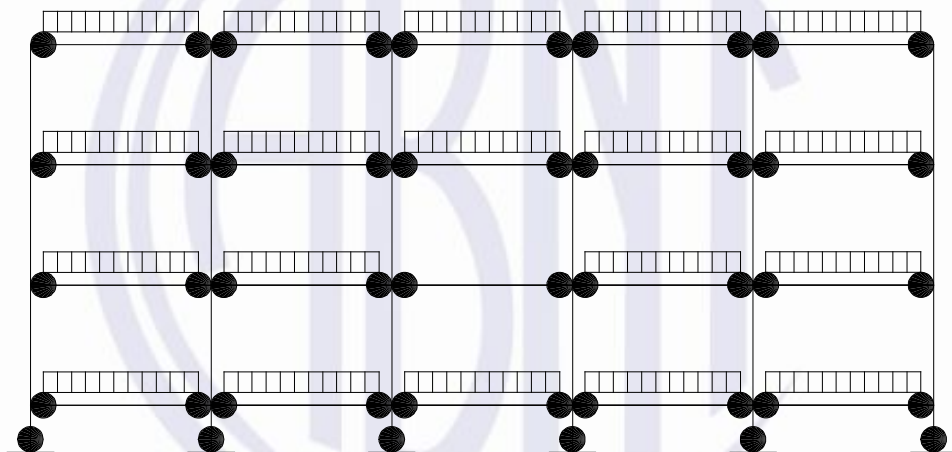


a) Carregamento típico parcial para um porta-paletes sem contraventamento

**Figura 26 – Carregamento típico parcial para análise na direção do corredor (continua)**



b) Carregamento típico parcial para um porta-paletes com contraventamento



c) Carregamento parcial adicional quando a longarina inferior está próxima do piso

**Legenda**

- conexão semirrígida

**Figura 26 (conclusão)**

**10.2.2.3 Combinações de carga para análise na direção transversal ao corredor**

Na direção transversal ao corredor, a estrutura deve ser analisada para as seguintes combinações de cargas:

- a) peso próprio;
- b) carga imposta pelos materiais armazenados;
- c) carga imposta por passarelas e pisos;
- d) carga imposta por equipamentos de movimentação (cargas de posicionamento de acordo com 6.3.3 e 6.3.4);
- e) ações resultantes de imperfeições na direção transversal ao corredor.

NOTA 1 Não há necessidade de considerar o carregamento parcial para estas combinações de carga.

NOTA 2 Cargas devidas a equipamento de movimentação normalmente acontecem horizontalmente na direção transversal ao corredor.

NOTA 3 Esta análise origina momentos fletores na direção transversal ao corredor e cargas axiais secundárias nas colunas.

#### 10.2.2.4 Deslocamento-limite na direção do corredor

Deve-se verificar que, para uma estrutura de altura total  $h$ , a deformação de segunda ordem da estrutura, quando totalmente carregada, com as ações resultantes das imperfeições especificadas em 5.3 (mas não as cargas de posicionamento especificadas em 6.3.4.3), seja inferior ao limite de deformação para o estado limite de serviço especificado em 11.2.

Quando exigido pela classificação de estruturas conforme 10.3.3, a análise deve considerar os efeitos de segunda ordem.

#### 10.2.3 Momento de rotação característico do conector

Em geral, o momento de rotação característico da longarina na ligação com a coluna deve ser determinado como o valor de cálculo da rigidez e o momento resistente por ensaio de acordo com A.2.4.

#### 10.2.4 Momento de rotação característico da ligação com o piso

A rigidez da ligação da coluna com o piso pode ser assumida como uma união articulada.

Para uma extremidade plana da coluna, a rigidez da ligação da coluna com o piso pode ser considerada

$$\frac{EI}{h} \quad (26)$$

onde

$EI$  é a rigidez à flexão da coluna na direção do corredor;

$h$  é a altura até o primeiro nível de longarina com um valor mínimo de 1 m.

O projeto da seção da coluna e da placa-base depende das forças internas da análise global.

Se for utilizado um valor mais elevado da rigidez da ligação da coluna com o piso na análise, este deve ser determinado por ensaio de acordo com A.2.8, com uma carga axial correspondente ao estado-limite último da estrutura a ser projetada.

Como alternativa, pode ser utilizada uma variação mais detalhada da rigidez e resistência com carga axial.

O projeto deve incluir uma verificação que leve em conta a variação da resistência e da rigidez da ligação com o piso sob variações da carga axial.

### 10.3 Análise de porta-paletes com e sem contraventamento na direção do corredor

A estabilidade na direção do corredor deve ser demonstrada por uma análise racional que leve em conta os seguintes fatores:

- efeito desestabilizante das cargas de compressão axial nas colunas (efeitos de segunda ordem);
- momento de rotação característico da ligação da longarina com a coluna;
- momento de rotação característico da ligação da coluna com o piso;



- d) rigidez ao cisalhamento do sistema de contraventamento e suas ligações;
- e) momento de rotação característico das emendas nas colunas;
- f) ações decorrentes de imperfeições na direção do corredor, conforme 5.3.

A rigidez ao cisalhamento do sistema de contraventamento e suas ligações deve ser determinada por um ensaio conforme A.2.9, uma vez que este valor não pode ser calculado.

Os elementos de contraventamento introduzem forças axiais adicionais nas colunas adjacentes que devem ser consideradas no projeto destes membros.

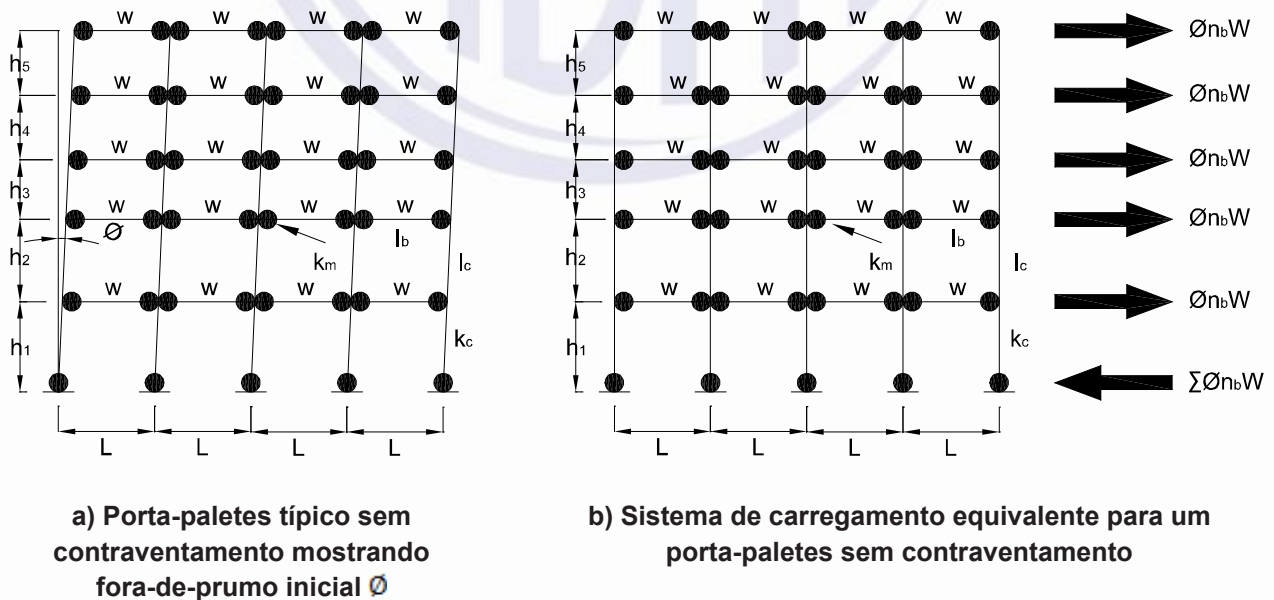
O contraventamento do plano transfere também as cargas horizontais na direção descendente para o plano do contraventamento vertical e, desse modo, introduz força axial adicional nas colunas adjacentes que deve ser considerada no projeto destes elementos.

NOTA 1 Os casos em 10.3 podem ser resolvidos com a inclusão de um plano de contraventamento vertical independente com membros verticais de resistência.

Os porta-paletes podem ser contraventados na direção do corredor através de ligação ao edifício ou outra estrutura resistente. Se este contraventamento for considerado no projeto, a reação do apoio ou apoios deve ser calculada e a estrutura de apoio deve ser concebida em conformidade com estas cargas.

NOTA 2 Se os modelos mostrados nas Figuras 27 e 28 forem usados, os momentos fletores nos conectores das longarinas e nas extremidades das longarinas podem ser corrigidos para definir a espessura final das colunas.

Modelos matemáticos típicos são mostrados nas Figuras 27 e 28.

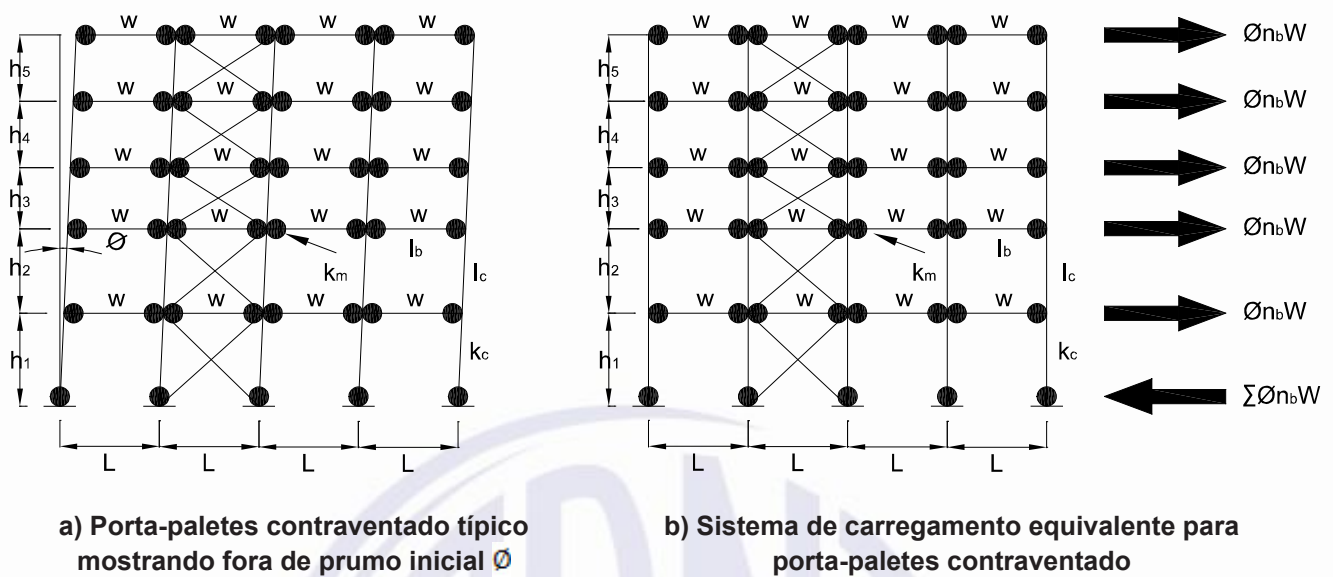


Legenda

- ligação semirrígida

Figura 27 – Modelo estrutural para a estabilidade na direção do corredor de um porta-paletes sem contraventamento





#### Legenda

- ligação semirrígida

**Figura 28 – Modelo estrutural para estabilidade na direção do corredor de um porta-paletes contraventado**

### 10.4 Análise de porta-paletes contraventado e não contraventado na direção transversal ao corredor

#### 10.4.1 Generalidades

A estabilidade na direção transversal ao corredor deve ser demonstrada por uma análise racional que leve em conta os seguintes fatores:

- flexibilidade de cisalhamento do sistema de contraventamento incluindo a flexibilidade das ligações entre as colunas e os elementos de contraventamento. Isto deve ser determinado por ensaio de acordo A.2.9;
- momento de rotação característico das emendas na coluna;
- cargas originadas pelos equipamentos de movimentação;
- momento de rotação característico da ligação da coluna com o piso;
- estabilidade global do contraventamento do montante;
- ações resultantes das imperfeições na direção transversal ao corredor como especificado em 5.3.3.

Pode ser utilizado um momento característico de rotação diferente de zero se for assegurado que o contato total com o piso é mantido.

**NOTA** É usual e seguro considerar uma união articulada entre os montantes e o piso. Um modelo matemático típico é mostrado na Figura 28.

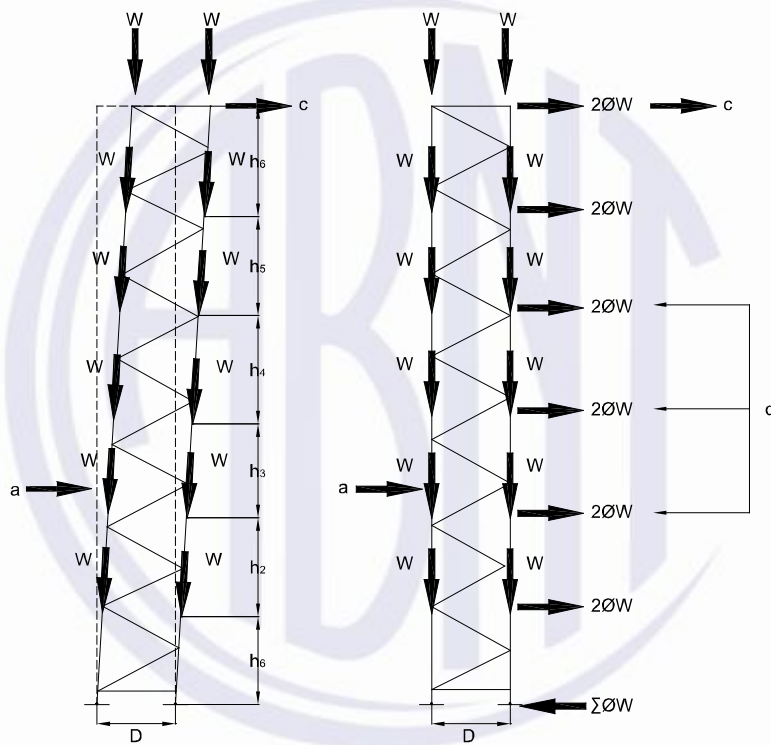
Os porta-paletes podem ser unidos na direção transversal ao corredor no edifício ou outra estrutura consistente. Se isto for considerado no projeto, a carga no apoio ou apoios deve ser calculada e o apoio e a estrutura de apoio projetados de acordo.

10.4.2 Estabilidade fora de plano

Uma carga de compressão desigual nas duas colunas de um montante é causada por:

- a) imperfeição inicial da verticalidade;
- b) carga horizontal imposta;
- c) efeitos de segunda ordem.

A coluna com maior carga deve ser verificada fora do plano (na direção do corredor) quanto à flambagem por flexão e torção. Pode-se supor que esta verificação não é determinante para porta-paletes sem contraventamento.



Legenda

- a carga de posicionamento
- b eixo de centro da coluna bruta
- c carga lateral do equipamento de movimentação
- D largura do montante
- d cargas de imperfeição
- h<sub>1</sub> a h<sub>6</sub> distância entre longarinas
- W carga da longarina
- Ø imperfeição do deslocamento lateral

Figura 29 – Modelo estrutural de montante para a estabilidade na direção transversal ao corredor

NOTA Os elementos de contraventamento interno podem ter rigidez reduzida (ver Anexo G) ou molas em ambas as extremidades.

Nos modelos da Figura 29, as excentricidades de ligação devem atender aos requisitos em 8.6.

## 10.5 Métodos para análise global

### 10.5.1 Efeitos da geometria deformada da estrutura

Os efeitos da geometria deformada (efeitos de segunda ordem) devem ser considerados se aumentarem significativamente os efeitos das ações ou modificarem significativamente o comportamento estrutural.

A classificação da estrutura é embasada na razão da carga elástica crítica para flambagem global em cada direção relevante:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{Vcr}}{F_{VSd}}$$

onde

$\alpha_{cr}$  é o fator pelo qual o carregamento de cálculo deveria ser aumentado para causar instabilidade elástica em um modo global;

$F_{Vcr}$  é a carga crítica de flambagem elástica para um modo de instabilidade global com base na rigidez elástica inicial;

$F_{VSd}$  é o carregamento de cálculo na estrutura.

Métodos para estimar  $V_{cr}$  com precisão suficiente para classificação são fornecidos no Anexo B.

Uma visão geral dos métodos de análise permitidos com base na classificação é fornecida na Tabela 9.

Se  $\alpha_{cr} \geq 10$ , a estrutura pode ser classificada como de pequena deslocabilidade, ou seja, sua resposta às forças horizontais no plano é suficientemente rígida para desprezar quaisquer forças internas adicionais ou momentos decorrentes de deslocamentos horizontais dos nós. Os efeitos de segunda ordem podem ser desprezados. Métodos de análise 0a e 1a podem ser usados (análise linear de primeira ordem).

Se  $3,333 \leq \alpha_{cr} < 10$  efeitos de segunda ordem podem ser tratados indiretamente. Os métodos de análise 0b e 1b podem ser usados.

Se  $\alpha_{cr} < 3,333$ , efeitos de segunda ordem devem ser tratados diretamente na análise. O método de análise 2 deve ser usado.

**NOTA 1** O limite em que uma análise de segunda ordem se torna obrigatória é maior que o limite contido na EN 1993-1-1. Isto ocorre porque as estruturas porta-paletes são produzidas industrialmente com maiores tolerâncias que as da construção civil, possuem ligações semirrígidas e geralmente possuem construção regular. Nestas circunstâncias, a validade entre os métodos exatos e aproximados é muito melhor, portanto, o intervalo de validade de métodos aproximados pode ser aumentado.

**NOTA 2** Porta-paletes não contraventados são geralmente classificados como estruturas de grande deslocabilidade na direção paralela ao corredor e, portanto, requerem consideração de efeitos de segunda ordem.

10.5.2 Método de análise

10.5.2.1 Generalidades

Dependendo da classificação em 10.5.1, um método de análise da Tabela 9 deve ser adotado para análise 2D ou 3D.

Tabela 9 – Métodos de análise

Método de análise		Comportamento do material	Comportamento geométrico	Imperfeições globais de acordo com 5.3.2	Imperfeição local de acordo com EN 1993-1-1/ EN 1993-1-3	Verificação do membro
0a	Aproximado	Linear	Primeira ordem	aplicável	não aplicável	De acordo com 5 e 6
0b			Primeira ordem com amplificação	aplicável	não aplicável	De acordo com 5 e 6
1a	Análise por elementos finitos <sup>a</sup>	Linear	Primeira ordem	aplicável	não aplicável	De acordo com 5 e 6
1b			Primeira ordem com amplificação	aplicável	não aplicável	De acordo com 5 e 6
2a		Linear ou não linear	Segunda ordem	aplicável	não aplicável	De acordo com 5 e 6
2b				aplicável	aplicável	De acordo com 5 e 6, c necessita considerar apenas flambagem por flexo-torção
<sup>a</sup> Sem efeito de empenamento.						

Para cada método de análise, o efeito das imperfeições locais dos contraventamentos deve ser verificado de acordo com 5.3.3.3.

10.5.2.2 Método de análise 0 – Aproximado

O método de análise 0 deve estar de acordo com os Anexos B, C e F, e a verificação dos membros de acordo com a Tabela 9.

10.5.2.3 Método de análise 1 – Análise de elemento finito linear

O método de análise 1 deve estar de acordo com a Seção 10.

10.5.2.4 Método de análise 2 – Análise de elemento finito de segunda ordem

O método de análise 2 deve estar de acordo com a Seção 10.

Uma análise abrangente de uma estrutura completa ou de uma estrutura extensa com um número representativo de módulos, na direção do corredor ou na direção transversal ao corredor, deve ser feita de duas formas.

Para aplicação dos métodos 2a e 2b, usar análise elástica ou elastoplástica de segunda ordem em que os componentes estruturais são representados por membros prismáticos e as uniões têm características de momento de rotação apropriadas.

Há dois tratamentos alternativos da flexibilidade da ligação longarina × coluna:

- 1) As ligações coluna × longarina podem ser modeladas como molas rotativas de rigidez constante. Neste caso, a folga dos conectores coluna × longarina deve ser incorporada nas imperfeições da estrutura de acordo com 5.3.2.
- 2) As ligações coluna × longarina podem ser modeladas como molas rotacionais não lineares. Neste caso, a folga dos conectores coluna × longarina pode ser incorporada na análise global incluindo uma folga inicial apropriada na característica de mola não linear ou deve ser incorporada nas imperfeições da estrutura de acordo com 5.3.2.

Para aplicação dos métodos 0b e 1b, usar uma análise elástica de primeira ordem em que os componentes estruturais são representados por membros prismáticos e as uniões por molas e na qual os efeitos de segunda ordem são tratados indiretamente por um dos seguintes métodos.

- 1) Utilizando os momentos de deslocamento amplificados como descrito no Anexo B, onde os momentos de deslocamento encontrados por uma análise elástica de primeira ordem são majorados multiplicando-os pelo fator  $\beta$ , onde:

$$\beta = \frac{F_{Vcr}}{F_{Vcr} - F_{Vsd}} \quad (27)$$

Quando for utilizado o método dos momentos de deslocamento amplificado, para o projeto dos componentes, deve-se utilizar o modo sem deslocamento para se determinar o comprimento de flambagem no plano.

- 2) O método dado no Anexo C, que usa equações simplificadas pode ser recomendado, como uma versão do método dos momentos de deslocamento amplificado e sujeito aos mesmos requisitos.
- 3) Qualquer outra simplificação racional de efeitos de segunda ordem pode ser usada, desde que o método seja comparado com uma análise de segunda ordem completa e mostrado ser conservador em relação à gama de estruturas para a qual se pretende utilizar.

Se forem utilizados os métodos dos Anexos B ou C e se houver uma emenda abaixo do terceiro nível de longarina, deve-se demonstrar que a emenda não introduz qualquer perda de rigidez ou uma análise completa de segunda ordem deve ser feita levando em conta a flexibilidade da emenda.

**NOTA 1** Caso for comprovado que uma emenda nessa posição tem rigidez rotacional, capacidade de momento e força igual ou maior que a da coluna mais fraca na emenda com coluna de mesmo comprimento, seus efeitos podem ser ignorados na análise global.

**NOTA 2** Os momentos de deslocamento são aqueles associados com a translação horizontal de um nível de plano de carga em relação ao nível do plano abaixo. Eles surgem da carga horizontal e também podem surgir do carregamento vertical se a estrutura ou o carregamento for assimétrico.

**NOTA 3** Se todos os módulos tiverem a mesma configuração de níveis de longarina, pode ser usado um alinhamento menor que cinco módulos ou com o número real.



O método simplificado do Anexo C somente pode ser usado para os arranjos de porta-paletes padronizados que atendam ao seguinte:

- a) comprimento da longarina constante;
- b) altura entre níveis de longarinas aproximadamente constante exceto para o primeiro plano;
- c) a mesma seção transversal de coluna em toda a estrutura;
- d) a mesma seção transversal de longarina em toda a estrutura;
- e) nenhuma alteração dos níveis das longarinas em toda a extensão do porta-paletes;
- f) o mesmo conector de ligação longarina x coluna em todo o porta-paletes.

## 10.6 Método simplificado para análise de estabilidade na direção transversal ao corredor

Podem ser usados os métodos 0b e 1b, baseados no método dos momentos de deslocamento amplificado descrito no Anexo F.

