

RENATA DE OLIVEIRA MELO

**AVALIAÇÃO DE COLUNAS À FLEXOCOMPRESSÃO SOB A ÓTICA DO
EUROCÓDIGO 03 E DA NBR 8800**



Universidade Fernando Pessoa

Porto 2024

RENATA DE OLIVEIRA MELO

**AVALIAÇÃO DE COLUNAS À FLEXOCOMPRESSÃO SOB A ÓTICA DO
EUROCÓDIGO 03 E DA NBR 8800**



Universidade Fernando Pessoa

Porto 2024

© 2024;

Renata de Oliveira Melo

“TODOS OS DIREITOS RESERVADOS”

RENATA DE OLIVEIRA MELO

**AVALIAÇÃO DE COLUNAS À FLEXOCOMPRESSÃO SOB A ÓTICA DO
EUROCÓDIGO 03 E DA NBR 8800**

Atesto a originalidade deste trabalho.

Assin.: Renata de Oliveira Melo.

(Renata de Oliveira Melo)

Tese apresentada à Universidade Fernando Pessoa
como parte dos requisitos para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil, sob a orientação do
Prof. Doutor Leonel José dos Santos Teixeira
Ramos.

RESUMO

RENATA DE OLIVEIRA MELO: Avaliação de colunas à flexocompressão sob a ótica do Eurocódigo 03 e da NBR 8800.

(Sob a orientação do Prof. Doutor Leonel José dos Santos Teixeira Ramos)

O projeto estrutural em aço requer a adoção de uma série de procedimentos para verificação da estabilidade dos elementos. As colunas, elementos sujeitos predominantemente a esforços de compressão, ao serem dimensionadas, muitas vezes são verificadas aos esforços isolados, não retratando a realidade. A verificação da estabilidade das colunas, frente aos esforços combinados de momento flector e compressão, requer uma análise mais apurada com o intuito de garantir a segurança. O EC3-1-1 estabelece métodos para a verificação da estabilidade de elementos sujeitos a flexão composta e flexão desviada. No Brasil é utilizada a NBR 8800:2008. Desse modo, o presente trabalho procurou avaliar os métodos de cálculo de colunas sujeitas a flexocompressão, sob a ótica do Eurocódigo 03 e da NBR 8800. Para isso, foram utilizadas 3 aplicações, que permitiu analisar e avaliar as semelhanças e diferenças nos cálculos realizados. Desse modo, foi possível observar que ambas as normas possuem a mesma base de cálculo, diferindo em pontos específicos, como alguns fatores e coeficientes empregados. A NBR 8800 acaba apresentando resultados mais conservadores que o EC 3, oriundos de simplificações e coeficientes de redução recomendados.

Palavras Chaves: Estruturas Metálicas; Eurocódigo 03; NBR 8800.

ABSTRACT

RENATA DE OLIVEIRA MELO: Evaluation of columns to flexocompression from the perspective of Eurocode 03 and NBR 8800.

(Under the supervision of Prof Leonel José dos Santos Teixeira Ramos)

Structural steel design requires the adoption of a series of procedures to check the stability of the elements. Columns, which are predominantly subject to compressive stresses, are often checked for isolated stresses when they are designed, which does not reflect reality. Verifying the stability of columns in the face of combined bending moment and compression forces requires a more accurate analysis in order to guarantee safety. EC3-1-1 establishes methods for verifying the stability of elements subject to composite bending and deflected bending. In Brazil, NBR 8800:2008 is used. This study sought to evaluate the calculation methods for columns subjected to flexocompression from the perspective of Eurocode 03 and NBR 8800. Three applications were used to analyse and evaluate the similarities and differences in the calculations carried out. In this way, it was possible to see that both standards have the same calculation basis, differing on specific points, such as some of the factors and coefficients used. NBR 8800 ends up presenting more conservative results than EC 3, due to simplifications and recommended reduction coefficients.

Keywords: Steel structures; Eurocode 03; NBR 8800.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o resultado de várias horas de trabalho e estudos, portanto, faz-se necessário exprimir os meus sinceros agradecimentos. Agradeço infinitamente a Deus, por mais esse propósito alcançado. Ao meu orientador, o Dr. Leonel Ramos, pelo conhecimento transmitido, pela dedicação e clareza nas orientações. Aos mestres, pelos ensinamentos apresentados durante o período do mestrado. E não menos importante, a minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão durante todo esse período.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I	4
1.1 Breve Introdução Histórica	4
1.2 Evolução Histórica das Normas na Europa e no Brasil	5
1.2.1 Eurocódigo 3	5
1.2.2 Norma Brasileira NBR 8800	7
CAPÍTULO II – PROJETO ESTRUTURAL	9
2.1 Recomendações do Projeto Estrutural	9
2.1.1 Propriedades dos Materiais	9
2.1.2 Forma dos Perfis Metálicos	10
2.2 Conceito de Equilíbrio Estático	11
2.2.1 Classificação das Ligações quanto à Rigidez	11
2.2.2 Modelo Estrutural	13
2.3 Estados Limites	14
2.3.1 Estado-Limite Último	14
2.3.2 Estado Limite de Serviço	14
2.4 Combinações de Ações	15
2.4.1 Ações nas Estruturas	15
2.4.2 Tipos de Combinações	15
2.5 Verificação da Segurança	16
2.5.1 Classificação das Secções - EC3-1-1	17
2.5.2 Classificação das Secções - NBR 8800	18

2.6 Colunas-----	19
2.6.1 <i>Efeitos das Imperfeições Geométricas e Plasticidade</i> -----	19
CAPÍTULO III – EUROCÓDIGO 3-----	20
3.1 Colunas à Compressão de acordo com o EC3-1-1-----	20
3.2 Colunas a Flexão Composta e Flexão Desviada de acordo com EC3-1-1-----	24
3.3 Esforço Transverso-----	28
CAPÍTULO IV – NBR 8800:2008-----	31
4.1 Dimensionamento à Compressão de acordo com a NBR 8800-----	31
4.1.1 <i>Índice de Esbeltez</i> -----	32
4.1.2 <i>Comprimento de Flambagem</i> -----	33
4.1.3 <i>Carga Crítica</i> -----	34
4.1.4 <i>Força de Compressão Resistente de Cálculo</i> -----	36
4.2 Colunas à Flexo-compressão-----	36
4.3 Dimensionamento ao Cortante-----	45
CAPÍTULO V – APLICAÇÕES E COMPARATIVOS-----	47
5.1 Modelos de Aplicação-----	47
5.1.1 <i>Aplicação 01</i> -----	47
5.1.2 <i>Aplicação 02</i> -----	64
5.1.1 <i>Aplicação 03</i> -----	73
5.2 Análise das Semelhanças e Divergências-----	82
CONCLUSÃO-----	89
REFERÊNCIAS-----	91
ANEXO A-----	93
ANEXO B-----	94
ANEXO C-----	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01- Ponte de Coalbrookdale, sobre o Rio Severn. -----	4
Figura 02- Diagrama tensão versus deformação dos aços estruturais. -----	10
Figura 03- Tipos de ligações em estrutura metálica.-----	12
Figura 04- Classificação das ligações de acordo com a NBR 8800.-----	12
Figura 05- Comportamento das secções à flexão. -----	17
Figura 06 - Fluxograma do dimensionamento da resistência à Encurvadura.-----	21
Figura 07- Encurvadura lateral de vigas. -----	24
Figura 08- Fluxograma das etapas para determinação da Resistência ao Bambeamento.-----	24
Figura 09 - Fluxograma do Dimensionamento à Compressão.-----	31
Figura 10 - Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.-----	33
Figura 11- Curvas para χ e curva única da NBR 8800.-----	36
Figura 12 - Fluxograma para verificação ao Momento Fletor. -----	37
Figura 13 - Escolha da curva de encurvadura em função da seção transversal.-----	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 - Factores de imperfeição para as curvas de encurvadura. -----	23
Tabela 02 - Curvas de encurvadura lateral recomendadas para secções transversais. -----	25
Tabela 03 - Valores recomendados dos factores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral. -----	26
Tabela 04 - Valores de $N_{Rk}=f_y \cdot A_i$, $M_{i,Rk}=f_y W_i$ e $\Delta M_{i,Ed}$ -----	27
Tabela 05 - Classificação das secções segundo o EC3-1-1 e NBR 8800. -----	83
Tabela 6 – Tabela F.1- Valores do $(b/t)_{lim}$. -----	94
Tabela 07 - Parâmetro referente ao momento fletor resistente. -----	95

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

A: área

A_g : área bruta da seção transversal

A_w : área de uma alma, área de corte

A_v : área resistente ao esforço transversal

b_f : largura da mesa

C: coeficiente, constante de torção

C_b : fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme

C_w : constante de empenamento da seção transversal

C_{my} ; C_{mz} : coeficiente de momento uniforme equivalente

d: altura total da seção transversal; diâmetro; altura da parte recta da alma

E, E_a : módulo de elasticidade do aço

e: excentricidade

f_u : resistência à rotura do aço à tração; tensão última

f_{ub} : resistência à rotura do material do parafuso ou barra redonda rosqueada à tração

f_y : resistência ao escoamento do aço; tensão de cedência

f_{yd} : resistência de cálculo ao escoamento do aço

G: módulo de elasticidade transversal do aço; centro geométrico da seção transversal

h: altura

I: momento de inércia

I_t : constante de torção de St. Venant

J: constante de torção

K: coeficiente de flambagem de barras comprimidas

k: constante de rigidez; parâmetro em geral

l: comprimento

L: vão; distância; comprimento

M: momento fletor

M_{Rd} : momento fletor resistente de cálculo

M_{Sd} : momento fletor solicitante de cálculo
 $M_{y,Ed}$: valor de cálculo do momento fletor actuante, em relação ao eixo y-y
 $M_{z,Ed}$: valor de cálculo do momento fletor actuante, em relação ao eixo z-z
 $M_{y,Rd}$: valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo y-y
 $M_{z,Rd}$: valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo z-z
 N : força axial
 N_{Ed} : valor de cálculo do esforço actuante
 Q : fator de redução total associado à flambagem local
 Q_a : fator de redução que leva em conta a flambagem local de elementos AA
 Q_s : fator de redução que leva em conta a flambagem local de elementos AL
 r : raio de giração; raio de concordância
 t : espessura
 T : momento de torção
 t_f : espessura da mesa
 t_w : espessura da alma
 V_{pl} : força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento
 V_{Rd} : força cortante resistente de cálculo
 V_{Sd} : força cortante solicitante de cálculo
 W : módulo de resistência elástico
 Z : módulo de resistência plástico
 α : coeficiente relacionado à curva de dimensionamento à compressão; factor de imperfeição
 γ : coeficiente de ponderação da resistência ou das ações
 δ : fator de contribuição do aço; deslocamento; flecha
 ϵ : deformação
 ϵ_y : extensão de cedência
 λ : índice de esbeltez; parâmetro de esbeltez
 λ_0 : índice de esbeltez reduzido
 λ_p : parâmetro de esbeltez limite para seções compactas
 λ_r : parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas
 σ : tensão normal
 σ_r : tensão residual de compressão da mesa
 τ : tensão de cisalhamento

χ : fator de redução associado à resistência à compressão; coeficiente de redução para a curva de dimensionamento de colunas à encurvadura

χ_{dist} : fator de redução para flambagem lateral com distorção da seção transversal

ψ : fator de redução de ações; fator de combinação das ações; relações entre tensões

$\bar{\lambda}$: coeficiente de esbelteza adimensional, reduzida ou normalizada

A_{eff} : área efectiva da seção transversal de classe 4, área efectiva da peça

E: módulo de elasticidade

f_y : tensão de cedência do aço

I: momento de inércia da seção

M_e : momento elástico

M_p : momento plástico

M_{cr} : momento crítico elástico de encurvadura lateral

N: esforço axial de compressão

N_{cr} : valor crítico do esforço normal para o modo de encurvadura elástica considerado

$N_{\text{cr,T}}$: valor crítico do esforço de encurvadura elástica por torção

N_E : carga crítica de Euler

ε : fator em função do tipo de aço

λ_1 : valor da esbelteza normalizada associada à encurvadura esbelteza normalizada

λ_p : esbelteza normalizada ou reduzida

λ_{LT} : esbelteza normalizada associada à encurvadura lateral

$v_{\text{máx}}$: flecha no centro da coluna

σ_E : tensão crítica de Euler

χ : fator de redução para o modo de encurvadura relevante

χ_{LT} : coeficiente de redução para a encurvadura lateral

INTRODUÇÃO

O trabalho intitulado “Avaliação de colunas à flexo-compressão sob a ótica do Eurocódigo 03 (EN 1993) e da NBR 8800:2008” foi desenvolvido como requisito para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil pela Universidade Fernando Pessoa.

As colunas são elementos lineares sujeitas predominantemente a esforços de compressão. No dimensionamento de estruturas metálicas, esses elementos muitas vezes são verificados apenas aos esforços de compressão, não retratando a real situação apresentada na estrutura. O trabalho tem como premissa permitir a exploração das abordagens normativas apresentadas no Eurocódigo 03 (EN 1993) - Projecto de estruturas de aço: regras gerais e regras para edifícios, norma europeia e na NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em edifícios, norma brasileira.

A escolha do tema tem como motivação o interesse acadêmico e profissional, que surge do questionamento se a influência dos momentos fletores, juntamente com esforços de compressão, é significativa em colunas metálicas quando comparados a colunas sujeitas apenas à compressão, assim como, quais as semelhanças e diferenças dos métodos de dimensionamentos tratados pela abordagem europeia e brasileira.

O trabalho possui como objetivo principal avaliar colunas sujeitas à flexo-compressão sob a ótica do Eurocódigo 03 e da NBR 8800. Como objetivos secundários, destacam-se:

- Analisar as principais diferenças no tratamento entre a norma adotada na Europa e no Brasil quanto às colunas sujeitas à flexo-compressão;
- Conhecer a influência da flexão associada à compressão em colunas de aço;
- Comparar os resultados no dimensionamento de colunas sujeitas a flexo-compressão de acordo com as normas.

A investigação, em termos metodológicos, sustenta-se no estudo do Eurocódigo 03, também conhecido como NE 1993, e da NBR 8800, estabelecendo uma linha comparativa entre as diferenças apresentadas nas normas retratando os métodos de cálculos propostos. Os métodos de cálculos abordados por ambas as normas foram aplicadas para três perfis metálicos. Os resultados obtidos pelas análises foram comparados e analisados, apresentando as principais diferenças nas abordagens normativas.

Para o estabelecimento dos métodos de cálculos aplicáveis ao estudo foram necessárias a compilação e a sistematização da formulação apresentadas no Eurocódigo 03 e NBR 8800. Além das normas mencionadas, também foram consultados artigos, livros, teses e dissertações desenvolvidos na temática abordada.

O texto está dividido em 05 capítulos. O capítulo 1 apresenta um breve histórico do emprego do aço, evolução das normas aplicáveis na Europa, no Brasil e normas complementares.

O capítulo 2 aborda as recomendações para a construção do projeto estrutural, propriedades dos materiais, tipos de perfis. Também são explorados o conceito de equilíbrio estático, o método dos estados-limites, combinações de esforços e segurança estrutural.

No capítulo 3 descreve o dimensionamento ao esforço de compressão, momento flector, esforço transversal e a combinação de esforços em um mesmo elemento, de acordo com a abordagem do EC3-1-1. A abordagem da NBR 8800 encontra-se no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta as aplicações normativas em três simulações e a análise das principais semelhanças e diferenças dos métodos recomendados por ambas as normas.

Finalmente, são apresentadas sucintamente as principais conclusões do estudo efetuado, bem como, as indicações para futuros trabalhos na análise e dimensionamento de colunas sujeitas a esforços combinados.

O trabalho realizado procurou apresentar as principais semelhanças e diferenças entre as normas no que diz respeito a colunas sujeitas à flexo-compressão. Entende-se que a metodologia apresentada possui algumas limitações, pois para validação do comparativo adotaram-se exemplos com esforços já estabelecidos.

CAPÍTULO I

1.1 Breve Introdução Histórica

De acordo com Berlei (2014), as primeiras evidências da obtenção do ferro datam de aproximadamente 6 mil anos a.C., em civilizações no Egito, Babilônia e Índia. Sua utilização limitava-se a fins militares, devido a raridade na obtenção do metal.

A utilização em escala industrial deu-se somente em meados do século XIX, com a Revolução Industrial. Juntamente com a crescente utilização do ferro desenvolveram-se processos de produção e conformação do material.

A construção da Ponte sobre o Rio Severn em Coalbrookdale, Inglaterra, 1779, foi um dos marcos no emprego do ferro fundido como material na construção civil. A ponte apresentava vãos de 42m, formada por 3 arcos, utilizando o ferro fundido, conforme Figura 01.

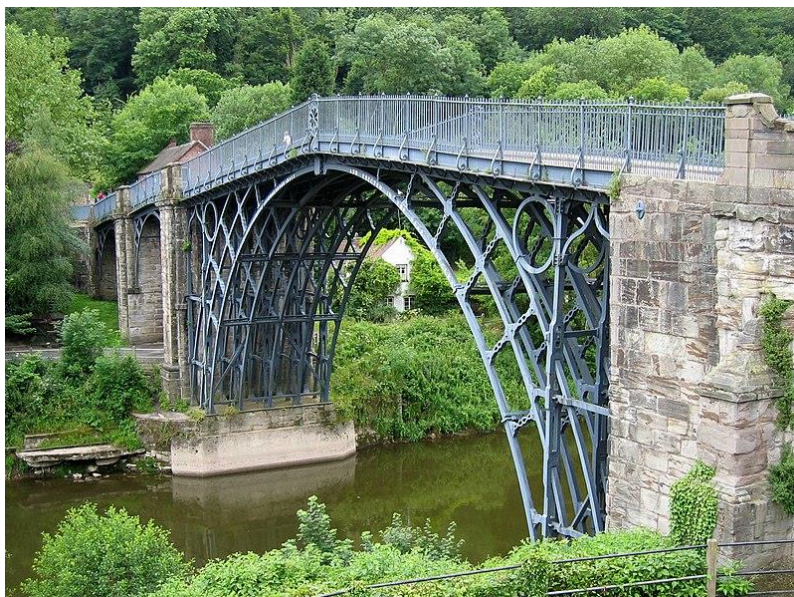


Figura 01- Ponte de Coalbrookdale, sobre o Rio Severn.
Fonte: <https://coisasdaarquitectura.wordpress.com/tag/rio-severn>

O emprego do aço na construção civil apresenta como vantagens a alta resistência mecânica, proporcionando estruturas mais leves, gerando economia nas fundações devido à diminuição do peso próprio da estrutura e prazos menores de execução em virtude da montagem mecanizada, o que pode impactar no custo final. Ainda se destacam a possibilidade de reaproveitamento do material, substituição de peças com relativa facilidade, uma obra mais limpa, redução de desperdícios e a compatibilidade com qualquer tipo de vedação (Berleli, 2014).

Dentre as desvantagens dos elementos em aço está a suscetibilidade aos efeitos da corrosão, necessitando de uma camada de proteção. Outra desvantagem expressiva é a resistência das estruturas de aço em situação de incêndio. Os perfis, pela pequena espessura das seções e alta condutividade térmica, apresentam perda de resistência em temperaturas elevadas. A pouca oferta no mercado e falta de alguns perfis muitas vezes restringe sua utilização.

1.2 Evolução Histórica das Normas na Europa e no Brasil

A normatização para estruturas em aço tem por objetivo fornecer parâmetros e regras aplicáveis, de acordo com os materiais adotados, requisitos de confiabilidade e execução para cada país.

1.2.1 Eurocódigo 3

A unificação dos procedimentos e regras para o dimensionamento do projeto estrutural na Europa foi fruto de várias décadas, iniciada a partir de 1975, que culminou na conceição de uma relação de normas aprovadas pelos estados-membros da União Europeia. Através dessas normas foram definidos os requisitos básicos que todas as construções devem adotar: resistência mecânica, estabilidade, resistência em situação de incêndio, segurança na utilização, isolamento acústico, economia de energia, isolamento térmico, higiene, saúde e proteção ao ambiente (Silva, 2016).

As normas estruturais estão divididas em:

- EN 1990 – Eurocódigo: Bases para o projeto de estruturas;
- EN 1991 – Eurocódigo 01: Ações em estruturas;

- EN 1991 – Eurocódigo 02: Dimensionamento de estruturas de concreto;
- EN 1991 – Eurocódigo 03: Dimensionamento de estruturas de aço;
- EN 1991 – Eurocódigo 04: Dimensionamento de estruturas mistas aço-concreto;
- EN 1991 – Eurocódigo 05: Dimensionamento de estruturas de madeira;
- EN 1991 – Eurocódigo 06: Dimensionamento de estruturas de alvenaria;
- EN 1991 – Eurocódigo 07: Projeto geotécnico
- EN 1991 – Eurocódigo 08: Dimensionamento de estruturas para resistência sísmicas;
- EN 1991 – Eurocódigo 09: Dimensionamento de estruturas de alumínio.

