

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e
Aço

Thaís Barbosa Soares

**PROJETO DE UM EDIFÍCIO DE PEQUENO PORTE ESTRUTURADO EM PERFIS
FORMADOS A FRIO**

Belo Horizonte

2018

Thaís Barbosa Soares

**PROJETO DE UM EDIFÍCIO DE PEQUENO PORTE ESTRUTURADO EM PERFIS
FORMADOS A FRIO**

Versão Final

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues.

Belo Horizonte

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
*Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de
Estruturas de Concreto Armado e Aço*

ATA DA DEFESA

**“Projeto de um Edifício de Pequeno Porte Estruturado
em Perfis Formados a Frio”**

THAÍS BARBOSA SOARES

Trabalho Final defendido perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço”

Aprovada em 20 de dezembro de 2018.

Por:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
Avaliador 1 – Orientador



Nota: 94

Prof. Dr. Hermes Carvalho
Avaliador 2



Nota: 95

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, o que seria de mim sem a fé que eu tenho nele.

A meus pais, Geraldo e Vera, que sempre acreditaram em minha capacidade e me ensinaram que devo fazer tudo aquilo que me proponho da melhor forma e mesmo quando o resultado não foi aquilo que eu esperava, o amor de vocês me fortaleceu.

A minha irmã, Ana Paula, pela contribuição para o meu sucesso, este é o resultado da confiança e força que depositou em mim.

A meu namorado, Rafael, por ser meu maior incentivador me fazendo acreditar que posso mais que imagino, obrigado por fazer do meu sonho, os nossos sonhos.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Curso de Especialização em Estruturas da UFMG, por todos ensinamentos e apoio para a conclusão deste projeto.

Agradeço de modo especial ao Professor Doutor Francisco Carlos Rodrigues, que me orientou durante a elaboração deste trabalho, muito obrigado por toda a dedicação, empenho e motivação.

Resumo

O presente trabalho refere-se à realização da análise estrutural e dimensionamento de um edifício de pequeno porte utilizando a estrutura em perfis formados a frio. O edifício em estudo foi apresentado pelo Manual de Construção em aço do CBCA, o qual foi dimensionado em perfis solados e laminados. A análise estrutural foi realizada por meio do programa SAP 2000 e a deslocabilidade da edificação foi verificada, classificando a estrutura como sendo de média deslocabilidade, estando o coeficiente $B_2 = (\mu_2/\mu_1)$ em todos os andares no intervalo entre 1,1 e 1,4.

PALAVRAS CHAVE: Perfis formados a frio, Análise estrutural, Deslocabilidade, Dimensionamento estrutural.

Abstract

The present work refers to the accomplishment of the structural analysis and design of a small building using the structure in cold formed profiles. The building under study was presented by the CBCA's Steel Construction Manual, which was dimensioned in welded and laminated profiles. The structural analysis was performed using the SAP 2000 program and the displacement of the building was verified, classifying the structure as being of medium displacement, with the coefficient $B_2=(\mu_2/\mu_1)$ on all floors in the range between 1,1 and 1,4.

KEYWORDS: Cold formed profiles, Structural analysis, Displaceability, Structural design.

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área bruta da seção transversal da barra

A_{ef} – área efetiva da seção transversal da barra

A_{inef} – área inefetiva

C_a – coeficiente de arrasto

C_w – constante de empenamento da seção transversal

D – largura nominal do enrijecedor de borda

E – módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200000MPa

F_a - força de arrasto: componente da força devida ao vento na direção do vento

G – módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77000MPa

I – momento de inércia da seção bruta

$I_{x'}$ - momento de inércia da seção efetiva considerando-se o “método linear”

I_a – momento de inércia de referência do enrijecedor de borda

I_s – momento de inércia da seção bruta do enrijecedor de borda, em torno do seu próprio eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido. A parte curva entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada

I_x - momento de inércia da seção efetiva do perfil, em relação ao eixo x

J – constante de torção

$K_x L_x$ – comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x

$K_y L_y$ - comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y

$K_z L_z$ – comprimento efetivo de flambagem global por torção

L – comprimento do elemento

M_{dist} - momento fletor de flambagem distorcional elástica

M_l - momento fletor de flambagem local elástica

M_{Rd} – momento fletor resistente de cálculo

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

N_{dist} – força axial de flambagem distorcional elástica

N_e – força axial de flambagem global elástica

N_{ex} – força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x

N_{exz} – força axial de flambagem global elástica por flexo-torção

N_{ey} - força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y

N_{ez} – força axial de flambagem global elástica por torção

$N\ell$ - força axial de flambagem local elástica

V_0 - velocidade básica do vento: velocidade de uma rajada de 3 s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano

V_k – velocidade característica do vento

$W_{c,ef}$ – - módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida

W_{ef} - módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento

b – largura do elemento, é a dimensão plana do elemento sem incluir dobras

b_c – largura do trecho comprimido de elementos sob gradiente de tensões normais

b_{ef} – largura efetiva

$b_{ef1}; b_{ef2}$ – larguras efetivas indicadas na tabela do anexo B

b_{inef} – largura inefetiva

d – largura do enrijecedor de borda

d_{ef} – largura efetiva do enrijecedor de borda

d_s – largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda

f_u - resistência à ruptura na tração

f_y - resistência ao escoamento do aço

k – coeficiente de flambagem local do elemento

n – expoente empregado no cálculo do coeficiente de flambagem local k

q - Pressão dinâmica do vento, correspondente à velocidade característica V_k , em condições normais de pressão (1 atm = 1013,2 mbar = 101320 Pa) e de temperatura (15°C)

r_0 – raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção

t – espessura do elemento

γ – coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral

P- Δ - efeito global de segunda ordem

P- δ – efeito local de segunda ordem

λ_0 – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global

λ_p – índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa

λ_{p0} – valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento

σ – tensão normal, em geral

x – fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global

x_0 – distância do centro de torção ao centroide, na direção do eixo x

x_{FLT} – fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção

Ψ – fator de redução das ações, fator de combinação de ações

– relação σ_2 / σ_1 empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local do elemento

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL – Elemento plano vinculado a outro elemento em apenas uma borda na direção longitudinal do perfil

CA – Ações Variáveis

CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço

CP – Ações Permanentes Diretas

CV0 – Cargas devido ao vento a 0°

CV90 – Cargas devido ao vento a 90°

Cx – Perfil Caixa

FHE – Força Nocial

FLT – Flambagem Lateral com Torção

Ie – Perfil I enrijecido

LCA - Reação da laje na viga devido a ações variáveis

LCP - Reação da laje na viga devido a ações permanentes diretas

MAES – Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes

MLE - Método das Larguras Efetivas

MRD - Método da Resistência Direta

MSE - Método das Seções Efetivas

P – Parede

R - Reação final das ações permanentes diretas mais ações variáveis

Ue – Perfil U enrijecido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO	12
3	REVISÃO DA LITERATURA	13
3.1	Fabricação e padronização de perfis formados a frio	13
3.2	Estabilidade das barras de seção abertas em perfis formados a frio.....	17
3.3	Métodos para dimensionamento de barra	19
3.3.1	Método das larguras efetivas- MLE	19
3.3.2	Método das seções efetivas- MSE	20
3.3.3	Método da resistência direta- MRD.....	21
3.4	Análise estrutural	21
3.4.1	Análise elástica de primeira ordem.....	22
3.4.2	Análise elástica de segunda ordem	22
4	MEMORIAL DE CÁLCULO	23
4.1	Descrição e parâmetros de projeto.....	23
4.2	Sistema estrutural.....	25
4.3	Materiais	32
4.4	Ações atuantes na estrutura	32
4.4.1	Ações permanente e ações variáveis.....	32
4.4.2	Ações devido ao vento	41
4.4.3	Força nocional (FHE)	47
4.4.4	Combinações de ações	50

4.5	Dimensionamento dos elementos da estrutura	55
4.5.3	Contraventamento.....	96
4.6	Consumo de aço.....	103
5	CONCLUSÃO	104
6	REFERÊNCIAS	105
7	APÊNDICE	1057
8	ANEXOS	1059

1 INTRODUÇÃO

O uso dos perfis formados a frio vem crescendo na construção civil, devido a rapidez e economia exigidas pelo mercado. Esse componente estrutural pode ser eficientemente utilizado em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, em casas populares e edifícios de pequeno porte (SILVA; PIGNATTA E SILVA, 2008).

Segundo Silva et al. (2014) a estrutura composta por chapas finas, possui leveza, agilidade de fabricação, de manuseio e de transporte, facilitando e diminuindo o custo de sua montagem, além de não necessitar maquinários pesados para içamento.

O início do projeto consiste na determinação das cargas e ações atuantes na estrutura e seus componentes. A estrutura deve ter resistência para suportar as ações e suas combinações, manter as deformações elásticas verticais e horizontais correspondentes dentro dos limites específicos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011).

Em seguida destacam-se as etapas da análise estrutural e dimensionamento. Em estruturas de barras o objetivo da análise é obter os esforços solicitantes e os deslocamentos nos nós da estrutura, em função da geometria, dos materiais e dos carregamentos obtidos. Na etapa de dimensionamento os componentes estruturais são verificados para os resultados obtidos na análise (PIRES FILHO, 2011).

2 OBJETIVO

Apresentar o dimensionamento estrutural de um edifício residencial de quatro pavimentos exposto no Manual de Construção em Aço do CBCA, fazendo-se a análise estrutural estática de 2ª ordem utilizando-se o programa computacional SAP 2000. O edifício será dimensionado em perfis formados a frio empregando-se as prescrições da norma ABNT NBR14762:2010.

No trabalho será exposto a influência para a deslocabilidade da edificação do uso da estrutura em perfis formados a frio ao comparar com a contida no Manual que utiliza perfis soldados e laminados.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Fabricação e padronização de perfis formados a frio

Segundo Silva et al. (2014) o perfil estrutural de aço formado a frio pode ser obtido por dois processos de fabricação: contínuo e descontínuo.

O processo contínuo, adequado à fabricação em série, é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço, sobre uma mesa de roletes, onde os roletes vão conferindo gradualmente à chapa, a forma definitiva do perfil (figura 1). Quando o perfil deixa a mesa de roletes, ele é cortado no comprimento indicado no projeto. A quantidade de pares de roletes depende da complexidade da forma da seção que se quer obter.

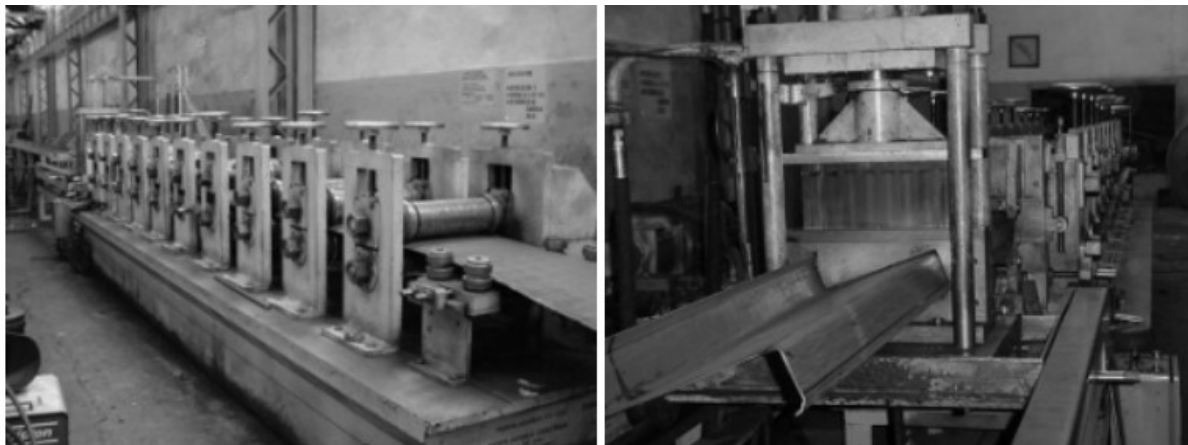


Figura 1- Fabricação de perfis formados a frio por conformação contínua em mesa de roletes.