## 10.7 Projeto das colunas

### 10.7.1 Generalidades

Deve-se verificar se, no estado-limite último, as colunas atendem aos requisitos em 9.7 quando submetidas às cargas fornecidas na Seção 6.

### 10.7.2 Forças axiais e momentos fletores de cálculo

As forças axiais e os momentos fletores calculados para o estado-limite último devem ser utilizados diretamente nas equações de interação adequadas indicadas em 9.7.5, mas devem ser levados em consideração quaisquer efeitos fora do plano que decorram do comportamento global da estrutura.

A força axial de cálculo em um membro é a força vertical devida à carga aplicada aumentada por quaisquer efeitos adicionais devido ao deslocamento em ambas as direções, força esta que pode, por sua vez, ser aumentada pela influência de imperfeições, cargas de colocação, efeitos de segunda ordem, etc. (ver 7.1). Esta força axial deve ser combinada com os momentos de flexão de cálculo em ambos os eixos.

O caso crítico de cálculo para uma coluna pode ser complicado pelo fato de que efeitos de segunda ordem em um plano podem ser aumentados por efeitos de segunda ordem no outro plano. Em geral, essa interação não precisa ser levada em conta. Assim, a carga axial de cálculo para uma coluna pode ser aumentada por efeitos de segunda ordem com imperfeições em um plano e efeitos de segunda ordem sem imperfeições no outro plano. Se este cálculo resulta em uma carga axial mais elevada do que a utilizada na análise de segunda ordem relevante, não há necessidade de repetir esta análise.

Em uma estrutura contraventada, as forças axiais e os momentos fletores resultantes de uma análise de primeira ordem no estado-limite último devem ser usados diretamente nas equações de interação. A coluna crítica em estruturas contraventadas é aquela adjacente ao contraventamento.

As forças axiais nas colunas dos módulos contraventados são influenciadas por momentos de tombamento devidos a imperfeições da estrutura etc. Isso aumenta a carga axial em uma coluna e pode originar uma força de tração no pé da outra coluna. Esta força de tração deve ser suportada pelos chumbadores da placa de base.



## 11 Estado-limite de serviço

### 11.1 Generalidades

Uma estrutura de aço deve ser projetada e construída de forma a atender a todos os critérios de serviço relevantes.

Em geral, devem ser consideradas deformações ou deflexões que afetem a aparência ou o uso efetivo da estrutura.

Quando uma análise global plástica for utilizada para o estado-limite último, pode ocorrer redistribuição plástica de forças e momentos no estado-limite de serviço. Quando este for o caso, deve-se verificar se os critérios de estado-limite de serviço permanecem válidos.

### 11.2 Estado-limite de serviço para porta-paletes

As deformações devem ser calculadas considerando as cargas definidas na Seção 6, bem como a carga no estado limite de serviço e os fatores de combinação indicados nos em 5.2.3, 7.3 e 7.4.

Os limites de deformação em relação às condições de operação segura estão indicados na EN 15620.

Na ausência de requisitos específicos, devem ser utilizados os seguintes valores-limite de deformação:

- a) torção máxima na longarina (ver 8.5.6):  $6^\circ$ ;
- b) flecha máxima na longarina:  $vão/200$ ;
- c) deflexão vertical máxima na estrutura de suporte de uma passarela ou piso apoiado na estrutura:  $vão/250$ .

O limite de  $vão/250$  para estruturas que suportam passarelas ou pisos é aplicável a uma carga de  $2,5 \text{ kN/m}^2$  (ver 6.3.6). Se for especificada uma carga maior, pode ser permitido um limite de deformação mais elevado, mas não superior a  $vão/200$ .

## 12 Marcação e identificação

Todas as instalações devem exibir, em um ou mais locais visíveis, um aviso permanente indicando que o porta-paletes foi projetado de acordo com esta Norma e indicando o peso máximo permitido da unidade de carga e a carga máxima admissível no módulo em uma impressão legível e clara. Adicionalmente pode ser informada a carga máxima admissível por plano de carga. Quando a estrutura suporta também pavimentos ou passarelas, as cargas admissíveis (por exemplo, as cargas de armazenamento ou as cargas das rodas do equipamento mecânico de manuseio) devem também ser apresentadas (ver a EN 15635).

## 13 Métodos de ensaio e avaliação dos resultados

### 13.1 Generalidades

Quando os ensaios forem realizados para obtenção de dados de desempenho para utilização no projeto, estes devem estar de acordo com o Anexo A.

As orientações sobre o controle da produção adequados para atender aos requisitos desta Norma estão no Anexo H.

A menos que os requisitos específicos de um ensaio requeiram, qualquer valor de resistência, rigidez ou deformação deve ser obtido de pelo menos três resultados experimentais. Os componentes a serem ensaiados devem ser produzidos como aqueles que são utilizados na montagem da estrutura.

A Tabela 14 apresenta uma visão geral dos ensaios de projeto especificados no Anexo A.

NOTA Os fabricantes podem selecionar tipos de aço que estejam próximos do limite de escoamento nominal.

Tabela 10 – Ensaios para fins de material e projeto

Subseção	Título	Método de ensaio
8.1.4	<b>Ensaios de materiais</b>	A.1
8.1.4.2	Ensaio de tração	A.1.1
8.1.1 (b)	Ensaio de dobramento	A.1.2
–	<b>Ensaios para componentes e uniões</b>	A.2
9.7.2	Ensaio de coluna curta	A.2.1
9.7.2	Ensaio de compressão em colunas	A.2.2 ou A.2.3
10.2.4	Ensaio de flexão em conectores	A.2.4
5.3.2	Ensaio de folga em conectores	A.2.5
6.4.2	Ensaio de cisalhamento em conectores e travas de conectores	A.2.7
9.9	Ensaio de ligação com o piso	A.2.8
10.3.1	Ensaio de rigidez de cisalhamento de montantes	A.2.9
9.7.5	Ensaio de flexão em seções de colunas	A.2.10
9.4.3	Ensaio de flexão em longarinas	A.2.11
9.8	Ensaio em emendas de colunas	A.2.12

13.2 Requisitos para ensaios

13.2.1 Equipamentos

Os ensaios para demonstrar a conformidade do produto acabado devem ser realizados utilizando equipamentos de acordo com os métodos de ensaio desta Norma.

Todo equipamento de pesagem, de medição e de ensaio deve ser calibrado de forma que seja rastreável e documentado.

O fabricante deve assegurar que o manuseio, a conservação e o armazenamento do equipamento de ensaio são adequados para manter a precisão necessária.

Quando a produção for intermitente, o fabricante deve assegurar que qualquer equipamento de ensaio que possa ser afetado pela interrupção seja adequadamente verificado e/ou calibrado antes da utilização.

A calibração de todo equipamento de ensaio deve ser repetida a intervalos regulares ou quando ocorrer qualquer reparo ou falha que possa perturbar a calibração do equipamento de ensaio.

A precisão do equipamento de medição deve ser adequada às grandezas a medir, normalmente maior do que  $\pm 2\%$  do valor a ser medido. Além disso, a grandeza a medir deve ter um valor mínimo de pelo menos 3 vezes a unidade mínima que pode ser mostrada pelo dispositivo de medição.

### 13.2.2 Condições de suporte

As condições de ensaio devem reproduzir as condições normais de suporte que estão presentes na construção real. Se este não for o caso, o projetista deve demonstrar que as condições escolhidas conduzem a resultados conservadores.

### 13.2.3 Aplicação da carga

A carga de ensaio deve ser aplicada de forma que não possa ocorrer qualquer influência anormal ou prevenção de deformações.

### 13.2.4 Incrementos da carga de ensaio

As cargas devem ser aplicadas de forma incremental ou contínua. Quando a carga for aplicada de forma incremental, os quatro primeiros incrementos são incrementos de aproximadamente 5 % da carga de falha esperada, e os incrementos restantes são escolhidos de modo que o comportamento observado esteja claramente definido.

As deformações em pontos críticos da estrutura de ensaio devem ser observadas quando estabilizadas.

Quando a carga for aplicada continuamente, a taxa de carga deve ser lenta o suficiente para assegurar que as condições estáticas prevaleçam. As deformações devem ser observadas em intervalos regulares, e com frequência suficiente para definir claramente o comportamento.

### 13.2.5 Montagem das amostras de ensaio

As amostras de ensaio devem ser montadas de acordo com as instruções de montagem do fabricante.

### 13.2.6 Relatórios dos ensaios

Para cada série de ensaios, deve ser preparada uma documentação que forneça todos os dados pertinentes, para que a série de ensaios possa ser reproduzida com precisão.

Devem ser registrados todos os resultados de inspeções, ensaios ou avaliações que requeiram uma ação devem ser registrados, bem como quaisquer medidas tomadas.

As medidas a serem tomadas quando os valores de controle ou os critérios não forem atendidos devem ser também registrados.

Além dos resultados dos ensaios, devem ser registradas no mínimo as seguintes informações:

- a) data de fabricação;
- b) números de desenho do produto para os componentes em ensaio;
- c) detalhes do processo de produção e montagem;

- d) especificação de materiais para os componentes em ensaio;
- e) data do ensaio;
- f) dimensões reais dos componentes do ensaio;
- g) propriedades materiais reais dos componentes do ensaio;
- h) detalhes do dispositivo de ensaio (dimensões, condições de suporte, ligações etc.);
- i) medições efetuadas durante o ensaio (carga, rotação, deformação etc.);
- j) observações sobre o aparecimento de deformações visíveis (flambagem, rasgamento etc.);
- k) modo de falha;
- l) evidência fotográfica do ensaio em andamento.

### 13.3 Interpretação dos resultados dos ensaios

#### 13.3.1 Definição da carga de falha

Considera-se que o componente de ensaio falhou quando:

- a) as cargas de ensaio aplicadas atingem o seu limite superior;
- b) ocorreram deformações de magnitude que o componente não pode mais realizar a sua função de projeto.

#### 13.3.2 Correção dos resultados dos ensaios

Os resultados iniciais dos ensaios devem ser ajustados de forma a considerar as diferenças entre a espessura real do material utilizado no ensaio e a espessura nominal especificada pelo fabricante, bem como de forma a considerar a diferença entre a tensão residual do material na amostra de ensaio e o valor mínimo assegurado pelo fabricante. A maneira pela qual os ajustes devem ser feitos depende da natureza do ensaio que está sendo feito, e é descrita para cada ensaio em A.2.

Quando as amostras forem preparadas para ensaios de tração para determinar o limite de escoamento do material, estas devem ser cortadas a partir de uma região não danificada da peça de ensaio, afastada das zonas afetadas pelo calor e longe das curvas na seção e de outras áreas onde os efeitos do trabalho a frio podem influenciar o resultado.

NOTA Alternativamente, as peças de ensaio podem ser cortadas da bobina original, antes da formação a frio.

#### 13.3.3 Determinação dos valores característicos

Após os resultados individuais de um grupo de ensaios terem sido corrigidos em função da variação da espessura e do limite de escoamento, o valor característico do parâmetro a medir  $R_k$  deve ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$R_k = R_m - k_s s \quad (28)$$

onde

$R_m$  é o valor médio dos resultados ajustados dos ensaios;

$$R_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ni}$$

$R_{ni}$  é o resultado individual ajustado do ensaio para a espessura e para o limite de escoamento;

$n$  é o número de resultados de ensaios no grupo ( $n \geq 3$ );

$s$  é o desvio-padrão dos resultados ajustados dos ensaios;

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (R_{ni} - R_m)^2}$$

$k_s$  é o coeficiente dado na Tabela 10.

**Tabela 11 – Coeficiente  $k_s$  baseado em fractil 95 % a um nível de confiança de 75 %**

$n$	$k_s$
3	3,37
4	2,63
5	2,33
6	2,18
7	2,08
8	2,00
9	1,95
10	1,92
15	1,82
20	1,76
30	1,73
40	1,71
50	1,69
100	1,68
$\infty$	1,64

### 13.3.4 Valores característicos para uma família de resultados de ensaios

Uma família de ensaios constitui em uma série de ensaios na qual é variado um parâmetro de projeto (por exemplo, vão, espessura etc.). Esta Seção permite que uma família de resultados de ensaio seja tratada como uma única entidade.

Para efetuar a avaliação da resistência característica, deve ser utilizada uma expressão adequada que defina a relação entre os resultados do ensaio e um ou mais parâmetros relevantes da série de ensaios. Esta expressão de projeto pode ser baseada nas equações apropriadas da mecânica estrutural ou em uma base empírica.

A expressão de projeto é considerada como o valor médio dos resultados do ensaio. O desvio-padrão  $s_n$  é calculado para toda a série de ensaios após a primeira normalização dos resultados do ensaio, dividindo cada resultado pelo valor correspondente da expressão de projeto. A resistência característica  $R_k$  para um determinado conjunto de parâmetros dentro de uma família é calculada conforme a seguir:

$$R_k = R_m (1 - k_s s_n) \quad (29)$$

onde

$R_m$  é o valor dado pela expressão de projeto;

$k_s$  é o valor dado na Tabela 10 com  $n$  = número total de ensaios na família;

$s_n$  é o desvio-padrão dos resultados dos ensaios normalizados.

NOTA Quanto mais precisamente a expressão de projeto reflete a força média medida, mais favoráveis os valores resultantes da avaliação. Os coeficientes na expressão de projeto podem ser ajustados para otimizar a correlação.

### 13.3.5 Correções para cargas ou momentos de falha

O procedimento a seguir é adotado, quando especificado no Anexo A, para aplicar uma correção à carga de falha ou momento de falha devido a variações na resistência ao escoamento do material e na espessura da amostra de ensaio.

$$R_{ni} = R_{ti} \left( \frac{f_y}{f_t} \right)^{\alpha_{fy}} \left( \frac{t}{t_t} \right)^{\beta_e} \quad (30)$$

onde

$R_{ni}$  é a carga ou momento de falha corrigido para o número de ensaio ( $i$ );

$R_{ti}$  é a carga ou momento de falha observado para o número de ensaio ( $i$ );

$f_t$  é o limite de escoamento observado para o corpo de prova;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$t_t$  é a espessura observada do corpo de prova;

$t$  é a espessura de projeto;

$\alpha_{fy} = 0$  quando  $f_y \geq f_t$ ;

$\alpha_{fy} = 1,0$  quando  $f_y < f_t$ .

Caso não seja especificado de outra maneira no Anexo A, a seguinte condição é válida:

para  $t \geq t_t$ :  $\beta_e = 0$



$$\text{para } t < t_t: \beta_e = \frac{\frac{b_p}{t}}{k \sqrt{\frac{E}{f_t}}} - 1 \quad \text{mas } 1 \leq \beta \leq 2 \quad (31)$$

onde

$k = 0,64$  para elementos enrijecidos;

$k = 0,21$  para elementos não enrijecidos;

$b_p$  é a largura no plano teórico.



## **Anexo A** (normativo)

### **Métodos de ensaios**

#### **A.1 Ensaios de materiais**

##### **A.1.1 Ensaio de tração**

Os ensaios de tração devem estar em conformidade com a ABNT NBR 6892-1.

Para os ensaios de tração as amostras devem ser retiradas na posição paralela à direção final de laminação, a fim de:

- a) estimar a resistência ao escoamento nominal do material utilizado na produção;
- b) estabelecer a resistência ao escoamento real do material utilizado em uma amostra de ensaio;
- c) corrigir os resultados dos ensaios.

Quaisquer áreas que tenham sido endurecidas por cisalhamento ou prensagem devem ser removidas.

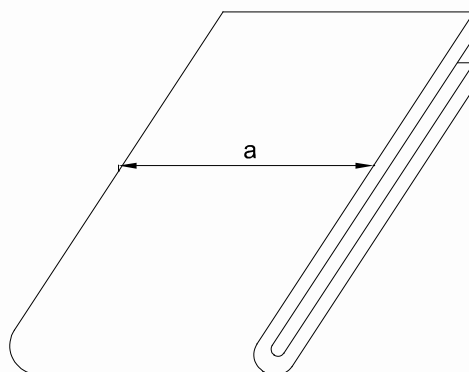
##### **A.1.2 Ensaio de dobramento**

O ensaio de dobramento deve ser efetuado em conformidade com a ABNT NBR ISO 7438.

Este ensaio deve ser concluído quando requerido em 8.1.1-b) ou G.4.

Os ensaios de dobramento devem ser realizados para demonstrar que o material utilizado na produção tem ductilidade adequada. O ensaio deve ser efetuado em corpos de prova colhidos na produção normal e, após a redução a frio se este processo for utilizado para obter propriedades mecânicas aumentadas.

O ensaio de dobramento deve ser efetuado à temperatura ambiente e o corpo de prova retirado na posição transversal à direção final de laminação deve suportar ser dobrado em 180° na direção indicada na Figura A.1, em torno de um diâmetro interno igual ao dobro da espessura do corpo de prova, sem o surgimento de trincas na superfície externa da região dobrada.



### Legenda

a direção final de laminação

**Figura A.1 – Peça de ensaio de dobramento transversal após dobra**

Considera-se que a amostra atende a esta Norma se uma inspeção visual do corpo de prova não identificar trincas na superfície externa da curva de 180° em relação às extremidades. É admissível alguma fissuração local, próxima à curva, mas não estendendo a mais de 1 mm da borda do corpo de prova.

## A.2 Ensaios em componentes e ligações

### A.2.1 Ensaio de compressão em coluna curta

#### A.2.1.1 Princípio

Este método de ensaio consiste na observação da influência de fatores como perfurações e flambagem local na resistência à compressão de uma coluna curta. Este ensaio não pode ser utilizado para observar a influência da flambagem distorcional.

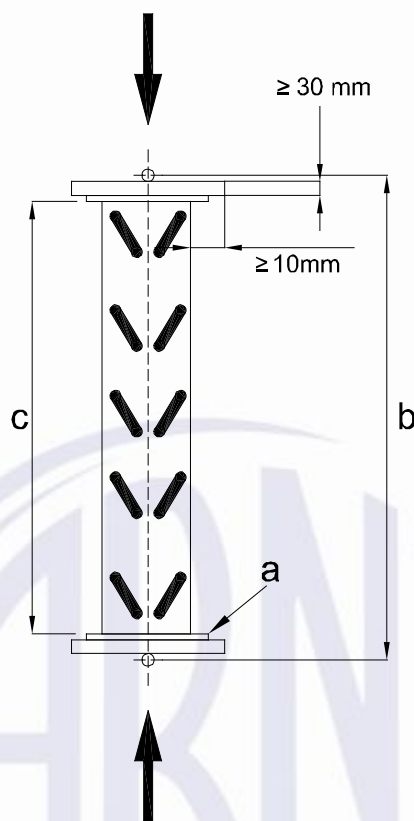
#### A.2.1.2 Disposição e método de ensaio – Alternativa 1

A amostra de ensaio deve ser preparada conforme ilustrado na Figura A.2 e descrito a seguir.

- 1) o comprimento deve ser superior a três vezes a maior largura plana da seção (desconsiderando os enrijecedores intermediários). Deve incluir pelo menos cinco passos das perfurações;
- 2) deve ser cortado perpendicularmente ao eixo longitudinal, a uma distância média entre dois conjuntos de perfurações;
- 3) as chapas de base e de topo devem ser encaixadas ou soldadas em cada extremidade da amostra.

**NOTA** A seção pode ser ajustada quanto ao retorno elástico (distorção da forma da seção transversal após o corte devido a tensões residuais) soldando-se à placa de base.

A carga axial deve ser transmitida às placas de base e de topo através de placas de pressão suficientemente espessas para garantir que suas deformações sob a carga de ensaio não influenciem o resultado. As placas de pressão devem sobressair pelo menos 10 mm além do perímetro da seção transversal da coluna. As placas de base e de topo devem estar posicionadas adequadamente nas placas de pressão em cada extremidade. As placas de pressão devem ter um pequeno alojamento para receber uma esfera de aço, conforme mostrado na Figura A.2.



**Legenda**

- a placa de base e topo
- b comprimento de flambagem
- c comprimento da seção conformada a frio

**Figura A.2 – Arranjo do ensaio de coluna curta**

A posição inicial deve ser o centro de gravidade da seção transversal mínima ou bruta ou em algum ponto entre elas. Em seguida, o corpo de prova deve ser posicionado na máquina de ensaio e carregado axialmente através das esferas de aço em cada extremidade. A posição da esfera em relação à seção transversal deve ser a mesma em ambas as extremidades da coluna, mas pode ser ajustada para dar a carga máxima de falha.

A carga deve ser aumentada até que ocorra algum tipo de instabilidade no corpo de prova e este não aceite mais carga. Esta carga deve ser registrada como a carga máxima de falha. A carga de falha característica deve ser baseada em uma série de ensaios com a mesma posição de carga.

**A.2.1.3 Disposição e método de ensaio – Alternativa 2**

Para a realização deste ensaio, deve-se utilizar uma máquina de ensaio de compressão na qual pelo menos uma das placas de carregamento permita o ajuste rotacional em torno de dois eixos horizontais e que podem ser fixados na posição conforme necessário.

O corpo de prova deve ser montado na máquina de ensaio centralizado pelo centroide de sua seção transversal bruta, com uma placa de carregamento livre para rotacionar, a fim de absorver qualquer falta de alinhamento das placas de extremidade do corpo de prova. Uma pré-carga (por exemplo, 0,5 % da carga de falha esperada) é então aplicada de modo a colocar a placa de carga ajustável

da máquina apenas em contato completo com as placas de extremidade do corpo de prova. O prato ajustável deve então ser fixado na posição.

A preparação do corpo de prova da coluna curta para este método de ensaio é a mesma como indicada em A.2.1.2. Em A.2.1.2-3) não são necessárias perfurações nas placas de pressão.

A carga deve ser aumentada em incrementos até a falha e a carga máxima aplicada deve ser registrada.

#### A.2.1.4 Correção das observações

A carga de falha observada deve ser corrigida considerando a espessura real e o limite de escoamento do corpo de prova de acordo com 13.3.5.

#### A.2.1.5 Expressão dos resultados

O valor característico da carga de falha  $R_k$  deve ser obtido de acordo com 13.3.3, e a área efetiva da seção transversal  $A_{ef}$ , deve ser calculada a partir de:

$$A_{ef} = \frac{R_k}{f_y} \quad (A.1)$$

Se no ensaio de coluna curta o índice de esbeltez máximo da coluna exceder o valor de  $\bar{\lambda} = 0,2$ , a área efetiva pode ser ajustada conforme a seguir.

- a) a capacidade de carga axial mínima  $N_{b,Rd,min}$  devida a flambagem por flexão e flambagem por flexo-torção de acordo com 9.7.4 e 9.7.5 deve ser calculada usando o valor de  $A_{ef}$  obtido a partir dos ensaios de compressão em colunas;
- b) o valor da  $A_{ef}$  deve então ser ajustado para um novo valor calculado por  $N_{b,Rd,min} = R_k/m$ .

Neste processo, se os resultados do ensaio tiverem sido obtidos usando a alternativa 1 (ver A.2.1.2), os comprimentos de flambagem por flexão devem ser tomados iguais à distância “ $b$ ”, entre as esferas de aço e o comprimento de flambagem à torção deve ser igual à metade do comprimento do perfil formado a frio do corpo de prova. Quando tiver sido utilizada a alternativa 2 (ver A.2.1.3), os comprimentos de flambagem por flexão e torção devem ser iguais à metade do comprimento  $c$  do perfil formado a frio do corpo de prova (ver Figura A.2).

### A.2.2 Ensaio de compressão em colunas – Verificação dos efeitos da flambagem distorcional

#### A.2.2.1 Princípio

Este método de ensaio consiste na determinação da influência do modo de flambagem distorcional na capacidade de carga axial da coluna. O resultado do ensaio fornece um meio de corrigir a capacidade de carga axial teórica determinada de acordo com 9.7.2.