O EN 1993, também conhecido como EC 3, é um conjunto de normas que apresenta os parâmetros relacionados com o nível de segurança e ações a serem consideradas no dimensionamento de estruturas de aço, que se divide em doze subpartes:

- EN 1993-1-1 – Regras gerais e regras para edificação;
- EN 1993-1-2 – Dimensionamento sob situação de incêndio;
- EN 1993-1-3 – Elementos de chapas finas formadas a frio;
- EN 1993-1-4 – Aços Inoxidáveis;
- EN 1993-1-5 – Elementos estruturais formados com placas;
- EN 1993-1-6 – Resistência e estabilidade de cascas estruturais;
- EN 1993-1-7 – Resistência e estabilidade de placas de aço sob carregamento transversal;
- EN 1993-1-8 – Dimensionamento de ligações estruturais;
- EN 1993-1-9 – Resistência à fadiga de estruturas de aço;
- EN 1993-1-10 – Tenacidade dos materiais e propriedades no sentido da espessura;
- EN 1993-1-11 – Dimensionamento de estruturas com elementos de aço tracionadas;
- EN 1993-1-12 – Regras suplementares para aço de alta resistência.

Os Eurocódigos não apresentam todos os requisitos para o dimensionamento estrutural, devendo cada estado-membro da União Europeia fixar recomendações complementares.

Silva (2016) enfatiza que o EC 3 deve ser utilizado em conjunto com as normas EN 1991-1: Ações e estruturas, EN 1998-8: Dimensionamento de estruturas para resistência a ações sísmicas e EN 1997-7: Projeto geotécnico. A estrutura, ao ser dimensionada e executada, deve apresentar desempenho compatível com as funções e vida-útil definidas. Isso significa que devem ser escolhidos materiais adequados; o dimensionamento e detalhamento devem ser realizados de forma apropriada, bem como os métodos de execução, fiscalização e controle.

1.2.2 Norma Brasileira NBR 8800

A NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – exhibe em seu escopo as definições dos princípios básicos, que trata do cálculo estrutural em aço e estruturas mistas de aço e concreto à temperatura ambiente, e aplicações em edifícios comerciais, residenciais e públicos.

A norma apresenta uma abordagem voltada para os perfis laminados e soldados, ligações realizadas por parafusos ou soldas, além do dimensionamento de passarelas de pedestre e suporte de equipamentos, sendo aplicável para aços não-híbridos. O comportamento do aço em situação de incêndio e dimensionamento sob a ação de sismos é descrita em normas específicas.

A NBR 8800 divide-se em doze capítulos, relacionados abaixo:

- Escopo;
- Referências normativas;
- Simbologia e unidades;
- Condições gerais de projeto;
- Condições específicas para o dimensionamento de elementos de aço;
- Condições específicas para o dimensionamento de ligações metálicas;
- Condições específicas para o dimensionamento de elementos mistos de aço e concreto;
- Condições específicas para o dimensionamento de ligações mistas;
- Condições adicionais de dimensionamento;
- Condições adicionais de projeto;
- Estados limites de serviços;

- Requisitos básicos de fabricação, montagem e controle de qualidade.

Nos seus dezoito Anexos são descritos os tipos de aços estruturais e formulações empregadas nas verificações dos elementos estruturais em aço e mistos aço-concreto.

A NBR 8800 relaciona uma série de outras normas complementares, dentre elas os Eurocódigos, que tratam sobre os materiais aceitos, fabricação, ações nas estruturas e segurança estrutural.

CAPÍTULO II – PROJETO ESTRUTURAL

2.1 Recomendações do Projeto Estrutural

No projeto estrutural adota-se uma série de procedimentos e etapas de forma que o projeto seja arquitetado de modo seguro, com técnicas apropriadas e desempenhe as funções para o qual foi projetado durante a vida útil pré-determinada.

O projeto estrutural compreende a escolha dos materiais adequados, o dimensionamento e o detalhamento dos elementos estruturais, de forma que esses resistam aos esforços gerados pelas ações. Deve-se observar se os deslocamentos se encontram dentro dos limites aceitáveis, o emprego de métodos de controle e fiscalização das fases de dimensionamento, construção e utilização (Silva, 2016).

Os aços empregados para a finalidade estrutural devem apresentar propriedades mecânicas apropriadas quando submetidos à ação de tensões e deformações, além dos requisitos de durabilidade durante a vida útil (Fakury, 2016).

Quando as condições ambientais possam afetar a durabilidade da estrutura em aço, recomenda-se a escolha dos materiais e/ou tipo de proteção superficial, além do posicionamento das peças no detalhamento, de forma a evitar acúmulo de água e poeira (Silva, 2016).

2.1.1 Propriedades dos Materiais

As propriedades mecânicas dos aços empregados em estruturas são obtidas pelo ensaio de tração à temperatura ambiente. Através de ensaios é possível obter o diagrama tensão x deformação, sendo possível observar o regime elástico e o regime plástico que engloba a fase de escoamento até alcançar a rotura, conforme apresentado na Figura 02.

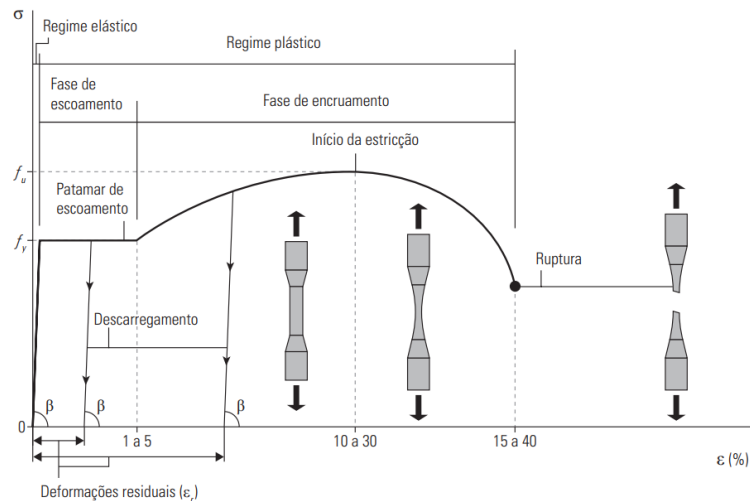


Figura 02- Diagrama tensão versus deformação dos aços estruturais.
Fonte: Faruky, 2016.

No ensaio são obtidas a tensão de escoamento (NBR 8800), isto é, a tensão de cedência (EC-03.1.1), e a tensão de ruptura do aço ensaiado.

Silva (2016) descreve que as propriedades dos materiais devem ser adotadas como os valores nominais característicos determinados por ensaios específicos caso não possuam os valores superiores e inferiores. O valor característico deve ser minorado através do coeficiente de segurança nominal γ_M fornecido, cujo valor varia em função do modo de colapso. O EC3-1-1 recomenda o valor do γ_M : $\gamma_{M0}=1,0$, $\gamma_{M1}=1,0$, $\gamma_{M2}=1,25$. Em contrapartida, a NBR 8800:2008 estabelece o valor de 1,10 para verificações ao escoamento (cedência) e 1,35 para elementos sujeitos a ruptura.

2.1.2 Forma dos Perfis Metálicos

Para Simões (2007), a forma das seções dos perfis é dependente do esforço atuante sobre o elemento, da facilidade da montagem, dos tipos de ligações adotadas, além dos fatores estéticos e da durabilidade.

Rebello (2007) destaca que a escolha do perfil mais adequado está relacionada com o princípio de distribuição de massa das seções, relacionando a forma das seções com os esforços a que são submetidos.

Para o esforço de tração simples pode-se empregar qualquer tipo de seção, preferencialmente seções que o material esteja concentrado junto ao centro de massa da seção. Nos esforços de compressão simples procura-se empregar seções em que a área

esteja mais afastada do centro de massa em ambas as direções, em razão da encurvadura. Para os esforços de flexão são requeridas formas de seções, cujo material esteja afastado do centro de gravidade em relação ao eixo que ocorre o momento fletor. Por essa razão, os perfis mais utilizados para colunas são o perfil H, o perfil I e tubulares, enquanto para vigas, o perfil I.

2.2 Conceito de Equilíbrio Estático

A análise estrutural é responsável por determinar os esforços internos, as reações e os deslocamentos que as ações irão provocar nos elementos estruturais. Compreende uma das etapas de maior responsabilidade, pois uma vez que não forem avaliadas apropriadamente, o dimensionamento apresentará falhas.

Simões (2007) salienta a importância de avaliar os esforços de cálculos atuantes sobre a estrutura, pois se essa não for considerada adequadamente, pouco importa a aplicação do dimensionamento para determinar a capacidade resistente do perfil utilizado.

Souza (2011) afirma que os esforços e deslocamentos depende da rigidez e deslocabilidade da estrutura, do comportamento da seção transversal, das ligações, das imperfeições e da estabilidade global da estrutura.

Segundo Pfeil (2021), o funcionamento das estruturas pré-fabricadas, como é o caso das estruturas em aço, dependem do comportamento das ligações. Em estruturas metálicas, as vinculações entre os elementos devem ser estabelecidas pelo calculista, buscando o modelo estrutural mais próximo do real e o detalhamento das ligações deve corresponder ao modelo adotado.

2.2.1 Classificação das Ligações quanto à Rigidez

As ligações têm a função de unir elementos, como viga-viga, viga-pilar ou barras adjacentes. A Figura 03 mostra exemplos básicos de união de um pórtico em vários pisos.

Legenda

- 1 Junta viga-coluna com viga num só lado
- 2 Junta viga coluna com vigas nos dois lados
- 3 Emenda de viga
- 4 Emenda de pilar
- 5 Base de pilar

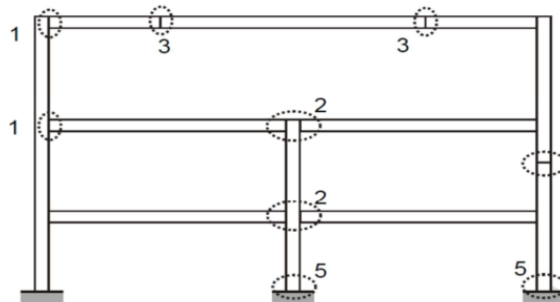


Figura 03- Tipos de ligações em estrutura metálica.
Fonte: Marques, 2013.

Segundo Marques (2013), o comportamento global da estrutura metálica está relacionado com o tipo de ligação adotada, variando da ligação apoiada até ao encastramento completo.

Souza (2011) afirma que as ligações são idealmente classificadas como ligações flexíveis ou rígidas, porém, a rigor, o comportamento das ligações é definido por uma curva momento-rotação, onde é definida sua rigidez, momento resistente e capacidade de rotação da ligação, conforme Figura 04.

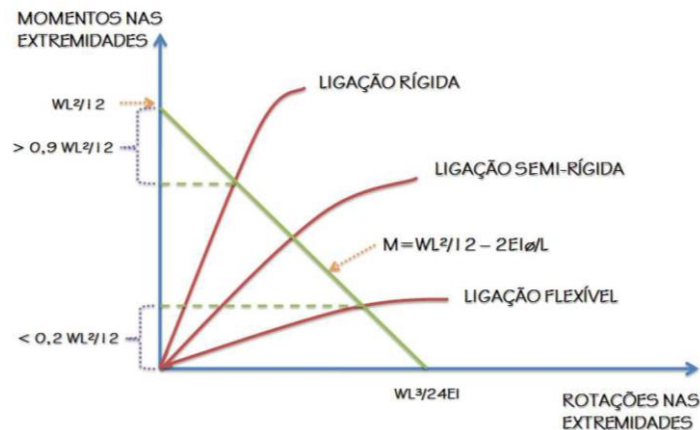


Figura 04- Classificação das ligações de acordo com a NBR 8800.
Fonte: Souza, 2011.

Na ligação rígida considera-se restrições de rotação de aproximadamente 90%, sendo capaz de transferir o esforço cortante e momento fletor para o elemento ligado. O ângulo entre os elementos estruturais, que se intercepta, consegue manter-se mesmo após a aplicação do carregamento da estrutura e apresenta possibilidade de deformações

das peças ligadas. O pórtico com ligações rígidas é considerado estável para ações verticais e horizontais. A rigidez do pórtico se dá através da rigidez à flexão dos elementos vigas-pilar, apresentando deslocamentos horizontais muito pequenos.

As ligações semi-rígidas apresentam restrições de rotação da ordem de 20% a 90%, sendo possível a transmissão de esforços para o elemento ligado, mas esse apresenta valor inferior ao da ligação rígida. Nesse tipo de ligação há grande dificuldade de estabelecer uma relação adequada.

Nas ligações flexíveis a restrição de rotação relativa entre os elementos ligados é muito pequena, isto é, permite a rotação entre as partes ligadas após a atuação do carregamento superior a 80%. Em vigas sujeitas à flexão simples, pode-se considerar a transmissão apenas do esforço cortante. Nesse modelo, o pórtico é estável apenas a cargas verticais, sendo que para as cargas horizontais, os pilares devem apresentar rigidez suficiente para resistirem sozinhos a esse esforço. Em alguns casos, para melhorar a rigidez da estrutura empregam-se os contraventamentos.

As ligações flexíveis são mais simples de serem executadas e apresentam menor custo em relação às ligações rígidas, porém requerem a necessidade da utilização dos contraventamentos, que podem induzir a concentração de tensões devido a forças horizontais nas fundações.

2.2.2 Modelo Estrutural

A análise da estrutura metálica pode-se dar através da análise global considerando a estabilidade dos elementos, da seção transversal, comportamento das ligações, imperfeições e deformabilidade da estrutura. Para estruturas isostáticas, utiliza-se a análise global elástica, enquanto para as estruturas hiperestáticas, pode ser utilizada a análise global elástica ou a análise global plástica (Silva, 2016).

Na análise global elástica adota-se a relação tensão-deformação de forma linear, significando que em qualquer ponto da estrutura, os esforços atuantes não ultrapassam a tensão de escoamento (cedência) do aço empregado. Na análise global plástica admite-se que em alguns pontos da seção sofrerá plastificação, formando as rótulas plásticas. No entanto, nas zonas menos solicitadas ocorre a redistribuição de esforços.

2.3 Estados Limites

As verificações quanto à perda de equilíbrio estático, colapso interno da estrutura ou das ligações e ruína por fadiga são alguns dos fatores a serem avaliados no dimensionamento e verificações das peças de aço empregadas. Nesse sentido, deve-se verificar as condições de segurança através do ELU e condições de desempenho de utilização no ELS (Souza, 2017).

No método dos estados limites, as ações e solicitações são abordadas de forma semi-probabilística e a segurança, de forma qualitativa, majorando os esforços e minorando a resistência do material em razão de sua variabilidade.

Segundo o EN 1990, para que a estrutura satisfaça os critérios de segurança, deve-se considerar as situações permanentes de dimensionamento, situações transitórias de carregamento, condições excepcionais e efeitos sísmicos, caso seja aplicável.

2.3.1 Estado-Limite Último

O Estado-Limite Último (ELU) pode ser entendido como fenômenos relacionados a ductilidade, máxima flambagem, fadiga, torção das peças e fraturas, isto é, ao colapso da estrutura, que podem colocar em risco a segurança dos ocupantes e bens. Está associado ao esgotamento da capacidade resistente ou perda de equilíbrio.

No ELU são empregues as combinações mais desfavoráveis de ações previstas na vida útil, da construção ou da atuação de uma ação excepcional.

2.3.2 Estado Limite de Serviço

Definidos com base nas condições particulares de utilização dos elementos estruturais, relacionados com o comportamento da estrutura. Neles são verificados os estados limites de deformação e vibração.

No ELS são considerados a funcionalidade da estrutura, o conforto dos ocupantes e condições relacionadas com a aparência dentro dos limites aceitáveis.

2.4 Combinações de Ações

As combinações de cálculo devem apresentar a majoração das cargas quantificadas na estrutura, levando em consideração as normas e regulamentos aplicáveis.

2.4.1 Ações nas Estruturas

As estruturas são projetadas para resistir todas as ações atuantes durante sua vida útil, apresentando como características a segurança, o desempenho e a durabilidade. As ações podem ser entendidas como um conjunto de cargas, que atuam na estrutura, de forma direta ou indireta (Souza, 2017).

As ações podem ser classificadas de acordo com a variação de tempo, em:

- Ações Permanentes (G): não apresentam variação significativa de intensidade e direção ao longo da vida útil da construção. Como exemplos, destacam-se o peso próprio, alvenaria, revestimento etc.
- Ações Variáveis (Q): apresentam variação significativa durante a vida útil da estrutura, destacando-se sobrecargas de utilização, ação do vento, variação de temperatura, dentre outras.
- Ações Excepcionais (E): apresentam baixa probabilidade de ocorrência, tais como explosões, choque de veículos, sismos e incêndios.

2.4.2 Tipos de Combinações

O carregamento é constituído por um conjunto de ações com probabilidade de atuarem juntas sobre uma estrutura. Nas combinações de cálculo são determinados os efeitos mais nocivos pela combinação de ações (Souza, 2017).

As combinações de ações no Estado Limite Último dividem-se em construções normais e de construção, que na primeira podem ocorrer durante a vida útil da construção, enquanto na segunda, podem ocorrer durante a fase de construção.

As combinações no Estado Limite de Serviço são determinadas com a finalidade de verificação do desempenho satisfatório para a finalidade que é destinada, dividindo-

se em combinações quase permanentes, utilizadas para verificação de deslocamentos e combinações frequentes, para verificação de vibrações na estrutura (Fakury, 2016).

2.5 Verificação da Segurança

De acordo com Simões (2014), o rigor na determinação de um elemento estrutural terá pouca importância se os esforços não forem convenientemente avaliados. Na análise global da estrutura deve-se observar a rigidez e deslocabilidade dos elementos e apoios, comportamento das seções, ligações e imperfeições.

A análise global elástica é utilizada para estruturas isostáticas, considerando que o material possui um comportamento linear quando submetido a uma tensão. Segundo Martins (2011), nas estruturas hiperestáticas os esforços podem ser obtidos pela análise global elástica, considerando a relação tensão-deformação linear ou através da análise global plástica, baseando na plastificação de alguns pontos da seção.

A análise global plástica parte do pressuposto de que a plastificação das seções da estrutura apresenta rótulas plásticas e redistribuição dos esforços das regiões mais solicitadas para as menos esforçadas, adotando um comportamento elasto-plástico perfeito.

A análise da estrutura pode ser realizada considerando os efeitos de 1ª ordem ou efeitos de 2ª ordem. Na primeira, os esforços são obtidos a geometria inicial, isto é, indeformada, enquanto na análise de 2ª ordem os esforços internos são influenciados pela configuração deformada da estrutura, conhecidos como efeitos globais P- Δ .

Na maioria das estruturas metálicas, para a análise global da estrutura, emprega-se a análise de 1ª ordem, desprezando os efeitos de 2ª ordem. A análise de 2ª ordem deve ser considerada quando os deslocamentos podem aumentar significativamente os esforços ou modifiquem o comportamento da estrutura.

Para o EC3-1-1, pode-se empregar a análise de 1ª ordem, caso o fator de carga α_{cr} seja maior ou igual a 10 e menor que 15.

2.5.1 Classificação das Secções - EC3-1-1

A encurvadura local possui uma influência na capacidade resistente de rotação de uma secção, isto é, enquanto na secção compacta ocorre a plastificação completa da secção, na secção esbelta, isso pode não ocorrer (Simões, 2014).

Em secções da alma ou banzos esbeltos são mais suscetíveis aos efeitos de instabilidades locais, antes mesmo que o elemento atinja a resistência de cálculo. Em função desse efeito, o EC 3 classifica as secções em quatro classes, em função da capacidade de rotação e formação das rótulas plásticas, como mostrado na Figura 05.

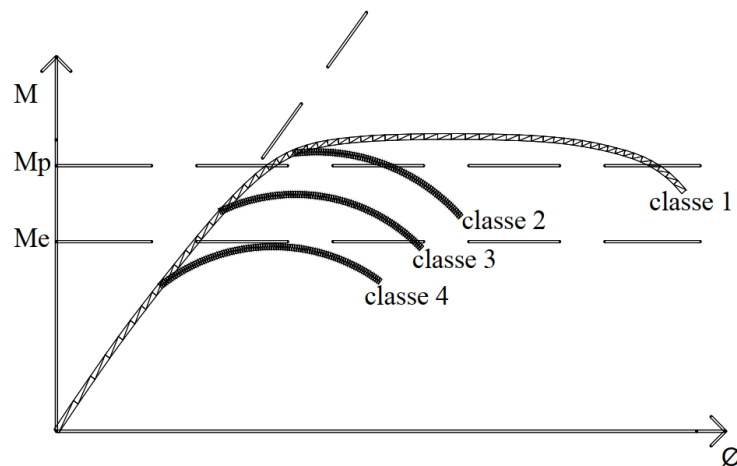


Figura 05- Comportamento das secções à flexão.
Fonte: Martins, 2011.