Fonte: SILVA et al., 2012.

O processo descontínuo, denominado dobramento, adequado a pequenas quantidades de perfis, é realizado mediante o emprego de uma prensa dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a chapa de aço, obrigando-a a formar uma dobra (figura 2). Várias operações similares a essa, sobre a mesma chapa, fornecem à seção do perfil a geometria exigida no projeto. O comprimento

do perfil está limitado à largura da prensa. O processo contínuo é utilizado por fabricantes especializados em perfis formados a frio e o processo descontínuo é geralmente utilizado pelos fabricantes de estruturas metálicas.



Figura 2- Fabricação de perfis formados a frio por prensa dobradeira

Fonte: SILVA et al., 2012.

A Norma ABNT NBR 14762:2010 “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” recomenda além da utilização de aços com qualificação estrutural, que os mesmos possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento f_u/f_y maior ou igual a 1,08, para garantir uma ductilidade mínima do material, havendo um intervalo entre o estado de serviço e o estado limite último. A norma indica também que o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10% para base de medida igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200mm. A Tabela 1 retirada da ABNT NBR 14762:2010, apresenta os valores nominais mínimos da resistência ao escoamento (f_y) e da resistência à ruptura (f_u) de aços relacionados por Normas Brasileiras referente a chapas finas para uso estrutural.

A ABNT NBR 14762:2010 prescreve ainda, que a utilização de aços sem qualificação estrutural é tolerada se o aço possuir propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. No entanto, não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento e 300 MPa para resistência à ruptura f_u .

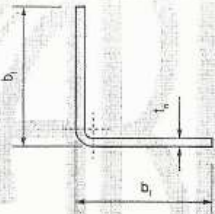
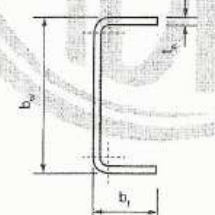
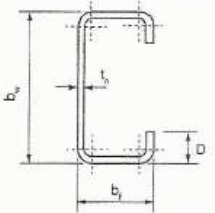
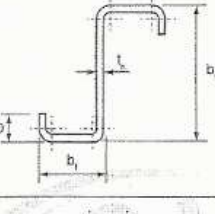
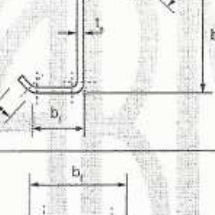

Tabela 1- Chapas finas de aço para uso estrutural

Especificação	Grau	f_y (MPa)	f_u (MPa)
ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono	CF-26	260/260	400/410
	CF-28	280/280	440/440
	CF-30	---/300	---/490
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921 Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica	CFR 400	---/250	---/380
	CFR 500	310/370	450/490
ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico ^b	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	280	380
	ZAR 320	320	390
	ZAR 345	345	430
	ZAR 400	400	450
^a	A faixa de espessura disponível varia de acordo com o produtor de aço.		
^b	Graus conforme ABNT NBR 7008.		

Fonte: ABNT NBR 14762- TABELA 1, 2010.

A Norma ABNT NBR 6355:2012 – “Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização”, apresenta as séries comerciais mais usuais de perfis estruturais de aço formados a frio e suas designações que são da seguinte forma: tipo do perfil × dimensões dos lados × espessura, sendo que todas as dimensões são dadas em mm. A Tabela 2 retirada da ABNT NBR 6355:2012, mostra os tipos de perfis e forma de nomenclatura dos elementos.

Tabela 2- Séries comerciais mais usuais de perfis estruturais e respectivas designações

Série	Seção transversal	Designação ^a
Cantoneira de abas iguais		L $b_f \times t_f$ Exemplo: L 50 \times 3,00
U simples		U $b_w \times b_f \times t_f$ Exemplo: U 150 \times 50 \times 2,65
U enrijecido		Ue $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Ue 150 \times 60 \times 20 \times 2,65
Z enrijecido a 90°		Z ₉₀ $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Z ₉₀ 200 \times 75 \times 20 \times 2,25
Z enrijecido a 45°		Z ₄₅ $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Z ₄₅ 200 \times 75 \times 20 \times 2,25
Cartola		Cr $b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Cr 100 \times 50 \times 20 \times 3,35

^a As dimensões devem ser apresentadas em milímetros.

Fonte: ABNT NBR 6355- TABELA 1, 2012.

3.2 Estabilidade das barras de seção abertas em perfis formados a frio

Os estados-limites últimos das barras de seção transversal aberta, formadas por chapas finas de aço, a serem considerados no dimensionamento, frequentemente estão associados à flambagem local, flambagem distorcional e flambagem global (SILVA et al., 2014).

Os perfis de aço formados a frio apresentam, em geral, elevada relação largura/espessura. Quando solicitados à compressão segundo seu eixo longitudinal, ao atingir a carga crítica, tornam-se suscetíveis ao fenômeno da flambagem local, caracterizada por uma flambagem de um ou mais elementos que compõem a seção transversal. Quando o perfil está sujeito a flambagem local, as arestas comuns entre os elementos permanecem retas, os ângulos entre os elementos adjacentes do perfil permanecem com seus valores invariáveis e os elementos flambam segundo uma sucessão de meias ondas senoidais de comprimentos iguais, conforme Figura 3. O comportamento pós-crítico das chapas esbeltas é estável, permanecendo tais elementos com capacidade portante mesmo após ser atingida sua carga crítica (RODRIGUES, 2016).

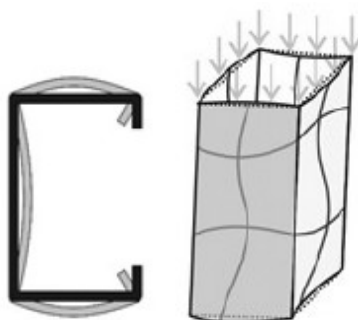


Figura 3- Flambagem Local. Fonte: SILVA et al., 2014.

Além da flambagem local, uma barra esbelta comprimida também está suscetível a um outro modo de flambagem, denominado flambagem por distorção, que pode ocorrer para níveis de carga menores que aqueles correspondentes à flambagem local. Tal fenômeno é caracterizado pela perda de estabilidade do conjunto formado pelo elemento comprimido e seu enrijecedor de borda, alterando a forma inicial da seção transversal, como ilustrado na Figura 4 (CHODRAUI, 2003).



Figura 4- Flambagem por Distorção. Fonte: SILVA et al., 2014.

A flambagem de uma barra longa pode se dar segundo os modos globais de flexão, torção pura e de flexo-torção. Este modo de flambagem é influenciado pelas características geométricas da seção transversal (momento de inércia, constantes de torção e de empenamento). O modo de flexão é definido pela carga crítica de Euler segundo o eixo de menor inércia da seção transversal. Quando as barras são formadas por perfis com seções abertas e com baixa rigidez torcional, além da flexão, a instabilidade pode também ocorrer por torção ou por uma combinação de flexão e torção, modo este denominado de flexo-torção (RODRIGUES, 2016).

Ainda pode ocorrer a interação entre um ou dois desses modos (flambagem local e por distorção) com um dos modos globais de uma barra comprimida (flambagem por flexão, torção ou flexo-torção). Esta interação conduz a uma perda prematura de rigidez da barra, resultando em uma carga última menor que aquela correspondente ao caso de ausência da flambagem local, podendo o estado-limite último ocorrer por colapso súbito da peça, apresentando um comportamento de equilíbrio pós-crítico instável. A vulnerabilidade a este tipo de colapso depende da relação entre as forças de flambagem local e global da barra, e ainda da forma e amplitude de suas imperfeições iniciais geométricas (RODRIGUES; CALDAS, 2014)

A título de exemplificação, a figura 5 ilustra os modos de flambagem possíveis de ocorrer em perfis de aço do tipo Ue.

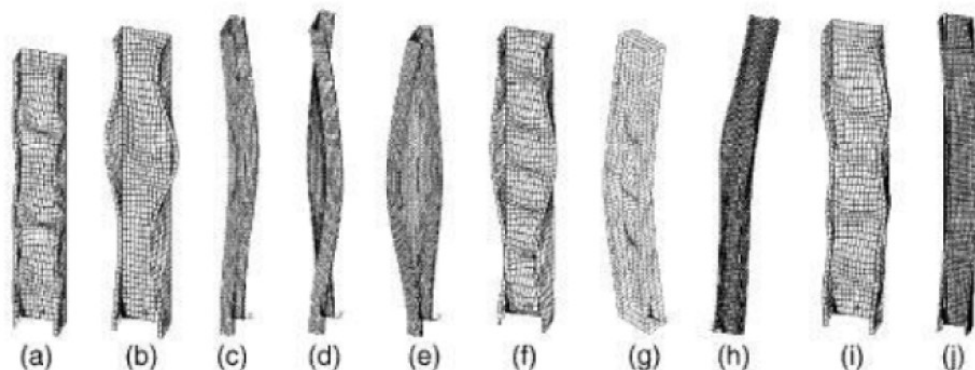


Figura 5- (a) flambagem local, (b) flambagem distorcional, (c) flambagem global por flexão, (d) flambagem global por torção, (e) flambagem global por flexo-torção, (f) flambagem local e flambagem distorcional, (g) flambagem global por flexão e flambagem local, (h) flambagem global por flexão e flambagem distorcional, (i) flambagem global por flexo-torção e flambagem local e (j) flambagem global por flexo-torção e flambagem distorcional. Fonte: KIMURA, 2014.

3.3 Métodos para dimensionamento de barra

Na etapa de dimensionamento os elementos estruturais componentes são verificados para os resultados obtidos na análise, tendo por base critérios de segurança estabelecidos em normas técnicas aplicáveis à situação específica considerada. (PIRES FILHO, 2011)

Atualmente, na norma brasileira para o dimensionamento de perfis formados a frio, ABNT NBR 14762:2010, há três procedimentos para a determinação de esforços resistentes: Método das larguras efetivas (MLE), Método das seções efetivas (MSE) e Método da resistência direta (MRD).

3.3.1 Método das larguras efetivas- MLE

Para a simplificação do tratamento de chapas esbeltas em regime pós- crítico, von Kármán propôs o método das larguras efetivas, que consiste na redução da rigidez da chapa, para isso o diagrama da distribuição das tensões em regime pós-crítico, que não é uniforme, é substituído por um diagrama uniforme de tensões. Assume-se que a distribuição de tensões seja uniforme ao longo

da largura efetiva “ b_{ef} ” fictícia com valor igual às tensões máximas localizadas nas bordas, figura 8. A largura “ b_{ef} ” é obtida de modo que a área sob a curva da distribuição não uniforme de tensões seja igual à soma de duas partes da área retangular equivalente de largura total “ b_{ef} ” (SILVA; PIGNATTA E SILVA, 2008).

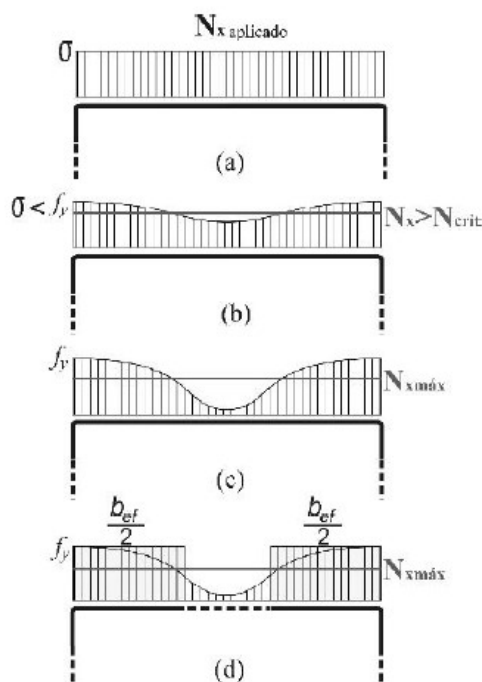


Figura 6- Distribuição de Tensões. Fonte: SILVA; PIGNATTA E SILVA, 2008

Silva et al. (2014) concluem que o método das larguras efetivas é muito mais trabalhoso do que o método das seções efetivas, por outro lado não há limitação quanto à seção transversal do perfil, pois é aplicado elemento a elemento. Adicionalmente, deve ser considerada a flambagem distorcional, para barras submetidas à compressão e para barras submetidas à flexão.