**NOTA** Se os ensaios de compressão das colunas contidos no Anexo forem realizados em toda a gama de comprimentos de colunas, os efeitos da flambagem distorcional estão incluídos nas curvas de flambagem, de modo que os ensaios de A.2.2 não precisam ser realizados.

### A.2.2.2 Disposição e procedimento

Pelo menos três ensaios devem ser realizados em colunas individuais com placas de topo conforme A.2.1.2. As colunas devem ter um comprimento conforme 9.7.2-c). O ensaio também pode ser feito em um montante com um único passo de contraventamento como parte de uma série de ensaios feitos para determinar a curva de flambagem da coluna, conforme A.2.3.

Se uma torção significativa for observada nas extremidades da amostra, as extremidades devem ser contidas para resistir a esta torção; esta restrição não pode oferecer nenhum impedimento adicional à distorção da seção.

O corpo de prova deve ser colocado na máquina de ensaio e carregado axialmente através da esfera de aço em cada extremidade. A posição da esfera de aço em relação à seção transversal deve ser a mesma em ambas as extremidades da coluna, mas pode ser corrigida para a posição que forneça a máxima carga de falha.

### A.2.2.3 Determinação dos resultados dos ensaios

Os resultados destes ensaios devem ser corrigidos para o limite de escoamento e espessura de acordo com A.2.3.4.

O valor característico da carga de falha,  $R_k$ , deve então ser obtido como descrito em 13.3.3 e a resistência de cálculo correspondente  $N_{db}$ ,  $R_d$  deve ser calculada. Este valor de ensaio é usado em 9.7.2, para verificar o efeito da flambagem distorcional.

## A.2.3 Ensaio de compressão em colunas – Determinação da curva de flambagem

### A.2.3.1 Princípio

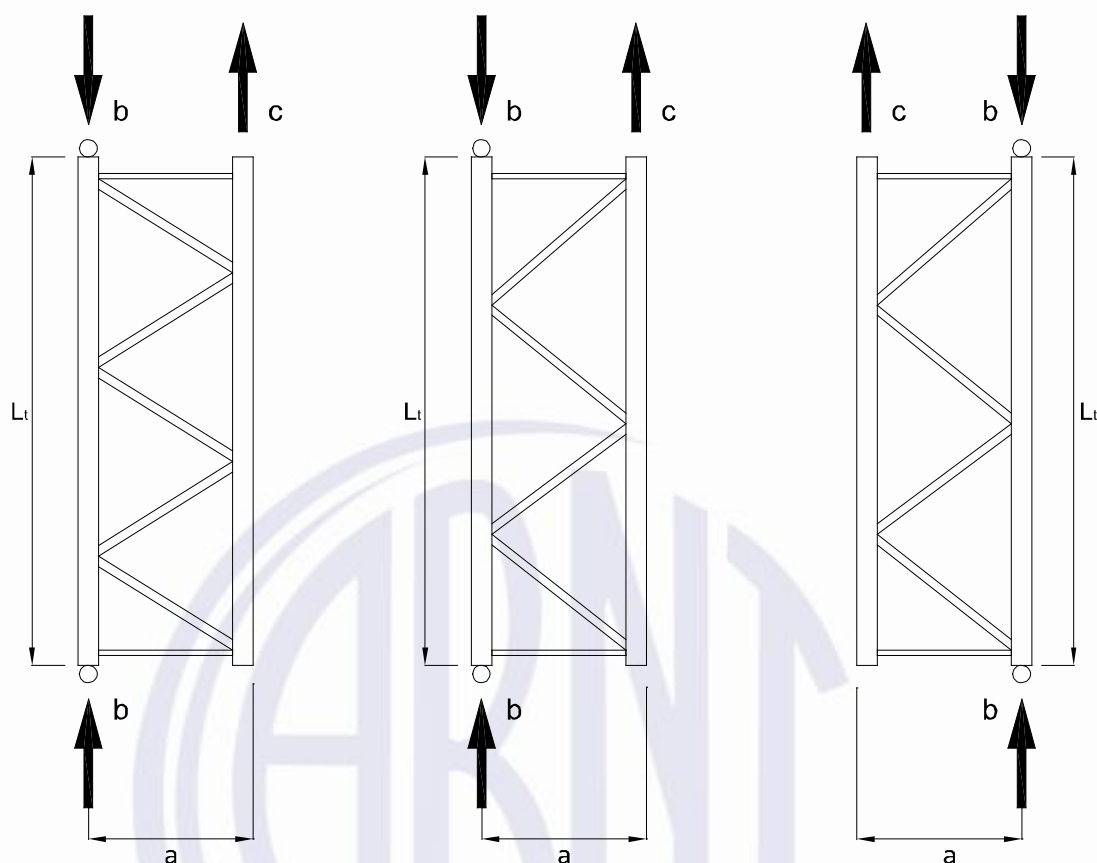
Este método de ensaio consiste na determinação da capacidade de carga axial da seção da coluna para uma gama de comprimentos efetivos na direção longitudinal ao corredor, considerando todos os efeitos de flambagem e a restrição proporcionada pelo contraventamento, seu espaçamento entre nós e sua conexão às colunas.

**NOTA** Os resultados do ensaio de compressão em colunas fornecem uma curva de coluna que é uma combinação do fator de redução por flambagem  $\chi$  e o índice de esbeltez  $\bar{\lambda}$ . O valor de  $\bar{\lambda}$  é obtido a partir da esbeltez correspondente ao modo de flambagem fora do plano =  $(L/r)$ , mesmo quando o modo de falha é um modo de flambagem distorcional, por flexo-torção ou no plano. O objetivo deste ensaio é permitir que a curva da coluna seja usada no projeto relacionando as cargas de flambagem com os comprimentos de flambagem somente na direção do corredor. Pode-se notar que é conservador não considerar os efeitos de restrição dos conectores nas extremidades da longarina.

### A.2.3.2 Disposição do ensaio

O arranjo do ensaio compreende uma estrutura montada com a máxima largura especificada para o produto, em que uma das duas colunas é carregada axialmente, como mostrado na Figura A.3. O padrão, as seções e as ligações do contraventamento devem ser os componentes utilizados na aplicação específica para as curvas de flambagem. O montante deve ser carregado através de esferas de aço e equipado com placas de base e topo, conforme A.2.1.2.





### Legenda

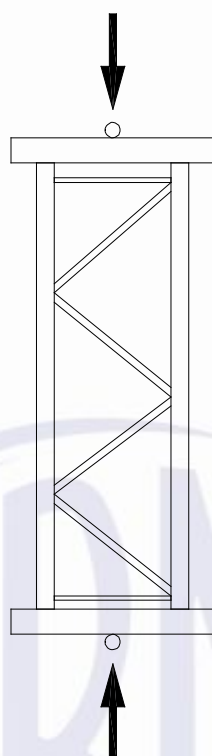
- a largura do montante
- b carga
- c peso da estrutura suportado independentemente
- $L_t$  comprimento de flambagem

**Figura A.3 – Arranjo alternativo para ensaio de compressão em colunas**

Alguns padrões de contraventamento, conforme Figura A.3-a), têm nós que não estão dispostos simetricamente sobre o eixo longitudinal do montante. Nestes casos, devem ser feitos ensaios-pilotos em cada coluna, conforme mostrado na Figuras A.3, para verificar a configuração mais fraca. A configuração mais fraca deve ser ensaiada para determinar a resistência à compressão.

Alternativamente, um conjunto de montante completo pode ser ensaiado à compressão na disposição mostrada na Figura A.4. Neste ensaio, os suportes de distribuição podem ser restringidos contra a rotação em torno do eixo longitudinal.

Quando um montante particular puder ser usado com diferentes tamanhos do painel de contraventamento ou diferentes profundidades do montante, cada combinação de tamanho e largura deve ser ensaiada separadamente ou os resultados para a estrutura com maior altura e profundidade do montante devem ser usados para todos os montantes.



**Figura A.4 – Arranjo alternativo para ensaio de compressão em colunas**

#### **A.2.3.3 Procedimento**

O montante deve ser ensaiado em uma faixa de comprimentos, o menor dos quais deve permitir apenas um único passo de contraventamento.

O comprimento mais longo deve corresponder a um índice de esbeltez não dimensional de aproximadamente 1,5 para a flambagem na direção longitudinal ao corredor e pelo menos três outros comprimentos de ensaio devem ser escolhidos com intervalos aproximadamente iguais entre estes dois extremos. Devem ser realizados cinco ensaios, divididos igualmente entre os comprimentos ensaiados; no entanto, um mínimo de dois ensaios em cada comprimento deve ser realizado.

Durante o ensaio, a carga deve ser aumentada até a falha e o modo de falha deve ser observado.

#### A.2.3.4 Correções das observações

As correções para cada valor observado da carga de falha devem ser feitas de acordo com 13.3.5 e devem ser consideradas a espessura real e a resistência ao escoamento da amostra de ensaio, conforme as seguintes equações:

$$R_{ni} = R_{ti} (C)^{\alpha} \left( \frac{t}{t_t} \right)^{\beta} \quad (\text{A.2})$$

onde

$$\begin{aligned} 0 \leq \bar{\lambda} \leq 0,2; \quad C &= \left( \frac{f_y}{f_t} \right) \\ 0,2 \leq \bar{\lambda} \leq 1,5; \quad C &= \frac{\bar{\lambda} - 0,2 + \frac{f_y}{f_t} (1,5 - \bar{\lambda})}{1,3} \\ 1,5 \leq \bar{\lambda}; \quad C &= 1,0 \\ \bar{\lambda} &= \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

onde

$\lambda$  é o Índice de esbeltez correspondente ao modo de falha observado.

$R_{ni}$ ,  $R_{ti}$ ,  $f_t$ ,  $f_y$ ,  $t_t$ ,  $t$  e são definidos em 13.3.5.

#### A.2.3.5 Obtenção da curva da coluna

Todos os resultados do ensaio de compressão devem ser considerados para obtenção da curva da coluna. Deve-se proceder conforme a seguir:

- a) para cada ensaio, os valores do fator de redução do esforço  $\chi_{ni}$  e o índice de esbeltez não dimensional  $\lambda_{ni}$  devem ser computados, de acordo com as seguintes equações:

$$\chi_{ni} = \frac{R_{ni}}{A_{ef} f_y} \quad (\text{A.4})$$

e

$$\bar{\lambda}_{ni} = \frac{\lambda_{ni}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_1} \quad (\text{A.5})$$

onde

$R_{ni}$  é a carga de falha ajustada para o ensaio número 1;

$f_y$  é a resistência ao escoamento nominal;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}};$$

$\lambda_{ni}$  é o índice de esbeltez para a flambagem por flexão sobre o eixo principal;

$$\beta_1 = \frac{A_{ef}}{A_g}.$$

- b) um gráfico de  $\chi_{ni}$  versus  $\bar{\lambda}_{ni}$  deve ser traçado;
- c) uma equação adequada deve ser escolhida para  $\chi_{ni}$  ( $= \chi_{cu}(\bar{\lambda}_{ni})$ ) para representar o lugar dos valores médios dos resultados do ensaio  $\chi_{ni}$ . Esta equação não pode ter mais de cinco coeficientes independentes. Isso pode ser feito usando um processo de ajuste de curva de mínimos quadrados ou desenhando uma curva suave de maior ajuste, manualmente;
- d) os valores individuais de  $\chi_{ni}$ , devem ser determinados dividindo cada um pelo valor médio correspondente,  $\chi_{cu}$ . O desvio-padrão,  $s$ , desses valores determinados pode então ser calculado;
- e) o valor característico do fator de redução da tensão,  $\chi$ , deve ser determinado usando:

$$\chi = \chi_{cu} (1 - k_s s) \quad (\text{A.6})$$

onde

$k_s$  é dado na Tabela 12 baseado no número total de resultados de ensaios.

Esta curva de coluna é válida no intervalo de comprimentos ensaiados de colunas. Para os comprimentos de coluna fora do intervalo ensaiado, a verificação da flambagem distorcional descrita em A.2.2 deve ser realizada com os resultados dos ensaios dos montantes de passo único de contraventamento. Em seguida, deve-se calcular o fator de redução de tensão de acordo com 9.7.4 e 9.7.5.

## A.2.4 Ensaios de flexão em conectores de extremidade de longarinas

### A.2.4.1 Princípio

Este método consiste na determinação da rigidez e da resistência à flexão do conector da extremidade da longarina. O comportamento estrutural do conjunto do conector da extremidade da longarina e coluna é crítico para o comportamento da estrutura completa e é influenciado por uma grande quantidade de fatores, conforme a seguir:

- a) o tipo da coluna;
- b) a espessura da chapa da coluna;
- c) o tipo da longarina;
- d) a posição da longarina no conector;
- e) o método de conexão da longarina ao conector;
- f) o tipo de encaixe;
- g) as propriedades dos materiais usados.

Todas as combinações desses fatores, que ocorrem no projeto do sistema estrutural, devem ser ensaiadas separadamente, exceto quando razoavelmente demonstrado que a interpolação de resultados fornece uma estimativa conservadora do desempenho.

Para cada montagem de coluna e conector, deve ser feito um mínimo de três ensaios nominalmente idênticos para que os resultados possam ser interpretados de forma estatística de acordo com 13.3.3.

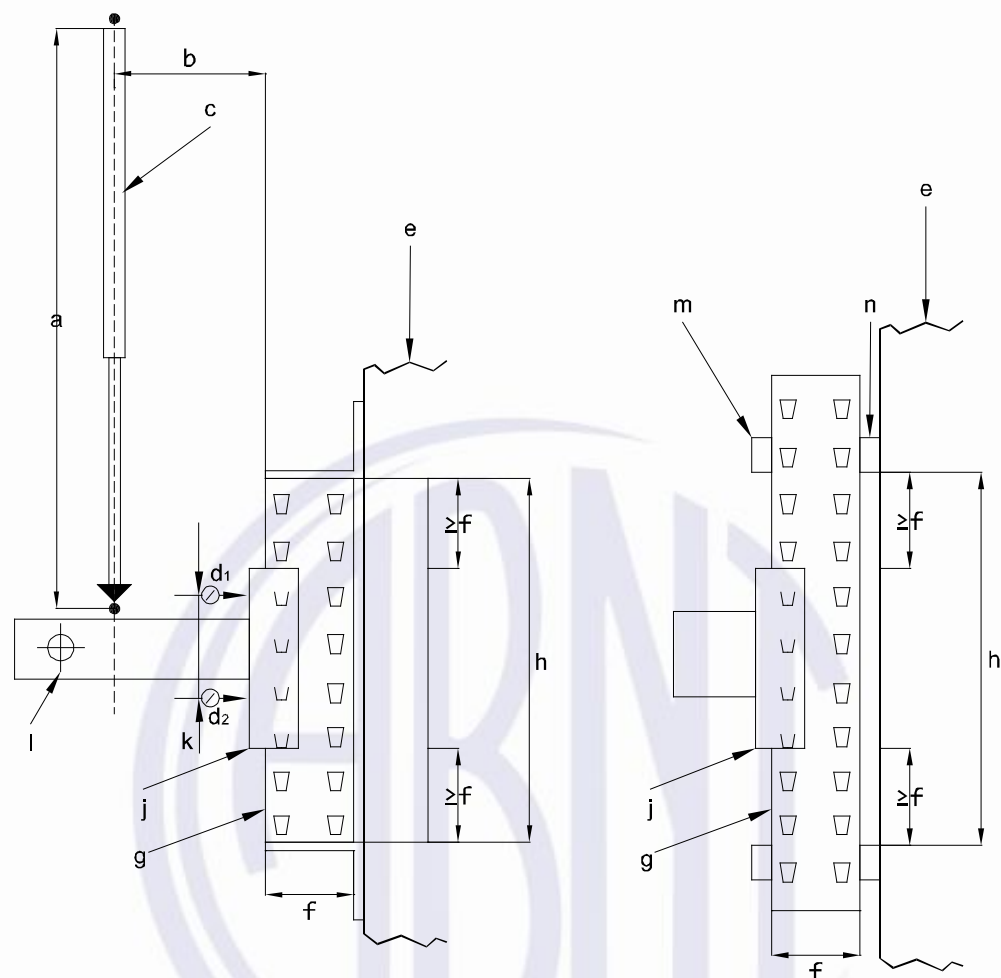
Alternativamente, um grupo de ensaios em que apenas parâmetros significativos são variados, como a altura da longarina, a espessura da coluna etc. podem ser ensaiados e tratados como uma única entidade para o propósito de seu tratamento estatístico conforme estabelecido em 13.3.4. O grupo deve consistir em pelo menos dez ensaios.

Em um grande grupo de colunas, conectores e longarinas, certas combinações de coluna, longarina e conector podem ser omitidas a critério do projetista, onde os resultados podem ser obtidos de forma confiável por interpolação.

#### A.2.4.2 Disposição de ensaio

O arranjo do ensaio deve ser conforme a seguir:

- a) um comprimento curto de coluna deve ser conectado a uma estrutura de ensaio relativamente rígida em dois pontos com uma distância  $g$  entre eles, onde:
  - $h \geq$  altura do conector da longarina + 2 vezes a largura da face da coluna;
  - ao longo desta distância não pode haver contato durante o ensaio entre a coluna e a estrutura rígida. Um curto comprimento de longarina deve ser conectado à coluna por meio do conector a ser ensaiado, e a trava deve estar no lugar. Exemplos típicos de arranjos de ensaio adequados são mostrados na Figura A.5.
- b) o movimento lateral e a torção na extremidade da longarina devem ser evitados por uma contenção lateral que, no entanto, permite que o componente da longarina se mova livremente na direção da carga. Alternativamente, um par de conectores podem ser ensaiados em paralelo;
- c) a carga deve ser aplicada a 400 mm da face da coluna por um atuador de pelo menos 750 mm de comprimento entre as extremidades fixadas, conforme Figura A.5;
- d) a rotação deve ser medida por um dos seguintes procedimentos:
  - 1) transdutores de deslocamento que rodam sobre uma placa fixada à longarina perto do conector, mas com espaço suficiente para permitir a distorção do conector (calibradores  $d_1$  e  $d_2$  na Figura A.5);
  - 2) um inclinômetro conectado à longarina próximo ao conector.



**Legenda**

- a  $\geq 750$  mm
- b 400 mm
- c atuador
- d dispositivos de medição
- e estrutura da plataforma de ensaio
- f largura da face da coluna
- g coluna curta
- h comprimento da amostra de ensaio
- j conector
- k espaçamento de dispositivos de medição
- l restrição lateral que permite o deslocamento vertical
- m grampo
- n bloco espaçador

NOTA São indicados métodos alternativos de suporte ao retângulo.

**Figura A.5 – Arranjo para o ensaio de flexão do conector**



### A.2.4.3 Procedimento

A disposição do ensaio indicado na Figura A.5 carrega o conector verticalmente para baixo. São obtidos valores separados para rigidez e resistência para os conectores da direita e esquerda, bem como o valor médio a ser utilizado no projeto.

Uma carga inicial  $F$ , igual a 10 % da carga de falha estimada, pode ser aplicada ao conjunto e, em seguida, removida como pré-carga para acomodar os componentes. Os instrumentos de medição devem então ser reiniciados, e a carga  $F$ , deve ser aumentada gradualmente até a carga máxima ser atingida e a conexão falhar. A rotação da conexão deve ser observada e, para cada ensaio, deve ser traçado um gráfico do momento  $M$  e a rotação  $\theta$ , no qual:

$$M = a F \quad (\text{A.7})$$

e

$$\theta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{d} \quad (\text{A.8})$$

onde

$a$  é o braço de alavanca para a carga  $F$ ;

$d$  é a distância entre os medidores  $d_1$  e  $d_2$ , conforme a Figura A.5;

$\delta_1$  é a deflexão medida pelo medidor  $d_1$ ;

$\delta_2$  é a deflexão medida pelo medidor  $d_2$ .

### A.2.4.4 Correção das observações

É necessário determinar a resistência ao escoamento e a espessura dos materiais da longarina, da coluna e do conector e calcular o fator de correção  $C_m$ , conforme equação a seguir:

$$C_m = ((f_y / f_t)^\alpha (t / t_t))_{\max} \text{ mas } C_m \leq 1,0 \quad (\text{A.9})$$

onde

$f_t$  é a resistência ao escoamento observado para o componente em questão;

$f_y$  é a resistência ao escoamento nominal para o componente em questão;

$t_t$  é a espessura medida do componente em questão;

$t$  é a espessura de cálculo do componente relevante;

$\alpha = 0$  quando  $f_y \geq f_t$ ;

$\alpha = 1,0$  quando  $f_y < f_t$ .

Desde que a longarina não falhe ou o limite de resistência da longarina seja superior a 1,25 vez a resistência admissível, o componente relevante é o conector ou a região da ligação na coluna ou os dois, o qual fornecer a maior correção aos valores de ensaio, independentemente de qual componente foi observado falhar. Se a longarina falhar, a correção relacionada aos materiais da longarina também deve ser considerada.

NOTA Correções de 15 % e abaixo podem ser desconsideradas.

Para fazer correções nas observações, a curva momento  $\times$  rotação ( $M_t-\theta$ ) para cada ensaio deve ser separada em dois componentes, um para representar as deformações elásticas e o outro as deformações inelásticas da conexão.

O procedimento deve ser conforme a seguir:

- 1) traçar os resultados do ensaio não ajustados como curva de momento  $\times$  rotação ( $M_t-\theta_t$ );
- 2) medir a inclinação desta curva, ( $k_0$ ) na origem;
- 3) das rotações observadas,  $\theta_t$ , subtrair as rotações elásticas  $M_t/k_0$  para obter as rotações plásticas  $\theta_p$ ;
- 4) calcular os momentos corrigidos  $M_n$ , utilizando a seguinte equação:

$$M_n = M_t \times C$$

onde

$$C = 0,15 + C_m \text{ e } C \text{ é inferior ou igual a } 1,0.$$

- 5) adicionar novamente as rotações elásticas, com a razão  $M_n/k_0$ , para gerar novas rotações conforme  $\theta_n = \theta_p + M_n/k_0$ ;
- 6) traçar a curva de momento  $\times$  rotação ajustada ( $M_n - \theta_n$ ).

NOTA A curva de momento  $\times$  rotação ajustada tem a mesma inclinação inicial  $k_0$  como a curva original observada.

Uma equação pode ser usada para representar a curva traçada do momento como uma função da rotação. Esta equação não pode ter mais de 5 coeficientes independentes. Isso pode ser conseguido usando um processo de ajuste de curva de mínimos quadrados.

#### A.2.4.5 Correção dos resultados e procedimento para determinar curvas

##### A.2.4.5.1 Generalidades

O momento de falha,  $M_{ni}$ , deve ser considerado o momento máximo corrigido, conforme indicado na Figura A.6.

Para cada montagem de coluna e conector, o momento de falha característico  $M_k$  deve ser calculado de acordo com 13.3.3. O momento resistente de cálculo para a conexão é então  $M_{Rd}$ , onde

$$M_{Rd} = \eta \frac{M_k}{\gamma_m} \quad (\text{A.10})$$

onde

$\gamma_m$  é o coeficiente de ponderação parcial para ligações, especificado em 7.5;

$\eta$  é o fator de redução de momento variável selecionado pelo projetista  $\leq 1$ .