- Classe 1 – formam rótulas plásticas, com capacidade de rotação superior à mínima exigida para análise plástica;
- Classe 2 – podem alcançar o momento plástico, mas possuem uma capacidade de rotação limitada, sendo considerada uma secção compacta;
- Classe 3 – a tensão na fibra mais externa comprimida da secção pode atingir a tensão de cedência, mas o momento de plastificação poderá não ser alcançado, devido à instabilidade local. Pode ser designada como secção semi-compacta;
- Classe 4 – secções em que é necessário considerar os efeitos da encurvadura local na verificação da resistência à flexão ou compressão, cuja resistência pode ser verificada pelo cálculo das secções efetivas reduzidas. A secção é considerada esbelta.

A classificação em classes pelo EC 3 é realizada de acordo com a razão entre a largura x espessura das partes comprimidas e do tipo de aço empregado. A alma e mesa do perfil podem assumir classificações diferentes, porém adota-se a classe mais alta para a verificação do perfil, isto é, a mais desfavorável (Simões, 2007).

Nas seções submetidas à flexão composta há uma série de pares de valores M-N que podem levar a seção ao limite, gerando uma maior complexidade. A classificação de seções sujeitas à flexão composta pode recorrer a procedimentos simplificados, isto é, considerando a seção sujeita à compressão pura e realizar a estimativa do eixo neutro com base nos esforços atuantes sobre a seção.

2.5.2 Classificação das Seções - NBR 8800

As seções à flexão, de acordo com a NBR 8800, são classificadas em três classes:

- Seção Compacta – são seções que apresentam uma robustez tal, que consegue desenvolver a distribuição de tensões plásticas, antes da flambagem local da seção. Nesse tipo de seção, o momento resistente máximo atinge o momento de plastificação da seção.
- Seção Semi-Compacta – seções que podem atingir o escoamento, mas não a completa plastificação da seção, antes que atinja a flambagem localizada. Essas seções apresentam limitada capacidade de rotação antes que ocorra a ruína. O momento resistente é menor que o momento de plastificação.
- Seção Esbelta – a ruína da seção ocorre antes do alcance da plastificação de qualquer elemento constituinte, sendo a resistência determinada pelo momento resistente crítico.

Determinada a classe da seção, é possível verificar sua resistência aos esforços atuantes por meio das formulações propostas em função da sua classificação.

2.6 Colunas

As colunas são elementos de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças de compressão são preponderantes, podendo apresentar distribuição constante de tensões, quando solicitado (Chamberlain, 2013).

O colapso de colunas geralmente ocorre por instabilidade da seção em um ponto específico, conhecida como flambagem local e/ou flambagem global, provocada por flexão.

2.6.1 Efeitos das Imperfeições Geométricas e Plasticidade

Souza (2017) afirma que, nos casos práticos, há sempre alguma imperfeição geométrica advinda do processo de construção, que afetam o comportamento do elemento, ou tensões residuais nas seções, oriundas da fabricação, que alteram o diagrama tensão-deformação do material.

Nos elementos sujeitos a imperfeições geométricas, não ocorrem bifurcação do equilíbrio, isto é, os deslocamentos aumentam gradativamente em função dos acréscimos da carga aplicada. Quando os elementos são impostos à flexão composta, limitam-se a máxima tensão a resistência ao escoamento da seção.

Pfeil (2021) destaca que, nas aplicações práticas, os elementos estruturais geralmente estão sujeitos às ações combinadas de solicitações, dando origem a solicitação de flexotração e flexocompressão. Esse efeito é considerado de segunda ordem, pois altera a geometria inicial do elemento, sendo relevante para elementos com elevado comprimento de flambagem, pois induzem a rotura por flambagem.

Silva (2016) salienta que é possível transformar o dimensionamento à flexão composta num dimensionamento à compressão simples através da introdução de um fator de redução da capacidade resistente χ . O Eurocódigo 03 considera uma simulação da excentricidade da carga, tensões residuais e o regime elastoplástico através do fator de imperfeição α , que assume valores entre 0,21 e 0,76, dependendo do tipo de seção no plano de deformação.

CAPÍTULO III – EUROCÓDIGO 3

Os elementos comprimidos têm sua resistência determinada, considerando o comprimento de encurvadura, com seção transversal constante, integrado ao pórtico, considerando o comprimento fictício de uma barra rotulada nos extremos.

3.1 Colunas à Compressão de acordo com o EC3-1-1

As colunas são conhecidas como elementos verticais que suportam as cargas axiais de compressão, podendo estar sujeitas a instabilidades provocadas devido a sua esbeltez. Elementos esbeltos são mais suscetíveis aos efeitos de encurvadura, enquanto elementos com esbeltez média são sensíveis aos efeitos das imperfeições.

A encurvadura é caracterizada pela presença de grandes deformações transversais, sendo preponderante em elementos de aço devido à alta resistência do aço e esbeltez dos perfis metálicos. Nas estruturas reais é inevitável que ocorram imperfeições, isto é, imperfeições geométricas e imperfeições dos materiais, provocando um afastamento do comportamento teórico (Simões, 2014).

O dimensionamento de elementos sujeitos à compressão simples, pela EC3-1-1, baseia-se nas curvas de dimensionamento à encurvadura (Marquoi e Rondal), considerando as imperfeições causadas por falta de linearidade, carga excêntrica, tensões residuais, substituindo-as por uma deformada inicial equivalente, na qual a resistência é verificada pela Equação 1.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1.0 \quad (1)$$

N_{Ed} : Valor de cálculo do esforço axial de compressão.

$N_{c,Rd}$: Valor de cálculo do esforço axial resistente das seções.

A resistência da seção sujeita à compressão, de acordo com EN 1993-1-1, é determinada pela equação em função da classe do perfil.

Classe 1,2 e 3:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2)$$

Classe 4:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3)$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de segurança, definido pelo EC3-1-1.

A: Área total da seção.

f_y : Tensão de cedência do aço.

A_{eff} : Área efectiva da seção transversal de classe 4.

No caso de elementos não contraventados lateralmente, o EC 3 recomenda a verificação da resistência considerando um fator de redução χ . O fluxograma da Figura 06 apresenta as etapas de cálculo para determinação da resistência à Encurvadura.

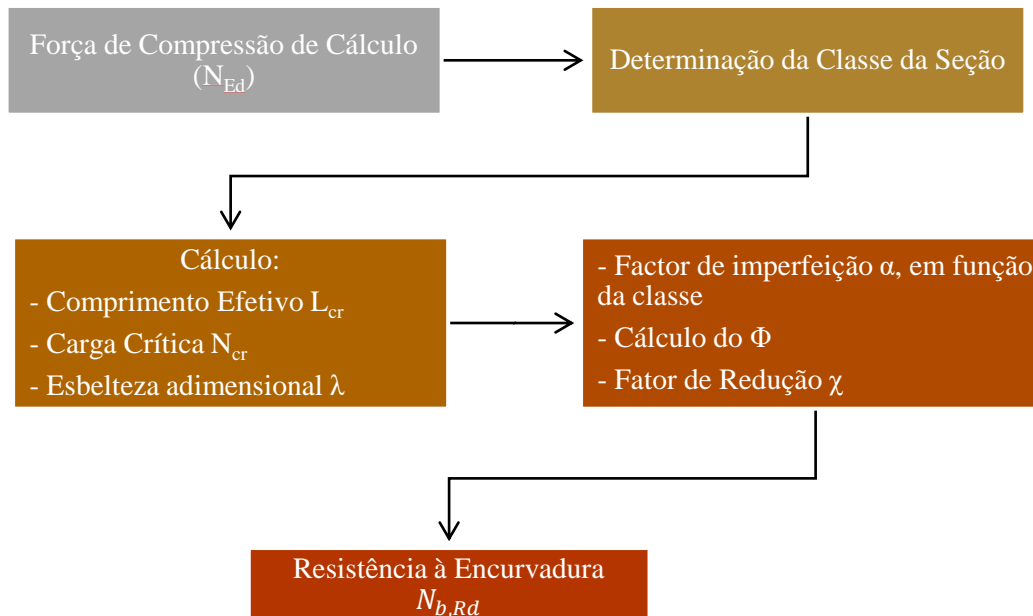


Figura 06 - Fluxograma do dimensionamento da resistência à Encurvadura.

Fonte: Autoria Própria, 2023.

Adicionalmente, deve-se verificar a condição referente à encurvadura por flexão (varejamento) em elementos de secção e esforço axial constantes, através das expressões 04 ou 05, em função da classificação:

Classe 1, 2 e 3:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4)$$

Classe 4:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5)$$

$N_{b,Rd}$: Resistência à encurvadura por flexão.

χ : Factor de redução para o modo de encurvadura relevante.

γ_{M1} : coeficiente parcial de segurança, definido pelo EC3-1-1.

O factor de redução de encurvadura relevante é obtido pela Equação 6, limitando seu valor a 1.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 \quad (6)$$

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (7)$$

A carga crítica elástica de encurvadura, utilizada para o cálculo do coeficiente de esbelteza adimensional, é calculada baseadas nas propriedades da secção utilizada, obtida pela Equação 8.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(k L)^2} \quad (8)$$

O coeficiente de esbelteza adimensional pode ser obtido pelas Equações 9 e 10, em função da classe do perfil.

Classe 1, 2 e 3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \lambda_1} \quad (9)$$

Classe 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr} \sqrt{A_{eff}/A}}{i \cdot \lambda_1} \quad (10)$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_y} = 93,9 \varepsilon \quad (11)$$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad (12)$$

$\bar{\lambda}$: coeficiente de esbelteza adimensional.

α : factor de imperfeição generalizada.

N_{cr} : carga crítica elástica.

L_{cr} : comprimento de encurvadura correspondente.

i : raio de giração da seção.

O factor de imperfeição real α , assume os valores apresentados no Quadro 6.1, no EC3-1-1, de acordo com a curva de dimensionamento à encurvadura (Tabela 01).

Tabela 01 - Factores de imperfeição para as curvas de encurvadura.

Curva de encurvadura	a ₀	a	b	c	d
Factor de imperfeição α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Fonte: EC3-1-1.

Para as seções não previstas no Quadro 6.2 do EC3-1-1, devem ser consideradas de forma análoga as formas apresentadas, de acordo com a classificação. A classificação da curva reflete a esbeltez da peça e o comprimento de encurvadura, conforme Figura 13 contida no Anexo A.

3.2 Colunas a Flexão Composta e Flexão Desviada de acordo com EC3-1-1

Vigas sob condição de restrição de deslocamentos e rotação no plano da secção, submetidas à flexão, provocadas por dois momentos fletores, aplicados nos extremos, gerará nas fibras superiores compressão, enquanto nas fibras inferiores, tração.

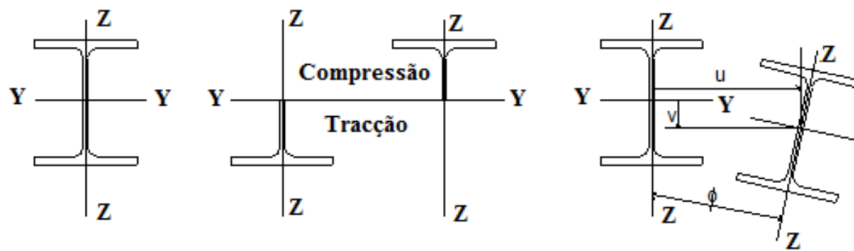


Figura 07- Encurvadura lateral de vigas.
Fonte: Martins, 2011.

A zona superior à compressão pode apresentar o fenômeno de instabilidade, conhecido como bambeamento ou encurvadura por flexo-torção, ao alcançar o Momento Crítico, isto é, as deformações transversais, seguidas pelas rotações, provocará instabilidade na zona comprimida, assim que essa alcançar a capacidade resistente, apresentando torção em relação à posição de equilíbrio, enquanto a zona tracionada tende a permanecer na posição inicial.

O Fluxograma apresenta de forma sintetizada as etapas de verificação de elementos sem contraventamento lateral, suscetíveis a instabilidade por Encurvadura Lateral (Figura 08).

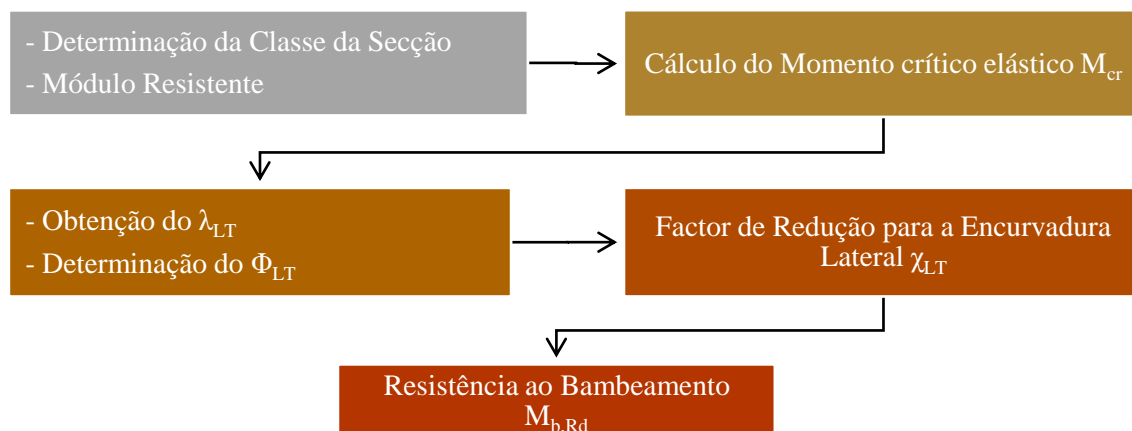


Figura 08- Fluxograma das etapas para determinação da Resistência ao Bambeamento.
Fonte: Autoria Própria, 2023.

No dimensionamento, o comprimento de encurvadura de peças comprimidas, com restrições de deslocamentos nos extremos, pode-se, a favor da segurança, considerar o $k=1$. Caso a viga esteja contraventada lateralmente, considera-se que a viga não esteja sujeita ao efeito de bambeamento.

O EC 3, pelo Método Geral, determina o Momento resistente de cálculo à encurvadura lateral através da expressão:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (13)$$

χ_{LT} : Factor de redução para a encurvadura lateral correspondente à esbelteza normalizada.

$W_y = W_{pl,y}$ seções da classe 1 e 2.

$W_y = W_{eff,y}$ seções da classe 4.

$W_y = W_{el,y}$ seções da classe 3.

De forma análoga, para a determinação do factor de redução para a encurvadura lateral correspondente à esbelteza normalizada, será necessário efetuar o cálculo do ϕ_{LT} , $\bar{\lambda}_{LT}$ e M_{cr} .

O valor de $\chi_{LT} \leq 1$.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (14)$$

$$\phi_{LT} = 0.5 [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \lambda_{LT}^{-2}] \quad (15)$$

O factor de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral é obtido na Tabela 02, de acordo com o tipo de seção e relação entre h/b .

Tabela 02 - Curvas de encurvadura lateral recomendadas para seções transversais.

Secção	Limites	Curva da encurvadura
Secções I ou H laminados	$h/b \leq 2$	A
	$h/b > 2$	B
Secções I ou H soldadas	$h/b \leq 2$	C
	$h/b > 2$	D
Outras secções	---	D

Fonte: EC3-1-1.

Tabela 03 - Valores recomendados dos factores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral.

Curva de encurvadura	a	B	C	D
Factor de imperfeição α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Fonte: EC3-1-1.

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (16)$$

O momento crítico de uma seção depende, basicamente, do tipo de carregamento que traduz na forma do diagrama de momentos fletores, das condições de apoio, do comprimento do elemento entre as seções transversais contraventados lateralmente, da rigidez a flexão lateral, rigidez a torção, rigidez de empenamento e do ponto de aplicação do carregamento, conforme a Equação 17.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{0.5} - (C_2 z_g) \right\} \quad (17)$$

C_1, C_2 : coeficiente do tipo de carregamento, obtidos no SN003.

I_z : menor momento de inércia da seção.

k_z : factor de comprimento efetivo.

k_w : factor de comprimento efetivo, podendo ser adotado 1.

G: módulo de distorção.

E: módulo de Young.

I_T : constante de torção.

I_w : constante de deformação.

L: distância entre os pontos travados (L_{cr}).

z_g : distância entre o ponto de aplicação da carga e o centro de corte.

O comportamento de um elemento sob a ação de compressão axial e flexão desenvolve um comportamento complexo. Para a análise, o item 6.3.3 do EC3-1-1 recomenda a aplicação do método da interação, que adotam o modelo de um pórtico com apoios simples em forquilha nas extremidades, possuindo travamento lateral contínuo, sob a ação de momentos fletores e esforço axial de compressão, acompanhados por cargas transversais.

A verificação da instabilidade do elemento pode ser realizada analisando os efeitos de segunda ordem, oriundas do deslocamento lateral do sistema, devendo obedecer às condições apresentadas nas Equações 18 e 19, quando solicitados à flexão composta desviada com esforço axial. As equações correspondem as equações de interação dos esforços, no qual cada termo estabelece a percentagem de utilização de cada esforço presente.

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (18)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (19)$$

Onde:

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$: valores dos esforços de cálculo de compressão e dos momentos fletores máximos, em relação aos eixos y-y e zz.

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$: momentos devido ao deslocamento do eixo, de acordo com 6.2.9.3, para as secções da Classe 4.

χ_y e χ_z : coeficiente de redução devido à encurvadura por flexão.

χ_{LT} : coeficiente de redução devido à encurvadura lateral.

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} : factores de interação.

Tabela 04 - Valores de $N_{Rk}=f_y \cdot A_i$. $M_{i,Rk}=f_y W_i$ e $\Delta M_{i,Ed}$

Classe	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{n,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{n,z} N_{Ed}$

Fonte: EC3-1-1.

O EC 3 apresenta dois métodos para a determinação dos valores dos coeficientes de interação, apresentados nos Anexos A e B do EC3-1-1.

Para os elementos suscetíveis de sofrer deformações por torção, deve-se realizar o cálculo do coeficiente de redução, devido à encurvadura lateral, e verificar a estabilidade por um dos Métodos apresentados no EC 3. No caso de os elementos não serem suscetíveis, adota-se o valor do coeficiente de deformação lateral igual a 1.

3.3 Esforço Transverso

A verificação do esforço transverso na secção transversal deve satisfazer a condição da Equação 20, isto é, o esforço de cálculo de corte deve ser igual ou inferior à resistência de corte da secção transversal:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0 \quad (20)$$

Onde:

$V_{c,Rd}$: valor de cálculo do esforço transverso resistente.

V_{Ed} : valor de cálculo do esforço transverso actuante.

Para o cálculo plástico, o $V_{c,Rd}$ assume o valor do $V_{pl,Rd}$ (Equação 21), enquanto no cálculo elástico, o valor da tensão máxima aplicada, τ_{Ed} , conforme Equação 22.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \leq 1.0 \quad (21)$$

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})} \leq 1.0 \quad (22)$$

$$\tau_{Ed} \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t} \quad (23)$$

Em que:

S: momento estático, em relação ao eixo principal da secção, da parte da secção transversal situada entre o ponto considerado e a fronteira da secção.

I: momento de inércia da totalidade da secção transversal.

t: espessura da secção no ponto considerado.

A_v : área resistente ao esforço transverso.

No caso de flexão com o esforço transversal, o EC 3 estabelece que deverão ser considerados, no cálculo do efeito do momento de cálculo resistente, o efeito do esforço transversal, reduzindo o valor da resistência transversal através de uma tensão de cedência reduzida, conforme Equação 25.

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (24)$$

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}} \quad (25)$$

Em que: $A_w = h_w \cdot t_w$

Em situações, cujo esforço transversal solicitante não ultrapasse a 50% do esforço transversal resistente plástico, seu efeito sobre o momento flector resistente poderá ser desprezado, excetuando casos em que a resistência da secção for reduzida pela encurvadura por esforço transversal.

Na flexão composta, no item 6.2.9 do EC 3, recomenda-se que em presença de um esforço normal, o seu efeito na determinação do momento flector resistente plástico deverá obedecer a Equação 26:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (26)$$

$M_{N,Rd}$: momento flector resistente plástico reduzido pelo esforço normal N_{Ed} .

$$N_{Ed} \leq 0.25 N_{pl,Rd} \quad (27)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (28)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (29)$$

Nas seções laminadas I e H e seções soldadas em I ou H, com banzos iguais, pode-se empregar as expressões desde que não necessite levar em consideração os furos das ligações.

$$n \leq a: \quad M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5a) \quad (30)$$

$$n > a: \quad M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[1 - \left(\frac{(n - a)^2}{(1 - a)^2} \right) \right] \quad (31)$$

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} \quad (32)$$

$$a = (A - 2b \cdot t_f) / A \quad \text{mas } a \leq 0.50 \quad (33)$$

CAPÍTULO IV – NBR 8800:2008

4.1 Dimensionamento à Compressão de acordo com a NBR 8800

Os elementos sujeitos a esforço de compressão axial terão sua resistência condicionada à resistência da seção transversal ou por fenômenos de instabilidade localizados. Eles deverão ser dimensionados considerando a flambagem local dos elementos que compõem a seção transversal da barra e a instabilidade por curvatura inicial. A Figura 09 apresenta o fluxograma de cálculo de elementos comprimidos, de forma simplificada.