3.3.2 Método das seções efetivas- MSE

O Método das seções efetivas trata o comportamento pós-crítico de modo análogo ao da chapa isolada, no entanto neste método considera-se a interação entre os elementos vizinhos. Esta interação ocorre devido a cada elemento que forma a seção, apresentar para a condição de extremidade, um engaste elástico no elemento vizinho, cujo coeficiente de rigidez é função das dimensões deste último. Sendo assim, um método mais realista ao comparar-se com o método das

larguras efetivas, no entanto possui uma limitação em relação a perfis, podendo ser usado diretamente apenas em perfis apresentados pela ABNT NBR 14762:2010 (RODRIGUES, 2016).

3.3.3 Método da resistência direta- MRD

O método da resistência direta também é apresentado na ABNT NBR 14762:2010, em substituição ao método da largura efetiva e método da seção efetiva. Para este método não é necessário o cálculo de larguras e propriedades efetivas da seção, sendo que o mesmo utiliza as propriedades da seção bruta.

A utilização deste método requer a análise geral de estabilidade elástica da barra, o que é feito empregando programas de computador, tais como o CUFSM (Schafer e Adány, 2006) e INSTAB (Pierin, 2011). Dessa forma, são obtidos os valores críticos (valores mínimos) das forças axiais e momentos fletores de flambagem elástica local e distorcional, respectivamente N_l e N_{dist} , M_l e M_{dist} . Ainda devem ser calculados os valores da força axial e momento fletor correspondentes a flambagem global da barra, N_e e M_e . Os valores característicos da força axial de compressão resistente $N_{c,Rk}$ e de momento fletor M_{Rk} , devem ser tomados como o menor valor calculado para a flambagem global, flambagem local e flambagem distorcional (CHODRAUI, 2003).

3.4 Análise estrutural

O cálculo de estruturas de aço envolve uma série de etapas, dentre as quais destacam-se a análise estrutural e o dimensionamento. Em estruturas de barras o objetivo da etapa de análise é obter os esforços solicitantes e os deslocamentos nos nós da estrutura, em função da geometria, dos materiais e dos carregamentos obtidos.

O que se denomina “análise estrutural” é um processo por meio do qual são obtidas as respostas da estrutura a um conjunto de ações por meio do estabelecimento de equações de equilíbrio. No contexto do projeto estrutural, o objetivo da análise é determinar os efeitos das ações nas estruturas, visando à verificação da segurança em relação a todas as situações críticas de desempenho, relativas tanto aos estados-limites últimos quanto aos estados-limites de serviço. O comportamento de uma estrutura e a correspondente análise estrutural podem ser classificados em linear ou não-linear (PIRES FILHO, 2011).

3.4.1 Análise elástica de primeira ordem

Na análise estrutural elástica de primeira ordem, considera-se que a estrutura possui comportamento elástico linear, ou seja, as equações de equilíbrio são estabelecidas com base na geometria indeformada (ou original) da estrutura, e os materiais dos elementos estruturais são considerados com comportamento sempre elástico linear (FAKURY et al., 2016).

3.4.2 Análise elástica de segunda ordem

A análise estrutural elástica de segunda ordem, considera a influência da mudança geométrica dos componentes da estrutura, neste caso os esforços solicitantes da estrutura são obtidos utilizando equações estabelecidas com base na geometria deformada da estrutura.

A análise não-linear geométrica para obtenção dos efeitos de segunda ordem é complexa, pois como a geometria deformada da estrutura não é conhecida durante a resolução das equações de equilíbrio, é necessário empregar um procedimento incremental-iterativo.

A análise estrutural de segunda ordem pode ser realizada por qualquer método que considere os efeitos global $P-\Delta$ e local $P-\delta$. Existem programas computacionais que efetuam essa análise diretamente, fornecendo resultados bem precisos. Tendo em vista as dificuldades envolvidas na adoção do novo procedimento de análise exigido, a ABNT NBR 8800:2008 propõe um método simplificado denominado “Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes” (MAES). O MAES é um método adaptado, que simula de forma aceitável uma análise de segunda ordem, a partir de duas análises de primeira ordem e de coeficientes de amplificação para consideração dos efeitos globais $P-\Delta$ e locais $P-\delta$.

O efeito global de segunda ordem, denominado como $P-\Delta$ (conhecido popularmente como efeito “pê-deltão”), é caracterizado pelas respostas decorrentes dos deslocamentos horizontais relativos das extremidades das barras, submetidas às cargas verticais atuantes na estrutura. Já o efeito local de segunda ordem, denominado efeito $P-\delta$ (conhecido popularmente como efeito “pê-deltinha”), é caracterizado pelas respostas decorrentes dos deslocamentos da configuração deformada de cada barra da estrutura submetida à sua própria força axial (FAKURY et al., 2016).

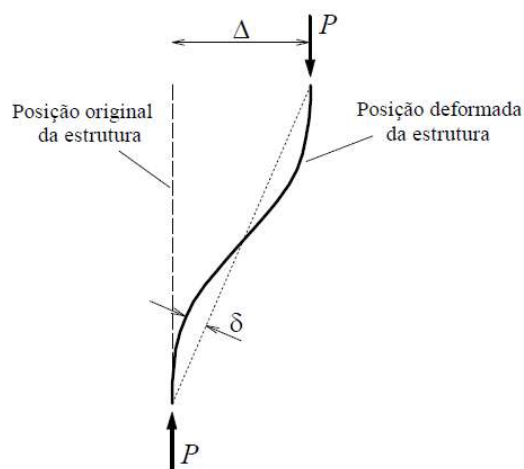


Figura 7- Efeitos globais P- Δ e locais P- δ . Fonte: PIRES FILHO, 2011

4 MEMORIAL DE CÁLCULO

4.1 Descrição e parâmetros de projeto

O projeto refere-se a uma edificação de 4 (quatro) pavimentos que possui área estruturada de 526,5m² localizada no Nordeste do país. A seguir são apresentadas as características do edifício, assim como os desenhos de projeto.

Dados gerais	
Comprimento (m)	15
Largura (m)	9
Altura (m)	12
pé-direito (m)	3
número de pavimentos	4
Terreno (m x m)	12x30
área total estruturada (m ²)	526,5

Quadro 1- Caracterização da edificação. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

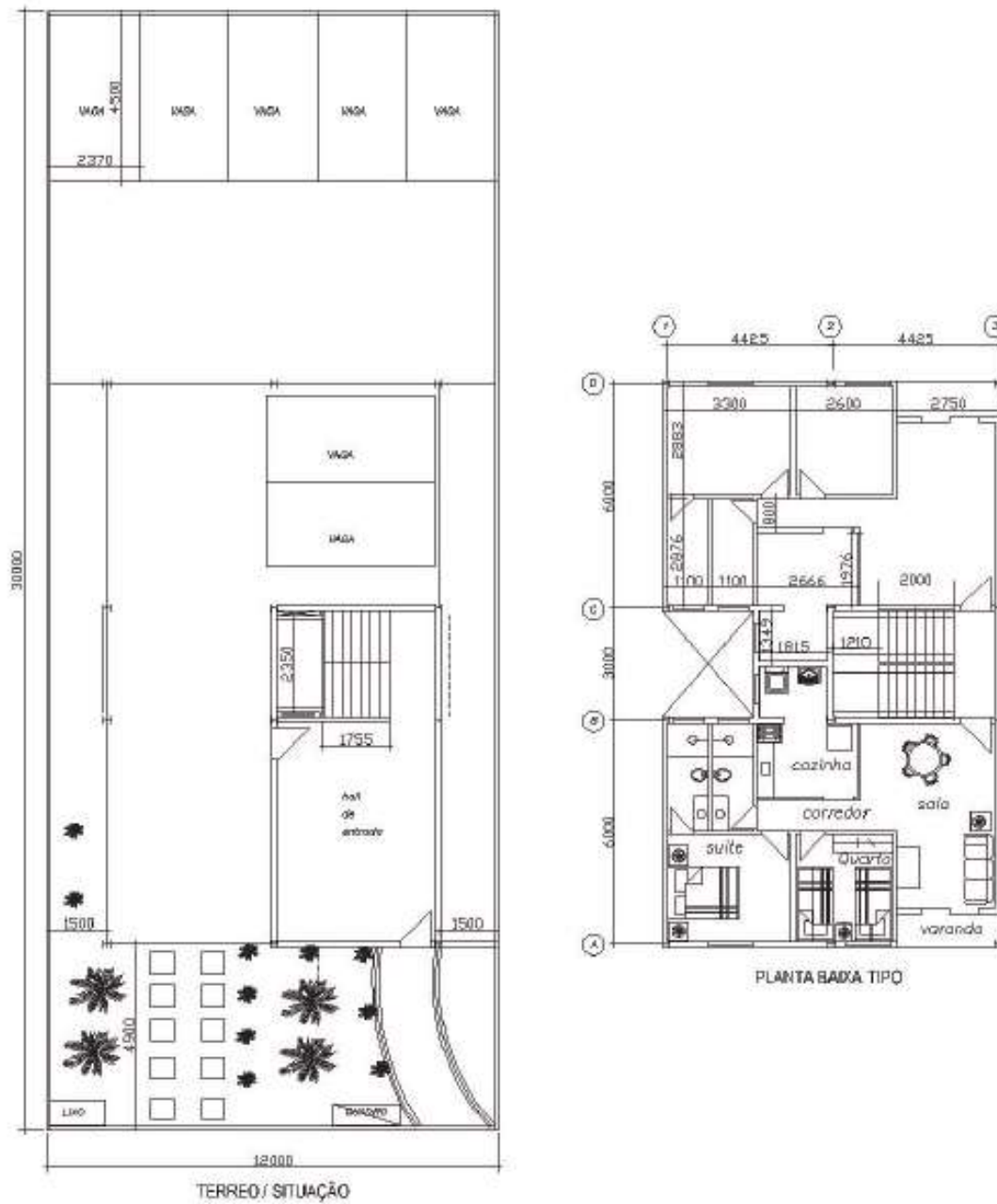


Figura 8 – Planta de situação e pavimento tipo. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