NOTA Qualquer valor do momento de cálculo pode ser escolhido menor ou igual ao máximo permitido para otimizar os requisitos possivelmente conflitantes de rigidez e resistência. Assim, ao reduzir a resistência de cálculo, uma maior rigidez de cálculo pode ser alcançada.

#### A.2.4.5.2 Procedimento para determinar uma curva bi linear

A relação momento e rotação bi linear consiste na rigidez rotacional linear juntamente com uma resistência de cálculo escolhida conforme indicada na Equação (A.10).

A rigidez rotacional do conector deve ser obtida pela inclinação  $k_{ni}$  de uma reta que passa através da origem e que divide áreas iguais entre ela e a curva experimental, até o limite do momento de cálculo corrigido pela resistência ao escoamento e a espessura,  $M_{Rd,c}$ , como mostrado na Figura A.6, conforme equação a seguir:

$$k_{ni} \leq 1,15 \frac{M_{Rd}}{\theta_{ki}} \quad (\text{A.11})$$

NOTA A condição em A.2.4.5.2 se destina a limitar a diferença entre a rotação na falha assumida no modelo e a indicada pelo ensaio, a 15 % nos casos em que o conector se comporta de forma não linear.

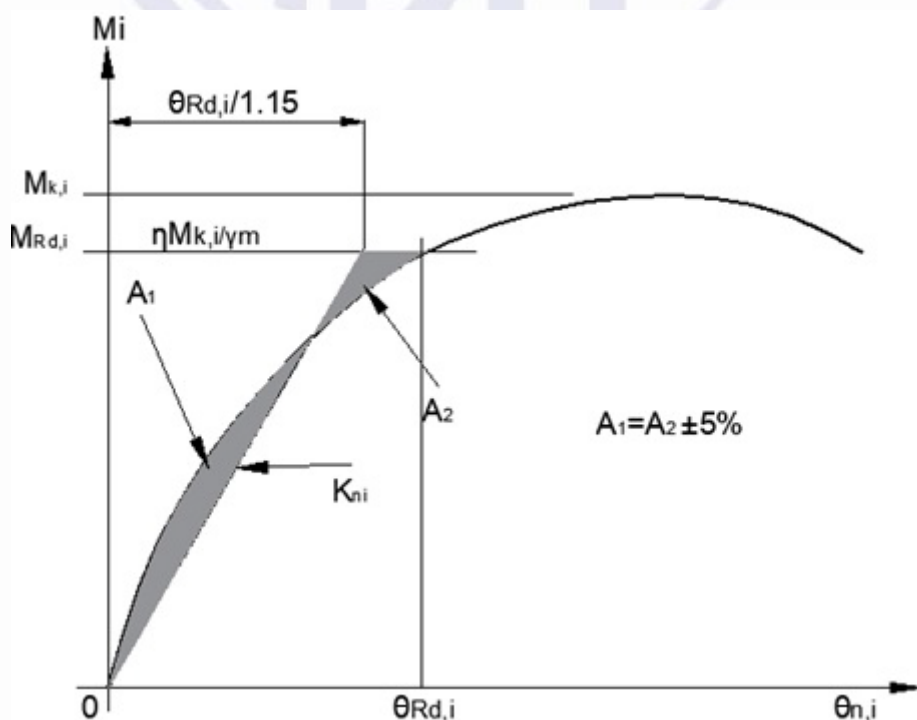


Figura A.6 – Obtenção da rigidez do conector

O valor de cálculo,  $k_d$ , da rigidez do conector deve ser calculada como o valor médio,  $k_m$ , conforme equação a seguir.

$$k_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{ni} \tag{A.12}$$

**A.2.4.5.3 Procedimento para determinar uma curva multilinear**

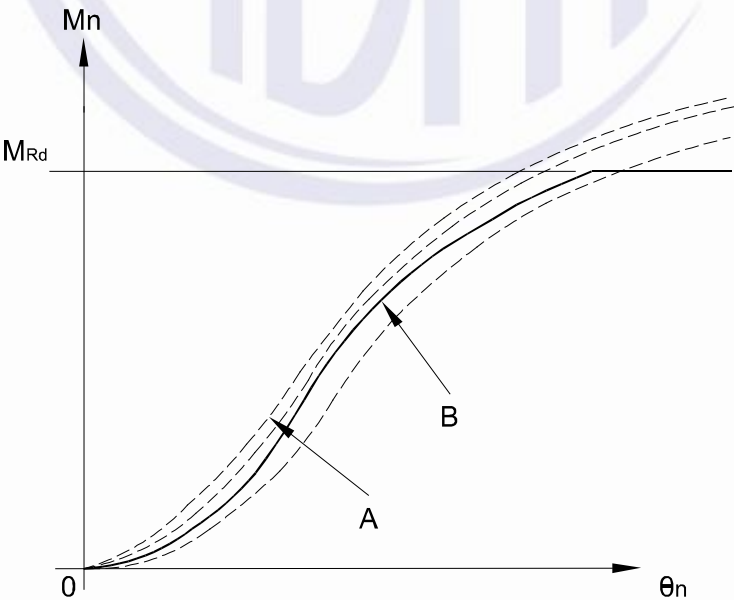
Para uma curva multilinear momento  $\times$  rotação, o primeiro passo é obter uma curva média dos resultados dos ensaios da combinação longarina e conector. Conforme A.2.4.3, os resultados para os conectores da direita e esquerda podem ser considerados em conjunto.

A curva média deve ser obtida ao traçar o valor médio da rotação em cada incremento de momento, aumentando até o valor do momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  usando as curvas momento  $\times$  rotação após a correção de acordo com o A.2.4.4.

Isso produz uma única curva para o tipo de conexão, relacionando momento e rotação, conforme mostrado pela linha cheia na Figura A.7.

Se a folga for omitida no cálculo das imperfeições da estrutura em 5.3.2, a folga medida de acordo com A.2.5 deve ser adicionada à curva média de momento  $\times$  rotação, obtida conforme mencionado nesta subseção, como uma linha horizontal ou quase horizontal.

A curva multilinear pode ser obtida substituindo a curva média por uma série de linhas retas que sempre devem estar abaixo dessa, conforme ilustrado na Figura A.8. Pode-se assumir que as características de momento  $\times$  rotação também são válidas para rotações negativas.



**Legenda**

- A série de curvas experimentais (corrigidas)
- B curva média obtida

**Figura A.7 – Determinação da curva média de rotação  $\times$  momento**

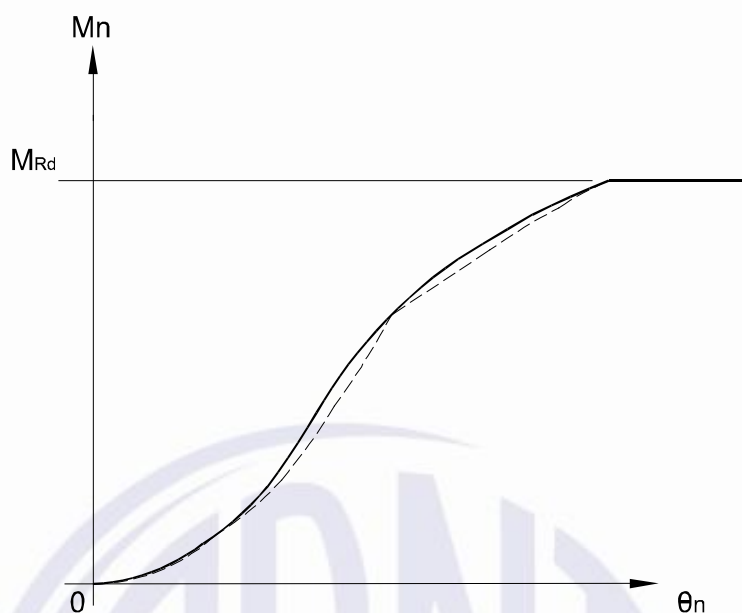


Figura A.8 – Linearização típica da curva média

## A.2.5 Ensaios de folga em conectores

### A.2.5.1 Princípio

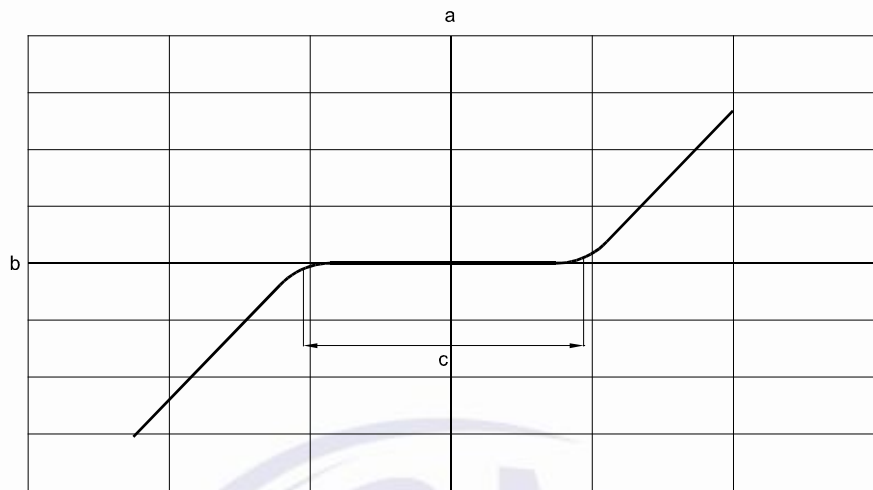
Este método de ensaio consiste na obtenção de um valor da folga da conexão,  $\delta_{ij}$  para uso nos cálculos de projeto conforme 5.3.2.

### A.2.5.2 Disposição do ensaio

Deve ser utilizada a mesma disposição de ensaio que o utilizado para a medição da resistência e rigidez do conector e especificado em A.2.4, exceto que o atuador de carga deve ser de dupla ação e capaz de aplicar a carga na direção inversa ou contrabalançar com contrapesos que devem ser usados para obter o mesmo efeito. O conector não pode desengatar da coluna durante o processo de reversão da carga. Qualquer medida escolhida para assegurar que isso não ocorra não pode influenciar o comportamento da folga.

### A.2.5.3 Procedimento

A carga  $F$  deve ser aumentada lentamente até o momento no conector ( $= 0,4 F$ ) atingir um valor igual a pelo menos 10 % do momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  especificado em A.2.4. As deflexões devem ser observadas. A carga deve então ser reduzida e, em seguida, invertida até que um momento negativo de pelo menos 10 % de  $M_{Rd}$  tenha sido aplicado. A carga deve então ser removida. A Figura A.9 mostra um resultado típico desse ensaio.



**Legenda**

- a momento em kNm
- b rotação em radianos
- c duas vezes o valor da folga do conector

**Figura A.9 – Resultado típico do ensaio**

A folga deve ser medida extrapolando as partes lineares das curvas de momento *versus* rotação em direção à origem até cruzarem o eixo de rotação, conforme mostrado na Figura A.9. A diferença entre os dois pontos de interseção obtidos é igual a duas vezes a folga do conector.

**A.2.5.4 Correções das observações**

Não é necessário fazer correções nas observações para considerar as variações de espessura ou de resistência ao escoamento.

**A.2.5.5 Expressão dos resultados**

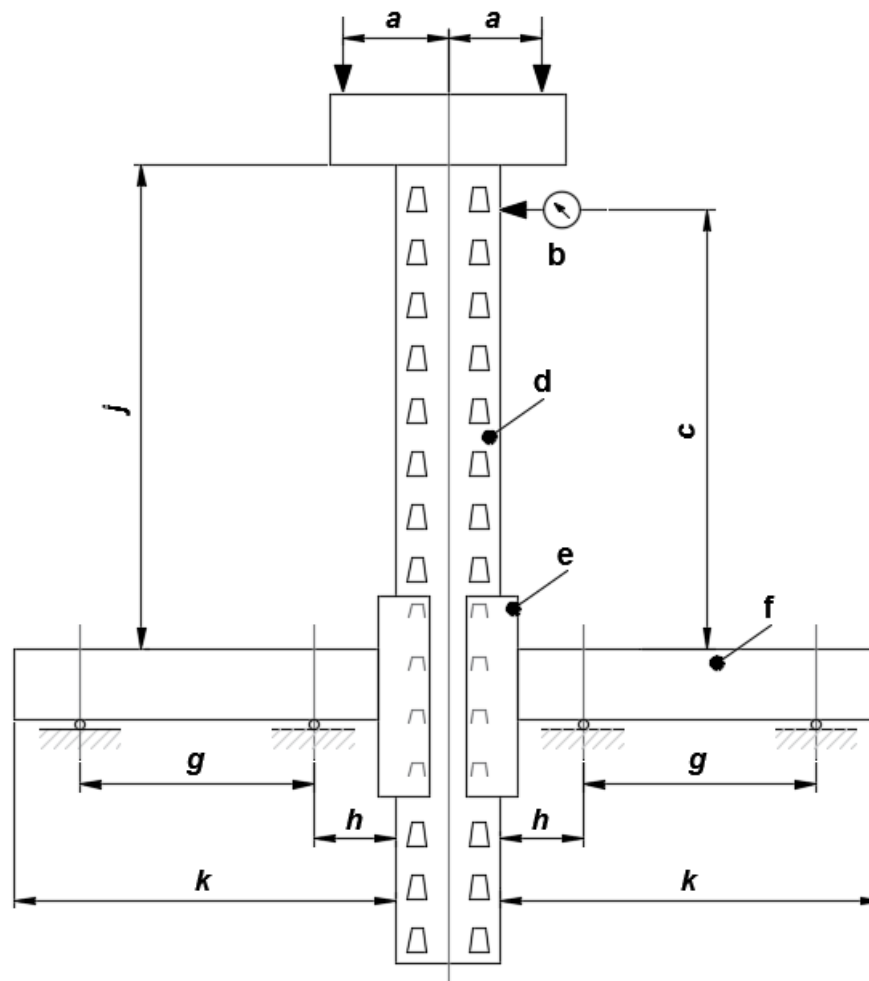
A folga deve ser considerada como o valor médio de  $\varnothing_{I,CL}$  de pelo menos três resultados de ensaio  $\varnothing_{I,CLi}$ .

**A.2.6 Alternativa “B”: uso de duas longarinas em balanço e uma coluna central**

**A.2.6.1 Disposição do ensaio**

Este método de ensaio utiliza um segmento de coluna no centro com duas longarinas em balanço. No corpo de prova, as longarinas, de comprimento não inferior a 600 mm, devem ser fixadas pelo conector em ambos os lados da coluna, que deve ter um comprimento superior a 750 mm (ver Figura A.10). As longarinas devem ser fixadas de forma imóvel a suportes rígidos em dois pontos, um a 50 mm do conector e o outro a 450 mm. Estas fixações não podem interferir com possíveis movimentos e rotações da coluna em relação às longarinas. Um membro de comprimento não inferior a 500 mm deve ser fixado na extremidade superior da coluna, paralela à direção das longarinas.





### Legenda

- a 250 mm
- b transdutor ou outro dispositivo de medição adequado
- c 600 mm
- d coluna invertida
- e conector
- f longarina
- g 400 mm
- h 50 mm
- j 750 mm
- k 600 mm (mín.)

**Figura A.10 – Arranjo típico do ensaio**

### A.2.6.2 Método do ensaio

Um dispositivo de medição de deslocamento adequado deve ser montado a 600 mm da face mais próxima de uma das longarinas de forma a medir o deslocamento do ponto de contato com a coluna, na direção paralela às longarinas.

Uma força vertical de 500 N deve ser aplicada paralelamente à coluna e a uma distância de 250 mm do seu centro e depois reduzido para 50 N. O deslocamento da coluna a 50 N deve ser medido pelo dispositivo de medição de deslocamento adequado. Com a coluna descarregada e na posição deslocada, a força de 500 N deve agora ser aplicada a uma distância de 250 mm do outro lado da coluna, reduzido para 50 N, e o deslocamento  $D_0$  do ponto anterior deve ser medido. A folga rotacional  $\phi_{I,CL}$  é dada por:

$$\phi_{I,CL} = \frac{D_0}{2c} \text{radianos} \quad (\text{A.13})$$

A deflexão relevante devida à rigidez da coluna e à rigidez rotacional do par de os conectores pode ser calculada e subtraída das deflexões medidas. As deflexões ajustadas podem ser usadas para determinar a folga do conector da extremidade da longarina.

#### A.2.6.3 Correção das observações

Não é necessário fazer correções nas observações para considerar as variações de espessura ou de resistência ao escoamento.

#### A.2.6.4 Expressão dos resultados

A folga deve ser considerada como o valor médio  $\phi_{I,CL}$  de pelo menos três resultados de ensaio  $\phi_{I,CL,i}$ .

### A.2.7 Ensaios de cisalhamento em conectores e travas de conectores

#### A.2.7.1 Princípio

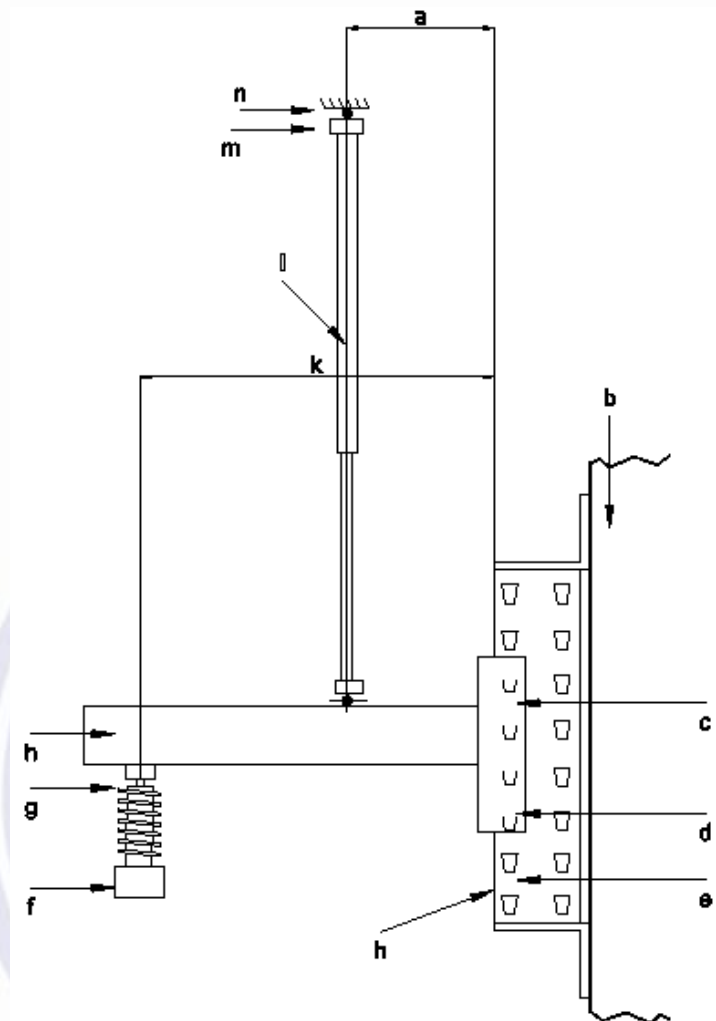
Este método de ensaio consiste na medição da resistência ao cisalhamento do conector ou da trava do conector. Todas as combinações especificadas em A.2.4.1 devem ser ensaiadas.

#### A.2.7.2 Disposição do ensaio

O arranjo deste ensaio compreende uma coluna curta ligada rigidamente a uma estrutura infinitamente rígida, com um comprimento de seção de longarina ligado a ele por meio da conexão a ser ensaiada, como mostrado na Figura A.10. A carga deve ser aplicada à conexão por um atuador com extremidade rotulada, colocado a uma distância  $a$  da face da coluna e o mais próximo possível. A extremidade livre da longarina deve ser contida por um suporte rotulado a pelo menos 400 mm da face da coluna, conforme mostrado na Figura A.10. Este suporte deve ser ajustado na direção vertical para que a longarina permaneça na horizontal durante o ensaio.

Para ensaiar a trava do conector, a peça deve ser instalada na posição invertida e, além do carregamento mostrado na Figura A.10, uma carga constante de 500 N é aplicada na superfície superior da longarina em uma direção normal à face da coluna, de modo a puxar o conector da longarina para longe da face da coluna.

**NOTA** O objetivo da aplicação da força é retirar a liberdade de movimento horizontal na montagem e assim criar a pior condição para a trava do conector.



### Legenda

- a menor distância possível da coluna
- b estrutura rígida para ensaio
- c trava do conector
- d conector
- e coluna curta
- f apoio com rosca
- g rolo e assento
- h longarina
- j rolo e assento
- k  $\geq 400$  mm
- l atuador de carga
- m célula de carga
- n pino final do arranjo

**Figura A.11 – Disposição para ensaio de cisalhamento do conector**

A aplicação da carga e o apoio rotulado devem ser alinhados com o centro de cisalhamento da longarina e a carga deve ser aplicada em toda a largura da face superior da longarina.

NOTA Se for de difícil obtenção uma amostra para ensaio de tração do conector que esteja aceitavelmente afastada da zona termicamente afetada ou da zona de deformação a frio, pode ser usado um corpo de prova menor que o especificado na ABNT NBR ISO 6892-1. Nenhum valor para o alongamento é necessário para este ensaio. Alternativamente, a amostra para ensaio de tração pode ser cortada do material de base do conector antes da sua conformação a frio.

### A.2.7.3 Procedimento

Para medir a resistência do conector ou da trava, a longarina deve ser carregada, conforme indicado na Figura A.11, até atingir a carga máxima  $F_{ti}$ . A resistência do conector,  $R_{ti}$ , deve ser calculada conforme a seguinte equação.

$$R_{ti} = F_{ti} \left( 1 - \frac{a}{k} \right) \quad (A.14)$$

### A.2.7.4 Correções das observações

Os resultados destes ensaios devem ser corrigidos para a resistência ao escoamento e a espessura de acordo com A.2.4.4.

### A.2.7.5 Expressão dos resultados

O valor característico da resistência ao cisalhamento do conector e da trava do conector deve ser determinado de acordo com 13.3.3 com base em resultados de pelo menos três ensaios.

## A.2.8 Ensaio da conexão com o piso

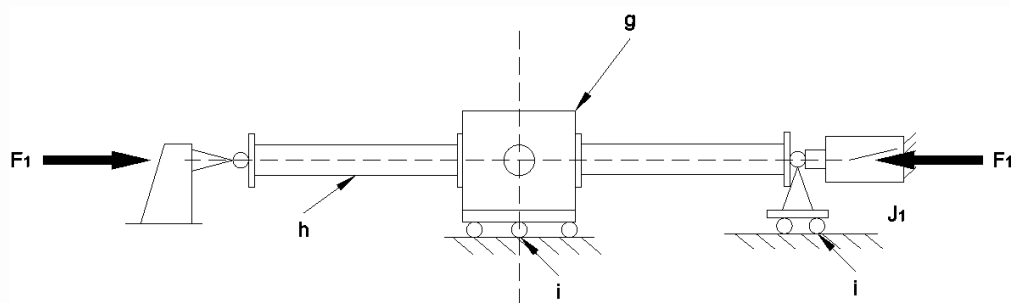
### A.2.8.1 Princípio

Este método de ensaio consiste na medição das características do momento de rotação da conexão entre a coluna e o piso para uma faixa de cargas axiais até a resistência máxima de cálculo da coluna.