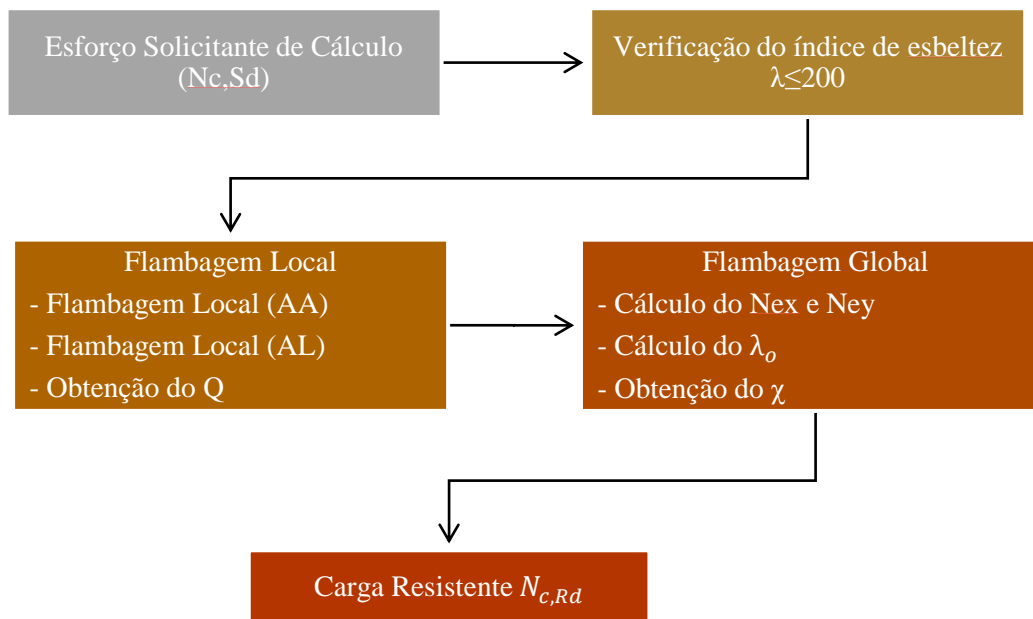


Figura 09 - Fluxograma do Dimensionamento à Compressão.
Fonte: Autoria Própria, 2023.

Na determinação da resistência de elementos comprimidos, a resistência não deve ser adotada como a resistência máxima do material à compressão, uma vez que dificilmente uma coluna apresentará resistência à flambagem ou flexão. A ruína de um

elemento comprimido será comandada pela carga crítica de flambagem global, desde que o elemento não apresente instabilidade localizadas.

A resistência de cálculo de elementos comprimidos deve atender a seguinte condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (34)$$

$N_{c,Sd}$: força axial de compressão solicitante de cálculo.

$N_{c,Rd}$: força axial de compressão resistente de cálculo.

Farruky (2016) destaca que os elementos da seção transversal são pouco influenciados pelas curvaturas iniciais, por consequência, são considerados como flambagem local, no Estado-Limite Último.

A NBR 8800 determina que a força axial de compressão resistente de cálculo, associada ao ELU à flexão, à torção e à flambagem local é obtida através das condições explicitadas. A determinação da resistência a compressão baseia-se na análise plástica da seção. A definição da esbeltez dos elementos constituintes da seção transversal é a relação entre a largura/espessura (b/t), conhecida como “parâmetro de esbeltez”. O parâmetro de esbeltez que não ultrapasse o $(b/t)_{lim}$, estabelecido pelo Anexo F.1, terá seu factor de redução Q igual a 1. Em casos que o valor é excedido, considera-se o factor redutor, de acordo com o enquadramento do grupo do elemento articulado-articulado (AA) ou articulado-livre (AL), conforme o Anexo A da NBR 8800.

A análise da mesa do Grupo 5, o b/t_{lim} é obtido em função da esbeltez da alma (k_c), em razão de que quanto menor a esbeltez, maior será o grau de encastramento entre a alma e a mesa, significando menor possibilidade de flambagem localizada.

4.1.1 Índice de Esbeltez

A NBR 8800 estabelece no item 5.3.4 a limitação do índice de esbeltez de elementos comprimidos, estabelecendo o limite a 200, sendo obtido através da maior relação entre o comprimento equivalente da barra ($k.L$) e o raio de giração, conforme apresentado na Equação 35.

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r} \quad (35)$$

Sendo:

$K_x \cdot L_x$: comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x.

$K_y \cdot L_y$: comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y.

r_x, r_y : raio de giração em relação aos eixos principais x e y respetivamente.

4.1.2 Comprimento de Flambagem

Os coeficientes de flambagem por flexão são estabelecidos com base em seis casos ideais de condição de contorno, considerando o elemento isoladamente, considerando as rotações e translações nas extremidades livres ou totalmente impedidas, conforme Figura 10.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	<ul style="list-style-type: none"> Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres 					

Figura 10 - Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.
Fonte: NBR 8800:2008.

Em casos de elementos contraventados, o coeficiente de flambagem devido à flexão deverá ser adotado como 1,0. No projeto de estruturas metálicas, a NBR 8800:2008 exige que a análise seja realizada considerando a não-linearidade da estrutura e não mais o comprimento efetivo de flambagem. Para a verificação, considera-se o equilíbrio com a estrutura deformada, isto é, os efeitos de 2ª ordem (Souza, 2017).

4.1.3 Carga Crítica

Entende-se como carga crítica, ou carga de Euler, como sendo o valor máximo da carga que provoca o fenômeno de mudança do estado de equilíbrio para o de desequilíbrio. Sua ocorrência é observada em peças esbeltas, isto é, a relação entre a área da seção transversal e comprimento, quando sujeitas a uma força axial de compressão.

De acordo com Silva (2016), a flambagem considerada por Euler partiu dos pressupostos que se tratava de um material homogêneo, com comportamento elástico, sendo um elemento prismático isento de imperfeições, com as extremidades rotuladas, sujeito a uma carga aplicada no centroide e que esse elemento não apresentava instabilidade local na seção transversal.

A flambagem é considerada uma instabilidade elástica, pois a peça entra em colapso sem que o material atinja a tensão de escoamento (cedência), sendo observada sempre em torno do eixo que apresenta menor inércia. A flambagem corresponde a um ELU.

A NBR 8800, para seções com dupla simetria, define a carga crítica como sendo:

Flambagem por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (36)$$

Flambagem por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (37)$$

Flambagem por flexão em relação ao eixo z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (38)$$

E : módulo de elasticidade do aço.

I_x : momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x.

$K_x L_x$: comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x.

I_y : momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y.

$K_y L_y$: comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y.

C_w : constante de empenamento da seção transversal.

G : módulo de elasticidade transversal do aço.

J : constante de torção da seção transversal.

r_0 : raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado por:

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (39)$$

O fator de redução associado à instabilidade global é dado pelas Equações 40 ou 41, que fornece a curva de resistência, também conhecida como curva de flambagem.

$$\lambda_0 \leq 1,5; \chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (40)$$

$$\lambda_0 > 1,5; \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (41)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QN_{pl}}{N_e}} \quad (42)$$

N_{pl} força normal correspondente ao escoamento da seção transversal.

N_e força normal de flambagem elástica, definida para o modo mais crítico para a flambagem por flexão, por torção ou por flexotorção.

λ_0 : índice de esbeltez reduzido.

N_e : força axial de flambagem elástica.

Faruky (2016) ressalta que cada perfil terá um comportamento na distribuição de tensões residuais, isto é, o fator χ deveria ser determinado com base em diversas curvas. A NBR 8800 emprega uma única curva, que fornece resultados superiores em várias situações, porém dentro dos limites aceitáveis em relação à segurança estrutural, e em alguns casos, inferiores, conforme Figura 11.

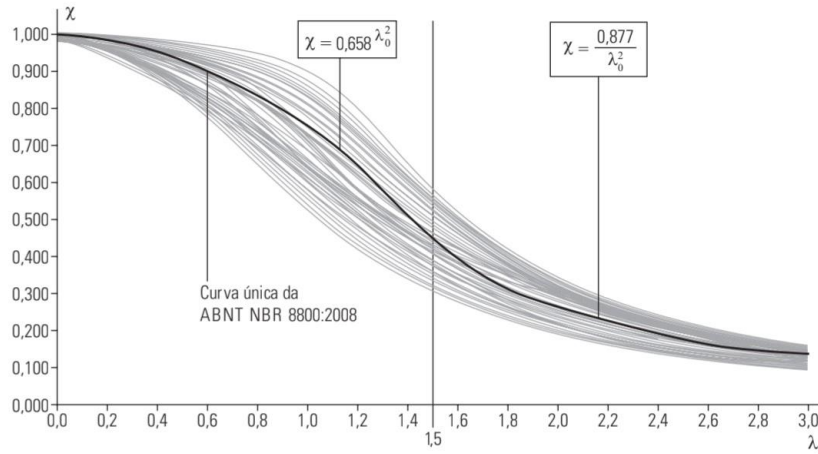


Figura 11- Curvas para χ e curva única da NBR 8800.
 Fonte: Fakury, 2016.

4.1.4 Força de Compressão Resistente de Cálculo

As barras comprimidas devem satisfazer a condição em que a força axial de compressão solicitante deve apresentar valor inferior ou igual à força axial resistente de cálculo, devendo ainda satisfazer ao limite de esbeltez.

Para a determinação da força axial resistente à compressão, associada ao estados-limites, devido à flexão, flexo-torção e flambagem localizada, devendo obedecer à Expressão 43:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (43)$$

χ : fator de redução associado à compressão.

Q : fator de redução associado à flambagem local, cujo valor é determinado no Anexo F.

A_g : área bruta da seção transversal da peça.

4.2 Colunas à Flexo-compressão

A flexo-compressão é aplicável a colunas sujeitas aos esforços combinados de força axial e momento fletor em um ou dois eixos de simetria da seção transversal. A forma de colapso geralmente ocorre por flambagem por flexão, flambagem lateral por torção, podendo ainda apresentar instabilidades locais em perfis de seções esbeltas.

Os elementos sujeitos à flexocompressão devem se levar em consideração os efeitos de 2ª ordem, considerando os efeitos globais na estrutura e locais nos elementos.

A NBR 8800:2008 estabelece que o momento resistente de cálculo deve ser determinado de acordo com o Anexo G ou H, devendo considerar, de acordo com o caso, os estados-limites últimos para a flambagem local da alma, flambagem local da mesa e flambagem lateral por torção, limitando o momento fletor resistente a $1.50W_{fy}/\gamma_{a1}$, sendo W o módulo resistente elástico mínimo em relação ao eixo de flexão. A Figura 12 apresenta as etapas de determinação da resistência ao momento fletor.

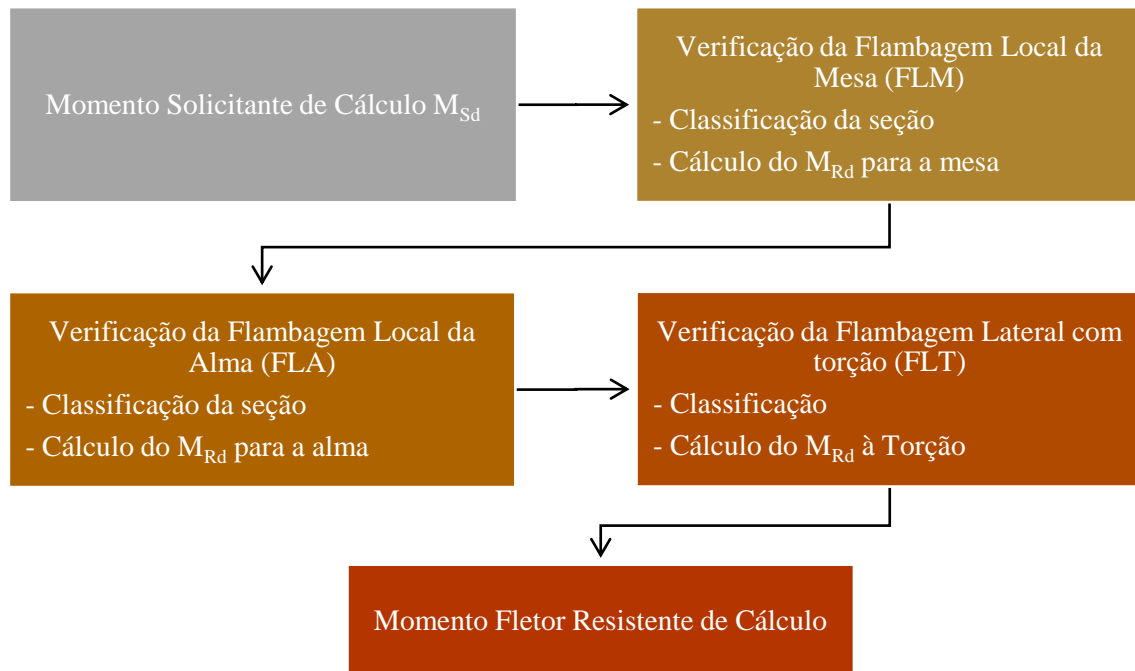


Figura 12 - Fluxograma para verificação ao Momento Fletor.
Fonte: Autoria Própria, 2023.

O momento fletor resistente de cálculo, para qualquer tipo de seção, é determinado pela aplicação de uma das equações após a comparação do índice de esbeltez λ e dos parâmetros de esbeltez λ_p e λ_r .

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p - \text{ Seção compacta} \quad (44)$$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} ; \quad (45)$$

para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ – Seção semi – compacta

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \text{ para } \lambda \geq \lambda_r \text{ – Seção esbelta} \quad (46)$$

Sendo:

λ : índice de esbeltez.

λ_p : parâmetro de esbeltez de plastificação.

λ_r : parâmetro de esbeltez residual.

M_{pl} : momento de plastificação.

M_r : momento residual, momento fletor correspondente ao início do escoamento.

M_{cr} : momento crítico.

γ_{a1} : coeficiente de minoração.

C_b : fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme.

A flambagem local dos elementos AA e AL deve ser verificada no Estado-Limite Último, de forma similar a verificação à compressão, isto é, depende fundamentalmente do parâmetro de esbeltez da seção transversal analisada. A verificação consiste basicamente em comparar o índice de esbeltez com os parâmetros de esbeltez, fornecida pela Tabela 07 do Anexo C, verificando o enquadramento em seção compacta, semi-compacta ou esbelta.

Para seções semi-compactas e esbeltas, deve-se levar em consideração a forma do diagrama de momento fletor não-uniforme (C_b), como um efeito favorável à resistência do elemento. De forma geral, pode-se considerar o C_b igual a 1,0, exceto em vigas sem pontos de contenção lateral entre apoios carregados transversalmente através da mesa comprimida (Pfeil, 2021). O coeficiente de modificação do diagrama de momento fletor não-uniforme pode ser obtido através da Equação 47.

$$C_b = \frac{12,5M_{m\acute{a}x}}{2,5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 3,0 \quad (47)$$

Sendo:

$M_{m\acute{a}x}$: momento fletor solicitante de cálculo máximo, em módulo, no comprimento destravado.

M_A : momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda.

M_B : momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado.

M_C : momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda.

O momento resistente de cálculo será obtido através das Equações 44, 45 ou 46, em função da classificação atribuída. Deve-se, ainda, considerar as notas relacionadas à Tabela 06, no Anexo C desse documento.

Nota 1:

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (48)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (49)$$

O C_w , para as seções I e H com dois eixos de simetria e seções U, é obtido na Equação 51 ou 52, em função da geometria do perfil.

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{E J} \quad (50)$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (51)$$

Seções I

$$C_w = \frac{t_f (b_f - 0,5t_w)^3 (d - t_f)^2}{12} \left[\frac{3(b_f - 0,5t_w)t_f + 2(d - t_f)t_w}{6(b_f - 0,5t_w)t_f + (d - t_f)t_w} \right] \quad (52)$$

Seções U

Nota 02:

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_{yc} J \beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (53)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \left[\sqrt{\beta_3^2 + \frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \right] \quad (54)$$

Onde:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{E J} \quad (55)$$

$$\beta_2 = 5,2 \beta_1 \beta_3 + 1 \quad (56)$$

$$\beta_3 = 0,45 \left(d - \frac{t_{fs} - t_{fi}}{2} \right) \frac{(\alpha_y - 1)}{(\alpha_y + 1)} \quad (57)$$

$$C_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs} t_{fi}}{2} \right)^2}{12} \left(\frac{t_{fi} b_{fi}^3 t_{fs} b_{fs}^3}{t_{fi} b_{fi}^3 + t_{fs} b_{fs}^3} \right) \quad (58)$$

d: altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão.

h_c: duas vezes a distância do centro geométrico da seção transversal à face interna da mesa comprimida.

t_f: espessura da mesa.

t_{fi}: espessura da mesa inferior.

t_{fs}: espessura da mesa superior.

Nota 3: O estado-limite FLA é aplicado apenas à alma de seção U, quando ocorre compressão na mesa superior.

Nota 4: O W_{ef}, módulo de resistência mínimo elástico, em relação ao eixo que ocorre flexão, aplicável quando tem mesa comprimida, ou a alma comprimida de seção U, fletido em relação ao menor eixo de inércia, o b_{ef} é obtido por:

Seção Tubular:

$$b/t \geq 1,40 \sqrt{E/f_y}$$

$$b_{ef} = 1,92 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,38}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \quad (59)$$

$$b/t < 1,40 \sqrt{E/f_y}$$

$$b_{ef} = b \quad (60)$$

Demais Seções:

$$b/t \geq 1,49 \sqrt{E/f_y}$$

$$b_{ef} = 1,92 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,34}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \quad (61)$$

$$b/t < 1,49 \sqrt{E/f_y}$$

$$b_{ef} = b \quad (62)$$

Nota 5: A tensão residual da compressão nas mesas, σ_r , deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado.

Nota 6:

Perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (63)$$

Perfis soldados:

$$M_{cr} = \frac{0,90Ek_c}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}} \quad (64)$$

No qual o k_c assume o valor de $k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{tw}}}$ e $0,35 \leq k_c \leq 0,763$.

W_c : módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão.

Nota 7: Para a verificação do FLT no estado-limite à flexão, só será aplicável quando for em relação ao maior momento de inércia.

Nota 8: b/t é a relação entre a largura e espessura, sendo aplicável à mesa comprida do perfil, no caso de seções I e H, com um eixo de simetria, sendo o b a metade da largura total e perfil U, a largura total da mesa.

Nota 9: Para as seções, deve-se limitar o valor de α_y .

a. $1/9 \leq \alpha_y \leq 9$.

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \quad (65)$$

b. Soma das áreas da menor mesa e da alma deve ser superior à área da maior mesa.

Nota 10:

Seções caixão:

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (66)$$

Seções tubulares retangulares:

$$\lambda_p = 2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (67)$$

O item 5.5 da NBR 8800 apresenta as prescrições aplicáveis a barras prismáticas à combinação de esforços solicitantes, no ELU, isto é, sujeitas a momento fletor, esforço cortante, força axial e momento de torção. Quando há a ocorrência simultânea de flexão e compressão, a seção dependerá do tipo de ação que será preponderante.

Em situações de atuação simultânea do esforço de tração ou compressão e de momentos fletores, recomenda-se a aplicação das expressões de interação, obedecidas as limitações.

a. Caso $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (68)$$

b. Caso $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (69)$$

Onde:

N_{Sd} : força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão.

N_{Rd} : força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão.

M_{xSd} e M_{ySd} : momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente, em relação ao eixo x e y da seção transversal.

M_{xRd} e M_{yRd} : momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente, em relação ao eixo x e y da seção transversal.

Quando o momento torçor solicitante de cálculo, T_{Sd} apresentar valor inferior a 20% do momento torçor resistente de cálculo, seu efeito poderá ser desprezado. Caso negativo, a tensão resistente de cálculo, expressa em termos de tensão pela tensão normais ou de cisalhamento, τ_{Sd} , utilizando a teoria da elasticidade, para quaisquer seções submetidas a momento de torção, força axial, momentos fletores e força cortante.

Estados-limite de escoamento, sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (70)$$

Estado-limite de escoamento, sob o efeito de tensão cisalhante:

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{0,60f_y}{\gamma_{a1}} \quad (71)$$

Estado-limite de instabilidade ou flambagem sob tensão normal:

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{\chi f_y}{\gamma_{a1}} \quad (72)$$

Estado-limite de instabilidade ou flambagem sob tensão de cisalhamento:

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{0,60\chi f_y}{\gamma_{a1}} \quad (73)$$

O valor do χ , fator de redução associado à resistência à compressão, deve ser determinado a partir de:

Tensões normais:

$$\lambda_0 = \sqrt{f_y / \sigma_e} \quad (74)$$

Tensões cisalhantes:

$$\lambda_0 = \sqrt{0,60f_y / \sigma_e} \quad (75)$$

σ_c : tensão crítica elástica normal.

τ_c : tensão crítica elástica de cisalhamento.