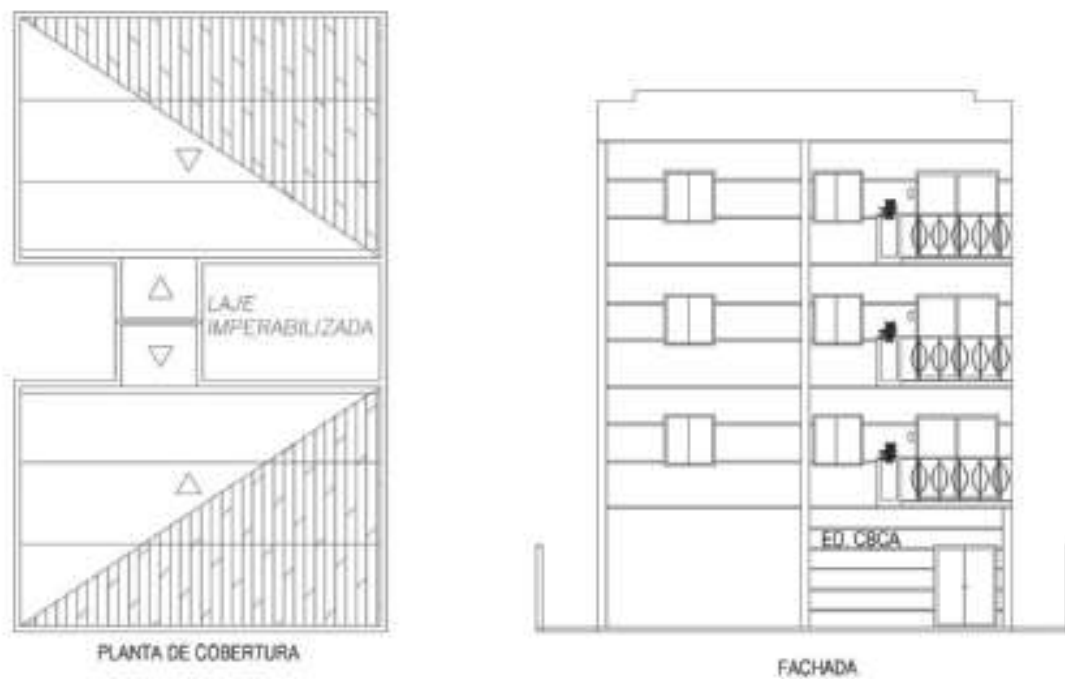


Figura 9 – Planta de cobertura e fachada. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.2 Sistema estrutural

Transversal: quadros rígidos nas filas A, B, C e D

Longitudinal: contraventamentos verticais entre as filas B e C nos eixos 1 e 3

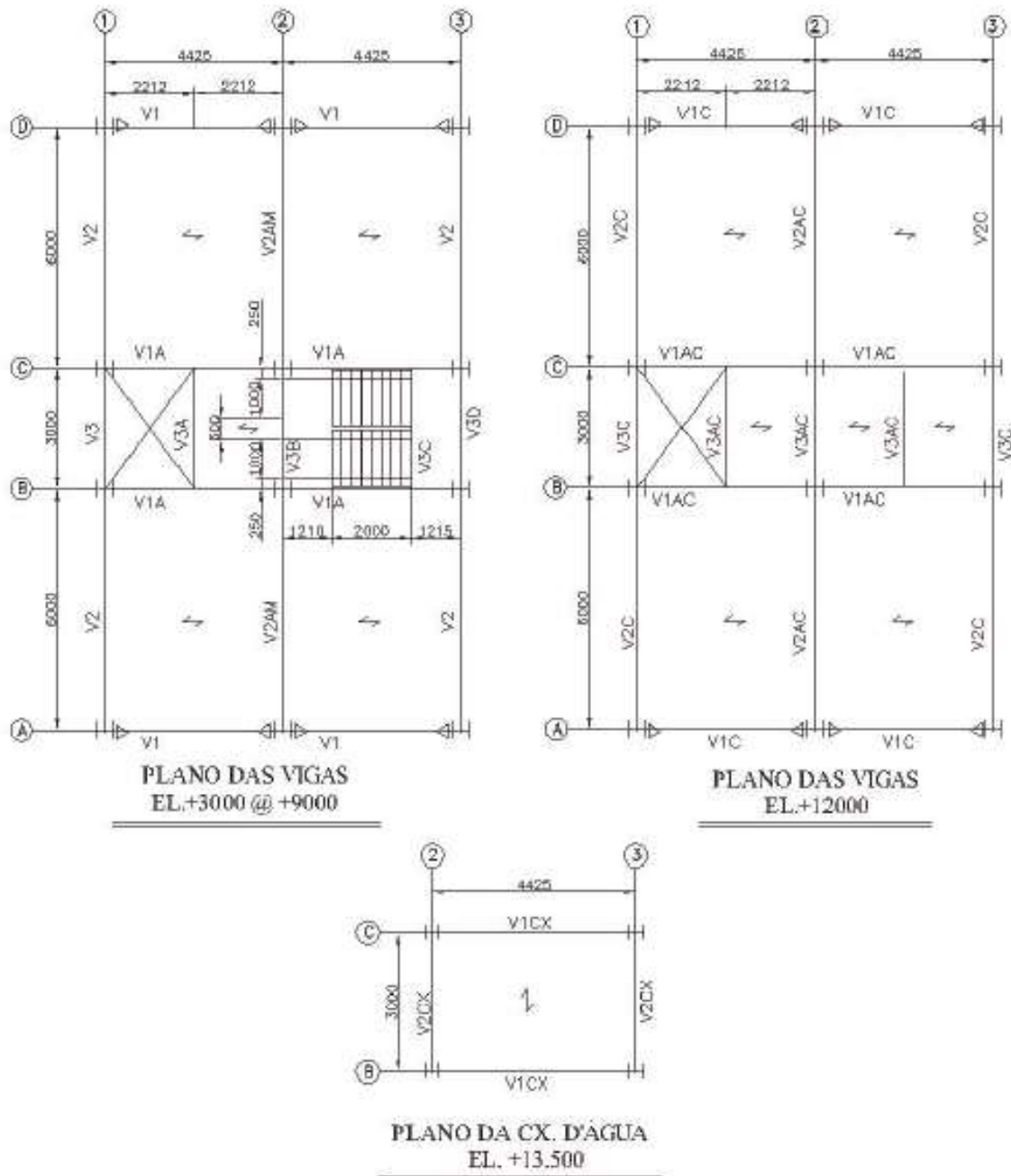


Figura 11 – Planta de plano das vigas. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

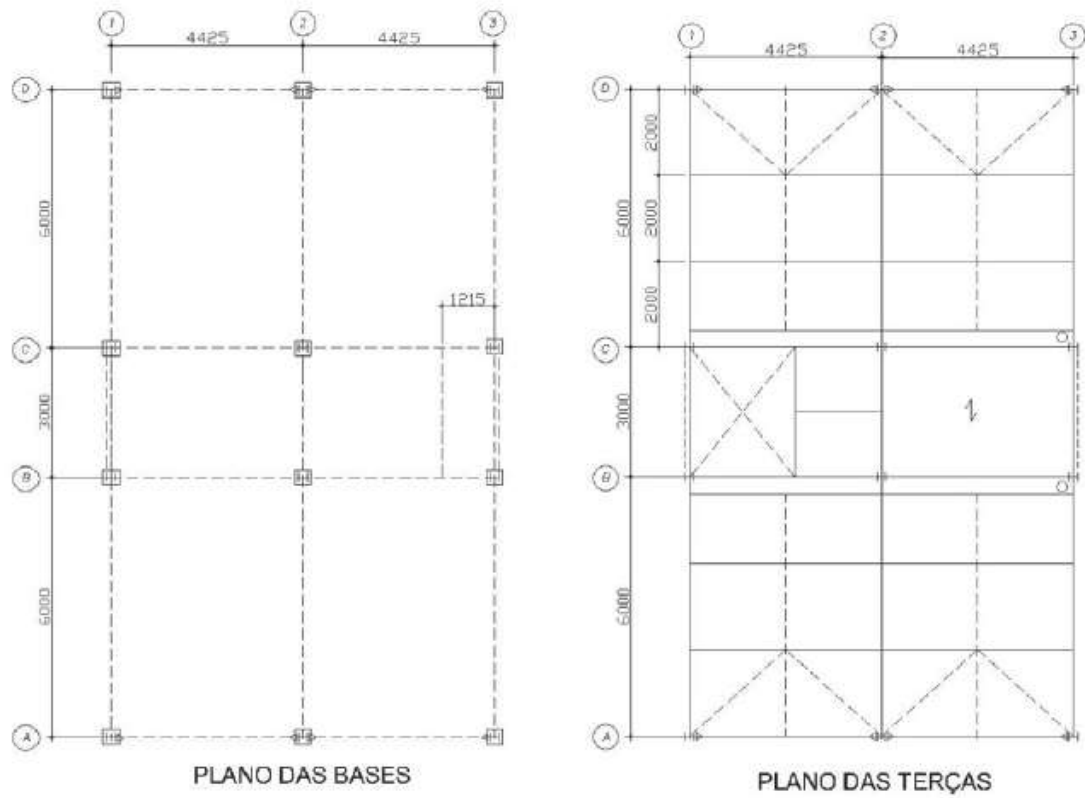


Figura 12 – Planta de plano das bases e terças. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

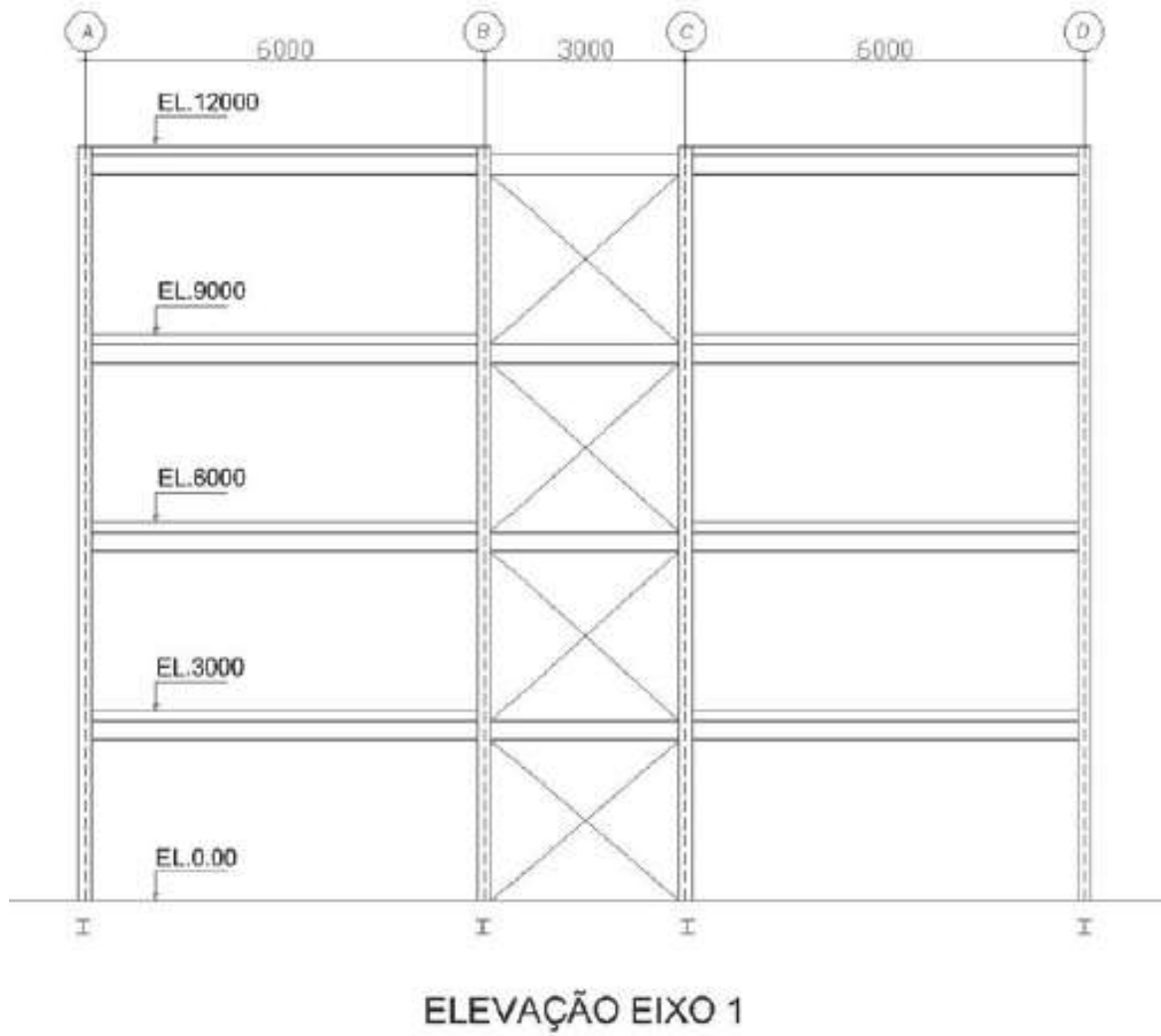


Figura 13 – Elevação eixo 1. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