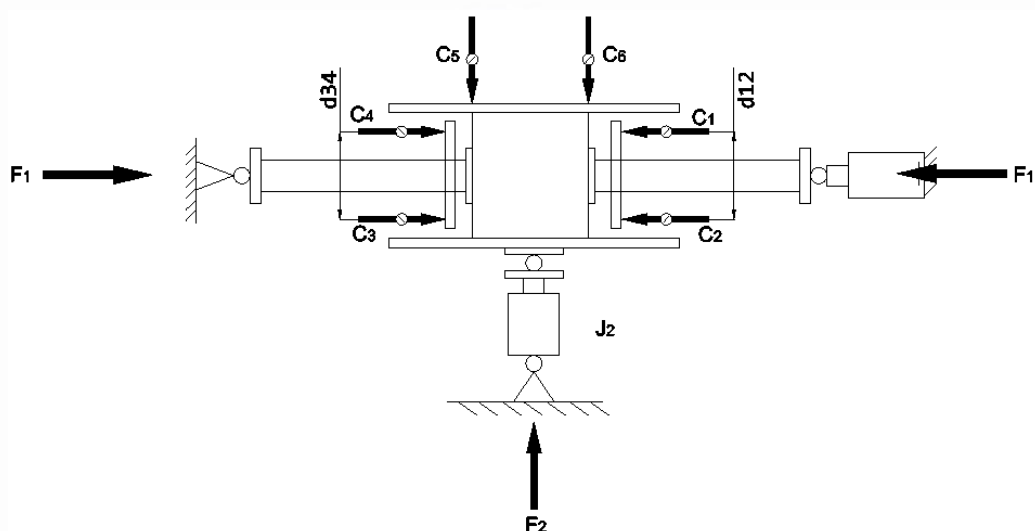
### A.2.8.2 Disposição do ensaio

A disposição do ensaio é mostrada na Figura A.12; podendo ser utilizadas alternativas, desde que modelem com precisão a condição estrutural real.

A disposição do ensaio utiliza dois segmentos de coluna, com comprimento igual a pelo menos 4 vezes a largura da coluna equipada com placas de base fixadas em um cubo de concreto sobre rolamentos, para representar a superfície do piso, conforme mostrado na Figura A.12. As placas de base padrão devem ser utilizadas neste ensaio e devem ser conectadas ao cubo de concreto usando as fixações adotadas para a estrutura que deveriam representar. Se as placas de base tiverem fixações do piso, a resistência do cubo de concreto utilizado no ensaio deve ser a mesma que a utilizada no piso na prática. Os ensaios realizados com concreto de classe de resistência 20 MPa podem ser usados para qualquer piso de concreto sólido cuja resistência do concreto não seja conhecida. Os ensaios podem ser feitos usando outros materiais correspondentes ao material real do piso quando não for concreto, desde que a condição do ensaio represente aqueles na prática.



a) Vista lateral do ensaio



b) Vista superior do ensaio

**Legenda**

$c_1$ a $c_6$	dispositivos de medição
$d_{12}$ e $d_{34}$	distância entre os dispositivos de medição
$F_1$ e $F_2$	força aplicada pelos atuadores
g	bloco de concreto
h	segmento de coluna
i	rolamentos de rolos
$J_1$ e $J_2$	atuadores de carga

**Figura A.12 – Disposição para ensaio da conexão com o piso**

O cubo de concreto deve ter faces paralelas e deve permitir uma folga de pelo menos 50 mm ao redor da placa de base. Deve ser montado sobre rolamento de rolos, esferas de rolamentos ou uma superfície bem lubrificada para que seja livre para se deslocar no plano horizontal, mas impedido de girar em torno do eixo vertical. Os dispositivos de medição devem ser montados para medir o movimento horizontal do cubo de concreto e a rotação das bases das colunas em relação à superfície do concreto. Um arranjo adequado é mostrado na Figura A.12.

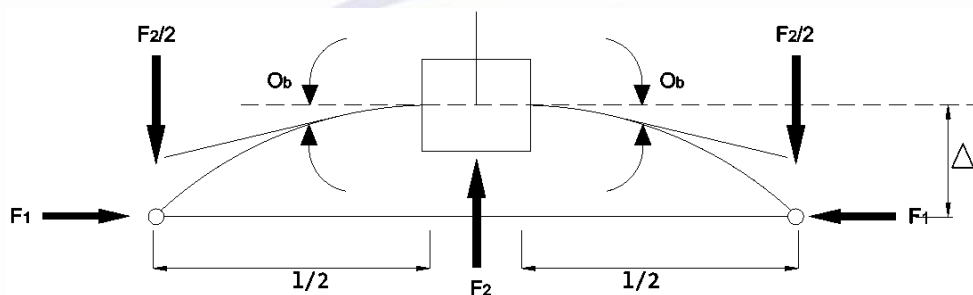
As colunas devem ser cortadas de forma perpendicular aos seus eixos longitudinais e as faces do cubo que devem suportar as colunas devem ser paralelas, de modo que os eixos de ambas as colunas coincidam com a linha de ação da carga.

### A.2.8.3 Procedimento

Os ensaios devem ser feitos em uma faixa de cargas axiais até a resistência máxima de cálculo estimada para a coluna. Pelo menos seis ensaios devem ser feitos para cada coluna.

A carga no atuador nº 1 deve ser ajustada em um valor nominal que mantenha todos os componentes em contato e os transdutores zerados. A carga no atuador nº 1 deve então ser aumentada para o seu valor total e mantida constante nesse valor. Em seguida, os deslocamentos devem ser observados e a carga no atuador nº 2 deve ser aumentada e novamente o deslocamento deve ser observado até que esta carga atinja seu máximo.

O sistema de forças é mostrado na Figura A.12.



**Figura A.13 – Forças e deformações no ensaio de conexão com o piso**

O momento aplicado na placa de base,  $M_b$ , e a rotação da placa de base,  $\theta_b$ , devem ser calculados conforme as equações a seguir.

$$M_b = \frac{F_2 l}{4} + F_1 \Delta \quad (A.15)$$

$$\theta_b = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_{12}} + \frac{\delta_3 - \delta_4}{d_{34}} \right] \quad (A.16)$$

onde

$F_1$  e  $F_2$  são as cargas aplicadas pelos atuadores 1 e 2 respectivamente;

$\delta_1$  a  $\delta_6$  são os deslocamentos nas posições 1 a 6 respectivamente;

$$\Delta = \frac{\delta_5 + \delta_6}{2} \quad (A.17);$$

$d_{12}$  e  $d_{34}$  são especificados na Figura A.12.

### A.2.8.4 Correções das observações

Não é necessário aplicar correções para os resultados dos ensaios da conexão com o piso.

O projetista deve considerar as consequências de quaisquer variações significativas nas propriedades mecânicas e geométricas do conjunto de ensaio em relação aos valores nominais.



### A.2.8.5 Expressão dos resultados

Para uma determinada carga axial, os valores de cálculo do momento último de resistência e a rigidez da conexão da placa de base devem ser calculados conforme A.2.4.5 para conectores de longarina, para cada valor da carga axial. Os resultados do ensaio devem ser lançados em gráficos de resistência e rigidez *versus* carga axial e, em cada caso, deve ser traçada uma curva de contorno suave ou uma série de linhas retas que se situam abaixo de todos os resultados do ensaio. Alternativamente, uma única rigidez pode ser escolhida para todos os valores da carga axial e as resistências correspondentes calculadas de acordo com A.2.4.5.

## A.2.9 Ensaio da rigidez ao cisalhamento dos montantes

### A.2.9.1 Princípio

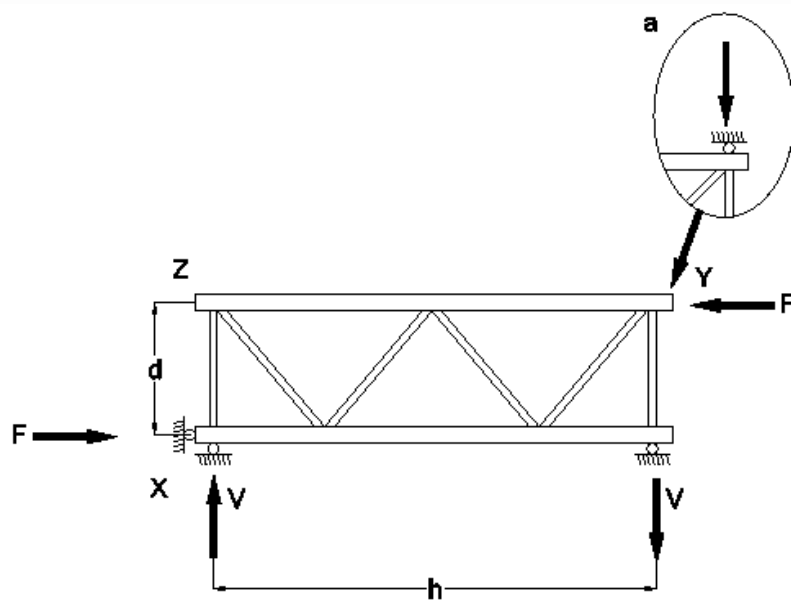
Este método de ensaio consiste na determinação da rigidez ao cisalhamento transversal por unidade de comprimento do montante, a fim de avaliar a sua estabilidade e avaliar a resistência ao cisalhamento da estrutura.

### A.2.9.2 Disposição do ensaio

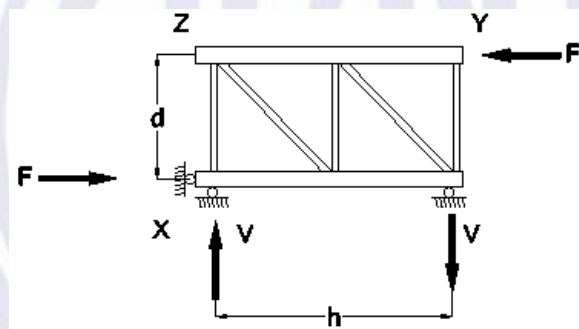
O corpo de prova deve ser um seguimento de montante com vários painéis de contraventamento carregados conforme a Figura A.14.

Pelo menos dois painéis devem ser usados, conforme a Figura A.14.

Uma coluna do montante deve ser articulada em uma extremidade, de modo que seja impedida de se mover horizontalmente, como no ponto X na Figura A.14 e a carga aplicada ao longo do centroide da outra coluna, no ponto Y na Figura A.14.



a) Montante com contraventamento diagonal



b) Montante com contraventamento em "Z"

**Legenda**

- a posição alternativa de restrição
- b distância entre o centro de gravidade das seções das colunas
- h comprimento do montante

**Figura A.14 – Arranjo do ensaio para medir a rigidez ao cisalhamento dos montantes armados**

Quando existirem variadas larguras de montantes, este ensaio deve ser feito para a largura comumente mais usada. Onde existir uma variedade de ângulos entre a coluna e o contraventamento, o ângulo médio pode ser usado nos ensaios.

A deformação horizontal  $\delta$  do montante deve ser medida no ponto Z da Figura A.14.

**A.2.9.3 Procedimento**

A carga  $F$  deve ser aumentada em incrementos até um nível suficiente para fornecer pelo menos três pontos na porção essencialmente linear da curva de carga  $\times$  deformação. A deformação correspondente  $\delta$  deve ser medida durante o ensaio, e um gráfico  $F \times \delta$  deve ser traçado.

NOTA O nível de carga apropriado depende do número de passos do contraventamento do montante  $t$ . Recomenda-se um valor de 2 kN por passo, mas a carga máxima não pode ser alta o suficiente para causar flambagem dos membros do contraventamento.

#### A.2.9.4 Correções das observações

Não é necessário aplicar correções para os resultados do ensaio da rigidez ao cisalhamento dos montantes.

#### A.2.9.5 Expressão dos resultados

O valor de cálculo da resistência ao cisalhamento transversal para o montante deve ser o valor médio de pelo menos três ensaios. A curva carga *versus* deformação obtida a partir deste ensaio geralmente não é linear e frequentemente inclui alguns efeitos devido à folga. A rigidez pode ser definida como a inclinação,  $k_{ti}$ , da linha reta de melhor ajuste para a curva em toda a sua extensão. Uma curva típica de carga *versus* deformação é mostrada na Figura A.15.

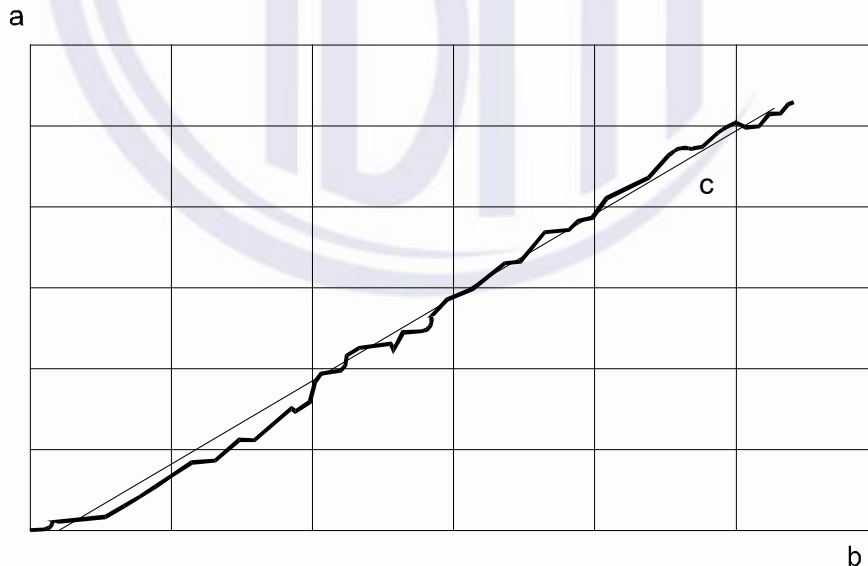
A resistência ao cisalhamento transversal do montante,  $S_{ti}$ , pode ser utilizada para obter uma área reduzida ou uma constante de mola para a conexão do contraventamento e deve ser calculada conforme a equação a seguir.

$$S_{ti} = \frac{k_{ti} d^2}{h} \quad (A.18)$$

onde

$h$  é o comprimento do montante;

$d$  é a distância entre os eixos do centroide da seção das colunas, conforme Figura A.14.



#### Legenda

- a esforço de cisalhamento em kN
- b deformação por cisalhamento em mm
- c inclinação  $k_{ti}$

NOTA O valor de cálculo da resistência transversal ao cisalhamento medido neste ensaio é  $S_D$  (ver Anexo G).

**Figura A.15 – Curva carga deformação**

A.2.10 Ensaio de flexão em seções de colunas

A.2.10.1 Princípio

Este método de ensaio consiste na determinação do momento fletor resistente de uma seção de coluna em torno do maior e do menor eixo de inércia.

A.2.10.2 Disposição do ensaio

O ensaio deve ser realizado carregando a coluna conforme a Figura A.16. O comprimento  $L$  da coluna deve ser:

$$L \geq 30D$$

onde

$D$  é a profundidade da coluna ensaiada.

O ensaio deve ser feito para medir a resistência à flexão da coluna em torno do maior ou do menor eixo. Quando o ensaio for feito para determinar a resistência à flexão em torno do eixo de simetria, um montante completo deve ser ensaiado com as duas colunas unidas pelo sistema de contraventamento normal, com a seção livre para rotacionar nos suportes, conforme Figura A.16. Esta disposição de ensaio permite a ocorrência de flambagem lateral com torção semelhante àquelas desenvolvidas pela coluna em seu modo normal de uso. As cargas aplicadas e suas reações para cada coluna devem estar sempre no mesmo plano vertical. Este plano pode ser definido pelo centro de cisalhamento ou pelo centroide da seção.

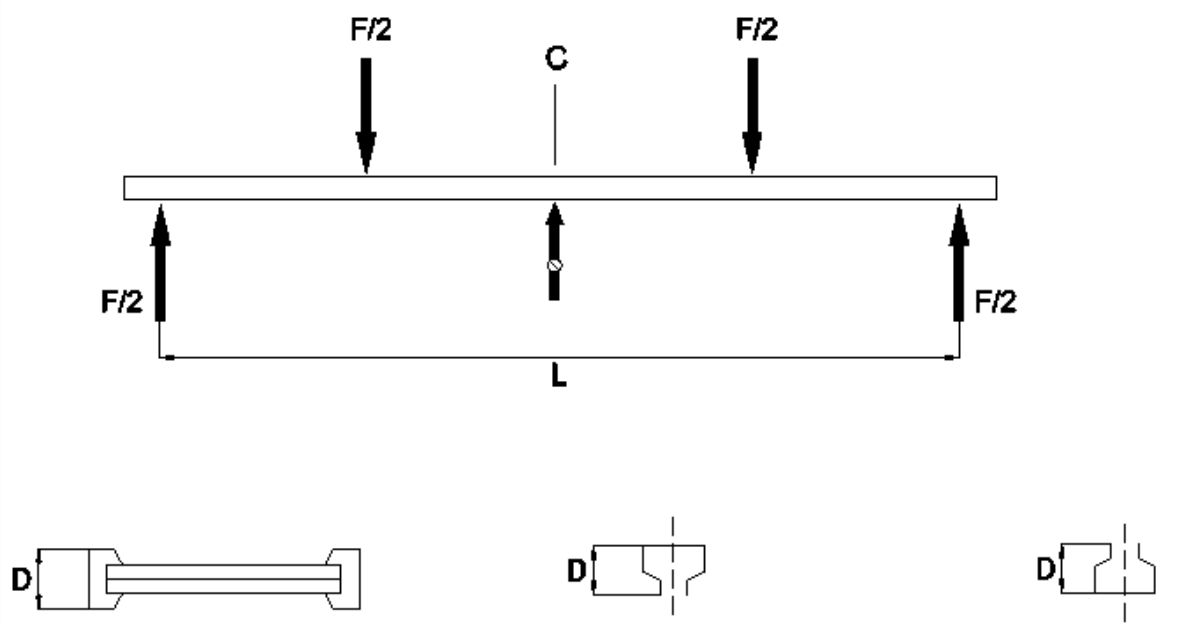


Figura A.16 – Disposição do ensaio

A.2.10.3 Procedimento

A carga deve ser aplicada em incrementos, até a falha, em dois pontos a  $\frac{1}{4}$  do vão (conforme ilustrado na Figura A.16), através de distribuidores de carga suficientemente largos para evitar qualquer esmagamento local da seção.

#### A.2.10.4 Correções das observações

O momento de falha medido no ensaio deve ser ajustado considerando a variação da espessura e a resistência ao escoamento das colunas de acordo com 13.3.5.

#### A.2.10.5 Expressão dos resultados

O valor característico do momento resistente deve ser calculado de acordo com 13.3.3.

### A.2.11 Ensaio de flexão em longarinas

#### A.2.11.1 Princípio

Este método de ensaio consiste na medição da resistência à flexão da longarina e à rotação da longarina em torno do próprio eixo sob carga de serviço. O ensaio para determinação da resistência da longarina foi projetado para fins de validação de um modelo analítico ou para determinar o momento fletor de cálculo e pode ser útil para longarinas com apenas um eixo de simetria que podem ser suscetíveis a flambagem lateral com torção.

#### A.2.11.2 Disposição do ensaio

A montagem do ensaio compreende um par de longarinas apoiadas em montantes usando conectores padrão, conforme Figura A.17. Para o ensaio de rotação da longarina, a extensão da longarina deve ser pelo menos igual a 50 vezes a largura da seção da mesma. As longarinas podem ser ligadas entre si por transversinas, barras para entrada de garfo ou qualquer outro componente que esteja incorporado na disposição menos favorável especificada pelo fabricante. O padrão de carga deve ser conforme usual. A Figura A.17 contém um exemplo da disposição do ensaio.

Alternativamente, como um ensaio-padrão para determinar a estabilidade geral da seção, as cargas podem ser aplicadas nos pontos de quarto do vão como mostrado na Figura A.16. Neste caso, a carga deve ser aplicada através de placas de largura máxima de 100 mm, a fim de reduzir a tendência de enrugamento de alma.

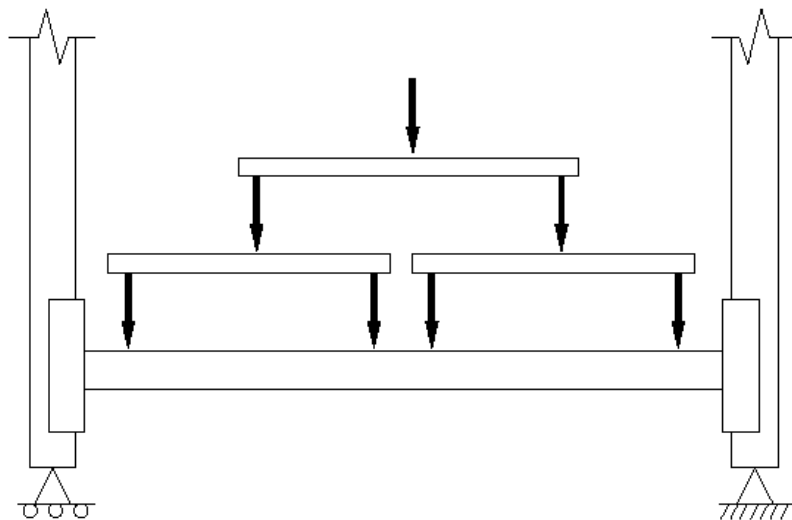
O movimento separado dos apoios pode ser considerado na interpretação deste ensaio.

É importante que a média do carregamento interaja com as longarinas da mesma maneira que o usual. Por exemplo, paletes flexíveis ou produtos armazenados, como pneus, tendem a carregar as longarinas horizontalmente e verticalmente; esta situação deve ser modelada com precisão nos ensaios. Se paletes comerciais forem usados para esses ensaios, a qualidade desses paletes deve ser igual à qualidade dos paletes usualmente utilizados.

Quando o ensaio for conduzido para avaliar os efeitos da possível flambagem lateral com torção em uma seção de longarina com apenas um eixo de simetria, então as condições normais para a restrição lateral do flange de compressão devem ser utilizadas no ensaio ou, se diversas condições forem cobertas pelos resultados do ensaio, a condição mais desfavorável deve ser ensaiada. Nos casos em que os paletes fornecerem suporte lateral no flange de compressão, a carga pode ser aplicada através de paletes ou usando uma disposição de substituição equivalente. O ensaio deve ser efetuado em um conjunto de vãos correspondente ao intervalo em que a longarina é fornecida.

Os dispositivos de carregamento devem ser livres para se deslocar com a estrutura sob ensaio.

Um montante deve ser apoiado em um suporte rotulado na base e mantido em posição, enquanto o outro deve ser apoiado de forma que esteja livre para se deslocar horizontalmente e para que não haja força horizontal e, portanto, nenhum momento possa se desenvolver na coluna.



**Figura A.17 – Exemplo de modelo de ensaio de longarina com carga aplicada**

#### **A.2.11.3 Procedimento**

A carga deve ser aumentada até a carga de serviço das longarinas e a rotação absoluta  $\theta_{ti}$  da longarina, em relação ao seu eixo longitudinal, deve ser medida no centro do vão. Esta medida deve ser feita com equipamento adequado montado independentemente da estrutura de ensaio. Para disposições de carregamento diferentes da Figura A.17, o método descrito em A.2.9.2 deve ser adaptado para considerar a distribuição real da carga no vão. Uma vez que as medidas de deflexão e a carga da longarina foram feitas, a carga pode ser aumentada até a falha ocorrer, e o momento de falha da longarina,  $M_{ti}$ , calculado.