4.3 Dimensionamento ao Cortante

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , de elementos fletidos no ELU de escoamento e flambagem por cisalhamento, o elemento resistente é a parede do perfil. Caso o perfil não alcance a resistência desejada, opcionalmente, pode-se colocar enrijecedores transversais em seções I, H e U, com flexão em relação ao eixo central do maior momento de inércia.

$$\lambda \leq \lambda_p \quad V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (76)$$

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (77)$$

$$\lambda \geq \lambda_r \quad V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right) \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (78)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (79)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (80)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (81)$$

k_v

$$= \begin{cases} 5.0 & \text{para almas sem enrijecedores transversais, para } \frac{a}{h} > 3 \text{ ou para } \frac{a}{h} > \left[\frac{260}{h/t_w} \right]^2 \\ 5 + \frac{5}{(a/h)^2} & \text{para outros casos} \end{cases}$$

V_{pl} : força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento.

a: distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes.

h: altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesas e alma nos perfis laminados.

tw: espessura da alma.

d: altura total da seção transversal.

Para a determinação da força cortante, correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, utiliza-se a Equação 82:

$$V_{pl} = 0.60A_w f_y \quad (82)$$

$$A_w = dt_w \quad (83)$$

CAPÍTULO V – APLICAÇÕES E COMPARATIVOS

5.1 Modelos de Aplicação

Para verificar as metodologias aplicadas pelo EC3-1-1 e pela NBR 8800:2008, foram definidos 03 perfis metálicos sujeitos aos esforços simultâneos de momento flector, esforço transversal (cortante) e esforço normal em uma mesma peça.

Através das simulações, foram possíveis identificar as semelhanças e divergências nos cálculos aplicáveis. As simulações utilizaram perfis metálicos das séries IPE e HEA.

5.1.1 Aplicação 01

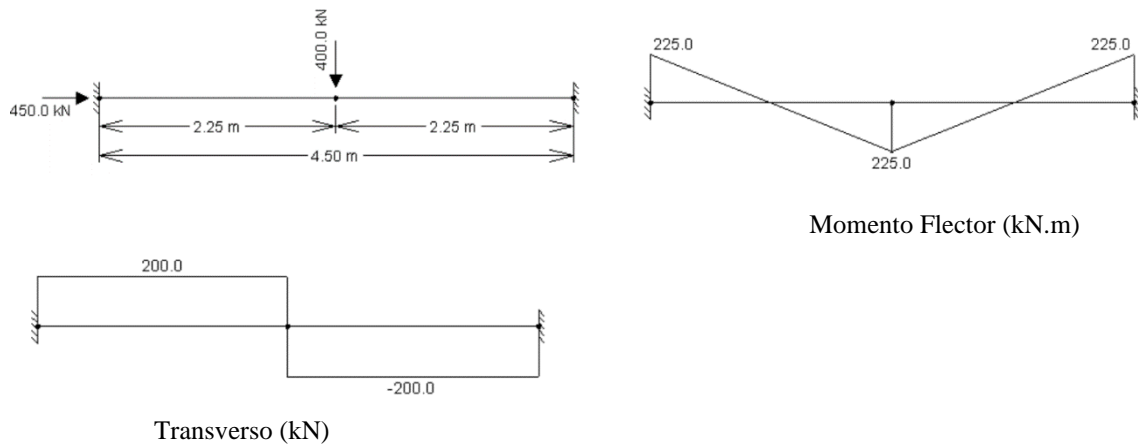
Perfil IPE 500 - Viga-coluna composta pelo perfil IPE 500 com aço S235, com restrições de rotação nos apoios e carga concentrada aplicada no centro geométrico da viga. O comprimento da viga-coluna é de 4,5m.

Dados geométricos do Perfil:

$h=500\text{mm}$	$I_y= 48200\text{cm}^4$	$W_{pl,z}=335,9\text{cm}^3$
$b=200\text{mm}$	$W_{el,y}= 1928\text{cm}^3$	$r_z=4,31\text{cm}$
$t_w=10,2\text{mm}$	$W_{pl,y}=2194\text{cm}^3$	$I_T=89,29\text{cm}^4$
$t_f= 16\text{mm}$	$r_y= 20,43\text{cm}$	$I_w=1249000\text{cm}^6$
$r=21\text{mm}$	$I_z=2142\text{cm}^4$	$A_v= 59,87\text{cm}^2$
$A=115,5\text{cm}^2$	$W_{el,z}= 214,2\text{cm}^3$	

Solicitações:

$N_{Ed} = 450\text{kN}$	$M_{Ed} = 225\text{kN.m}$	$V_{Ed} = 200\text{kN.m}$
-------------------------	---------------------------	---------------------------



Verificação pelo EC3-1-1

Classificação da Seção

O perfil IPE 500 pertence à Classe 1, de acordo com as cláusulas 5.5, 6.1 e 6.2, do EC 3, tendo a capacidade de formação de rótula plástica, isto é, capacidade de rotação para uma análise plástica.

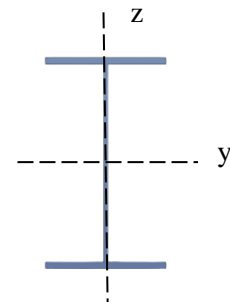
$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1$$

Alma sob flexão:

$$c/t = (500 - 2 \cdot 16 - 2 \cdot 21)/10,2 = 41,76 < 72 \quad \text{Classe 1}$$

Mesa comprimida:

$$c/t = (200/2 - (10,2/2 + 21))/16 = 4,31 < 33 \quad \text{Classe 1}$$



Verificação à Compressão

a. Comprimento de Encurvadura:

Para a determinação do comprimento de encurvadura foi adotado $k_y=1$ e $k_z=0,5$, de acordo com as condições de restrições dos apoios.

$$L_{Ey} = k_y \cdot L_y = 1 \cdot 450 = 450 \text{ cm}$$

$$L_{Ez} = k_z \cdot L_z = 0,5 \cdot 450 = 225 \text{ cm}$$

b. Coeficiente de Esbelteza

Com base na natureza dos elementos esbeltos, faz-se necessária a determinação da esbelteza para posteriormente determinar a resistência da seção.

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,91$$

$$\lambda_y = \frac{L_{Ey}}{i_y} = \frac{450}{20,43} = 22,03$$

$$\lambda_z = \frac{L_{Ez}}{i_z} = \frac{225}{4,31} = 52,20$$

c. Cálculo do factor de redução χ_{\min}

$$\frac{h}{b} = \frac{500}{200} = 2,5 > 1,2 \quad t_f = 16\text{mm}$$

Consultando o Quadro 6.2 do EC3-1-1, identificou-se a Curva de Encurvadura para ambos os eixos, isto é, para flexão no eixo y corresponde a curva a ($\alpha=0,21$) e para flexão no eixo z, a curva b ($\alpha=0,34$). Como o $\bar{\lambda}_z > \bar{\lambda}_y$ e a curva no eixo z é maior que a curva no eixo y, o factor de redução mínimo será tomado no eixo z.

d. Coeficientes de redução, devido à encurvadura por flexão, nos eixos y e z.

Eixo y (eixo de maior inércia):

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{22,03}{93,91} = 0,235$$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,235 - 0,2) + 0,235^2] = 0,531$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,531 + \sqrt{0,531^2 - 0,235^2}} = 0,993$$

Eixo z (eixo de menor inércia):

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{52,20}{93,91} = 0,556$$

$$\phi_z = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] = 0.5[1 + 0,34(0,556 - 0.2) + 0,556^2] = 0,715$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,715 + \sqrt{0,715^2 - 0,556^2}} = 0,858$$

$$\chi_{\min} = \chi_z = 0,858$$

e. Resistência da Seção sob a ação de Compressão

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,858 \cdot 115,5 \cdot 23,5}{1,0} = 2330,34 \text{ kN}$$

A relação entre o N_{Ed} e o $N_{b,Rd}$ é menor que 1, cumprindo a condição de estabilidade do elemento à encurvadura da coluna.

Verificação ao Esforço Transverso

A área de corte da seção IPE 500 é de $59,87 \text{ cm}^2$, e como o $h_w/t_w = 41,76 < 72\varepsilon/\eta$, considerando conservadoramente $\eta=1$, dispensa a necessidade de verificar a encurvadura devido ao esforço transverso para alma não reforçada.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{59,87 \cdot 23,5 / \sqrt{3}}{1,0} = 812,30 \text{ kN}$$

A interação flexão-esforço transverso é dispensável quando o esforço transverso de cálculo V_{Ed} é inferior a 50% do $V_{pl,Rd}$. Para o elemento, não será necessário reduzir o momento resistente em função do esforço transverso. A verificação do esforço transverso cumpre os requisitos de estabilidade, uma vez que o $V_{Ed} < V_{pl,Rd}$.

Verificação Flexão

A verificação da interação entre a flexão e o esforço axial plástico é dado pela equação, devendo obedecer às duas condições apresentadas. Caso o esforço axial

solicitante exceda os limites estabelecidos, o EC 3 recomenda a redução do momento resistente plástico.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{115,5 \cdot 23,5}{1,0} = 2714,25 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \cdot 42,6 \cdot 1,02 \cdot 23,5}{1,0} = 510,56 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 0,25 \cdot 2714,25 = 678,56 \text{ kN}$$

Como o esforço solicitante de cálculo é inferior às duas condições, não será necessária a redução do momento plástico resistente em torno do eixo y, devido ao esforço axial.

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y,Rd} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2194 \cdot 23,5}{1,0} = 51559 \text{ kN.cm} = 515,59 \text{ kN.m}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z,Rd} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{335,9 \cdot 23,5}{1,0} = 7893,65 \text{ kN.cm} = 78,94 \text{ kN.m}$$

O elemento possui apenas um momento atuante no eixo y, não sendo necessária a verificação de flexão composta desviada. Como o $M_{N,y,Rd} > M_{y,Ed}$, cumpre-se a verificação de estabilidade ao momento flector.

Verificação da estabilidade sob a ação de Flexão com Compressão

A verificação da estabilidade do elemento em análise, sob a ação de flexão com compressão, isto é, flexão composta, será avaliada utilizando-se o Método 1, previsto no EC3-1-1.

a. Resistência característica da seção transversal:

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 115,5 \cdot 23,5 = 2714,25 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 2194 \cdot 23,5 = 51559 \text{ kN.cm} = 515,59 \text{ kN.m}$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 335,9 \cdot 23,5 = 7891,65 \text{ kN.cm} = 78,92 \text{ kN.m}$$

b. Cálculo dos termos auxiliares:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 48200}{(1 \cdot 450)^2} = 49333,40 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{(K_z L_z)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2142}{(1 \cdot 225)^2} = 8769,47 \text{ kN}$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{450}{49333,40}}{1 - 0,993 \frac{450}{49333,40}} = 1,00$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{450}{8769,47}}{1 - 0,858 \cdot \frac{450}{8769,47}} = 0,992$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{2194}{1928} = 1,138 (<1,5)$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{335,9}{214,2} = 1,568 (<1,5)$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_{M1}} = \frac{450}{2714,25/1,0} = 0,166$$

$$\bar{\lambda}_{m\acute{a}x} = \text{m\acute{a}x}(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = \text{m\acute{a}x}(0,235; 0,556) = 0,556$$

c. Momento crítico

Como o elemento analisado está sujeito à torção, uma vez que, o elemento não apresenta travamentos laterais e a inércia no eixo y é maior que a inércia à torção, faz-se necessário analisá-lo quanto à estabilidade.

O momento crítico elástico para a flexão é determinado pela formulação apresentada abaixo, considerando a forma do diagrama do momento flector, condições das restrições dos apoios e o tipo de carga aplicada. Para o elemento, consultando a Tabela 3.2 do SN003, tem-se o $C_1=1,682$, $C_2= 1,645$. O ponto de aplicação da carga foi

considerado no centro de corte ($z_g=0$), apresentando um momento crítico elástico de 2229,78 kN.m.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(K.L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{K_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right] - C_2 z_g \right\}$$

d. Coeficiente de Esbeltez adimensional à encurvadura lateral com momento crítico.

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2194 \cdot 23,5}{2229,78 \cdot 10^2}} = 0,481$$

e. Carga crítica de flambagem torcional

$$i_c^2 = y_c^2 + (I_y + I_z)/A = 0,0 + (48200 + 2142) / 115,5 = 435,86 \text{ cm}^2$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_c^2} \left(GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{ET}^2} \right) = \frac{1}{435,86} \left(8100 \cdot 89,29 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1249000}{450^2} \right) \\ = 4592,34 \text{ kN}$$

f. Factores C_m

A verificação quanto à formulação empregada para a determinação dos factores C_m , tem-se:

$$\bar{\lambda}_0 > 0,2 \sqrt{C_1}^4 \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}} \right)}$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,481 > 0,2 \sqrt{1,682}^4 \sqrt{\left(1 - \frac{450}{8769,47} \right) \left(1 - \frac{450}{4592,34} \right)} = 0,25$$

O elemento é suscetível de sofrer instabilidade por torção, sendo necessário quantificar os factores equivalentes de momento uniformes.

Factor C_{m0} , considerando o momento no eixo y quase linear:

$$C_{mz,0} = 0.79 + 0.21\psi_y + 0.36(\psi_y - 0.33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}$$

$$C_{mz,0} = 0.79 + 0.21 \cdot 1 + 0.36(1 - 0.33) \frac{450}{8769,47} = 1,012$$

A deformação foi obtida pelo software Ftool, apresentando o valor de $\delta_x = 19\text{mm}$.

$$\begin{aligned} C_{my,0} &= 1 + \left(\frac{\pi^2 EI_y |\delta_x|}{L_E^2 |M_{y,Ed}|} - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{M_{cr,y}} \\ &= 1 + \left(\frac{\pi^2 21000 \cdot 48200 |0.19|}{450^2 |225 \cdot 10^2|} - 1 \right) \frac{450}{49333,40} \end{aligned}$$

$$C_{my,0} = 0.995$$

$$\begin{aligned} C_{my} &= 1 + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1 + (1 - 0,995) \frac{\sqrt{2,995} \cdot 0,998}{1 + \sqrt{2,995} \cdot 0,998} \\ &= 0,998 \end{aligned}$$

$$C_{mz} = C_{mz,0} = 1,012$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{89,29}{48200} = 0,998$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{22500}{450} \frac{115,5}{1928} = 2,995$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cT}}\right)}} \geq 1$$

$$C_{mLT} = 0,998^2 \frac{0,998}{\sqrt{\left(1 - \frac{450}{8769,47}\right) \left(1 - \frac{450}{4592,34}\right)}} = 1,043$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2194 \cdot 23,5}{2229,78 \cdot 10^2}} = 0,481$$

Curva b com $\alpha_{LT}=0,34$

$$\begin{aligned}\phi_{LT} &= 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0.5[1 + 0,34(0,481 - 0.2) + 0,481^2] \\ &= 0,663\end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,663 + \sqrt{0,663^2 - 0,481^2}} = 0,893$$

g. Termos auxiliares

O cálculo dos termos auxiliares foi efetuado com base na formulação proposta no Quadro A.1 do EC3-1-1.

$$b_{LT} = a_{LT} \bar{\lambda}_0^2 \frac{M_{yEd}}{\chi_{LT} M_{pl,yRd}} \frac{M_{zEd}}{M_{pl,zRd}} = \frac{0,998 \cdot 0,481^2 \cdot 225 \cdot 10^2}{0,893 \cdot 515,59} \cdot \frac{0}{78,94} = 0$$

$$\begin{aligned}c_{LT} &= 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,yRd}} \\ &= 10 \cdot 0,998 \cdot \frac{0,481^2}{5 + 0,556^4} \cdot \frac{225 \cdot 10^2}{0,998 \cdot 0,893 \cdot 515,59 \cdot 10^2} = 0,222\end{aligned}$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^2} \frac{M_{yEd}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,yRd}} \frac{M_{zEd}}{C_{mz} M_{pl,zRd}}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot 0,998 \cdot \frac{0,481}{0,1 + 0,556^2} \frac{225 \cdot 10^2}{0,998 \cdot 0,893 \cdot 515,59 \cdot 10^2} \frac{0}{1,012 \cdot 78,94} = 0$$

$$\begin{aligned}e_{LT} &= 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{yEd}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,yRd}} \\ &= 1,7 \cdot 0,998 \cdot \frac{0,481}{0,1 + 0,556^4} \frac{225 \cdot 10^2}{0,998 \cdot 0,893 \cdot 515,59 \cdot 10^2} = 2,044\end{aligned}$$

Para a determinação dos parâmetros C_{yy} , C_{yz} , C_{zy} e C_{zz} , utilizou-se as equações do Quadro A.1.

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} = 1 + (1,138 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,138} 0,998^2 \cdot 0,556 - \frac{1,6}{1,138} 0,998^2 \cdot 0,556^2 \right) 0,166 - 0 \right] \geq \frac{1928}{2194}$$

$$C_{yy} = 1,018 \geq 0,878$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{14}{w_z^5} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x}^2 \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}}$$

$$C_{yz} = 1 + (1,568 - 1) \left[\left(2 - \frac{14}{1,568^5} \cdot 1,012^2 \cdot 0,556^2 \right) 0,166 - 0,222 \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,568}{1,115} \cdot \frac{214,2}{335,9}}$$

$$C_{yz} = 1,018 \geq 0,454$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{14}{w_y^5} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x}^2 \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}}$$

$$C_{zy} = 1 + (1,138 - 1) \left[\left(2 - \frac{14}{1,138^5} 0,998^2 \cdot 0,556^2 \right) 0,166 - 0 \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,115}{1,568} \cdot \frac{1928}{2194}}$$

$$C_{zy} = 0,994 \geq 0,445$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \lambda_{m\acute{a}x} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x}^2 - e_{LT} \right) n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} = 1 + (1,568 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,568} 1,012^2 \cdot 0,556 - \frac{1,6}{1,568} 1,012^2 \cdot 0,556^2 - 2,045 \right) 0,166 \right] \geq \frac{214,2}{335,9}$$

$$C_{zz} = 0,911 \geq 0,638$$

Como o perfil enquadra-se na Classe 1, os factores de interação k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} são obtidos pelas fórmulas apresentadas para a Classe no Anexo A do EC3-1.1.

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 0,998 \cdot 1,043 \frac{1}{1 - \frac{450}{49333,40}} \frac{1}{1,018} = 1,031$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,012 \frac{1}{1 - \frac{450}{8769,47}} \frac{1}{1,018} 0,6 \sqrt{\frac{1,568}{1,115}} = 0,738$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0,998 \cdot 1,043 \frac{0,992}{1 - \frac{450}{49333,40}} \frac{1}{0,994} 0,6 \sqrt{\frac{1,115}{1,568}} = 0,536$$

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1,012 \frac{0,892}{1 - \frac{450}{8769,47}} \frac{1}{0,911} = 1,163$$

Verificação das condições de estabilidade do elemento sujeito ao momento flector, esforço axial.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{450}{0,993 \cdot 2714,25} + 1,031 \frac{225 + 0}{0,893 \frac{515,59}{1,0}} + 0,738 \frac{0 + 0}{\frac{78,94}{1,0}} = 0,67 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

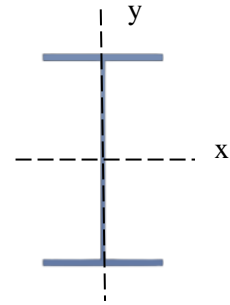
$$\frac{450}{0,859 \cdot 2714,25} + 0,536 \frac{225 + 0}{0,893 \frac{515,59}{1,0}} + 1,163 \frac{0 + 0}{\frac{78,94}{1,0}} = 0,455 \leq 1$$

O perfil cumpre a verificação de estabilidade aos esforços combinados de flexão e esforço axial, de acordo com o Método 1 do EC3-1-1.

Verificação pela NBR 8800:2008

Verificação à compressão

A verificação dos elementos sujeitos à compressão é realizada analisando a flambagem localizada na alma e na mesa do perfil.



a. Flambagem Local da Alma (FLA)

$$b/t = (500 - 2 \cdot 16 - 2 \cdot 21) / 10,2 = 41,76$$

Utilizando a Tabela F.1, da NBR 8800, para perfis laminados, obtém-se a relação $(b/t)_{lim}$, a ser utilizada na verificação.

$$(b/t)_{lim} = 1,49 \sqrt{E/f_y} = 1,49 \sqrt{21000/23,5} = 44,54$$

Como o b/t é menor que o $(b/t)_{lim}$, o fator de redução Q_a para elementos comprimidos AA será 1.

b. Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$b/t = (200/2) / 16 = 6,25$$

Consultando a Tabela F.1, da NBR 8800, aplica-se a equação apresentada. Como o b/t é menor que o $(b/t)_{lim}$, o fator de redução Q_s para elementos comprimidos AL será 1.

$$(b/t)_{lim} = 0,56 \sqrt{E/f_y} = 0,56 \sqrt{21000/23,5} = 16,74$$

Por consequência, o fator de redução aplicado devido à flambagem local será $Q=Q_a.Q_s = 1$.

c. Determinação da Carga Crítica N_e

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 48200}{(1 \cdot 450)^2} = 49333,40 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2142}{(0,5 \cdot 450)^2} = 8769,47 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GI_T = \frac{1}{20,88^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1249000}{(1 \cdot 450)^2} + 8100 \cdot 89,29 \right]$$

$$= 4591,14 \text{ kN}$$

$$N_{e \min} = 4591,14 \text{ kN.}$$

d. Índice de Esbeltez Reduzido

Através da determinação do índice de esbeltez reduzido λ_0 , é possível determinar o fator de redução associado à compressão χ .