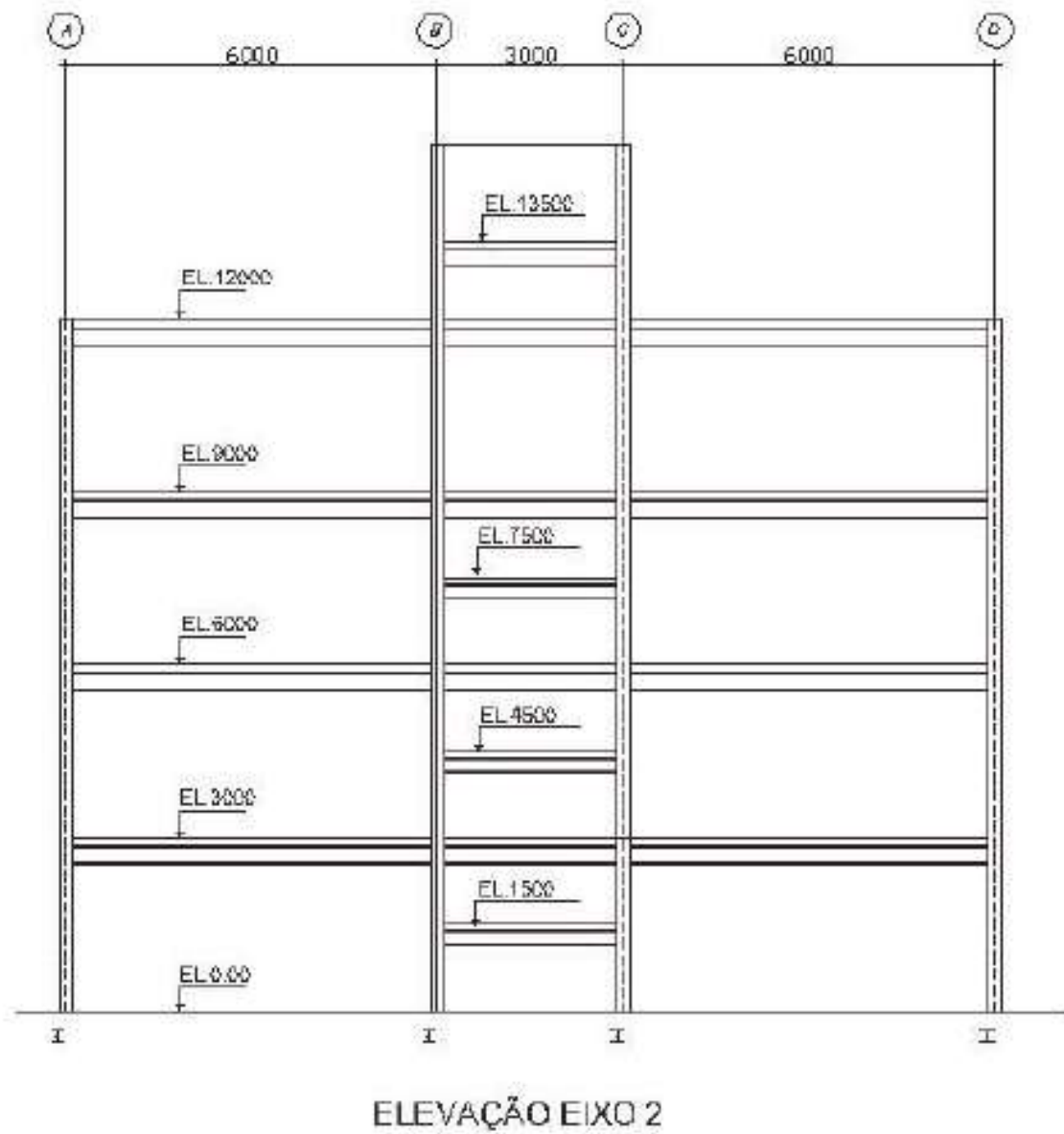


Figura 14 – Elevação eixo 2. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

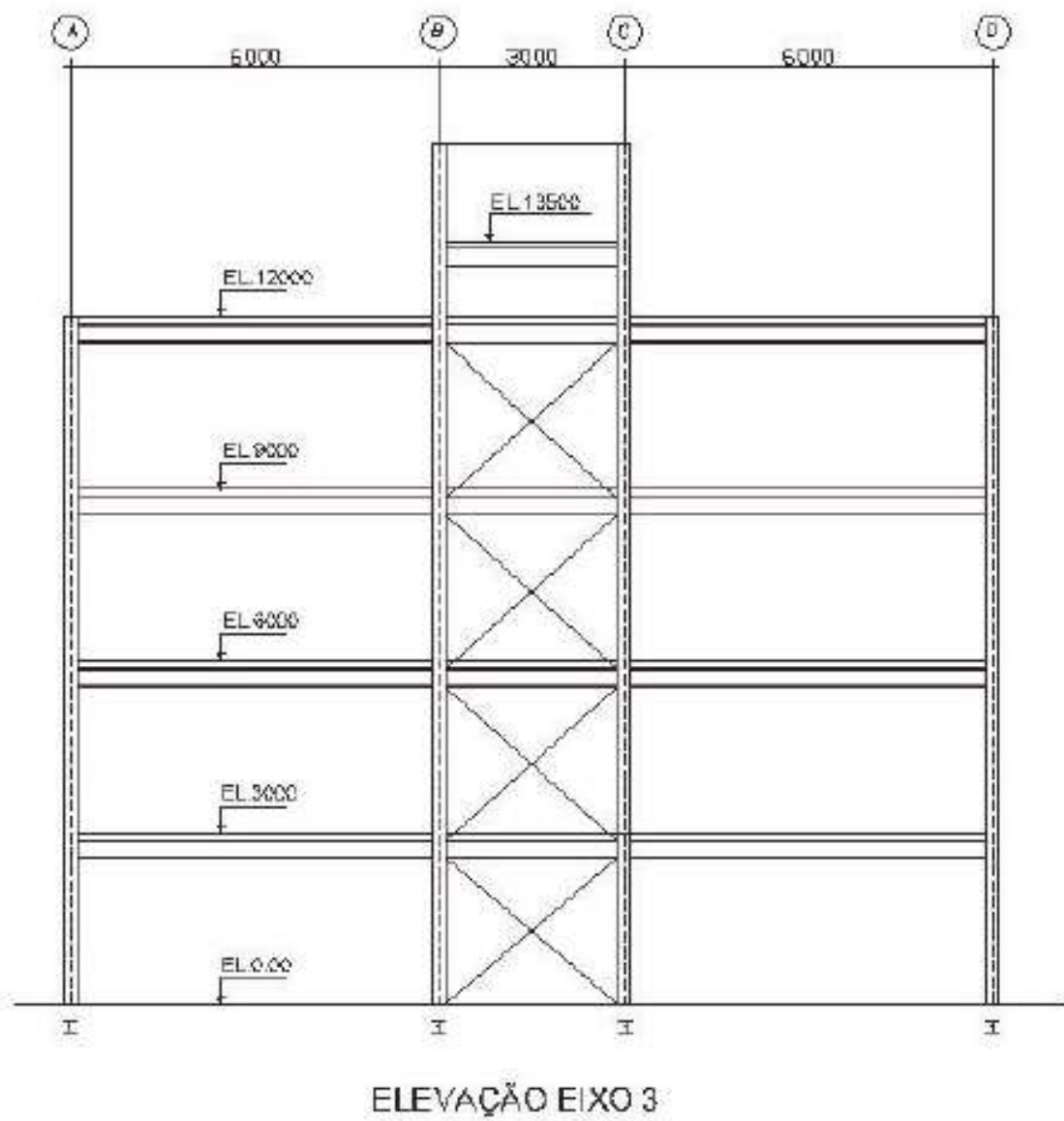


Figura 15 – Elevação eixo 3. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

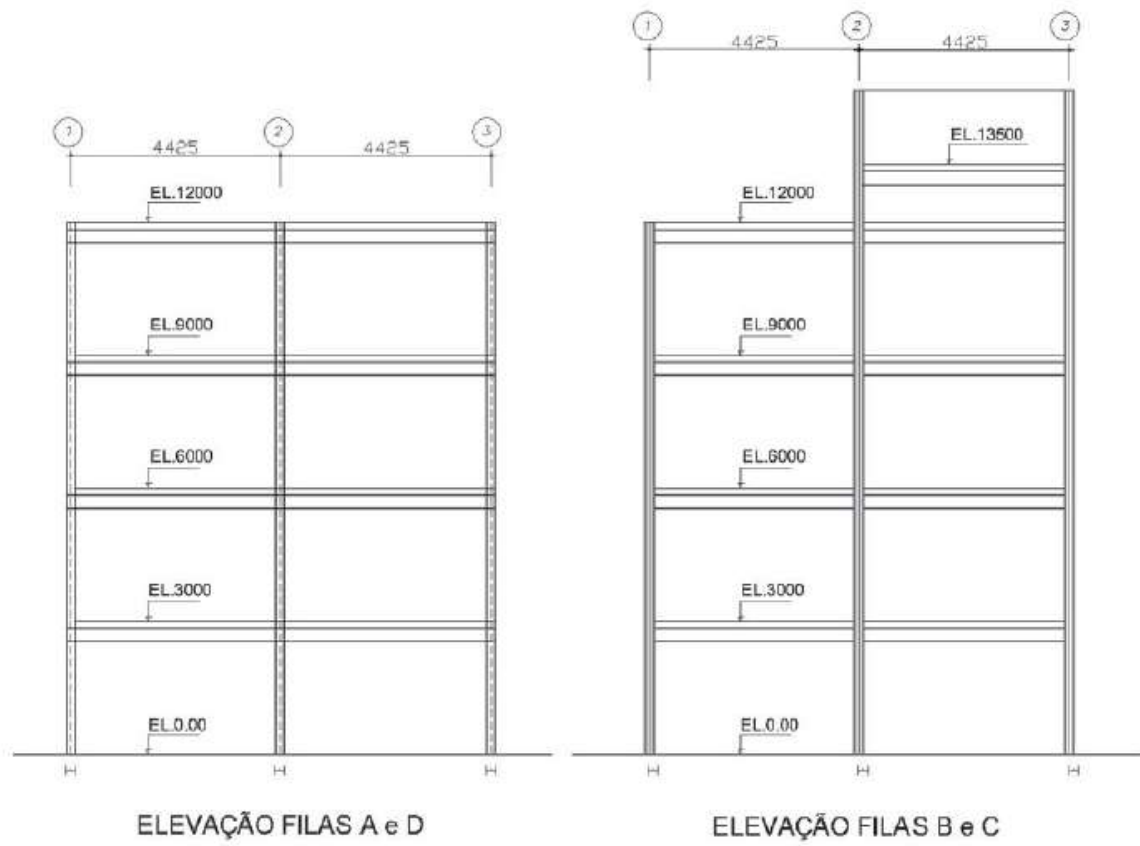


Figura 16 – Elevação filas A-D e B-C. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.3 Materiais

Materiais	Fy (kN/cm²)	Fu (kN/cm²)
Vigas e Pilares	34	45
Placa de base	25	40
Chapa de ligação	25	40
Chumbadores	25	40
Solda-eletrodo E 70XX		48,5
Conector de cisalhamento		41,5
Parafusos ASTM A325 D=19mm	57	82,5
Concreto fck>20MPa		

Quadro 2- Materiais estruturais. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.4 Ações atuantes na estrutura

No cálculo das ações atuantes na estrutura verificou-se diferenças em relação as ações expostas no Manual de Construção em Aço do CBCA, estas divergências foram citadas em notas durante o texto.