#### **A.2.11.4 Correções das observações**

As correções para o valor observado da rotação da longarina,  $\theta_{ti}$ , devem ser calculadas conforme a equação a seguir, na qual a terceira potência para correções de espessura é usada apenas para seções abertas, caso contrário, a primeira potência deve ser usada.

$$\theta_{ni} = \theta_{ti} \left( \frac{t_t}{t} \right)^\beta \quad (\text{A.19})$$

onde

$\beta = 3$  para seções abertas;

$\beta = 1$  para seções fechadas e  $\theta_{ni} \geq \theta_{ti}$ ;

$\theta_{ti}$  é o valor observado da rotação central no estado-limite de serviço;

$\theta_{ni}$  é o valor corrigido da rotação central; correções para o momento de falha observado,  $M_{ti}$ , devem ser feitas de acordo com 13.3.5.



### A.2.11.5 Expressão dos resultados

O valor de cálculo da rotação da longarina deve considerar a média dos valores de pelo menos três ensaios. O valor do momento resistente característico deve ser calculado de acordo com 13.3.3.

## A.2.12 Ensaio em emendas de colunas

### A.2.12.1 Princípio

Este método de ensaio consiste na determinação da rigidez e da resistência de emendas entre segmentos de colunas.

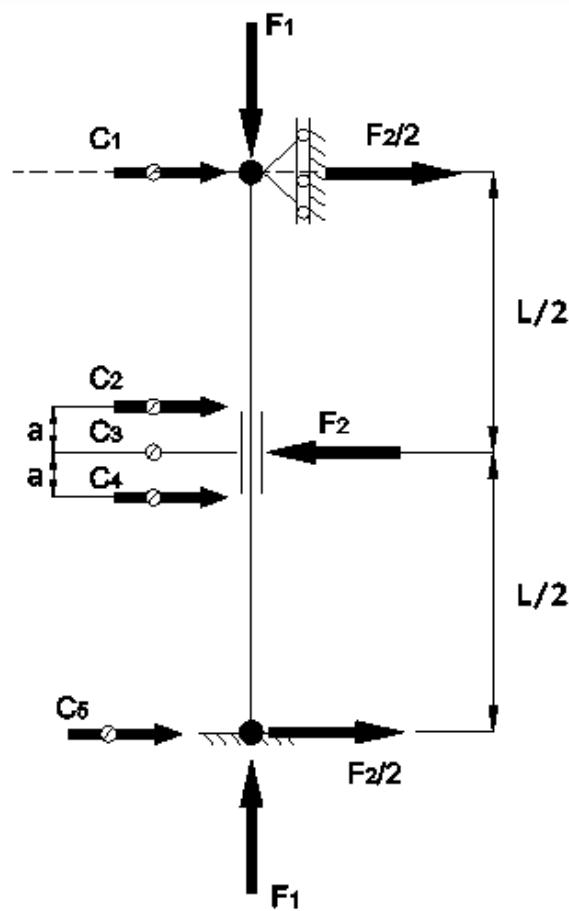
Quando a rigidez e a resistência da emenda são solicitadas na direção transversal ao corredor, uma única montagem de emenda deve ser ensaiada.

### A.2.12.2 Disposição do ensaio

Este ensaio é usualmente aplicado para emendas no plano longitudinal ao corredor. Neste caso, a flexão da emenda é sobre o eixo de simetria da coluna e pode causar torção. Para eliminar esses efeitos, um par de colunas pode ser ensaiado em conjunto, opostas pela face frontal ou pela parte posterior, e montados sobre a mesma placa de base. Essas colunas podem ser fixadas uma a outra longe da emenda para reduzir a torção das seções. A carga aplicada deve ser duas vezes a especificada em A.2.12.3.

A disposição do ensaio é mostrada na Figura A.17 e compreende duas colunas conectadas entre si pela emenda a ser ensaiada. Esta amostra é carregada axialmente com uma força  $F_1$  através de juntas rotuladas nas extremidades. As cargas  $F_1$  devem ser aplicadas no eixo do centroide da amostra em ensaio.

Cada conjunto de emenda deve compreender duas colunas com comprimento de pelo menos 4 vezes a largura da seção da coluna mais o comprimento da emenda. Os dispositivos de medição devem ser instalados nas extremidades das colunas e na emenda, conforme mostrado na Figura A.18.



**Legenda**

- $\ell$  distância entre rótulas
- $a$  distância entre dispositivos de medição
- $F_1$  carga axial
- $F_2$  carga transversal
- $C_1$  a  $C_5$  dispositivos de medição de deslocamento

**Figura A.18 – Disposição do ensaio**

**A.2.12.3 Procedimento**

Os ensaios devem ser feitos em uma faixa de valores da carga axial  $F_1$ , aproximadamente igual a  $0,25 F_{sd}$ ,  $0,5 F_{sd}$ ,  $0,75 F_{sd}$  e  $1,0 F_{sd}$ , onde  $F_{sd}$  é a força de cálculo máxima esperada para a coluna. Pelo menos um ensaio deve ser feito para cada valor da carga axial.

A força  $F_1$  é aplicada primeiramente com um valor escolhido e mantida constante à medida que a força horizontal,  $F_2$ , é aplicada. A força  $F_2$  é gradualmente aumentada até a falha da emenda e nenhuma força adicional pode ser aplicada. Os deslocamentos devem ser medidos nos pontos  $C_1$  a  $C_5$ .

Um gráfico do momento,  $M$ , aplicado na união *versus* a rotação  $\theta$  deve ser traçado, conforme as equações a seguir:

$$M = F_2 \frac{\ell}{4} + F_1 \left( \delta_3 - \left( \frac{\delta_1 + \delta_5}{2} \right) \right) \quad (\text{A.20})$$

$$\theta = \frac{2}{a} \left( \delta_3 - \frac{\delta_2 + \delta_4}{2} \right) \quad (\text{A.21})$$

#### A.2.12.4 Correções das observações

Não é necessário aplicar correções para os resultados do ensaio de emendas de colunas.

O projetista deve considerar as consequências de quaisquer variações significativas nas propriedades mecânicas e geométricas do conjunto de ensaio com relação aos valores nominais.

#### A.2.12.5 Expressão dos resultados

Os valores característicos da rigidez e resistência da emenda para cada valor da força axial  $F_1$  devem ser obtidos conforme A.2.8.5.

Se a variação da rigidez ou o momento último de cálculo combinado com força axial não for superior a  $\pm 10\%$  do valor médio para a faixa de forças axiais ( $F_1$ ) até a força de cálculo da coluna, o valor médio pode ser assumido e usado na análise e projeto da estrutura. Quando houver variação maior no momento resistente e na rigidez da emenda, devem ser utilizados valores apropriados correspondentes à força axial de cálculo.

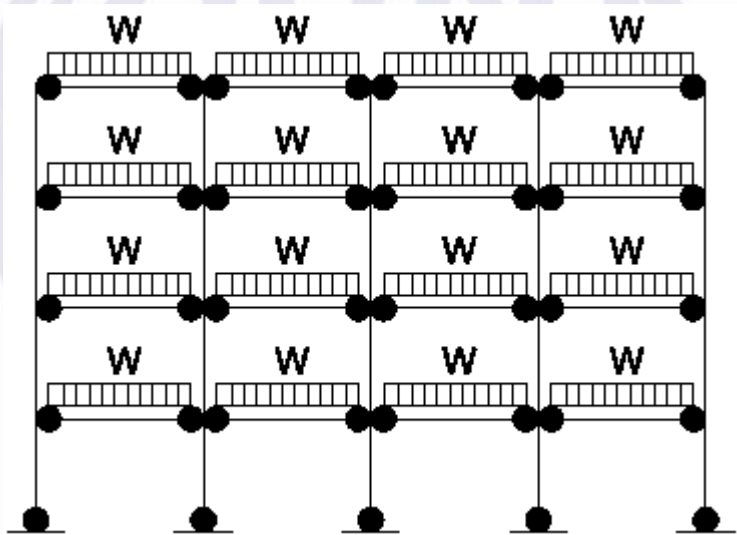
Anexo B  
(informativo)

Método analítico de deslocamento amplificado para verificação  
da estabilidade na direção do corredor

B.1 Princípio

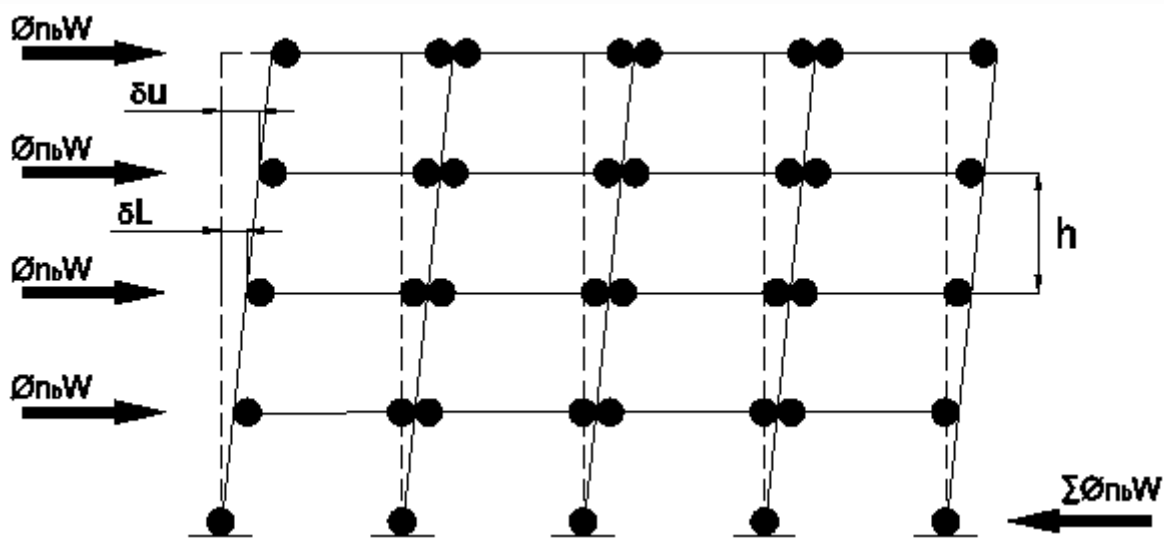
Este método de análise consiste na determinação precisa do valor da carga crítica elástica  $F_{Vcr}$  de uma estrutura plana. Isso permite que o aumento dos momentos fletores e deformações devido a efeitos de segunda ordem sejam estimados.

A Figura B.1 ilustra a base deste método de análise.



a) Estrutura real e carregamento

Figura B.1 – Base do método de deslocamento amplificado (continua)



b) Cargas horizontais de imperfeições e deformações resultantes

**Legenda**

- conexão semirrígida

**Figura B.1** (conclusão)**B.2 Análise elástica linear**

Uma análise elástica linear da estrutura completa pode ser realizada para determinar as forças internas e deformações devidas às cargas horizontais de imperfeição conforme a Figura B.1. Estas cargas são especificadas em 5.3.2 e Figura 7.

A flexibilidade da conexão da longarina com a coluna pode ser considerada.

Pode-se considerar a rigidez da conexão da coluna com o piso (ver A.2.8).

**B.3 Valor crítico elástico**

O valor crítico elástico da carga de falha da coluna no modo de deslocamento,  $F_{Vcr}$ , pode então ser determinada como:

$$\frac{F_{Vcr}}{F_{VSd}} = \frac{\varnothing}{\varnothing_{máx.}} \quad (B.1)$$

onde

$F_{VSd}$  é o valor de cálculo da força vertical na estrutura;

$\varnothing_{máx.}$  é o maior valor do índice de deslocamento de  $\varnothing_s$  qualquer nível;

$\varnothing_s = (\delta_U - \delta_L)/h$ ;

$h$  é a altura do nível;

$\delta_U$  é a deformação horizontal no nível superior;

$\delta_L$  é a deformação horizontal no nível inferior.

#### B.4 Fator amplificador

No estado-limite requerido, as forças internas e as deformações de cálculo, em qualquer modo de deslocamento são amplificadas pelo fator  $\beta$ , conforme a seguinte equação.

$$\beta = \frac{F_{Vcr}}{F_{Vcr} - F_{VSd}} \quad (B.2)$$





Anexo C  
(informativo)

Equações aproximadas para o cálculo de um porta-paletes regular na direção do corredor

C.1 Equação aproximada para construção regular

As equações a seguir são aplicáveis a qualquer porta-paletes de construção regular e que não apresentam pressupostos significativos.

$N_s = 5$	Número de níveis
$N_b = 5$	Número de módulos
$I_c = 700\,000\text{ mm}^4$	Momento de inércia da coluna
$K_c = 90\,000\text{ kNmm/radianos}$	Rigidez da placa de base
$W_c = 0\text{ kN}$	Carga adicional na parte superior do porta-paletes, se houver
$I_b = 550\,000\text{ mm}^4$	Momento de inércia da longarina
$K_b = 70\,000\text{ kNmm/radianos}$	Rigidez do conector
$W_b = 6\text{ kN}$	Carga de cálculo por longarina
$h_1 = 1\,500\text{ mm}$	Altura da primeira longarina em relação ao piso
$h = 1\,500\text{ mm}$	Altura da segunda longarina em relação à primeira (tomado como típico)
$L = 2\,700\text{ mm}$	Vão da longarina
$\alpha = 0,01$	Relação da carga horizontal nocional com a carga vertical
$\lambda = 1,0$	Fator de carga a ser investigado na 2ª parte do cálculo
$E = 210\text{ kN/mm}^2$	Módulo de Young
$S_{ig}W = N_b (N_s W_b + W_c)$ (C.1)	Carga total no porta-paletes
$S_2 = S_{ig}W - N_b W_b$ (C.2)	Carga sobre o primeiro nível

O momento relativo às cargas verticais aplicadas horizontalmente é calculado conforme a seguir.

$$S_{ig} W_h = \frac{N_s (N_s - 1)}{2} N_b W_b h + N_s N_b W_b h_1 + (N_s h + h_1 - h) N_b W_c \quad (C.3)$$

$$I_{cc} = (N_b + 1) I_c \quad (C.4) \quad I_{cc} \text{ Momento de inércia total das colunas}$$

$$K_{cc} = (N_b + 1) K_c \quad (C.5) \quad \text{Rigidez total das placas de base}$$

$$F = \frac{12 N_b E I_b K_b}{6 E I_b + K_b L} \quad (C.6)$$

$$C = F + \frac{E I_{cc} K_{cc}}{E I_{cc} + K_{cc} h_1} + \frac{E I_{cc}}{h} \quad (C.7)$$

$$A = \frac{S_{ig} W h_1 K_{cc} h_1 + 2 E I_{cc}}{2 C} + \frac{S_2 h}{2 C} \quad (C.8)$$

$$B = \frac{E I_{cc}}{h C} \quad (C.9)$$

$$D = (N_s - 1 + B) F + \frac{E I_{cc} K_{cc} B}{E I_{cc} + K_{cc} h_1} \quad (C.10)$$

$$G = \frac{S_{ig} W h_1}{2} \left[ \frac{K_{cc} h_1}{K_{cc} h_1 + E I_{cc}} \right] + \frac{E I_{cc} K_{cc} A}{K_{cc} h_1 + E I_{cc}} - S_{ig} W h + F A \quad (C.11)$$

$$\theta_1 = A - \frac{B G}{D} \quad (C.12)$$

O fator de carga crítica elástica  $V_c$  é calculado conforme as equações a seguir.

$$V_{cr0} = \frac{k_{cc} h_1 + E I_{cc}}{\left[ \frac{K_{cc} h_1}{2} + E I_{cc} \right] \theta_1 + \frac{S_{ig} W h_1^2}{12 E I_{cc}} (K_{cc} h_1 + 4 E I_{cc})} \quad (C.13)$$

$$V_{cr2} = -\frac{D}{G} \quad \theta_2 = \frac{S_2 h^2}{12 E I_{cc}} + 0,5 \left[ \frac{1}{V_{cr2}} + \theta_1 \right] \quad (C.14)$$

$$V_{cr1} = \frac{1}{\theta_2} \quad V_c = \text{Min}(V_{cr}) \quad (C.15)$$

A carga crítica elástica do porta-paletes é o menor dos valores entre  $V_{cr0}$ ,  $V_{cr1}$  e  $V_{cr2}$ , indicado na equação (C.15) do acima, a menos que a primeira longarina esteja perto do piso quando um fator de correção das seguintes equações será aplicado.

$$0,8 + 0,2 \frac{h_1}{h} \quad (C.16)$$

$$\text{Min}(V_{cr}) = 3,576$$

$$V_c = \text{if} \left[ h_1 \leq h \left[ 0,8 + 0,2 \frac{h_1}{h} \right] V_c, V_c \right] \quad V_c = 3,576 \quad (C.17)$$

Este método (ver Equação C.15) somente é válido se  $V_c = 3,333 \lambda$

O fator de majoração para efeitos de segunda ordem é calculado conforme a seguinte equação.

$$\beta = \alpha \frac{\lambda V_c}{V_c - 1} \quad (C.18)$$

O deslocamento lateral dos níveis deve ser de no máximo  $\varnothing \leq 0,02$  em qualquer nível.

O cálculo do fator de correção para o nível inferior é conforme a equação a seguir.

$$\varnothing_1 = \frac{\beta}{V_{cr0}} \quad \varnothing_1 = 0,0039 \quad (C.19)$$

O cálculo do fator de correção para o segundo nível é conforme a equação a seguir.

$$\text{Segundo nível } \varnothing_2 = \frac{\beta}{V_{cr1}} \quad \varnothing_1 = 0,0034 \quad (C.20)$$

O cálculo do fator de correção para o nível superior é conforme a equação a seguir.

$$\text{Nível superior } \varnothing_u = \frac{\beta}{V_{cr2}} \quad \varnothing_1 = 0,0026 \quad (C.21)$$

**NOTA** O fator de correção para a carga crítica elástica, ou seja,  $0,8 + 0,2h_1/h$  não aplica correção se a longarina inferior estiver a uma distância do piso, semelhante ao espaçamento entre as demais longarinas do porta-paletes. Se o menor espaçamento estiver perto do piso, a carga crítica dada pela equação C.17 é reduzida em 20 %. Existe uma transição linear entre esses dois casos extremos. Se  $h_1 \geq h$ , então não é necessário aplicar o fator de correção à carga crítica elástica. Este procedimento é conservador em relação aos valores de calibração disponíveis.

## C.2 Momentos fletores adicionais devido ao carregamento-padrão

O cálculo do momento fletor na conexão longarina-coluna devido à carga do palete (kNmm) é calculado conforme as equações a seguir.

$$M_p = \frac{\lambda W_b L}{12} \left[ \frac{K_b L}{2EI_b + B_b L} \right] \quad (C.22)$$

A rigidez da longarina (caso geral) é calculada conforme a seguir:

$$K_{b1} = \frac{4EI_b K_b (K_b L + 3EI_b)}{(K_b L + 2EI_b)(K_b L + 6EI_b)} \quad (C.23)$$

A rigidez da longarina (caso simétrico) é calculada conforme a seguir:

$$K_{b2} = \frac{2EI_b K_b}{(K_b L + 2EI_b)} \quad (C.24)$$

A rigidez do segmento inferior da coluna é calculada conforme a seguir:

$$K_{c1} = \frac{4EI_c}{h_1} \frac{K_c h_1 + 3EI_c}{K_c h_1 + 4EI_c} \quad (C.25)$$

A rigidez do segmento superior da coluna é calculada conforme a seguir:

$$K_{c2} = \frac{4EI_c}{h} \quad (C.26)$$

A rigidez total na conexão é calculada conforme a seguir:

$$S_K = K_{b1} + K_{b2} + K_{c1} + K_{c2} \quad (C.27)$$

### C.3 Momento de cálculo

O momento na conexão longarina-coluna devido ao deslocamento lateral e carregamento-padrão (kNmm) é calculado conforme as equações a seguir.

$$M_C = \frac{6EI_b K_b \beta \theta_1}{6EI_b + K_b L} + M_p \left[ 1 - \frac{K_{b1}}{S_K} \right] \quad (C.28)$$

$$\text{Forças axiais na coluna } P = \frac{S_{ig} W}{N_b} \text{ (kN)} \quad (C.29)$$

O momento na coluna abaixo do primeiro nível de longarina devido ao deslocamento lateral (kNmm) é calculado conforme a equação a seguir.

$$M = \frac{-(\beta S_{ig} W h_1)}{2(N_b)} \left[ \frac{K_c h_1 + 2EI_c}{K_c h_1 + EI_c} \right] + \frac{EI_c K_c \beta \theta_1 N_b + 1}{K_c h_1 + EI_c} \quad (C.30)$$

O momento abaixo do primeiro nível de longarina devido ao carregamento vertical padrão (kNmm) é calculado conforme a equação a seguir.

$$M_{C1} = M_p \frac{K_{c1}}{S_K} \quad (C.31)$$

O momento total abaixo do primeiro nível de longarinas corresponde a  $M - M_{C1} = -512,118$

O momento na base devido ao deslocamento lateral (kNmm por coluna) é calculado conforme a equação a seguir.

$$M_H = \frac{-(\beta S_{ig} W h_1)}{2(N_b + 1)} \left[ \frac{K_c h_1}{K_c h_1 + EI_c} \right] - \frac{EI_c K_c \beta \theta_1}{K_c h_1 + EI_c} \quad (C.32)$$

O momento na base devido ao carregamento-padrão (kNmm por coluna) é calculado conforme a equação a seguir.

$$M_{c11} = M_{C1} \frac{K_c h_1}{2(K_c h_1 + 3EI_c)} \quad (C.33)$$

O momento total na base corresponde a  $M_H - M_{C1} = -322,228$  e os momentos no segundo trecho de coluna correspondem a  $\theta_2 = \emptyset_u$  (majorado).

Os momentos acima do primeiro nível de longarina devido ao deslocamento lateral (kNmm) são calculados conforme a equação a seguir

$$M_{bc} = \frac{-(\beta S_2 h)}{2(N_b)} + \left[ \frac{EI_c \beta \theta_1}{h} - \frac{EI_c \theta_2}{h} \right] \frac{N_b + 1}{N_b} \quad (C.34)$$

O momento acima do primeiro nível de longarinas devido ao carregamento vertical padrão (kNmm) é calculado conforme a equação a seguir:

$$M_{c_2} = M_p \frac{K_{c_2}}{S_K} \quad (C.35)$$

O momento total acima do primeiro nível de longarinas corresponde a  $M_{b_c} - M_{c_2} = -427,114$ .

O momento abaixo do segundo nível de longarinas devido ao deslocamento lateral (kNmm) é calculado conforme a equação a seguir.

$$M_{c_b} = \frac{-(\beta S_2 h)}{2(N_b)} - \left[ \frac{EI_c \beta \theta_1}{h} - \frac{EI_c \theta_2}{h} \right] \frac{N_b + 1}{N_b} \quad (C.36)$$

O momento abaixo do segundo nível de longarinas devido ao carregamento-padrão (kNmm) é calculado conforme a equação a seguir:

$$M_{c_{22}} = 0,5 M_{c_2} \quad (C.37)$$

O momento total abaixo do segundo nível de longarinas corresponde a  $M_{b_c} - M_{c_{22}} = -525,076$ .

#### C.4 Cargas de cálculo nas colunas externas

Visto que o carregamento padrão foi incluído no projeto das colunas internas, não é necessário realizar a consideração separada das colunas externas.