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QN_{pl}}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 115,5 \cdot 23,5}{4591,14}} = 0,769$$

Como λ_0 é menor que 1,5, emprega-se a equação a seguir para a obtenção do fator de redução χ .

$$\lambda_0 \leq 1,5; \chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,769^2} = 0,781$$

e. Força de Compressão Resistente de Cálculo

A força axial resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ associada ao ELU por instabilidade por flexão, por torção ou flexo-compressão e flambagem local é determinada pela equação:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,781 \cdot 1 \cdot 115,5 \cdot 23,5}{1,10} = 1927,12 \text{ kN}$$

Como o $N_{c,Rd}$ é maior que o N_{Ed} , cumpre-se a verificação do perfil ao esforço de compressão pela NBR 8800.

Verificação ao Momento Fletor

a. Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\lambda = \frac{h_w}{t_w} = \frac{426}{10,2} = 41,76$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 112,40$$

Como o parâmetro de esbeltez da alma λ é inferior ao parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação λ_p , a seção é classificada como seção compacta, sendo seu momento resistente determinado pelo momento de plastificação, com a aplicação do coeficiente γ_{a1} .

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{51559}{1,10} = 46871,81 \text{ kN.cm} = 468,71 \text{ kN.m}$$

$$M_{pl} = Z_x f_y = 2194 \cdot 23,5 = 51.559 \text{ kN.cm}$$

b. Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$\lambda = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{200}{2 \cdot 16} = 6,25$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 11,36$$

De forma similar ao que ocorreu na alma, na mesa o parâmetro de esbeltez da alma λ é inferior ao parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação λ_p , sendo a seção considerada compacta, com momento resistente de cálculo de 468,71 kN.m.

c. Flambagem Lateral por Torção (FLT)

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{450}{4,3} = 104,65$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 52,61$$

Como o parâmetro de esbeltez é maior que o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação, fez-se necessário o cálculo do parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento λ_r , para realizar a classificação.

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_x}{E J} = \frac{(23,5 - 7,05)1929}{21000 \cdot 89,29} = 0,0169$$

Sendo a tensão residual 0,3 da tensão de escoamento.

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{2142 \cdot 80,29}}{4,3 \cdot 80,29 \cdot 0,0169} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 1249000 \cdot 0,0169^2}{2142}}} = 169,99$$

A seção é classificada como uma seção semi-compacta para o efeito de torção, uma vez que $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, sendo o momento de cálculo resistente determinado pela equação:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Para a determinação do momento fletor resistente de cálculo, deve-se levar em consideração as condições de carregamento e forma do diagrama de momento fletor, através do fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme. Para a aplicação, foi realizado o cálculo do C_b .

$$C_b = \frac{12,5M_{\text{máx}}}{2,5M_{\text{máx}} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} = \frac{12,5 \cdot 225}{2,5 \cdot 225 + 3 \cdot 0,8 + 4 \cdot 225 + 3 \cdot 0,80} = 1,91$$

O momento residual é indicado na Tabela G1 da NBR 8800 para a FLT.

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W_x = (23,5 - 7,05) 1928 = 31715,6 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd} = \frac{1,91}{1,10} \left[51559 - (51559 - 31715,6) \frac{104,65 - 52,61}{169,99 - 52,61} \right] = 742,51 \text{ kN.cm}$$

Como o M_{Rd} calculado para o FLT é superior ao momento resistente plástico, adota-se para a FLT o momento de 468,71kN.m.

O momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) da seção deve ser tomada a menor resistência das três verificações, portanto 468,71kN.m. A resistência ao momento fletor, de acordo com a NBR 8800, é superior ao momento solicitante de cálculo (M_{Sd}), cumprindo a verificação.

Verificação ao Esforço Cortante

A determinação da resistência de cálculo ao esforço cortante V_{Sd} consiste em comparar o parâmetro de esbeltez λ com o parâmetro de esbeltez limite para a plastificação λ_p . Quando o parâmetro de esbeltez é inferior ao parâmetro de esbeltez limite para a plastificação, considera-se a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, em casos negativos, a resistência será determinada por formulações específicas.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{426}{10,2} = 41,76$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5 \cdot 21000}{23,5}} = 73,53$$

Como $\lambda < \lambda_p$, o V_{Rd} é obtido pela equação:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{M1}} = \frac{612,67}{1,10} = 557,06 \text{ kN}$$

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y = 0,60 \cdot 51,0 \cdot 23,5 = 719,1 \text{ kN}$$

$$A_w = d t_w = 50 \cdot 1,02 = 51,0 \text{ cm}^2$$

A resistência do perfil IPE500 ao esforço cortante de cálculo é de 653,72kN, atendendo a solitação de cálculo de 200kN.

Equação de Interação Momento Fletor-Compressão

A verificação de flexo-compressão deverá atender as equações de interação momento fletor-compressão, em função da razão do esforço solicitante de compressão e esforço resistente de compressão.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = \frac{450}{1927,12} = 0,23$$

Como a relação entre o esforço solicitante de cálculo e resistência solicitante de cálculo é maior que 0,2, enquadra-se no “caso a”, descrito pela NBR 8800:2008.

a. Caso $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{450}{1927,12} + \frac{8}{9} \left(\frac{225}{468,71} + 0 \right) = 0,66 \leq 1,0$$

O perfil IPE atende a equação de interação de esforço normal e momento fletor, atuando no eixo de maior inércia.

5.1.2 Aplicação 02

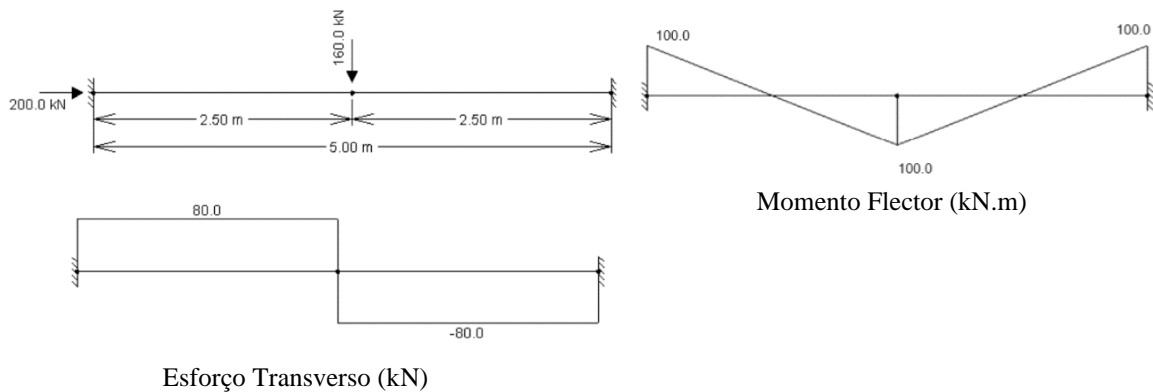
Perfil IPE-A 360: Coluna IPE-A 360 com aço S235, com restrições de rotação nos apoios e carga concentrada no cento geométrico do perfil. O comprimento do pilar é de 5,0m.

Dados geométricos do Perfil:

$h=357,6\text{mm}$	$I_y=14520\text{cm}^4$	$W_{pl,z}=171,9\text{cm}^3$
$b=170\text{mm}$	$W_{el,y}=811,8\text{cm}^3$	$r_z=3,84\text{cm}$
$t_w=6,6\text{mm}$	$W_{pl,y}=906,8\text{cm}^3$	$I_T=26,51\text{cm}^4$
$t_f=11,5\text{mm}$	$r_y=15,06\text{cm}$	$I_w=282000\text{cm}^6$
$r=18\text{mm}$	$I_z=944,3\text{cm}^4$	
$A=64,0\text{cm}^2$	$W_{el,z}=111,1\text{cm}^3$	

Solicitações:

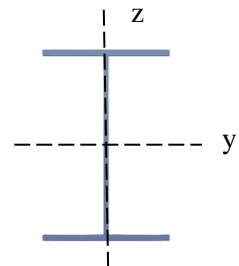
$N_{Ed} = 200\text{kN}$	$M_{Ed} = 100\text{kN.m}$	$V_{Ed} = 80\text{kN}$
-------------------------	---------------------------	------------------------



Verificação pelo EC3-1-1

Classificação da Seção

O perfil IPE-A 360 em aço S 235 é proposto como Classe 1 em alma sob flexão e compressão da mesa em flexão.



Verificação à Compressão

a. Comprimento de Encurvadura:

Considerou-se o $k=1$ no eixo y e $k=0,5$ no eixo z , conforme as condições de restrições nos apoios, apresentando $L_{Ey} = 500\text{cm}$ e $L_{Ez} = 250\text{cm}$.

b. Coeficiente de Esbelteza

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,91 ; \quad \lambda_y = \frac{L_{Ey}}{i_y} = 33,20 ; \quad \lambda_z = \frac{L_{Ez}}{i_z} = 65,10$$

c. Cálculo do factor de redução χ_{\min}

A relação h/b é igual a 2,1, maior que 1,2, com $t_f=11,5\text{mm}$. Consultando o Quadro 6.2 do EC3-1-1, identificou-se a Curva de Encurvadura para ambos os eixos, isto é, para flexão no eixo y corresponde a curva a ($\alpha=0,21$) e para flexão no eixo z , a curva b ($\alpha=0,34$). Como o $\bar{\lambda}_z > \bar{\lambda}_y$ e a curva no eixo z é maior que a curva no eixo y , o factor de redução mínimo será tomado no eixo z .

d. Coeficientes de redução devido à encurvadura por flexão, nos eixos y e z

Eixo y (eixo de maior inércia):

$$\bar{\lambda}_y = 0,354 ; \quad \phi_y = 0,579 \quad \chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,964$$

Eixo z (eixo de menor inércia):

$$\bar{\lambda}_z = 0,693 ; \quad \phi_z = 0,824 \quad \chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0,787$$

$$\chi_{\min} = \chi_z = 0,787$$

Resistência à Encurvadura de elementos à compressão

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,787 \cdot 64 \cdot 23,5}{1,0} = 1183,65\text{kN}$$

O valor de cálculo da resistência da encurvadura da coluna é superior a solicitação N_{Ed} , cumprindo a verificação a equação de verificação.

Verificação ao Esforço Transverso

A área de corte da seção IPE-A 360 é de 29,76cm², e como o $h_w/t_w = 45,24 < 72\varepsilon/\eta$, considerando conservadoramente $\eta=1$, dispensa a necessidade de verificar a encurvadura devido ao esforço transverso para alma não reforçada.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{29,76 \cdot 23,5 / \sqrt{3}}{1,0} = 403,76 \text{ kN}$$

A interação flexão-esforço transverso é dispensável quando o esforço transverso de cálculo V_{Ed} é inferior a 50% do $V_{pl,Rd}$, não sendo necessário reduzir o momento resistente em função do esforço transverso. Como o V_{Ed} é menor que 403,76kN, cumpre a verificação.

Verificação Flexão Composta e Esforço Axial

A verificação da interação entre a flexão e o esforço axial plástico é dada pela equação, devendo obedecer às duas condições apresentadas. Caso o esforço axial solicitante exceda os limites estabelecidos, o EC 3 recomenda a redução do momento resistente plástico.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 1504,00 \text{ kN}; \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = 231,56 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 376 \text{ kN}$$

Como o esforço solicitante de cálculo é inferior às duas condições, não será necessária a redução do momento plástico resistente em torno do eixo y, devido ao esforço axial.

$$M_{N,y,Rd} = \frac{W_{pl,y,Rd} f_y}{\gamma_{M0}} = 213,10 \text{ kN.m}; \quad M_{N,z,Rd} = \frac{W_{pl,z,Rd} f_y}{\gamma_{M0}} = 40,39 \text{ kN.m}$$

Como o elemento possui apenas momento atuante no eixo y, não se faz necessária a verificação de flexão composta desviada. A verificação da estabilidade do

elemento em análise, sob a ação de flexão com compressão, será empregue o Método 1, previsto no EC3-1-1.

Verificação da estabilidade sob a ação de Flexão com Compressão

A verificação da estabilidade do elemento em análise sob a ação de flexão com compressão será avaliada utilizando o Método 1, previsto no EC 3.

a. Resistência característica da seção transversal:

$$N_{Rk} = 1504,00\text{kN}; \quad M_{y,Rk} = 213,10\text{kN.m}; \quad M_{z,Rk} = 40,39\text{kN.m}$$

b. Cálculo dos termos auxiliares:

Os termos auxiliares foram obtidos pelas mesmas equações empregadas na Aplicação 01. Os valores das cargas críticas nos eixos são $N_{cr,y} = 12037,76\text{kN}$ e $N_{cr,z} = 3131,48\text{kN}$.

$$\mu_y = 0,999; \quad \mu_z = 0,986; \quad w_y = 1,117 (<1,5); \quad w_z = 1,547 (<1,5);$$

$$n_{pl} = 0,133$$

c. Momento Crítico

O elemento analisado está sujeito à torção, uma vez que a inércia no eixo y é maior que a inércia à torção. Como a viga não apresenta travamentos laterais, faz-se necessário analisá-la quanto a estabilidade.

O momento crítico para flexão, considerando a forma do diagrama de momento flector, com os $C_1 = 1,682$, $C_2 = 1,645$, com a carga aplicada no centro geométrico ($z_g = 0$), é de $630,74\text{kN.m}$, obtido pela equação do Momento crítico elástico.

d. Coeficiente de Esbeltez adimensional à encurvadura lateral com momento crítico.

$$\bar{\lambda}_o = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,581$$

e. Carga crítica de flambagem torcional

$$i_c^2 = y_c^2 + (I_y + I_z)/A = 241,78\text{cm}^2$$

$$N_{Cr.T} = \frac{1}{i_c^2} \left(GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{ET}^2} \right) = 1855,08\text{kN}$$

f. Factores C_m

A verificação quanto a formulação empregada para a determinação dos factores C_m , tem-se que $\bar{\lambda}_0 = 0,581 > 0,26$. O elemento é suscetível de sofrer instabilidade por torção, sendo necessário quantificar os factores equivalentes de momento uniformes. A deformação do elemento é de 3,35mm, para o cálculo do $C_{m_y,0}$. Factor C_{m0} , considerando o momento no eixo y quase linear:

$$C_{m_{z,0}} = 1,015; \quad C_{m_{y,0}} = 0,990; \quad C_{m_y} = 0,997; \quad C_{m_z} = C_{m_{z,0}} = 1,015;$$

$$a_{LT} = 0,998; \quad \varepsilon_y = 3,939; \quad C_{mLT} = 1,051$$

Curva b com $\alpha_{LT}=0,34$

$$\phi_{LT} = 0,734; \quad \chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = 0,846$$

g. Termos Auxiliares

O cálculo dos termos auxiliares foi efetuado com base na formulação proposta no Quadro A.1 do EC3-1-1.

$$b_{LT} = 0 \quad c_{LT} = 0,359 \quad d_{LT} = 0 \quad e_{LT} = 1,657$$

Para a determinação dos parâmetros C_{yy} , C_{yz} , C_{zy} e C_{zz} , utilizou-se as equações do Quadro A.1 (Factores de Interação) do EC-03.1.1, para a Classe 1.

$$C_{yy} = 1,005 \quad C_{yz} = 0,892 \quad C_{zy} = 0,971 \quad C_{zz} = 0,934$$

Como o perfil enquadra-se na Classe 1, os factores de interação k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} são obtidos pelas fórmulas apresentadas para a classe no Anexo A do EC3-1-1, com os valores dos termos e parâmetros anteriormente calculados.

$$k_{yy} = 1,060 \quad k_{yz} = 0,858 \quad k_{zy} = 0,551 \quad k_{zz} = 1,145$$

Verificação das condições de estabilidade do elemento sujeito ao momento flector, esforço axial.

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,73 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,48 \leq 1$$

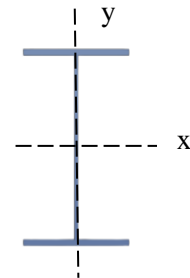
O perfil cumpre a verificação de estabilidade aos esforços combinados de flexão e esforço axial, de acordo com o Método 1 do EC3-1-1.

Verificação pela NBR 8800:2008

Verificação à compressão:

a. Flambagem Local da Alma (FLA)

Comparando a relação $(b/t)=45,24$ com o $(b/t)_{lim}=44,54$, obtida na Tabela F.1, da NBR 8800, para perfis laminados, observa-se que o (b/t) ultrapassa o $(b/t)_{lim}$, sendo necessário determinar o fator de redução Q_a para elementos comprimidos.



$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{63,68}{64,0} = 0,995$$

No qual, o A_g é a área do perfil utilizado e o A_{ef} é a área efetiva da seção transversal. O valor do c_a para perfis I deverá ser 0,34, conforme item F.3.1.

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t = 64 - (29,86 - 29,37) \cdot 0,66 = 63,68 \text{cm}^2$$

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] = 29,37 \text{cm}$$

b. Flambagem Local da Mesa (FLM)

Na verificação da flambagem local da mesa, a relação (b/t) é de 7,34. Para os perfis laminados, o (b/t)_{lim} para o aço S235 é de 16,74. Como o b/t é menor que o (b/t)_{lim}, o fator de redução Q_s para elementos comprimidos AL será 1. Por consequência, o fator de redução aplicado devido à flambagem local será Q=Q_a·Q_s = 0,955.

c. Determinação da Carga Crítica Ne

A carga crítica do perfil no eixo x e y, respectivamente, assume o valor de 12037,76kN e 3131,48kN. No eixo z, ela é determinada através da equação descrita abaixo.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GI_T = 4761,63 \text{kN}$$

A carga crítica, a ser utilizada para a determinação do índice de esbeltez, é a menor das cargas críticas, isto é, N_{e min}=3131,48kN.

d. Índice de Esbeltez Reduzido

O índice de esbeltez reduzido λ₀ é de 0,478. Como λ₀ é menor que 1,5, emprega-se a equação a seguir para a obtenção do fator de redução χ.

$$\lambda_0 \leq 1,5; \chi = 0,658 \lambda_0^2 = 0,908$$

e. Força de Compressão Resistente de Cálculo

A força axial resistente de cálculo N_{c,Rd} associada ao ELU por instabilidade por flexão, por torção ou flexo-compressão e flambagem local é determinada pela equação:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,908 \cdot 0,995 \cdot 64 \cdot 23,5}{1,10} = 1235,27 \text{ kN}$$

Como o $N_{E,d}$ é menor que o $N_{c,Rd}$, cumpre-se a verificação à compressão.

Verificação ao Momento Fletor

a. Flambagem Local da Alma (FLA)

A verificação localizada da alma do perfil é realizada pela relação entre a altura e a espessura da alma, denominada parâmetro de esbeltez. Como o parâmetro de esbeltez da alma $\lambda=45,24$ é inferior ao parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação $\lambda_p = 112,40$, a seção é classificada como seção compacta, sendo seu momento resistente determinado pelo momento de plastificação, com a aplicação do coeficiente γ_{M1} .

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = 193,72 \text{ kN.m}$$

b. Flambagem Local da Mesa (FLM)

De forma similar ao que ocorreu na alma, na mesa o parâmetro de esbeltez da alma $\lambda=7,39$ é inferior ao parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação $\lambda_p=11,36$, sendo a seção considerada compacta, com momento resistente de cálculo de 193,72kN.m.

c. Flambagem Lateral por Torção (FLT)

Na verificação da flambagem lateral por torção, consultando a Tabela G da NBR 8800, para perfis laminados com dupla simetria e solicitado no maior eixo de inércia, obtém-se a formulação para o cálculo do parâmetro de esbeltez e o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação.

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = 130,21; \quad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 52,61$$

Como o parâmetro de esbeltez é maior que o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação, fez-se necessário o cálculo do parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento λ_r , para realizar a classificação.

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_x}{EJ} = \frac{(23,5 - 7,05)811,6}{21000 \cdot 26,51} = 0,0239$$

Sendo a tensão residual 0,3 da tensão de escoamento.

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} = 164,28$$

A seção é classificada como uma seção semi-compacta para o efeito de torção, uma vez que $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, sendo o momento de cálculo resistente determinado pela equação:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Para a determinação do momento fletor resistente de cálculo, devem-se levar em consideração as condições de carregamento e forma do diagrama de momento fletor, através do fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme. Para a aplicação, foi realizado o cálculo do $C_b = 1,76$.

O momento residual é indicado na Tabela G.1 da NBR 8800, para a FLT.

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W_x = 13350,82 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd} = \frac{1,76}{1,10} \left[21309,8 - (21309,8 - 13350,82) \frac{130,21 - 52,61}{164,28 - 52,61} \right] = 252,46 \text{ kN.m}$$

Portanto, como momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) da seção é adotado o menor valor das três verificações, portanto, 193,72kN.m. A resistência ao momento fletor, de acordo com a NBR 8800, é superior ao momento solicitante de cálculo (M_{Ed}), cumprindo a verificação.