4.4.1 Ações permanente e ações variáveis

A seguir são apresentados a distribuição dos carregamentos da estrutura, referente a ações permanentes diretas (CP) e ações variáveis (CA). Para a determinação das ações atuantes analisou-se cada nível da edificação conforme especificado nas figuras do item 4.2.

Nota: P = parede; LCP = reação da laje na viga devido a CP;

LCA = reação da laje na viga devido a CA; R = reação final CP+CA.

4.4.1.1 EL. 13500 – Vigas localizadas sob a caixa d'água

Ações Permanentes (CP)

- Existe alvenaria com altura de 2m, peso total (incluindo revestimento) de 1,25KN/m², com tijolo de concreto celular;
- Laje de concreto maciça com espessura de 12 cm armada apenas em uma direção para receber a caixa d'água de 1,25KN/m²;
- Impermeabilização da laje de 0,50KN/m².

Ações Variáveis (CA)

- Forro sem acesso de cobertura com peso de 0,50KN/m²;
- Caixa d'água com peso de 12,0KN/m².

- Resumo de ações

Eixo 2 e 3 → $P = 1,25\text{KN/m}^2 \times 2\text{m} = 2,50\text{KN/m}$

Fila B e C → $P = 1,25\text{KN/m}^2 \times 2\text{m} = 2,50\text{KN/m}$

$$\text{LCP} = (3\text{KN/m}^2 + 0,5\text{KN/m}^2) \times 1,5\text{m} = 5,25\text{KN/m}$$

$$\text{LCA} = (12\text{KN/m}^2 + 0,5\text{KN/m}^2) \times 1,5\text{m} = 18,75\text{KN/m}$$

- Reações finais

$$\text{Eixo 2-C} \rightarrow (2,5\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (26,5\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 63\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-C} \rightarrow (2,5\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (26,5\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 63\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-B} \rightarrow (2,5\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (26,5\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 63\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-B} \rightarrow (2,5\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (26,5\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 63\text{KN}$$

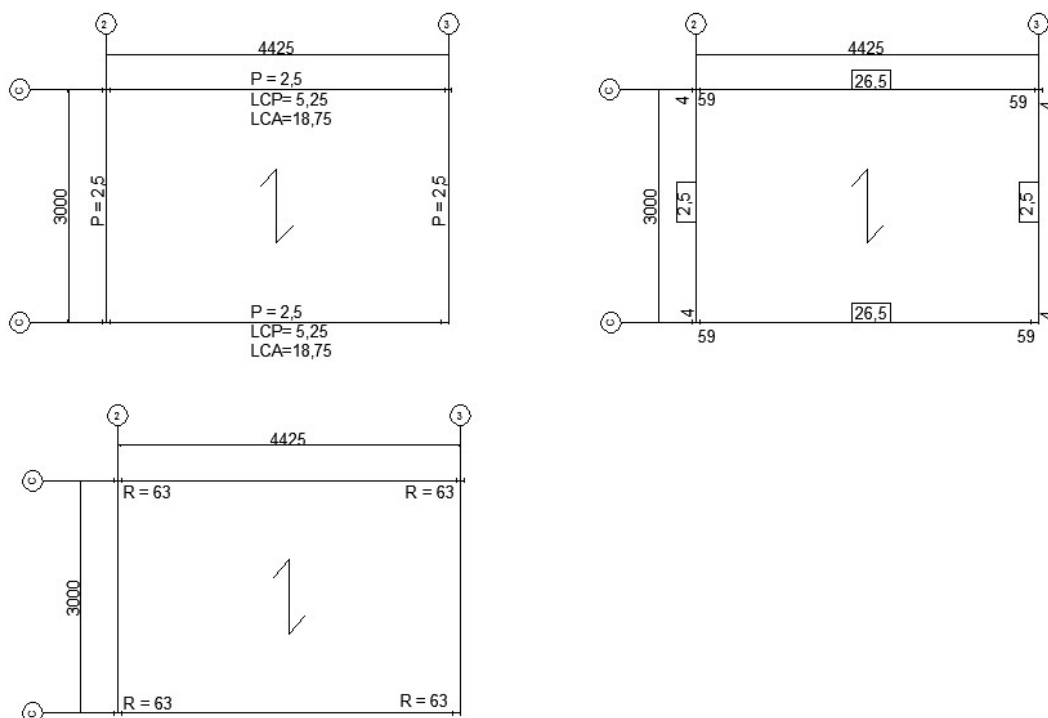


Figura 17 – Cargas nas vigas sob a caixa d'água. Fonte: Adaptado INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

Nota: No cálculo da reação da laje na viga devido a CP, houve uma divergência com o valor apresentado no Manual da CBCA. No Manual o valor de LCP= 5,80 KN/m neste trabalho foi corrigido para 5,25KN/m, resultando em uma reação total de 63KN.

4.4.1.2 EL. 12000 – Vigas localizadas na cobertura

Ações Permanentes (CP)

- Existe alvenaria externa com altura de 1,35m, peso total (incluindo revestimento) de 1,25KN/m²;
- Laje de forro com espessura de 10 cm de 2,50KN/m²;
- Forro de gesso de 0,15KN/m²;
- O conjunto de telhas, terças e tirantes tem o peso estimado de 0,15KN/m².

Ações Variáveis (CA)

- Forro sem acesso de cobertura com peso de 0,50KN/m².

- Resumo de ações

$$\text{Eixo 1 e 3} \rightarrow P = 1,25\text{KN/m}^2 \times 1,35\text{m} = 1,70\text{KN/m}$$

$$\text{LCP} = (2,50\text{KN/m}^2 + 0,15\text{KNm}^2 + 0,15\text{KN/m}^2) \times 2,212\text{m} = 6,20\text{KN/m}$$

$$\text{LCA} = 0,5\text{KN/m}^2 \times 2,212\text{m} = 1,10\text{KN/m}$$

$$\text{Eixo 2} \rightarrow \text{LCP} = (2,50\text{KN/m}^2 + 0,15\text{KNm}^2 + 0,15\text{KN/m}^2) \times 4,425\text{m} = 12,40\text{KN/m}$$

$$\text{LCA} = 0,5\text{KN/m}^2 \times 4,425\text{m} = 2,21\text{KN/m}$$

$$\text{Eixo A, B, C e D} \rightarrow P = 1,25\text{KN/m}^2 \times 1,35\text{m} = 1,70\text{KN/m}$$

- Reações finais

$$\text{Eixo 1-D} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 31\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-D} \rightarrow (14,61\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) = 52\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-D} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 31\text{KN}$$

$$\text{Eixo 1-C} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) + (8\text{KN} / 2) = 35\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-C} \rightarrow (14,61\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (12,7\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) + (8\text{KN} / 2) = 75\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-C} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) + (9\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) = 45\text{KN}$$

$$\text{Eixo 1-B} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) = 35\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-B} \rightarrow (14,61\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (12,7\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) + (8\text{KN} / 2) = 75\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-B} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) + (9\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) = 45\text{KN}$$

$$\text{Eixo 1-A} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 31\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-A} \rightarrow (14,61\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) = 52\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-A} \rightarrow (9\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (1,70\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 31\text{KN}$$

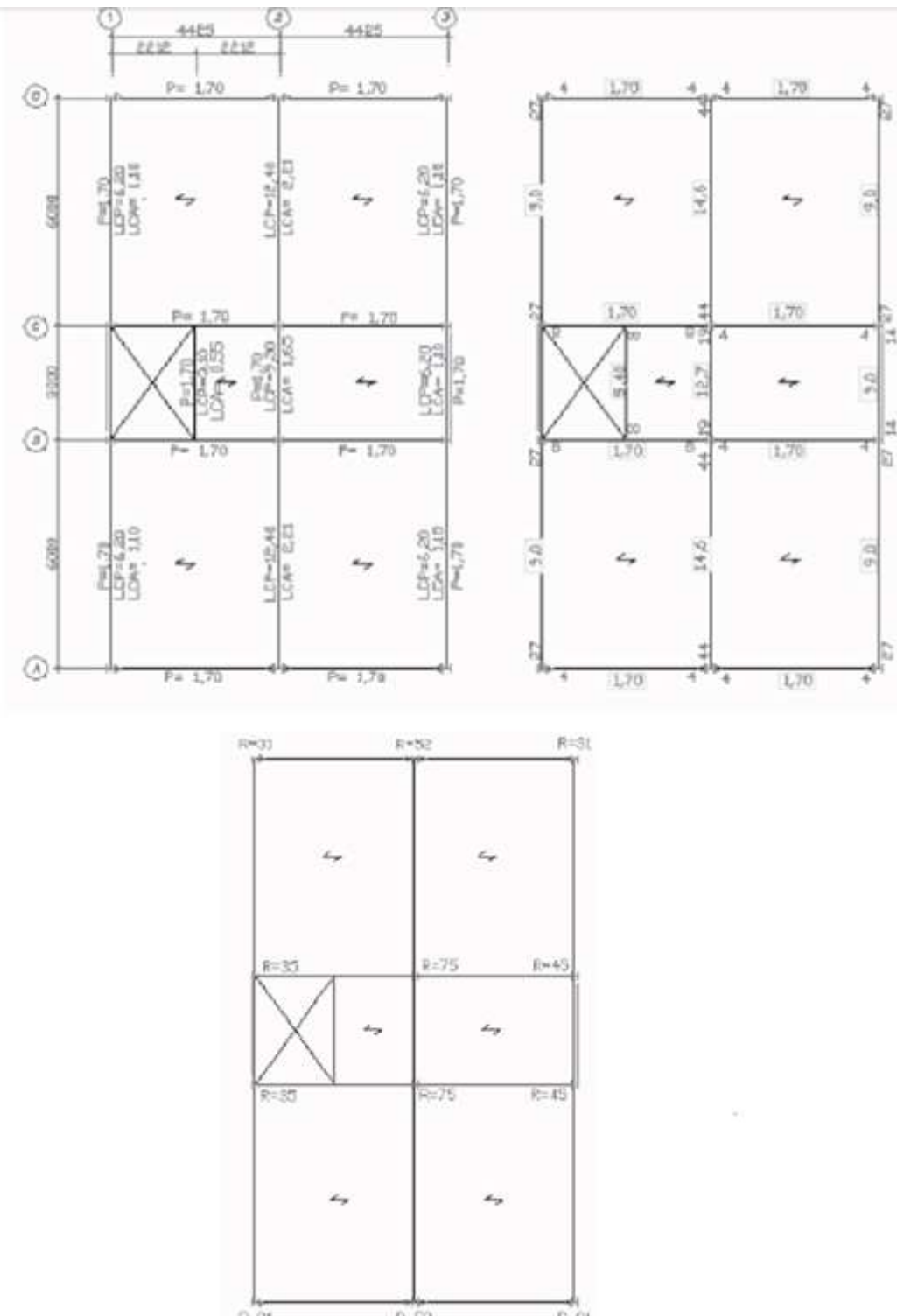


Figura 18 – Cargas nas vigas cobertura. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.4.1.3 EL. 3000 a 9000 – Vigas do piso tipo

Ações Permanentes (CP)

- Existe alvenaria externa com altura de 2,70m, peso total (incluindo revestimento) de 1,25KN/m²;
- Paredes internas em “Dray Wall” de 0,30KN/m²;
- Laje de piso com espessura de 20 cm de 2,50KN/m²;
- Forro de gesso de 0,15KN/m²;
- Revestimento de piso de 0,50KN/m²;
- Estrutura da escada com peso estimado de 2,50KN/m²;
- Corredor e hall com peso estimado de 3,00KN/m².