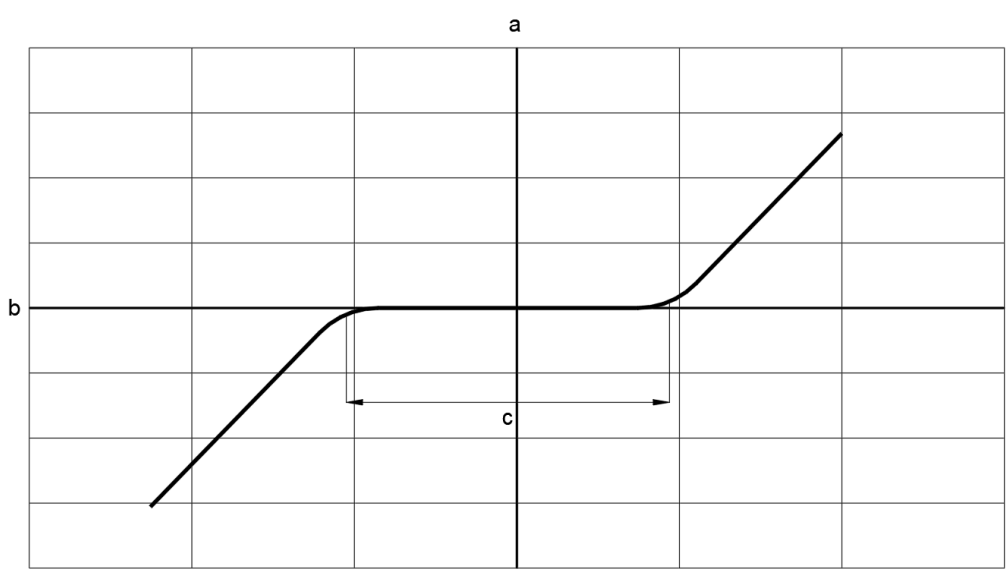
Anexo D  
(normativo)

Folga do montante

D.1 Generalidades

O gráfico da Figura D.1 é obtido a partir do ensaio da rigidez ao cisalhamento dos montantes (ver A.2.9).

O ângulo de folga do montante  $\phi$  é  $\frac{1}{2}$  do ângulo total de folga  $c$  (ver Figura D.1).



Legenda

- a momento
- b rotação em radianos
- c dobro do valor da folga

Figura D.1 – Resultado típico do ensaio

D.2 Tipos de contraventamento do montante

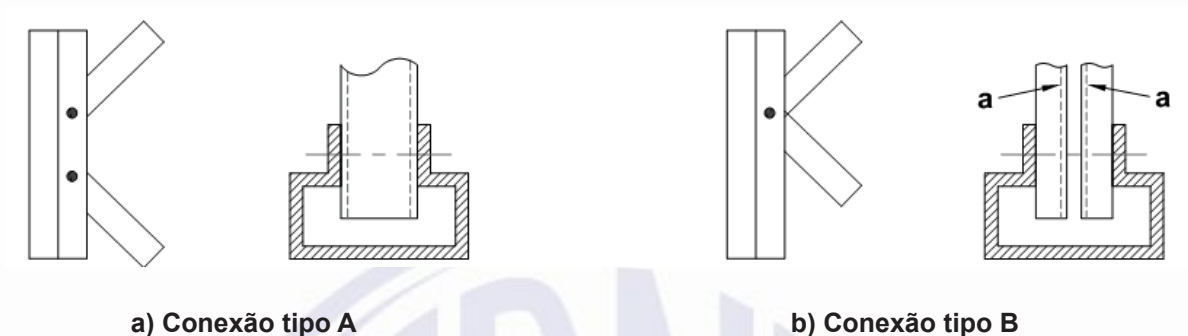
Para o cálculo da folga, dois principais tipos de sistema de contraventamento do montante são identificados conforme a seguir:

- a) tipo A (ver Figura D.2-a):
  - diagonais conectadas a coluna em posições de diferente altura;
  - diagonais conectadas simetricamente.



b) tipo B (ver Figura D.2-b):

- diagonais conectadas à coluna na mesma posição de altura;
- diagonais conectadas assimetricamente.



a) Conexão tipo A

b) Conexão tipo B

### Legenda

a alma

**Figura D.2 – Conexão do contraventamento**

### D.3 Folga

O ângulo de folga  $\varnothing_{l,mt}$  pode ser calculado conforme as equações a seguir:

- Tipo A ângulo de folga  $\varnothing_{l,mt} = \frac{2(s_{cl} + s_{dia})}{d} \sin(\alpha) \left( 1 + \frac{1}{\tan^2(\alpha)} \right)$  (D.1)

- Tipo B ângulo de folga  $\varnothing_{l,mt} = \frac{2s_{cl}}{d} + \frac{2s_{dia}}{d} \sin(\alpha) \left( 1 + \frac{1}{\tan^2(\alpha)} \right)$  (D.2)

sendo

$d$  é a distância horizontal entre os pontos de conexão nas colunas (ver Figura D.3)

$\alpha$  é o ângulo médio das diagonais com o plano horizontal (ver Figura D.3)

$$s_{cl} = \frac{d_{cl} - d_{fix}}{2}$$

onde

$d_{cl}$  é o diâmetro do furo na coluna;

$d_{fix}$  é o diâmetro do fixador.

$$s_{dia} = \frac{d_{dia} - d_{fix}}{2}$$

onde

$d_{dia}$  é o diâmetro do furo na diagonal.

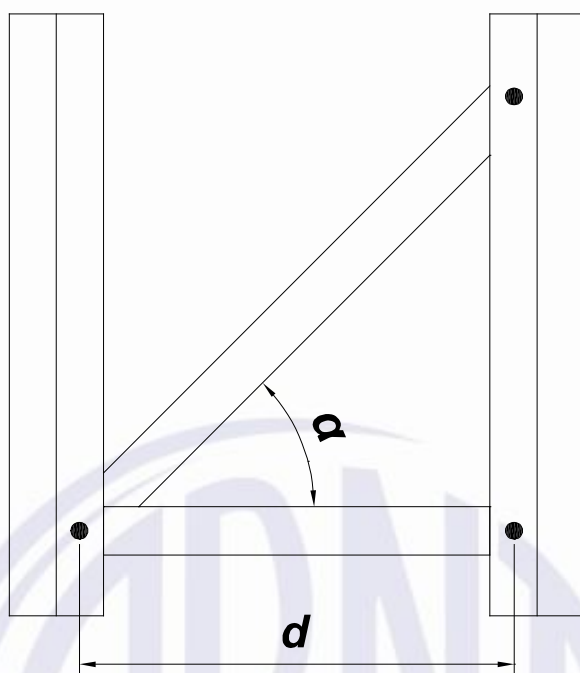


Figura D.3 – Definição gráfica do  $d$  e  $\alpha$

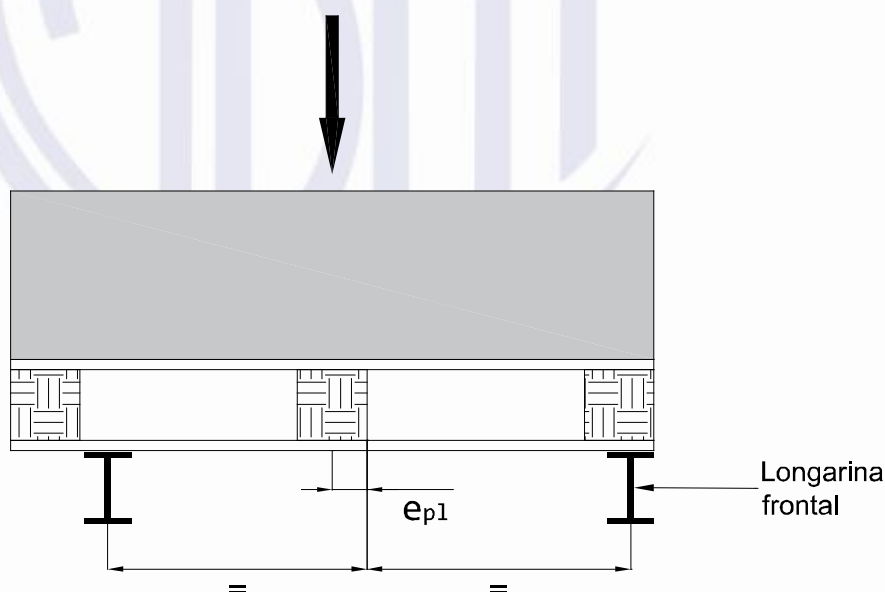
## Anexo E (informativo)

### Imprecisão de posição

Imprecisões no posicionamento de cargas podem ser consideradas nos casos em que o projeto permite desalinhamento significativo na direção perpendicular ao corredor e o projetista possui conhecimento prévio dos equipamentos operacionais e procedimentos que permitem que isso seja levado em consideração no cálculo. Se o efeito (tensão, deformação, etc.) das imperfeições de carga no limite de tolerância não for superior a 12 % do efeito da longarina quando normalmente carregada, este efeito pode ser desconsiderado.

Se o projeto e a operação do sistema propiciarem o alinhamento excêntrico sistemático, isso deve ser considerado na análise global. Quando o equipamento de movimentação for um transelevador, o fornecedor desse equipamento deve especificar as tolerâncias de colocação que, juntamente com a tolerância de construção do porta-paletes na direção perpendicular ao corredor, devem ser consideradas no projeto.

Em um plano de carga usual com duas longarinas, deve-se considerar para efeitos de cálculo, que o paleta nunca ultrapassa a face frontal da longarina dianteira (ver Figura E.1).



#### Legenda

$e_{p1}$  tolerância de posicionamento de projeto

**Figura E.1 – Excentricidade de carga**

Anexo F  
(informativo)

Cargas equivalentes de longarinas

Para situações onde a concepção de carga distribuída uniformemente em uma longarina não for válida, os coeficientes na Tabela F.1 são usados para converter o arranjo do carregamento real em um carregamento equivalente uniformemente distribuído.

Tabela F.1 – Coeficiente de ponderação de carga para longarinas (continua)



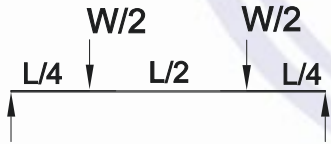
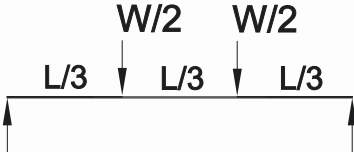
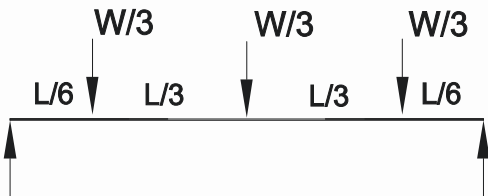
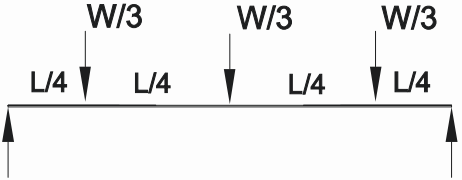
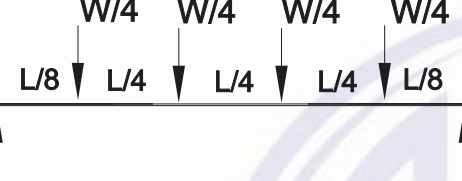
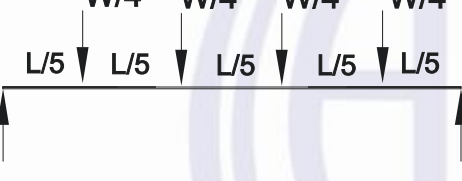
Carregamento-padrão	$\beta_m$	$\beta_\theta$	$\beta_\Delta$
	1,0	1,0	1,0
	2,0	1,5	1,6
	1,0	1,12	1,1
	1,33	1,33	1,36
	1,11	1,06	1,05

Tabela F.1 (conclusão)

Carregamento-padrão	$\beta_m$	$\beta_\theta$	$\beta_\Delta$
	1,33	1,25	1,27
	1,0	1,03	1,02
	1,2	1,2	1,21
<b>Legenda</b>  W carga total na longarina L vão da longarina (pode ser considerada a distância entre as faces dos montantes para o cálculo)			

Exemplar para uso exclusivo - Código Identificador #553498@552139# RNP:2612398694 (Pedido 894836 Impresso: 17/03/2024)

## Anexo G

### (informativo)

### Método simplificado para a análise da estabilidade na direção perpendicular ao corredor em circunstâncias em que há distribuição uniforme de compartimentos de carga ao longo da altura do montante

#### G.1 Generalidades

A carga elástica crítica  $F_{Vcr}$  para a instabilidade do deslocamento é primeiramente estimada. O método de amplificação dos deslocamentos é, então, utilizado para realçar as forças e deslocamentos internos a serem considerados nos efeitos de segunda ordem.

#### G.2 Flambagem global de montantes

A carga elástica crítica  $F_{Vcr}$  de um montante é calculada conforme as equações a seguir.

$$F_{Vcr} = \frac{1}{\frac{1}{F_{Vcr}^*} + \frac{1}{S_D}} \quad (G.1)$$

$$F_{Vcr}^* = \frac{\pi^2 E A_u D^2}{2 H_b^2} \quad (G.2)$$

onde

$F_{Vcr}$  é a carga vertical total no montante causando flambagem lateral elástica;

$F_{Vcr}^*$  é a carga crítica desprezando a flexibilidade de cisalhamento do contraventamento;

$A_u$  é a área da seção transversal de uma coluna;

$H$  é o comprimento do montante;

$H_b$  é o comprimento de flambagem do montante;

sendo  $H_b = 2 H \sqrt{\frac{1 + 2,18 \frac{W_0}{W_1}}{3,18}}$  para o montante não apoiado na Figura G.1-a) (G.3)

$H_b = H \sqrt{\frac{1 + 1,65 \frac{W_0}{W_1}}{5,42}}$  para o montante apoiado na Figura G.1-a) (G.4)

onde

$W_0$  é a carga aplicada no topo do porta-paletes (ver Figura G.1-c));



$W_1$  é a carga total no porta-paletes (ver Figura G.1-c));

$S_D$  é a rigidez ao cisalhamento do montante por unidade de comprimento.

NOTA Se as cargas iguais de longarinas forem aplicadas em todos os níveis do montante, tem-se a condição  $W_1/W_0 = n_s$  = número de níveis de longarinas na direção longitudinal ao corredor.

### G.3 Rigidez ao cisalhamento do montante

Para uma estrutura em que a flexibilidade da conexão pode ser mostrada como insignificante ou pode ser permitida dentro das expressões dadas (por exemplo, usando uma área de seção transversal reduzida para as barras do contraventamento), a rigidez ao cisalhamento por unidade de comprimento  $V_{Sd}$  é calculada conforme a equação a seguir:

$$\frac{1}{S_D} = \frac{1}{S_{dh}} + \frac{1}{S_{dd}} + \frac{1}{S_{db}} \quad (G.5)$$

As variáveis  $S_{dh}$ ,  $S_{dd}$  e  $S_{db}$  são indicadas na Tabela G.1 para uma variedade de diferentes sistemas de contraventamento.

Quando um cálculo confiável da rigidez ao cisalhamento não pode ser realizado, deve ser determinado por ensaio de acordo com A.2.8.

### G.4 Fator $\beta$ de amplificação

Se  $F_{VSd}/F_{Vcr} < 0,1$ , efeitos globais de segunda ordem podem ser desprezados. No estado-limite, o componente de influência das forças internas e as deflexões calculadas usando a teoria da primeira ordem são aumentadas devido aos efeitos de segunda ordem pelo fator de multiplicação  $\beta$ , conforme a equação a seguir:

$$\beta = \frac{F_{Vcr}}{F_{Vcr} - F_{VSd}} \quad (G.6)$$

onde

$F_{VSd}$  é o valor de cálculo da carga vertical no montante.

A disposição na Figura G.1-b) deve ser usada com cuidado. Conectar os montantes juntos na parte superior não constitui um apoio adequado, porque todos os montantes podem sofrer deslocamento por flambagem juntos. Um apoio só pode ser utilizado quando uma estrutura independente com rigidez suficiente estiver disponível.

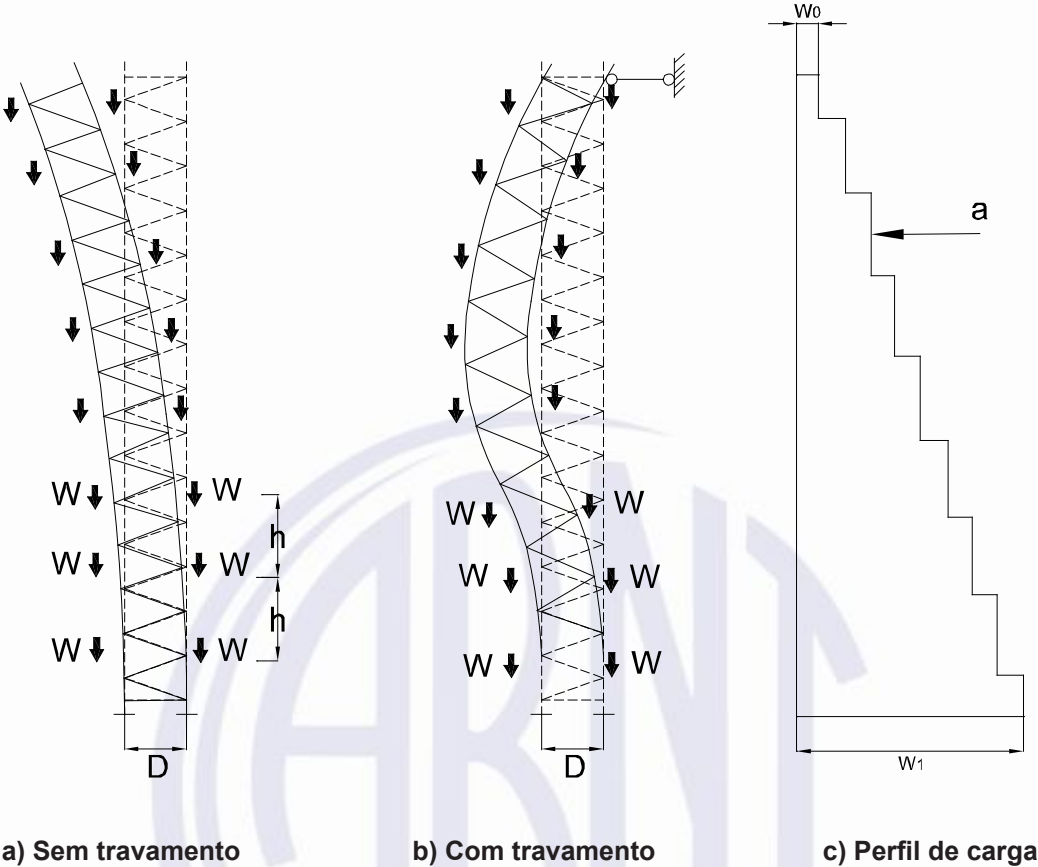
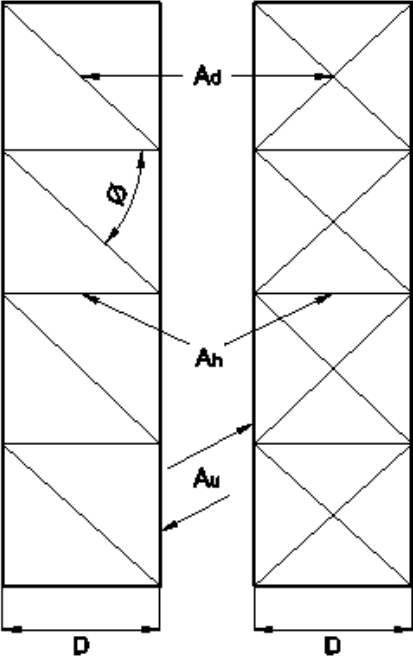
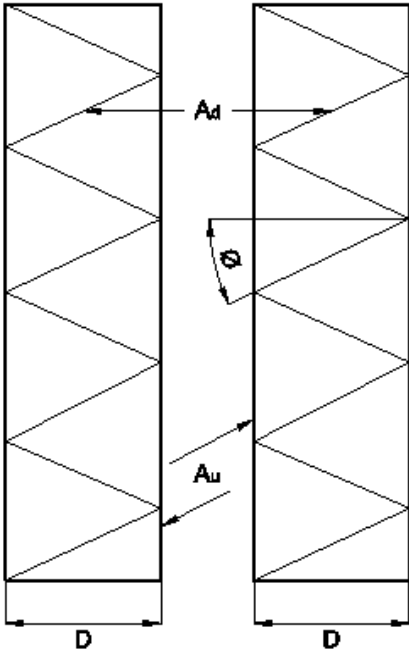


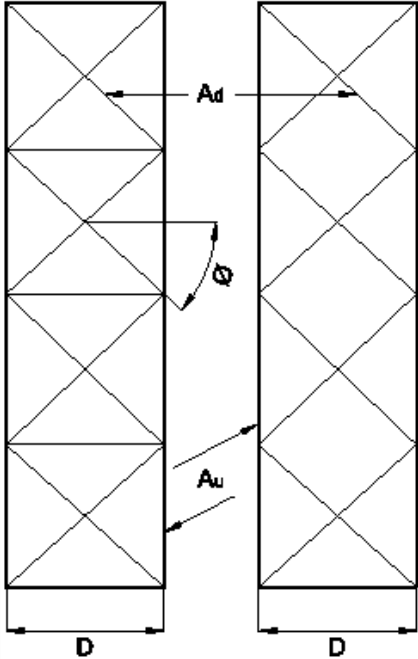
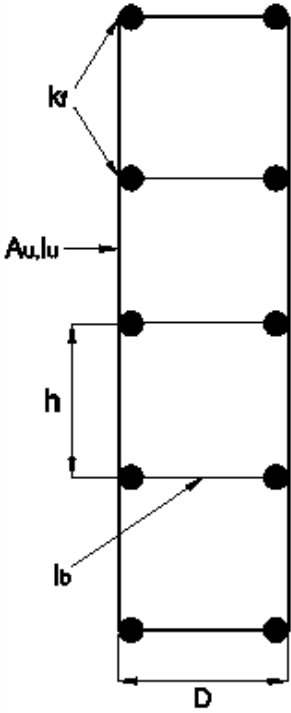
Figura G.1 – Concepção para a análise simplificada da estabilidade na direção transversal ao corredor

Tabela G.1 – Rigidez ao cisalhamento para montantes (continua)

Disposição do montante	Equação para o cálculo de rigidez ao cisalhamento
<div>Classe 1</div> <div></div>	<div>Contraventamento somente à tração</div> <div><math display="block">\frac{1}{S_{dd}} = \frac{1}{A_d E \sin \phi \cos^2 \phi}</math><math display="block">\frac{1}{S_{dh}} = \frac{1}{A_h E \tan \phi}</math><math display="block">\frac{1}{S_{db}} = 0</math></div>
<div>Classe 2</div> <div></div>	<div><math display="block">\frac{1}{S_{dd}} = \frac{1}{A_d E \sin \phi \cos^2 \phi}</math><math display="block">\frac{1}{S_{dh}} = 0</math><math display="block">\frac{1}{S_{db}} = 0</math></div>

Exemplar para uso exclusivo - Código Identificador #553498@552139# RNP:2612398694 (Pedido 894836 Impresso: 17/03/2024)

Tabela G.1 (conclusão)

Disposição do montante	Equação para o cálculo de rigidez ao cisalhamento
<div>Classe 3</div> <div></div>	<div><math display="block">\frac{1}{S_{dd}} = \frac{1}{2A_d E \sin \phi \cos^2 \phi}</math></div> <div><math display="block">\frac{1}{S_{dh}} = 0</math></div> <div><math display="block">\frac{1}{S_{db}} = 0</math></div>
<div>Classe 4</div> <div></div>	<div><math display="block">\frac{1}{S_{dd}} = 0</math></div> <div><math display="block">\frac{1}{S_{dh}} = 0</math></div> <div><math display="block">\frac{1}{S_{db}} = \left[ \frac{h_D}{12EI_b} \left( 1 + \frac{6EI_b}{DK_f} + \frac{h^2}{24EI_u} \right) \right]</math></div>

## Anexo H (informativo)

### Controle de fabricação do produto (CFP)

#### H.1 Frequência de ensaios

A frequência de ensaios deve assegurar que componentes produzidos sejam fabricados a partir de materiais especificados dentro dos limites de tolerância e atuem conforme especificado.