Verificação ao Esforço Cortante (Transverso)

A determinação da resistência de cálculo ao esforço cortante V_{Rd} consiste em comparar o parâmetro de esbeltez $\lambda = 45,24$ com o parâmetro de esbeltez limite para a plastificação $\lambda_p = 73,53$. Como o parâmetro de esbeltez é inferior ao parâmetro de esbeltez limite para a plastificação, considera-se a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento. O $A_w = 23,60\text{cm}^2$.

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y = 332,78\text{kN} \quad V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{M1}} = 302,52\text{kN}$$

O V_{Sd} é menor que o V_{Rd} , cumprindo a verificação de resistência.

Equação de Interação Momento Fletor-Compressão

Na verificação da Interação dos esforços de compressão e momento fletor, para o N_{Sd}/N_{Rd} igual a 0,16, aplica-se a Equação de Interação a seguir.

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) = 0,68 \leq 1,0$$

A resistência do perfil atende às solicitações, de acordo com a equação de interação.

5.1.1 Aplicação 03

Perfil HEA 240: Coluna HEA 240 com aço S355, com restrições de rotação nos apoios e carga concentrada na face superior da mesa comprimida. O comprimento do pilar é de 3,5m.

Dados geométricos do Perfil:

$h=230\text{mm}$	$I_y= 7763\text{cm}^4$	$W_{pl,z}= 351,7\text{cm}^3$
$b=240\text{mm}$	$W_{el,y}= 675,1\text{cm}^3$	$r_z= 6\text{cm}$
$t_w=7,5\text{mm}$	$W_{pl,y}= 774,6\text{cm}^3$	$I_T= 41,55\text{cm}^4$
$t_f= 12\text{mm}$	$r_y= 25,18\text{cm}$	$I_w=328500\text{cm}^6$
$r=21\text{mm}$	$I_z= 2769\text{cm}^4$	
$A=76,8\text{cm}^2$	$W_{el,z}= 230,7\text{cm}^3$	

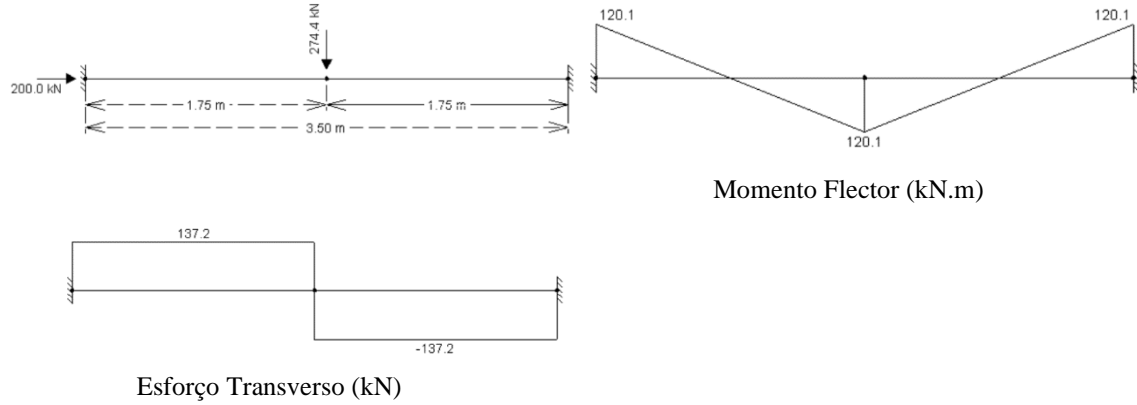
Solicitações:

$N_{Ed} = 200\text{kN}$

$M_{y,Ed} = 120\text{kN.m}$

$M_{z,Ed} = 40\text{kN.m}$

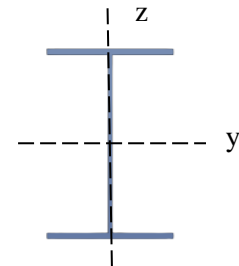
$V_{Ed} = 137,2\text{kN}$



Verificação pelo EC3-1-1

Classificação da Seção

Aplicando os procedimentos previstos na cláusula 5.5 do EC3-1.1, para a seção HEA 240 em aço 355, considerando os esforços aplicados, pertence à Classe 2, isto é, a classe mais alta obtida na alma e mesa do perfil.



Verificação à Compressão

a. Comprimento de Encurvadura:

Considerou-se o $k=0,5$ para a determinação do comprimento de encurvadura em ambas as direções, considerando as restrições nos apoios, assumindo os valores de $L_{Ey} = L_{Ez} = 175\text{cm}$.

b. Coeficiente de Esbelteza

$\lambda_1 = 76,41; \quad \lambda_y = 17,41; \quad \lambda_z = 29,17$

c. Cálculo do factor de redução χ_{\min}

Consultando o Quadro 6.2 do EC3-1-1, identifica-se a Curva de Encurvadura para ambos os eixos, isto é, para flexão no eixo y corresponde a curva b ($\alpha=0,34$) e para flexão no eixo z, a curva c ($\alpha=0,49$). Como o $\bar{\lambda}_z > \bar{\lambda}_y$ e a curva no eixo z é maior que a curva no eixo y, o factor de redução mínimo será tomado no eixo z.

d. Coeficientes de redução devido à encurvadura por flexão, nos eixos y e z

Plano xz (encurvadura em torno de y):

$$\bar{\lambda}_y = 0,228; \quad \phi_y = 0,531; \quad \chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,990$$

Plano xy (encurvadura em torno de z):

$$\bar{\lambda}_z = 0,382; \quad \phi_z = 0,617; \quad \chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0,907$$

$$\chi_{\min} = \chi_z = 0,907$$

Resistência à Encurvadura de elementos à compressão

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,907 \cdot 76,8 \cdot 35,5}{1,0} = 2473,71 \text{ kN}$$

O valor de cálculo da resistência da encurvadura da coluna é superior à solicitação N_{Ed} , satisfazendo a equação de verificação.

Verificação ao Esforço Transverso

A área de corte da seção HEA 240 é de 25,18cm², e como o $h_w/t_w = 27,5 < 72\varepsilon/\eta = 58,3$, considerando conservadoramente $\eta=1$, dispensa a necessidade de verificar a encurvadura, devido ao esforço transverso para alma não reforçada.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{25,18 \cdot 35,5 / \sqrt{3}}{1,0} = 516,09 \text{ kN}$$

Como $V_{Ed} < V_{pl,Rd}$, é verificada a resistência ao esforço transverso. A interação flexão-esforço transversa é dispensável quando o esforço transverso de cálculo V_{Ed} é

inferior a 50% do $V_{pl,Rd}$, não sendo possível reduzir o momento resistente em função do esforço transversal.

Verificação Flexão Composta e Esforço Axial

A verificação da interação entre a flexão e o esforço axial plástico é dada pela equação, devendo obedecer às duas condições apresentadas. Caso o esforço axial solicitante exceda os limites estabelecidos, o EC3-1-1 recomenda a redução do momento resistente plástico.

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 2726,40\text{kN}; \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = 218,33\text{kN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 681,6\text{kN}$$

Como o esforço solicitante de cálculo é inferior às duas condições, não será necessária a redução do momento plástico resistente em torno do eixo y, devido ao esforço axial.

$$M_{N,y,Rd} = \frac{W_{pl,y,Rd} f_y}{\gamma_{M0}} = 264,33\text{kN.m}; \quad M_{N,z,Rd} = \frac{W_{pl,z,Rd} f_y}{\gamma_{M0}} = 124,85\text{kN.m}$$

Como o N_{Ed} é menor que 436,65kN, não é necessária a redução do momento plástico no eixo z.

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = 436,65\text{kN}$$

A flexão composta desviada é verificada pela condição a seguir, sendo na relação entre o esforço normal de cálculo e o $N_{pl,Rd}$. Para o perfil HEA 240, n é igual a 0,055 e $\beta=0,27$, para vigas com carga distribuída e momentos aplicados nas extremidades. Como β é menor que 1, adota-se o valor de 1,0 e $\alpha=2$.

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta = 0,53 \leq 1,0$$

O perfil HEA 240 possui capacidade de suportar os esforços combinados de momento flector no eixo y e no eixo z.

Para a verificação da estabilidade do elemento, sob a ação de flexão com compressão, foi empregue o Método 1, previsto no EC3-1-1.

Método 1

a. Resistência característica da seção transversal:

$$N_{Rk} = 2726,40\text{kN}; \quad M_{y,Rk} = 264,33\text{kN.m}; \quad M_{z,Rk} = 124,85\text{kN.m}$$

b. Cálculo dos termos auxiliares:

O cálculo dos termos auxiliares, incluindo os factores C_{yy} e C_{zy} , definidos no Quadro A.1 do EC3-1-1, utilizando as mesmas formulações anteriormente apresentadas.

$$N_{cr,y} = 52537,88\text{kN}; \quad N_{cr,z} = 18739,84\text{kN};$$

$$\mu_y = 1,00; \quad \mu_z = 0,999; \quad w_y = 1,103; \quad w_z = 1,524 \quad n_{pl} = 0,073$$

Como o elemento analisado está sujeito à torção, uma vez que a inércia no eixo y é maior que a inércia à torção. Como a viga não apresenta travamentos laterais, faz-se necessário analisá-la quanto à estabilidade.

c. Momento Crítico

O momento crítico para flexão, considerando a forma do diagrama de momento flector, obtido pela fórmula descrita abaixo, com os $C_1=1.682$, $C_2= 1,645$, com a carga aplicada no centro geométrico ($z_g=0$), é de 2175,09 kN.m.

Coefficiente de Esbeltez adimensional à encurvadura lateral com momento crítico uniforme para o caso padrão é obtido através da formulação.

$$\bar{\lambda}_o = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,349$$

d. Carga crítica de flambagem torcional

$$i_c^2 = y_c^2 + (I_y + I_z)/A = 137,06\text{cm}^2$$

$$N_{Cr.T} = \frac{1}{i_c^2} \left(GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{ET}^2} \right) = 6510,50 kN$$

e. Factores C_m

O elemento é suscetível de sofrer instabilidade por torção, sendo necessário quantificar os factores equivalentes de momento uniformes.

Factor C_{m0} , considerando o momento no eixo y quase linear. Os factores de equivalentes de momento uniforme são obtidos de acordo com o Quadro A.1.16 do EC3-1-1.

$$C_{mz,0} = 1,003; \quad C_{my,0} = 1,003; \quad C_{my} = 1,001; \quad C_{mz} = C_{mz,0} = 1,003$$

$$a_{LT} = 0,995; \quad \varepsilon_y = 6,83; \quad C_{mLT} = 1,007;$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = 0,349$$

Curva a com $\alpha_{LT}=0,21$, $h/b < 2$.

$$\phi_{LT} = 0,576; \quad \chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = 0,966$$

f. Termos Auxiliares

O cálculo dos termos auxiliares foi efetuado com base na formulação proposta no Quadro A.1 do EC3-1-1.

$$b_{LT} = 0,010; \quad c_{LT} = 0,113; \quad d_{LT} = 0,858; \quad e_{LT} = 2,283$$

Para a determinação dos parâmetros C_{yy} , C_{yz} , C_{zy} e C_{zz} , utilizou-se das equações do Quadro A.1.

$$C_{yy} = 1,008; \quad C_{yz} = 1,008; \quad C_{zy} = 0,917; \quad C_{zz} = 0,968$$

Como o perfil enquadra-se na Classe 1, os factores de interação k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} são obtidas pelas fórmulas apresentadas para a classe no Anexo A do EC3-1-1, com os valores dos termos e parâmetros anteriormente calculados.

$$k_{yy} = 1,003; \quad k_{yz} = 0,709; \quad k_{zy} = 0,562; \quad k_{zz} = 1,046$$

Verificação das condições de estabilidade do elemento sujeito ao momento flector, esforço axial.

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,77 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,68 \leq 1$$

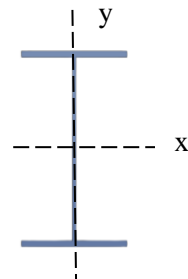
O perfil cumpre a verificação de estabilidade aos esforços combinados de flexão e esforço axial, de acordo com o Método 1 do EC3-1-1.

Verificação pela NBR 8800:2008

Verificação à compressão:

a. Flambagem Local da Alma (FLA)

Comparando a relação $(b/t)=21,86$ com o $(b/t)_{lim}=36,23$, obtidos na Tabela F.1 da NBR 8800, para perfis laminados, observa-se que o (b/t) não ultrapassa o $(b/t)_{lim}$, com o $Q_a=1$.



b. Flambagem Local da Mesa (FLM)

Como o $b/t=10$ é menor que o $(b/t)_{lim}=13,62$, o factor de redução Q_s para elementos comprimidos AL será 1.

Por consequência, o factor de redução aplicado devido à flambagem local será $Q=Q_a.Q_s = 1$.

c. Determinação da Carga Crítica N_e

$$N_{ex} = 52537,87\text{kN}; \quad N_{ey} = 18739,84\text{kN}; \quad N_{ez} = 3863,75\text{kN}$$

A carga crítica $N_{e \min} = 3863,75\text{kN}$.

d. Índice de Esbeltez Reduzido

Através da determinação do índice de esbeltez reduzido λ_0 , é possível determinar o factor de redução associado à compressão χ .

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QN_{pl}}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 76,8 \cdot 35,5}{3863,75}} = 0,840$$

Como λ_0 é menor que 1,5, emprega-se a equação a seguir para a obtenção do factor de redução χ .

$$\lambda_0 \leq 1,5; \quad \chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,840^2} = 0,744$$

e) Força de Compressão Resistente de Cálculo

A força axial resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ associada ao ELU por instabilidade por flexão, por torção ou flexo-compressão e flambagem local é determinada pela equação:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,744 \cdot 76,8 \cdot 35,5}{1,10} = 1844,72\text{kN}$$

Verificação ao Momento Fletor

a. Flambagem Local da Alma (FLA)

O parâmetro de esbeltez da alma $\lambda = 21,86$ é inferior ao parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação $\lambda_p = 91,44$. A seção é classificada como seção compacta, sendo seu momento resistente determinado pelo momento de plastificação, com a aplicação do coeficiente γ_{M1} .

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = 240,30\text{kN.m}$$

b. Flambagem Local da Mesa (FLM)

O parâmetro de esbeltez $\lambda=21,86$ é maior que o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação $\lambda_p=9,24$, fez-se necessário o cálculo do parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento λ_r , para perfis laminados, de acordo com a nota 6 da NBR 8800:2008.

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} = 24,12$$

A seção é classificada como uma seção semi-compacta, uma vez que $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$. Para a determinação do momento fletor resistente de cálculo, levou-se em consideração as condições de carregamento e forma do diagrama de momento fletor, através do fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme. Para a aplicação foi realizado o cálculo do C_b igual a 1,91.

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] = 458,97 \text{ kN.m}$$

c. Flambagem Lateral por Torção (FLT)

Como o parâmetro de esbeltez $\lambda=58,33$ é maior que o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação $\lambda_p=42,81$, fez-se necessário o cálculo do parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento λ_r para realizar a classificação.

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{E J} = 0,0192$$

Sendo a tensão residual 0,3 da tensão de escoamento.

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} = 153,72$$

A seção é classificada como uma seção semi-compacta para o efeito de torção, apresentando um M_{Rd} de 458,97kN.m, com o $C_b=1,91$.

Considerando a condição mais desfavorável, o M_{Rd} assume a mesma resistência calculada para a mesa do perfil. Portanto, o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) da seção do HEA 240 é de 240,30kN.m.

Verificação ao Esforço Cortante (Transverso)

Para a determinação da resistência de cálculo ao esforço cortante V_{Rd} , do perfil HEA 240, foi necessário comparar o parâmetro de esbeltez $\lambda = 21,86$ com o parâmetro de esbeltez limite para a plastificação $\lambda_p = 59,82$. Como o parâmetro de esbeltez é inferior ao parâmetro de esbeltez limite para a plastificação, considera-se a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento. A área de corte é de 7,25cm².

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y = 367,43\text{kN}; \quad V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{M1}} = 334,02\text{kN}$$

A resistência ao esforço cortante V_{Rd} é superior à solicitação de cálculo V_{Sd} , cumprindo a condição de equilíbrio.

Equação da Interação Momento Fletor-compressão

A verificação de flexo-compressão deverá atender as equações de interação momento fletor-compressão, em função da razão do esforço solicitante de compressão e esforço resistente de compressão. Como a relação entre o esforço solicitante de cálculo e o esforço resistente de cálculo é de (0,11), inferior a 0,2, utiliza-se a seguinte equação de interação de esforço axial de compressão e momento fletor.

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) = 0,90 \leq 1,0$$

A resistência do perfil atende às solicitações, de acordo com a equação de interação.

5.2 Análise das Semelhanças e Divergências

O primeiro ponto a ser observado no EC3-1-1 e na NBR 8800, nas verificações de resistência à compressão e ao momento fletor, é a classificação das seções. Na

Tabela 05 são apresentadas as classificações das três Aplicações, na qual nota-se que embora a classificação da seção seja similar na classificação da seção à compressão, a NBR 8800 conduz classificação mais conservadora.

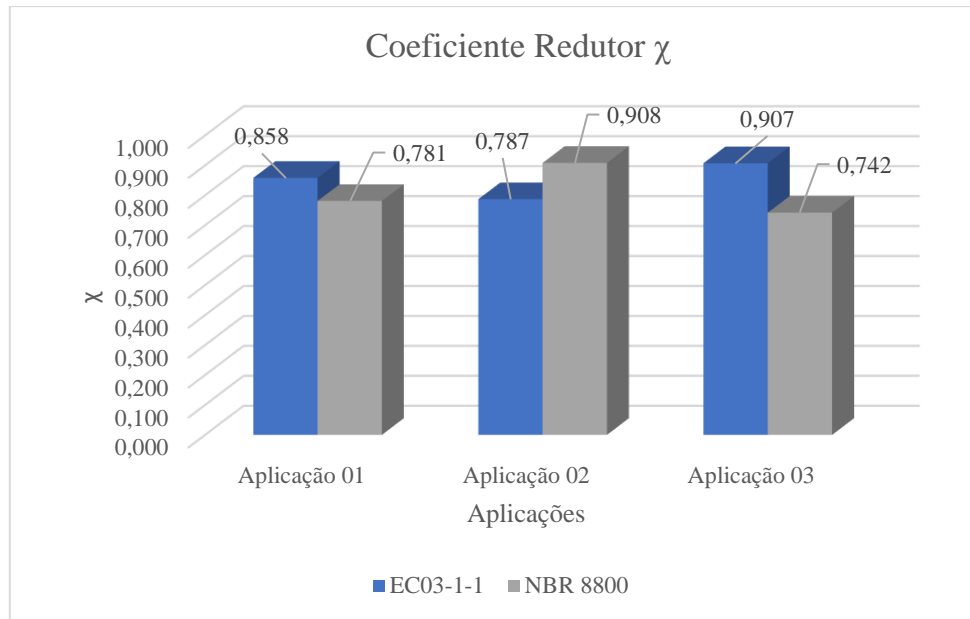
Tabela 05 - Classificação das seções segundo o EC3-1-1 e NBR 8800.

		Aplicação 01	Aplicação 02	Aplicação 03
Esforços Atuantes	N_{Ed} (kN.m)	450,00	200,00	200,00
	$M_{,Ed}$ (kN.m)	225,00	100,00	120,00
EC3-1-1		Classe 1	Classe 1	Classe 2
NBR 8800	FLM	Compacta	Compacta	Semi-Compacta
	FLA	Compacta	Compacta	Compacta
	Compressão (FLM)	Compacta	Compacta	Compacta
	Compressão (FLA)	Compacta	Semi-Compacta	Compacta

Fonte: Autoria própria, 2023.

A verificação ao esforço de compressão de ambas as normas se baseiam na relação entre o c/t . No EC3-1-1, as seções que compõem o perfil são enquadradas em uma das quatro classes, estabelecendo se a análise empregada será elástica ou plástica. Na NBR 8800, através da relação c/t , é possível avaliar se a alma ou a mesa pode vir a sofrer instabilidade localizada. Caso verifique-se que o perfil estará sujeito à flambagem localizada na alma ou na mesa, é aplicado um coeficiente redutor, devido ao esforço localizado. Posteriormente, realiza-se a verificação global através da formulação da carga crítica, e conseqüentemente, a aplicação do fator redutor para a flambagem global. A resistência do elemento à compressão é dada pelo fator de redução devido à flambagem localizada, fator de redução relacionado à flambagem global, à tensão de cedência e área da seção transversal, aplicado um fator de minoração.

O Gráfico 01 apresenta o comparativo dos factores de redução devido à encurvadura, obtidos nas Aplicações, utilizando as recomendações do EC3-1-1 e NBR 8800.

Gráfico 01 - Factor Redutor χ devido à Encurvadura.

Fonte: Autoria Própria, 2023.

Nos resultados obtidos, observa-se que o factor redutor devido à encurvadura alcança valores maiores no EC3-1-1, nas Aplicações 01 e 03. A diferença entre os valores varia entre 9,0% na Aplicação 01 e 18,2% na Aplicação 03. Na Aplicação 02, o coeficiente redutor, calculado pela NBR 8800, apresentou uma diferença de 13,3% em relação ao obtido pelo EC3-1-1. Cabe ressaltar que na Aplicação 02, devido a possibilidade de flambagem localizada na alma, o valor de Q_a acaba influenciando o factor de redução devido à flambagem global.