Ações Variáveis (CA)

- Piso tipo (apartamentos) 1,50KN/m²;
- Área de serviço 2,00KN/m²;
- Escada/Hall/Corredor 3,00KN/m².

- Resumo de ações

Eixo 1 e 3 → $P = 1,25\text{KN/m}^2 \times 2,70\text{m} = 3,40\text{KN/m}$

$$\text{LCP} = (2,50\text{KN/m}^2 + 0,30\text{KN/m}^2 + 0,15\text{KN/m}^2 + 0,50\text{KN/m}^2) \times 2,212\text{m} = 7,63\text{KN/m}$$

$$\text{LCA} = 1,5\text{KN/m}^2 \times 2,212\text{m} = 3,30\text{KN/m}$$

Eixo 2 → $P = 1,25\text{KN/m}^2 \times 1,35\text{m} = 1,7\text{KN/m}$ (apenas entre o eixo B e C)

$$\text{LCP} = (2,50\text{KN/m}^2 + 0,30\text{KN/m}^2 + 0,15\text{KN/m}^2 + 0,50\text{KN/m}^2) \times 4,425\text{m} = 15,30\text{KN/m}$$

$$\text{LCA} = 1,5\text{KN/m}^2 \times 4,425\text{m} = 6,70\text{KN/m}$$

Eixo A, B, C e D → $P = 1,25\text{KN/m}^2 \times 2,70\text{m} = 3,40\text{KN/m}$

Área serv. → $\text{LCP} = (2,50\text{KN/m}^2 + 0,30\text{KN/m}^2 + 0,15\text{KN/m}^2 + 0,50\text{KN/m}^2) \times 1,106\text{m} = 3,9\text{KN/m}$

$$\text{LCA} = 2,0\text{KN/m}^2 \times (2,212\text{m}/2) = 2,2\text{KN/m}$$

Escada → $\text{LCP} = 2,50\text{KN/m}^2 \times ((4,425\text{m} - 1,215\text{m})/2) = 4,0\text{KN/m}$

$$\text{LCA} = 3\text{KN/m}^2 \times ((4,425\text{m} - 1,215\text{m})/2) = 5,0\text{KN/m}$$

Laje escada → $\text{LCP} = (2,50\text{KN/m}^2 + 0,15\text{KN/m}^2 + 0,50\text{KN/m}^2) \times (1,215\text{m}/2) = 2\text{KN/m}$

$$\text{LCA} = 3\text{KN/m}^2 \times (1,215\text{m}/2) = 2\text{KN/m}$$

- Reações finais

$$\text{Eixo 1-D} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 51\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-D} \rightarrow (22\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,40\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) = 81\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-D} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 51\text{KN}$$

$$\text{Eixo 1-C} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,40\text{KN/m} \times 4,425\text{m}/2) + (14\text{KN}/2) = 58\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-C} \rightarrow (22\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (8\text{KN/m} \times 3\text{m}/2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) + (14\text{KN}/2) + (20\text{KN}/(4,425\text{m}-1,215\text{m})) = 107\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-C} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (7,40\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) + (20\text{KN}/1,215\text{m}) = 77\text{KN}$$

$$\text{Eixo 1-B} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,40\text{KN/m} \times 4,425\text{m}/2) + (14\text{KN}/2) = 58\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-B} \rightarrow (22\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (8\text{KN/m} \times 3\text{m}/2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) + (14\text{KN}/2) + (20\text{KN}/2) = 107\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-B} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (7,40\text{KN/m} \times 3\text{m} / 2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) + (20\text{KN}/2) = 77\text{KN}$$

$$\text{Eixo 1-A} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 51\text{KN}$$

$$\text{Eixo 2-A} \rightarrow (22\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,40\text{KN/m} \times 4,425\text{m}) = 81\text{KN}$$

$$\text{Eixo 3-A} \rightarrow (14,3\text{KN/m} \times 6\text{m} / 2) + (3,4\text{KN/m} \times 4,425\text{m} / 2) = 51\text{KN}$$

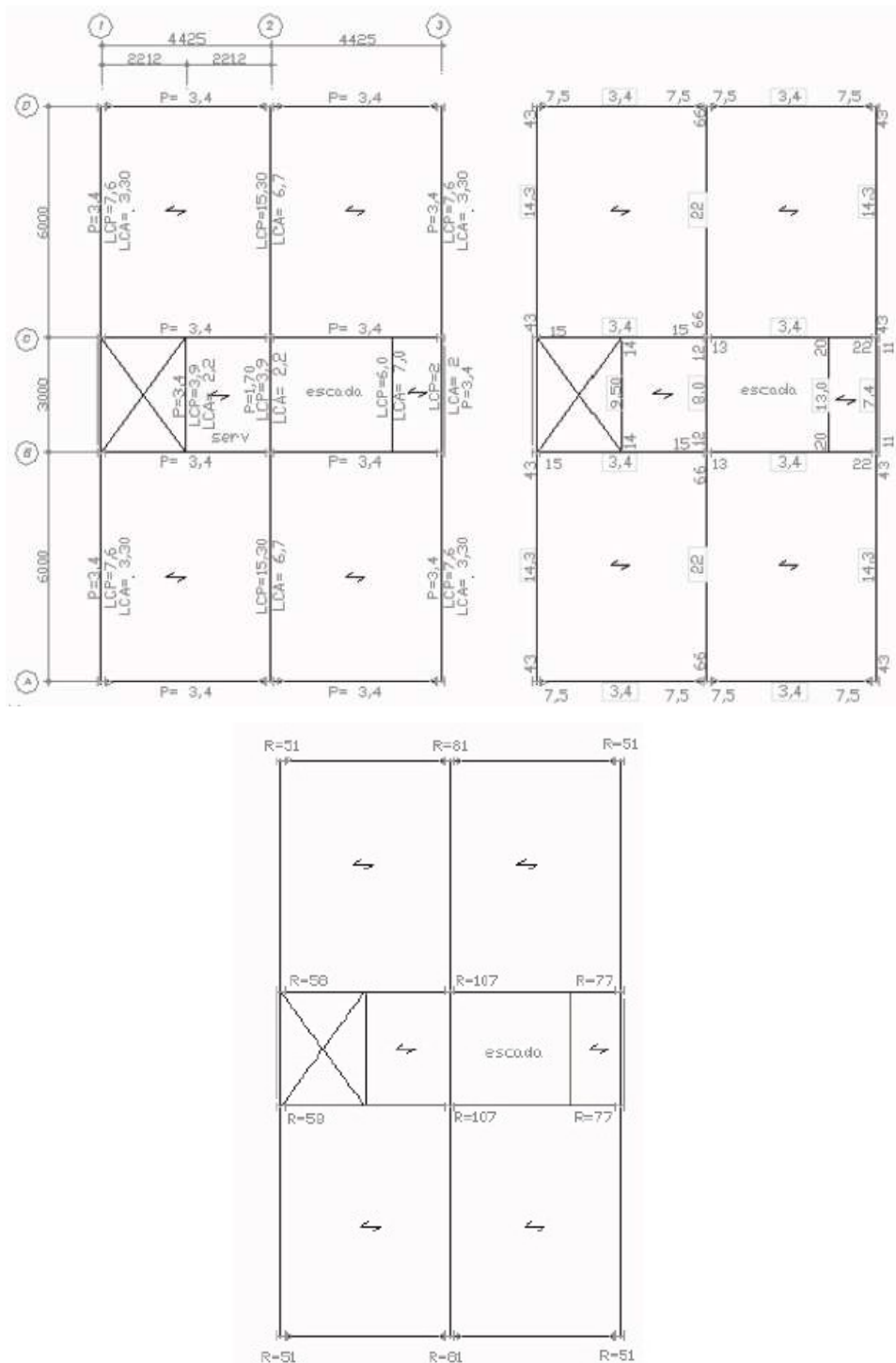


Figura 19 – Cargas nas vigas do piso tipo. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.4.1.4 EL. 1500, 4500 e 7500 – Vigas da escada

Ações Permanentes (CP)

- Peso estimado degrau + corrimão + estrutura escada + laje patamar de 2,5kN/m².

Ações Variáveis (CA)

- Escada 3,00kN/m²

- Resumo de ações

Eixo 2 → $P = 1,25\text{kN/m}^2 \times 1,35\text{m} = 1,70\text{kN/m}$

LCP = $2,50\text{kN/m}^2 \times 1,35\text{m} = 4,0\text{kN/m}$

LCA = $3,0\text{kN/m}^2 \times 1,35\text{m} = 5,0\text{kN/m}$

- Reação final

$11,0\text{kN/m} \times 3\text{m} / 2 = 17\text{kN}$

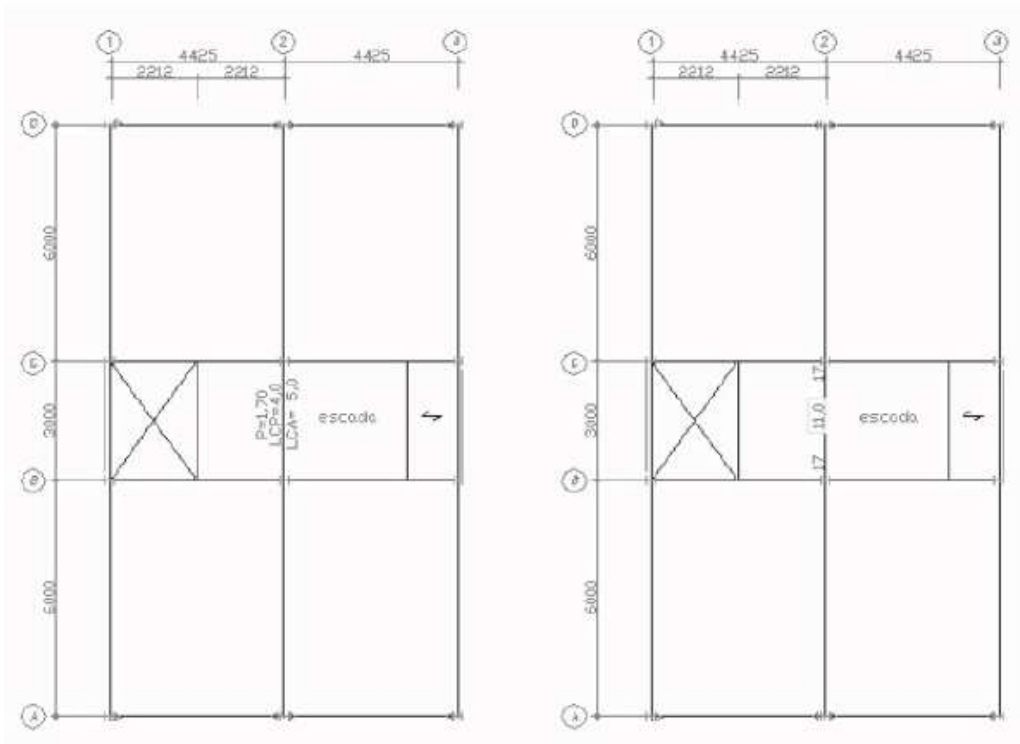


Figura 20 – Cargas nas vigas da escada. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