#### H.2 Ensaio de dobra em longarinas e conectores

Pelo menos um par de conectores a cada mês, selecionado aleatoriamente, deve ser ensaiado de forma que durante um período de tempo o controle estatístico de qualidade seja alcançado para cada conector daquela classe. O fabricante deve selecionar a combinação de longarinas e colunas que forem utilizados para esses ensaios.

O resultado de cada ensaio deve ser documentado e tratado estatisticamente para obter o valor característico. Quando pelo menos 20 resultados do ensaio forem acumulados durante um longo período, os mais antigos, além dos 20 e com mais de 12 meses podem ser descartados.

Os resultados de cada ensaio para o momento resistente do conector devem ser aceitos desde que excedam o valor característico adotado para o projeto.

Os resultados de cada ensaio para a rigidez do conector devem atender à relação:

$$k_d + 2s \geq k_{ti} \geq k_d - 2s \quad (G.1)$$

onde

$k_{ti}$  é o valor observado da rigidez;

$k_d$  é o valor de cálculo da rigidez;

$s$  é o desvio-padrão dos resultados acumulados.

Quando um resultado de ensaio não atende às condições indicadas nesta subseção, um conjunto de ensaios deve ser feito com pelo menos três conectores selecionados do mesmo lote de produção, e os valores característicos de e rigidez devem ser calculados de acordo com esta Seção.

Se o valor característico obtido atender aos requisitos, então o lote pode ser aceito. Caso não atenda, o lote deve ser rejeitado.

#### H.3 Ensaio de dobra

Quando a propriedade básica de um tipo de aço for determinada por ensaio de tração de acordo com 8.1, um ensaio simples de dobra de acordo com A.1.2 também deve ser realizado como parte do CFP.

## **Anexo I** (informativo)

### **Orientação para a determinação do comprimento crítico para o ensaio de flambagem por distorção**

#### **I.1 Introdução**

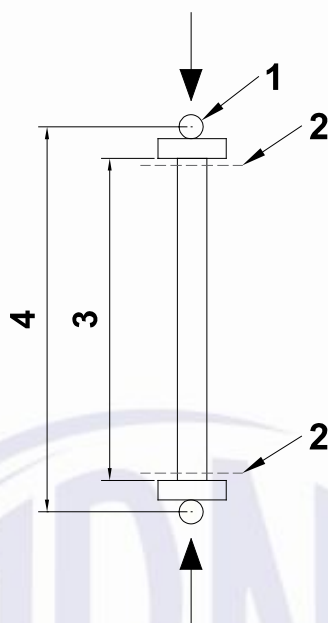
Quando um montante tiver o comprimento entre os contraventamentos variável, cada comprimento deve ser ensaiado. O número de ensaios pode ser minimizado pelo uso de análise por elementos finitos para determinar o comprimento crítico teórico de flambagem distorcional. Este Anexo fornece uma abordagem para determinar este comprimento crítico. A partir deste ensaio, pode ser calculado um fator de redução máximo de flambagem distorcional, que é aplicável para todos os comprimentos entre os contraventamentos.

NOTA Este método de obtenção do comprimento crítico de flambagem distorcional pode ser usado também para comprimentos entre contraventamentos constantes, pois fornece resultados conservadores.

#### **I.2 Comprimento em relação aos vínculos na disposição do ensaio**

Na Figura I.1,  $L_1$  corresponde ao comprimento de flambagem por torção (comprimento da amostra). Já  $L_2$  corresponde à duas vezes o comprimento de flambagem por flexão e o comprimento crítico de flambagem distorcional.





#### Legenda

- 1 esfera de aço
- 2 vínculos com engastamento total para efeitos de distorção e torção (St. Venant e empenamento).
- 3  $L_2$  (duas vezes o comprimento de flambagem e o comprimento crítico de flambagem distorcional)
- 4  $L_1$  (comprimento de flambagem para flambagem por flexão)

**Figura I.1 – Comprimentos para o ensaio de flambagem distorcional**

NOTA Se o engastamento total não for alcançado, o resultado é conservador.

### I.3 Método para a determinação do comprimento crítico de flambagem distorcional

#### I.3.1 Etapa 1

Uma abordagem pelo método das faixas finitas resulta em uma aproximação prática. Para métodos de faixas finitas válidas, podem ser utilizados *softwares* comercialmente disponíveis.

#### I.3.2 Etapa 2

Caso o *software* a ser utilizado não permita perfurações, os seguintes pontos devem ser considerados na modelagem da seção transversal:

- é permitido modelar os cantos como cantos vivos;
- é permitido modelar o efeito das perfurações por uma espessura reduzida equivalente,  $t_{red}$ , sobre uma largura definida das perfurações (ver Figura H.3). Esta espessura reduzida deve ser determinada conforme a seguir:

$$t_{red} = \sqrt[3]{\frac{L_{np}}{L} \cdot \alpha \cdot t} \quad (I.1)$$

onde

$L$  é o passo das perfurações no “elemento plano” da seção considerada;

- $L_{np}$  é  $L$  menos a altura da perfuração;
- $\alpha$  é o fator de correção que depende da forma e configuração das perfurações (ver Figura I.2 e Figura I.3).

O fator  $\alpha$  deve ser determinado, usando *software* 3D com elemento de placa adequado, comparando as deformações calculadas das duas situações a seguir:

- a) modelo 1: o “elemento plano” real com a configuração real das perfurações e considerando um comprimento de pelo menos 5 vezes o passo das perfurações.
- b) modelo 2: o mesmo “elemento plano”, mas modelado com  $t_{red}$  sobre uma parte relevante na face que contém as perfurações, em todo o seu comprimento.

A Figura I.4 mostra os detalhes do modelo. O valor para  $t_{red}$  deve ser determinado iterativamente com a condição:

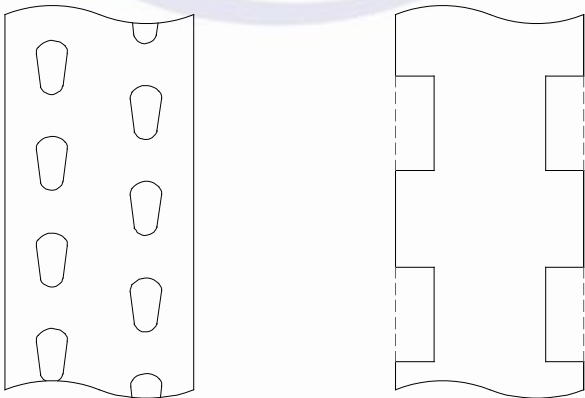
$$\delta_{\text{modelo 1}} = \delta_{\text{modelo 2}}(t_{red})$$

onde

- $\delta_{\text{modelo 1}}$  é a deflexão conforme definido no modelo 1;
- $\delta_{\text{modelo 2}}(t_{red})$  é a deformação definida no modelo 2 em função de  $t_{red}$ .

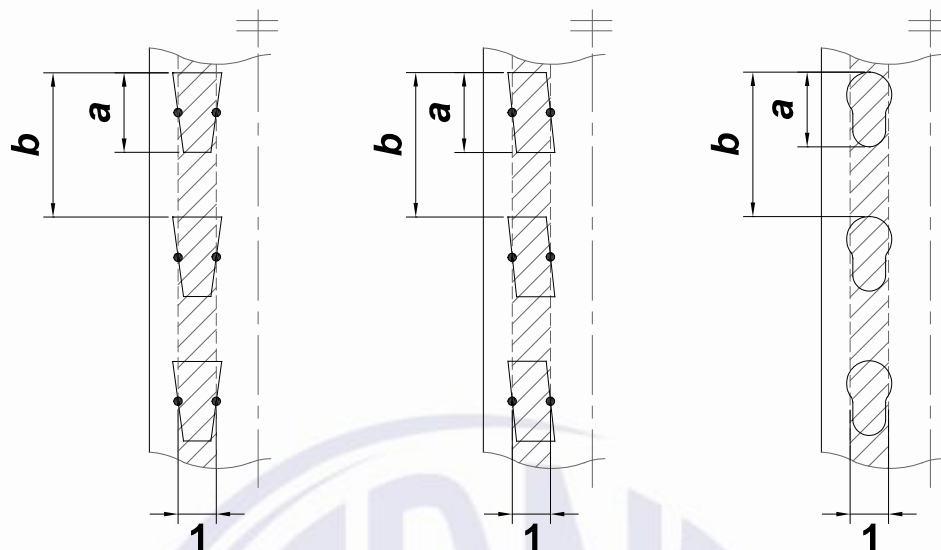
Se houver perfurações na lateral, o mesmo procedimento deve ser seguido também para a face lateral da seção (ver Figura I.4).

NOTA Na Bibliografia (ver [18]), propõe-se tomar para todas as configurações de perfuração  $\alpha = 0,9$ . No entanto, a pesquisa descrita limitou-se a um determinado tipo específico de perfuração e a uma determinada distribuição de carga. Nos modelos utilizados no CUFSM<sup>1)</sup> [19] apresentados em [18], foi considerado como carregamento não uniforme com tensão zero nas faixas perfuradas. A distribuição uniforme pode ser considerada como uma simplificação aceitável, ver Etapa 5. As situações apresentadas na Figura I.2 não foram consideradas. Também se sabe que  $\alpha$  diminui com o decréscimo da razão  $b/a$ . Portanto,  $\alpha$  precisa ser determinado para cada situação.



**Figura I.2 – Diferentes perfurações da alma que podem afetar a restrição distorcional dos flanges, e, portanto, afetam  $\alpha$**

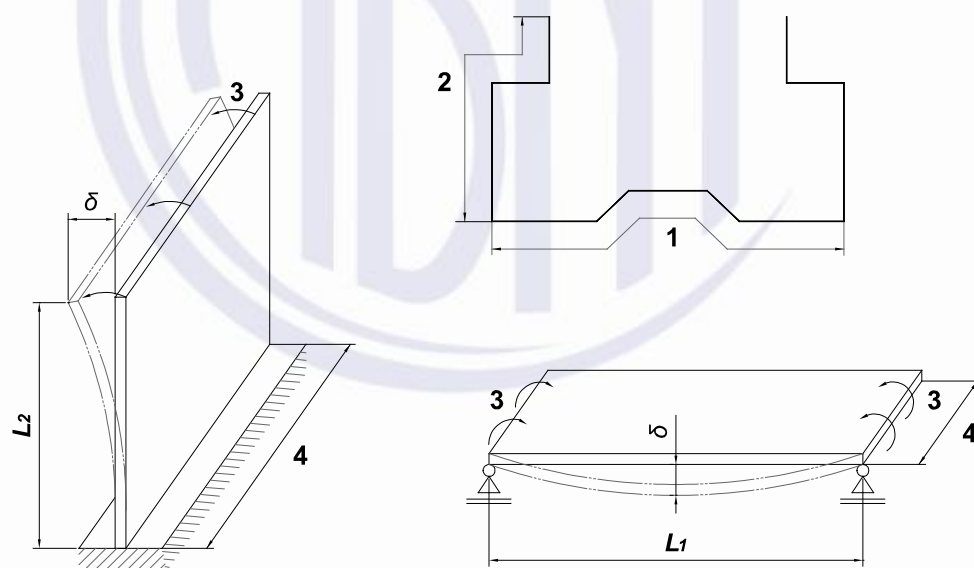
1) O *software* CUFSM é exemplo de produto adequado comercialmente disponível. Esta informação é dada para facilitar aos usuários deste documento e não constitui um endosso por parte da ABNT ao produto citado.



### Legenda

- 1 dimensão de seção transversal equivalente com a espessura reduzida na face frontal  $t_{red}$

**Figura I.3 – Seção transversal equivalente sobre a seção sombreada da face frontal  $t_{red}$**



### Legenda

- 1 face frontal da coluna  
 2 face lateral da coluna  
 $L_1$  comprimento total desenvolvido da face frontal da coluna  
 $L_2$  comprimento total desenvolvido da face lateral da coluna  
 3 momento fletor uniformemente distribuído  
 4 comprimento da placa (pelo menos 5 vezes o passo das perfurações)  
 $\delta$  deformação típica

**Figura I.4 – Detalhes para a modelagem de um elemento plano da seção vertical**

I.3.3 Etapa 3

A condição de vínculo no modelo de faixa finita deve estar de acordo com a configuração de ensaio, ou seja, totalmente fixada em todas as direções em ambas as extremidades.

NOTA O modelo de faixa finita conforme Bibliografia (ver [18]) só permite especificar duas condições nas extremidades do membro comprimido, totalmente articuladas em todas as direções ou totalmente fixas. A condição de extremidade “totalmente fixa” está próxima das condições de extremidade dadas na disposição de ensaio (ver Figura I.1) no que diz respeito à flambagem distorcional. Não é possível modelar “totalmente as restrições a St. Venant e ao empenamento” em combinação com nenhuma restrição devido à flexo-torção.

I.3.4 Etapa 4

Pelo menos quatro faixas finitas devem ser usadas para cada elemento plano.

I.3.5 Etapa 5

A modelagem do carregamento nas extremidades das barras deve ser de compressão uniforme ao longo de todo o perfil da seção.

NOTA Um valor inicial prático para o carregamento é a resistência ao escoamento da peça.

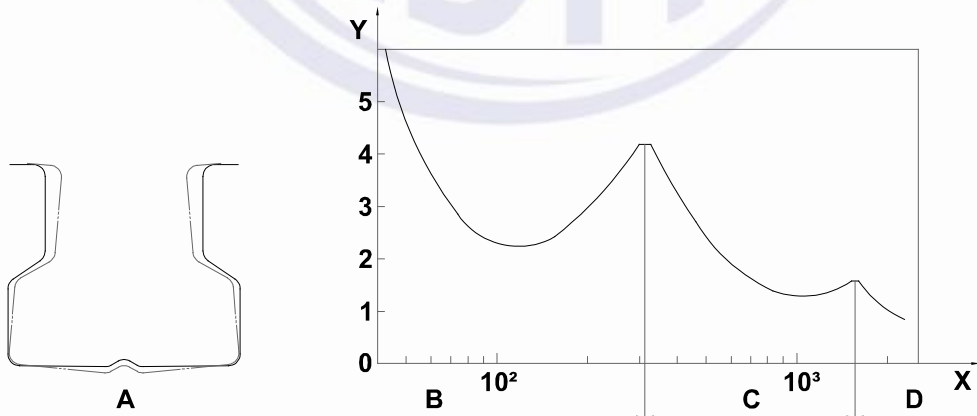
I.3.6 Etapa 6

Pelo menos dez amostras devem ser consideradas e o tamanho delas deve ser pelo menos o comprimento de ensaio da coluna curta +  $n \times 50 \text{ mm}$  até  $L_G$ .

onde

$L_G$  é o comprimento em que o modo de flambagem global se torna crítico.

O comprimento crítico de flambagem distorcional é o comprimento correspondente à carga mínima de flambagem distorcional, ver Figura I.5.



Legenda

- A perfil deformado de uma coluna típica
- B flambagem local é crítica
- C flambagem distorcional é crítica
- D flambagem global é crítica

Figura I.5 – Exemplo do gráfico mostrando a mudança do modo de flambagem variando com o comprimento

O comprimento da amostra para o ensaio de flambagem distorcional deve ser o mais próximo considerando o passo das furações.



Anexo J  
(informativo)

Propriedades da seção equivalente

Este Anexo apresenta orientações para obter as propriedades de perfis levando em conta o efeito de suas perfurações (ver Figuras J.1 e J.3).

Para simplificar os cálculos, os furos podem ser considerados quadrados (ver Figura J.2).

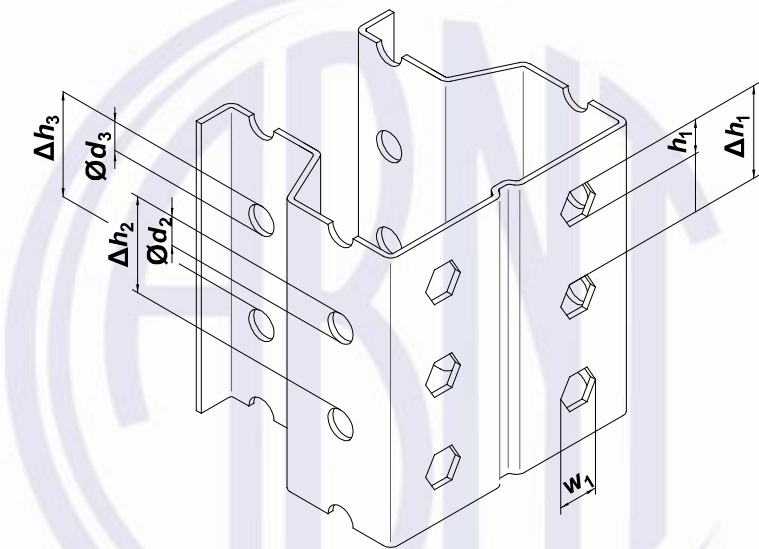


Figura J.1 – Geometria original do perfil

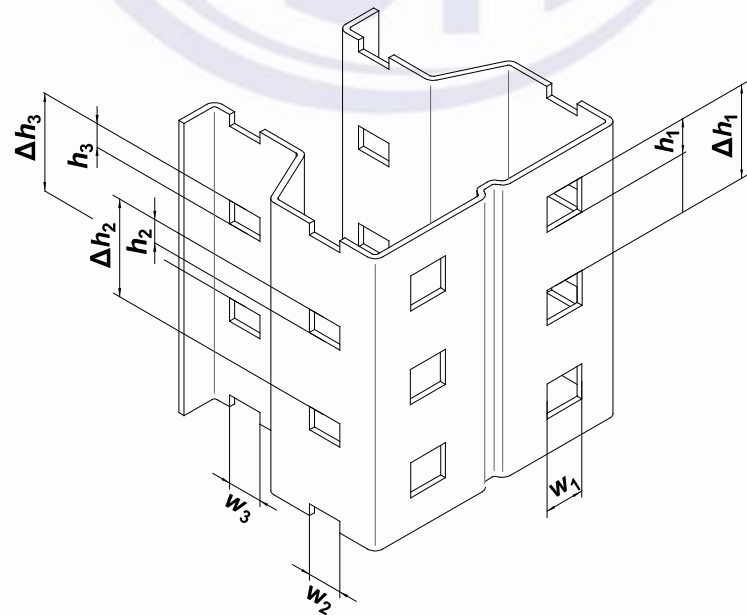
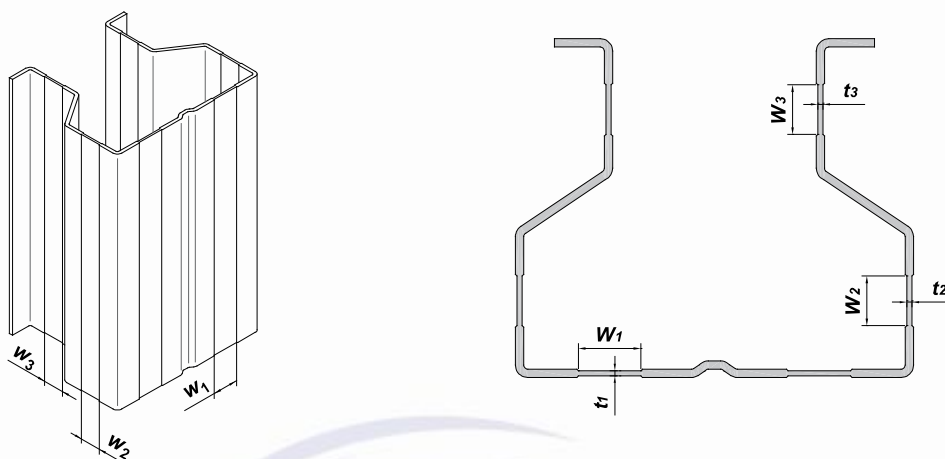


Figura J.2 – Perfil com furações simplificadas

O efeito da perfuração é representado com uma redução local da espessura; a seção transversal é dividida em faixas de diferentes espessuras (ver Figura J.3).





**Figura J.3 – Perfil com faixas de espessura equivalente**

O cálculo para obter as propriedades dos perfis pode ser feito utilizando-se as equações a seguir:

$$t_i = t \cdot \frac{\Delta h_i - h_i - \xi_j \cdot w_i}{\Delta h_i} \quad (\text{J.1})$$

$$\xi_j = \frac{\Delta h_i - h_i}{2 \cdot w_i} \leq 1,5 \quad (\text{J.2})$$

onde

$t_i$  é a espessura equivalente da faixa;

$t$  é a espessura nominal do perfil;

$\Delta h_i$  é o passo da furação;

$h_i$  é a altura do furo;

$w_i$  é a largura do furo;

$\xi_j$  é o fator de influência da furação.

As propriedades geométricas do perfil podem ser obtidas através de *softwares* apropriados ou métodos de cálculo conforme a EN 1993-1-3.

## Bibliografia

- [1] ABNT NBR 6323, *Galvanização por imersão a quente de produtos de aço e ferro fundido – Especificação*
- [2] ABNT NBR 6649, *Bobinas e chapas finas a frio de aço carbono para uso estrutural – Especificação*
- [3] ABNT NBR 10476, *Revestimentos de zinco eletrodepositados sobre ferro ou aço – Especificação*
- [4] ABNT NBR 11003, *Tintas – Determinação da aderência*
- [5] ABNT NBR 6120, *Ações para o cálculo de estruturas de edificações*
- [6] ABNT NBR 11888:2015 Versão Corrigida:2018, *Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço carbono e de aço de alta resistência e baixa liga – Requisitos gerais*
- [7] ABNT NBR 14918, *Chumbadores mecânicos pós-instalados em concreto – Avaliação do desempenho*
- [8] ABNT NBR ISO 9001, *Sistema de gestão da qualidade – Requisitos*
- [9] EN 15512, *Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles of structural design*
- [10] EN 528, *Rail dependent storage and retrieval equipment – Safety requirements*
- [11] EN 1992, *Eurocode 2 – Design of concrete structures*
- [12] EN 1991-1-7, *Eurocode 1. Actions on structures Part 1-7: General actions – Accidental actions*
- [13] J M Davies e J S Cowen “*Pallet racking using cold-reduced steel*” 12th International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Design and Construction, St Louis, USA 18-19 October 1994, 641-655.
- [14] Pr-FEM 10.2.08 “*Recommendations for the design of static steel pallet racks under seismic conditions*” Edição: 20ª - Dezembro 2005.
- [15] FEM 10.2.14-1/FEM 10.4.103 - 1, *Warehouse floors – Storage system areas operated by Industrial Trucks – Part 1: Tolerances, deformations, methods of measurement and additional requirements for VNA truck operation*
- [16] FEM 10.2.14 - 2, *Warehouse floors – Storage system areas operated by Industrial Trucks – Part 2: Requirements for design and possible remedial actions – Interface with Racking*
- [17] FEM R&S, *Information Bulletin No 10, Warehouse building – Storage areas for racking – Guidance for Stakeholders.*
- [18] CASAFONT P. ROURE B. PEKOZ. *Linear buckling analysis of perforated steel storage rack columns with a finite strip method. Thin-walled Struct.* 2012
- [19] “CUFSM – Version 4.04” (Ben Schafer / Johns Hopkins University). See: <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/>