Na NBR 8800 o coeficiente redutor é obtido utilizando a formulação baseada em uma única curva de encurvadura, podendo apresentar resultados, em alguns casos, menores que o EC3-1-1, utilizando uma das 4 curvas de encurvadura. De acordo com a literatura consultada, ao adotar uma única curva de flambagem para todos os perfis, pode gerar resultados bem conservadores em relação à normatização internacional.

Na verificação dos perfis à compressão, observou-se que a resistência à compressão acompanhou os coeficientes redutores χ , apresentados no Gráfico 02.

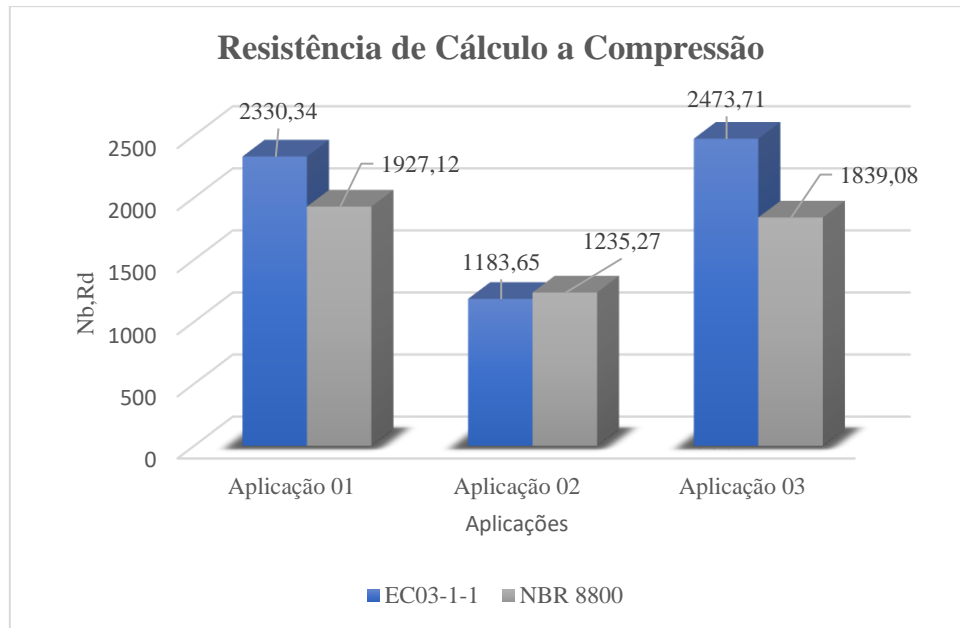


Gráfico 02 - Resistência de Cálculo à Compressão.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Nas Aplicações 01 e 03 apresentaram resistências superiores no EC3-1-1 de 17,3% e 25,7%, respectivamente, enquanto na Aplicação 02, a diferença de 4,2%, sendo a resistência pela NBR 8800 maior. O coeficiente de minoração da resistência à compressão possui uma parcela na responsabilidade, pois enquanto o EC 3 aplica o factor $\gamma_{M1}=1,0$, a NBR 8800 utiliza o $\gamma_{a1}=1,10$.

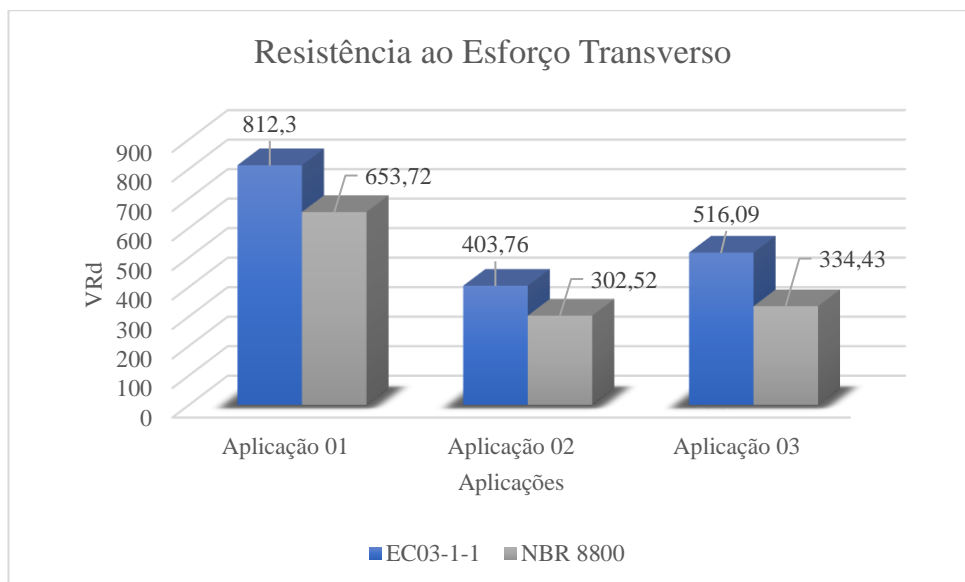


Gráfico 03 - Resistência ao Esforço Transverso.
Fonte: Autoria própria, 2023.

No Gráfico 03, as resistências ao esforço transversal apresentaram valores superiores na verificação pelo EC3-1-1. Na Aplicação 01, 19,5%, na Aplicação 02, 25,1% e na Aplicação 03 35,2%. Na formulação empregada pelo EC3-1-1, o $V_{c,Rd}$ é obtido pelo $V_{pl,Rd}$ para o cálculo plástico, com o $\gamma_{M1}=1,0$. Pela verificação apresentada na NBR 8800, o cálculo da resistência é obtido de acordo com o parâmetro de esbeltez da seção. As principais diferenças encontram-se na área de corte e coeficientes de minoração aplicadas por ambas as normas.

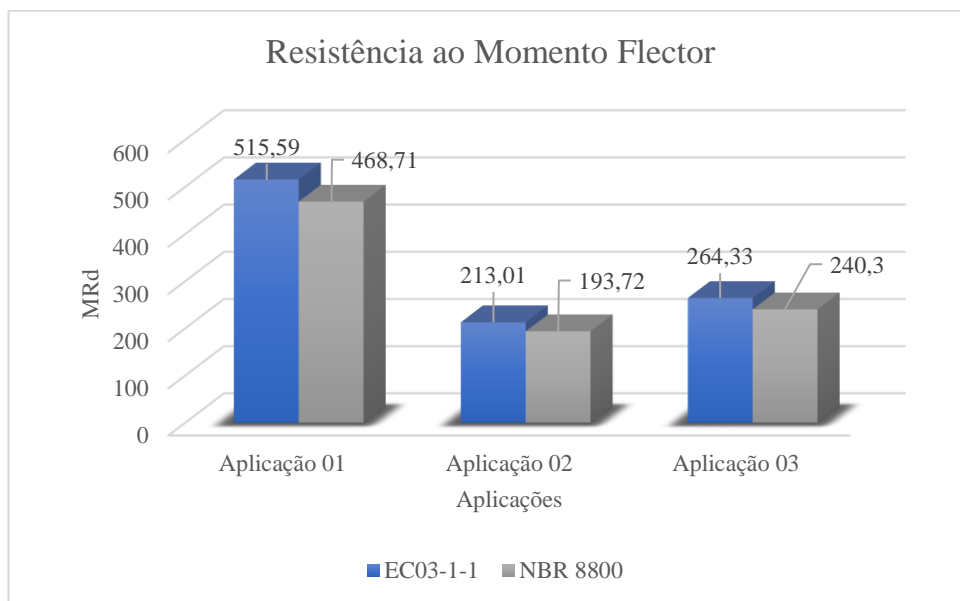


Gráfico 4 - Resistência ao Momento Flector (Eixo de maior Inércia).
Fonte: Autoria própria, 2023.

Na resistência ao momento flector atuante no eixo de maior inércia, apresentada no Gráfico 04, observou-se que a NBR 8800 apresentou resistências inferiores, com 9,1% nas três aplicações. A diferença nas resistências ao momento flector calculada é oriunda da aplicação do coeficiente de minoração de $\gamma_{a1}=1,10$ pela NBR 8800.

No Gráfico 05, as verificações de estabilidade pelo EC3-1-1 utilizando o Método 01 apresentam diferenças pequenas em relação a NBR 8800. Os coeficientes para a Equação de Interação do EC 3 exigem que se faça um número maior de cálculos de “Termos Auxiliares” para aplicação nas equações de verificação de estabilidade. Pelos resultados alcançados nas Aplicações, somente a Aplicação 03 apresentou valor superior na Equação de Interação da NBR 8800, com uma diferença de menos de 12,2%.

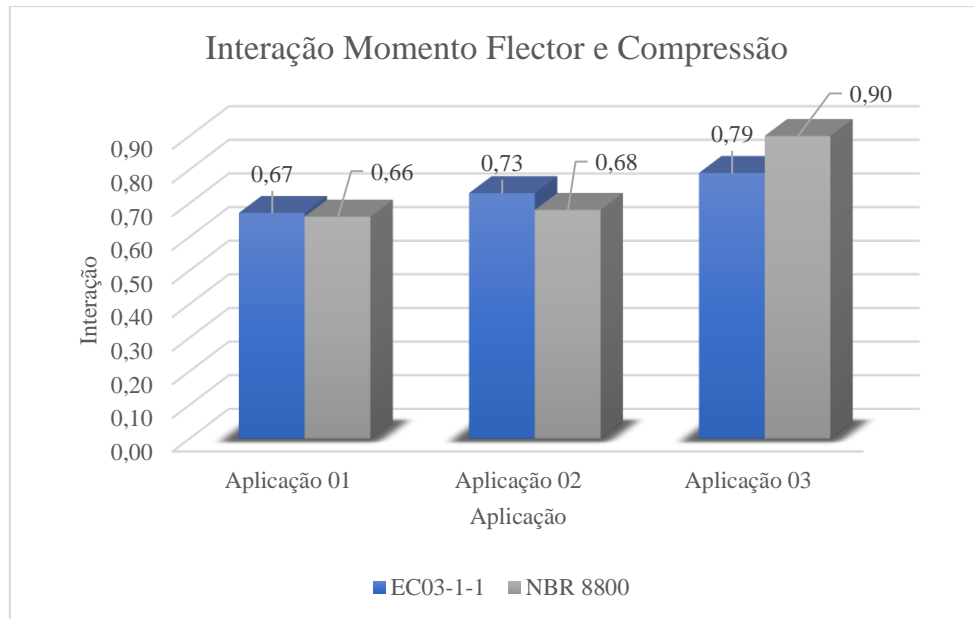


Gráfico 05 - Interação Momento Flector e Compressão.
Fonte: Autoria própria, 2023.

No Gráfico 06 é apresentado o comparativo das verificações realizadas para os esforços solicitantes isolados em relação às resistências ($Solicitações / Resistência \leq 1$) e a aplicação das Equações de Interações realizadas por ambas as normas. Percebe-se que nas verificações isoladas, a NBR 8800 apresenta valores mais conservadores do que o EC 3, isto é, a relação solicitação/resistência é mais próxima de 1.

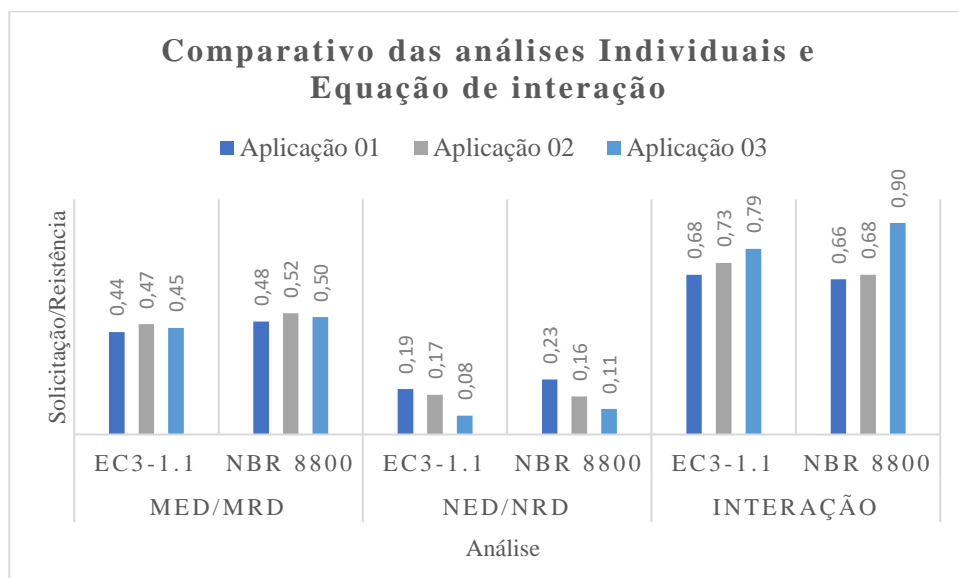


Gráfico 06 - Comparativo das Análises individuais e Equação de Interação.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Na análise através da Equação de Interação pela NBR 8800, os resultados variam de 1,5% a 12,2% em relação ao EC3-1-1. Cabe ressaltar que as verificações da

NBR 8800 se baseiam em uma única Equação de Interação, em razão do N_{Ed}/N_{cRd} , que pode apresentar valores conservadores. No EC3-1-1 há o emprego de duas equações e com o emprego de vários termos auxiliares, o que torna a verificação mais extensa.

CONCLUSÃO

A determinação da resistência de elementos estruturais constitui uma das etapas do projeto estrutural em aço, que se respalda na normatização de cada país. Este trabalho descreveu como o EC 3 e a NBR 8800 realizam as verificações das resistências em 3 Aplicações, quando sujeitas a esforços isolados e/ou combinados.

Na resistência à compressão, de forma isolada, as aplicações apresentaram valores superiores no EC 3 em duas delas (17,3% na Aplicação 01 e 25,7% na 03) e inferior na Aplicação 02 (4,2%). Ressalta-se que a NBR 8800 adota uma única Curva de Encurvadura, enquanto o EC 3, os perfis são enquadrados em uma das 4 Curvas de Encurvadura.

Para a resistência ao momento flector, as diferenças mantiveram constantes nas Aplicações, isto é, 9,1% maior no EC 3, advindas do emprego do coeficiente de minoração da resistência do aço aplicado na NBR 8800 de 1,10. Na resistência ao esforço transversal, as 03 Aplicações apresentaram resistências superiores no EC 3 de 19,5%, 25,1% e 35,2%, respetivamente. As diferenças decorrem da aplicação do coeficiente de minoração da resistência e diferença no cálculo da área de corte recomendada pela NBR 8800.

Na verificação de estabilidade pelos esforços, combinados através das Equações de Interação, observou-se que na Aplicação 01 a diferença foi de 1,5% superior no EC 3, enquanto na Aplicação 02 e 03, 6,9% e 12,2%, respetivamente, na NBR 8800. A aplicação que o EC 3 apresentou um valor maior na Equação de Interação foi o perfil verificado pelo Caso 1 da NBR 8800, isto é, a relação entre a resistência à compressão e solicitação maior que 20%.

Nas colunas submetidas à compressão e momento flector, percebe-se que a determinação das resistências de forma isolada constitui um problema, pois conduz a valores de resistências que desprezam a possibilidade de redução, em razão da atuação simultânea de esforços. No caso de esforços combinados, tanto o EC3-1-1 quanto a NBR 8800, apresentam a necessidade de verificar a estabilidade através de Equação de Interação. Embora o perfil possa alcançar a resistência desejada, quando avaliado o esforço de forma isolada na verificação de interação, quando as resistências estão próximas às solicitações, o perfil não verifica quanto a estabilidade, sendo necessário redimensioná-lo. Ambas as normas, embora com equações diferentes, consideram o agravamento ou atenuação dos esforços simultâneos.

Nesse estudo, conclui-se que as verificações pela NBR 8800 conduzem a resultados mais conservadores, uma vez que na sua formulação apresenta coeficiente de segurança maior, simplificações de conceitos e normatizações internacionais.

Finalmente, através das aplicações foi possível evidenciar que as verificações das resistências aos esforços isolados constituem um erro de premissa e que ambas as normas não exigem o projetista de as considerar.

Como desenvolvimento de futuros trabalhos propõe-se o comparativo das resistências ao esforço de compressão avaliando a influência das Curvas de Encurvadura empregadas por ambas as normas.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). *NBR 8800: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Bellei, I. (2014). *Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo*. São Paulo: PINI.
- Chamberlain, Z. (2013). *Projeto e cálculo em estruturas em aço: edifício em aço detalhado*. Rio de Janeiro, Grupo Gen.
- Fakury, R. H. (2016). *Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto*. São paulo, Pearson Education do Brasil.
- Figueiredo, L. (1998). *Projeto e Construção de Pilares Mistos Aço-Concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Martins, J. G. (2011). *Estruturas Metálicas: EC 3 – parte 1.1*. Série Estruturas. vol.4. Porto. Universidade Fernando Pessoa.
- NP EN 1993-1-1:2010. *Eurocódigo 3 – Projeto de Estruturas de Aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade.
- Pfeil, W. e Pfeil, M. (2021). *Estruturas de Aço - Dimensionamento Prático*. 9ª edição. Grupo GEN.
- Rebello, Y. C. P. (2007). *Bases do projeto estrutural na arquitetura*. São Paulo, Zigurate Editora.

Silva, L. “*et. alii*”, (2016). *Dimensionamento de Estruturas de Aço: Comparações entre o Eurocódigo 3 e a Norma Brasileira NBR 8800*. Rio de Janeiro, EdUERJ.

Silva, L. (2007). *Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: métodos avançados eurocódigo 3*. Coimbra, CMM.

Silva, V. P. e Fabio Domingos Pannoni. *Estruturas de aço para edifícios: aspectos tecnológicos e de concepção*. São Paulo, Editora Blucher, 2010.

Simões, R. (2014). *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço. Parte 1-1. regras gerais e regras para edifícios*. 3.ed. Coimbra, CMM.

Souza, A. S. C. (2017). *Dimensionamento de Elementos e Ligações em Estruturas de Aço*. São Carlos, EdFSCar.

ANEXO A

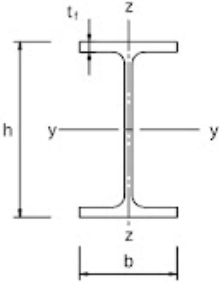
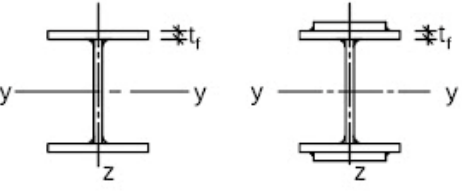

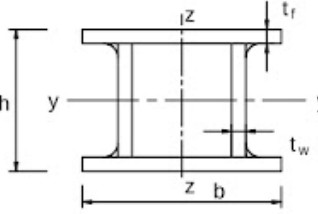
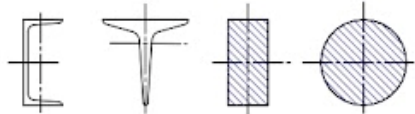
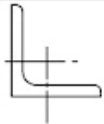
Secção transversal	Limites	Encurvadura em relação ao eixo	Curva de encurvadura	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Perfis laminados 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d c
Perfis I soldados 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y - y z - z	c d	
Secções tubulares 	acabadas a quente	qualquer	a	a ₀
	enformadas a frio	qualquer	c	c
Secções em caixão soldadas 	em geral (excepto como abaixo indicado)	qualquer	b	b
	soldaduras espessas: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	qualquer	c	c
Perfis U, T e secções cheias 		qualquer	c	c
Cantoneiras 		qualquer	b	b

Figura 13 - Escolha da curva de encurvadura em função da secção transversal.

Fonte: EC3-1-1.

ANEXO B

Tabela 6 – Tabela F.1- Valores do $(b/t)_{lim}$.

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> Mesas ou almas de seções tubulares retangulares Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-caixão Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	<ul style="list-style-type: none"> Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travejamento 		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U soldadas^a 		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções T 		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a O coeficiente k_c é dado em F.2.

Fonte: NBR 8800: 2008.

ANEXO C

Tabela 07 - Parâmetro referente ao momento fletor resistente.

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	Mr	Mcr	λ	λ_p	λ_r
Seção I ou H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior inércia.	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Nota 5	Nota 1	L_b/r_y	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Nota 5	Nota 6	b/t Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (anexo H)	h/t _w	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seção I ou H com um eixo de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior inércia.	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ \leq $f_y W_t$	Nota 2	L_b/r_{yc}	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Nota 5	Nota 6	b/t Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota 6
	FLA	$f_y W$ Nota 5	Viga de alma esbelta (anexo H)	h _c /t _w	$\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seção I ou H com dois eixos de simetria e seções U, fletidas em relação ao eixo de maior inércia.	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Nota 5	Nota 6	b/t Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota 6
	FLA	$f_y W$ Nota 5	$\frac{W_{ef}^2}{W}$ Nota 4	h/t _w	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior inércia.	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	L_b/r_y	$\frac{0,13 E}{M_{pl}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$

Fonte: NBR 8800:2008.