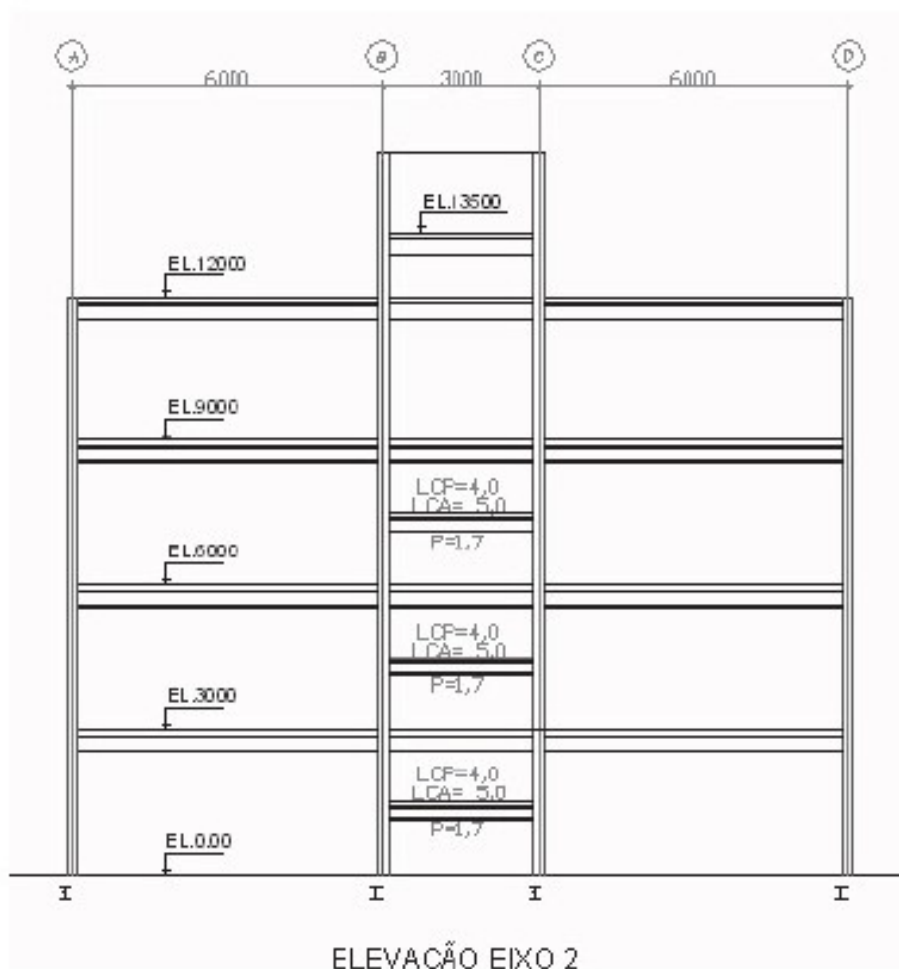


Figura 21 – Cargas nas vigas intermediárias. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.4.2 Ações devido ao vento

Para determinação das ações devidas ao vento, sabe-se que:

- A edificação situa-se no nordeste do país, onde a velocidade básica do vento é de 30m/s;
- O edifício não se encontra sujeito a vento de alta turbulência, ou seja, sua altura supera 2 vezes a altura média das construções situadas no raio de 500m.

A ação do vento atuando na estrutura calcula-se de acordo com a ABNT NBR 6123:88 – “Forças devidas ao vento em edificações”.

Velocidade básica do vento $V_0 = 30\text{m/s}$

Fator Topográfico $S_1 = 1$ (terreno plano) – Item 5.2 da ABNT NBR 6123:88

Fator de rugosidade S_2 - Item 5.3 da ABNT NBR 6123:88

Categoria IV- Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

O fator S_2 é obtido pela expressão:

$$S_2 = b \times Fr \times \left(\frac{Z}{10}\right)^p$$

Os parâmetros meteorológicos foram consultados na Tabela 1 da ABNT NBR 6123:88 de acordo com a classificação e categoria da edificação e assim descritos no quadro 3.

Elevação (Z) (m)	b	Fr	p	S_2
3	0,86	1	0,12	0,74
6	0,86	1	0,12	0,81
9	0,86	1	0,12	0,85
12	0,86	1	0,12	0,88

Quadro 3- Fator de rugosidade S_2 . Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

Nota: No quadro sobre o Fator de rugosidade S_2 que consta no manual da CBCA, os valores descritos na tabela correspondem a classe B, o correto seriam os valores acima correspondentes a classe A. Dessa forma os valores S_2 encontrados neste trabalho são diferentes dos apresentados pelo manual, assim as cargas devido ao vento sofrerão alterações.

Fator Estatístico $S_3 = 1$ (Grupo 2, edificações para residência) -Item 5.4 da ABNT NBR6123:88.

Velocidade característica (V_k) e pressão dinâmica (q):

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad q = 0,613 \times V_k^2 / 10^3$$

Tabela 3- Velocidade característica (V_k) e pressão dinâmica (q)

h (m)	V_0	S_1	S_2	S_3	V_k (m/s)	q (kN/m ²)
3	30	1	0,74	1	22,2	0,30
6	30	1	0,81	1	24,3	0,36
9	30	1	0,85	1	25,5	0,40
12	30	1	0,88	1	26,4	0,43

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

Coefficiente de arrasto C_a :

Considerando que a edificação se encontra sujeita a vento de baixa turbulência, consulta-se a Figura 4 da ABNT NBR 6123:88 para a determinação do coeficiente de arrasto.

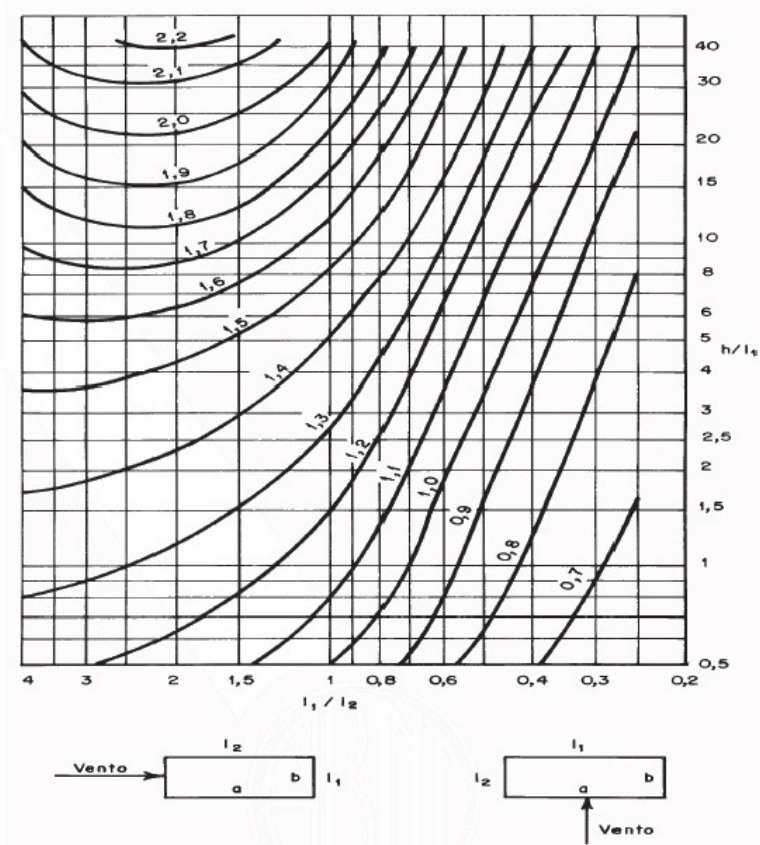
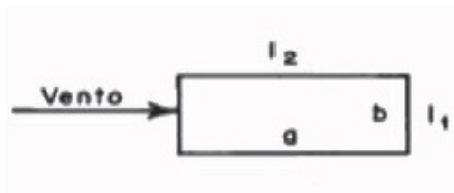


Figura 22 – Coeficiente de arrasto, C_a , para edificações em vento de baixa turbulência.

Fonte: ABNT NBR 6123, 1988.

Coefficiente de arrasto para o vento (CV0):



$a = 15\text{m}$; $b = 9\text{m}$; $H = 12\text{m}$

$L1/L2 = 9/15 = 0,60$; $H/L1 = 12/9 = 1,33$

Analisando o gráfico da Figura 15 têm-se $C_a = 0,95$.

Força de arrasto (vento)

$$F_a = C_a \times q_k \times A_e$$

Onde:

C_a = coeficiente de arrasto,

q_k = pressão dinâmica do vento,

A_e = área de influência.

Tabela 4- Resumo do vento CV0

h (m)	q_k (KN/m ²)	C_a	A_e (m ²)	F_a (kN)	$1/2F_a$ (kN)
3	0,30	0,95	27	7,75	3,87
6	0,36	0,95	27	9,28	4,64
9	0,40	0,95	27	10,22	5,11
12	0,43	0,95	13,5	5,48	2,74
13,5	0,43	0,95	6,6	2,68	1,34

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

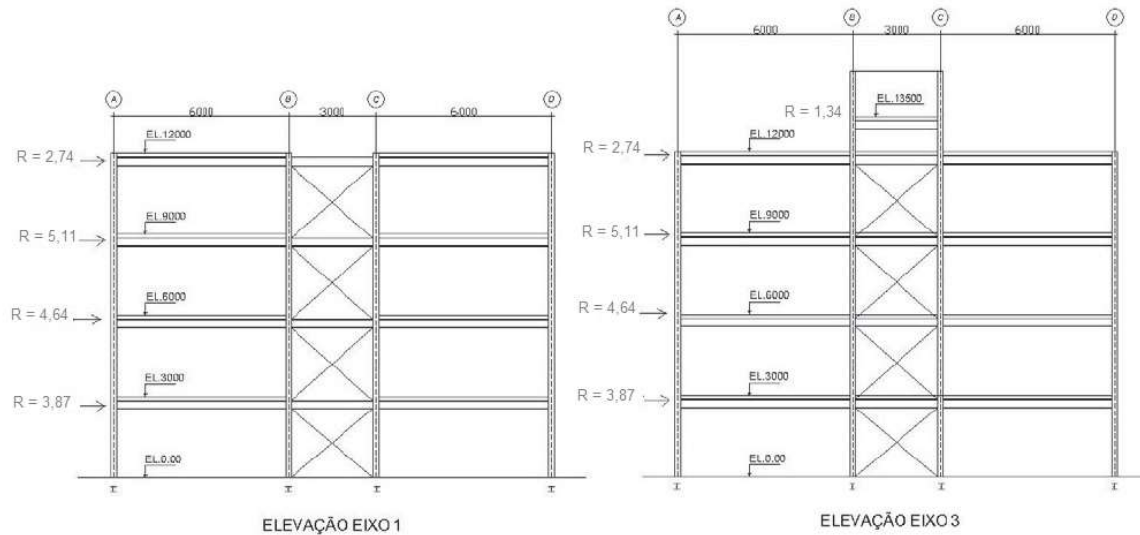
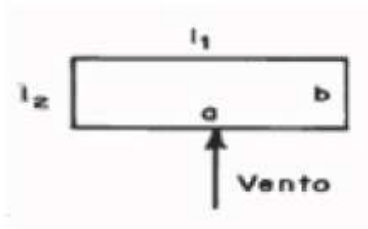


Figura 23 – Cargas devido ao vento aplicadas nos nós para os eixos 1 e 3. Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

Coefficiente de arrasto para o vento (CV90):



$a = 15\text{m}$; $b = 9\text{m}$; $H = 12\text{m}$

$L1/L2 = 15/9 = 1,67$; $H/L1 = 12/15 = 0,80$

Analisando o gráfico da Figura 15 têm-se $C_a = 1,2$.

Força de arrasto (vento)

$$F_a = C_a \times q_k \times A_e$$

Tabela 5- Vento CV90, filas A e D

h (m)	qk (KN/m ²)	Ca	Ae (m ²)	Fa (KN)
3	0,30	1,2	9	3,26
6	0,36	1,2	9	3,91
9	0,40	1,2	9	4,30
12	0,43	1,2	3,5	1,79

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

Tabela 6- Vento CV90, filas B e C

h (m)	qk (KN/m ²)	Ca	Ae (m ²)	Fa (KN)
3	0,30	1,2	13,5	4,89
6	0,36	1,2	13,5	5,86
9	0,40	1,2	13,5	6,46
12	0,43	1,2	7,87	4,03
13,5	0,43	1,2	1,125	0,58

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

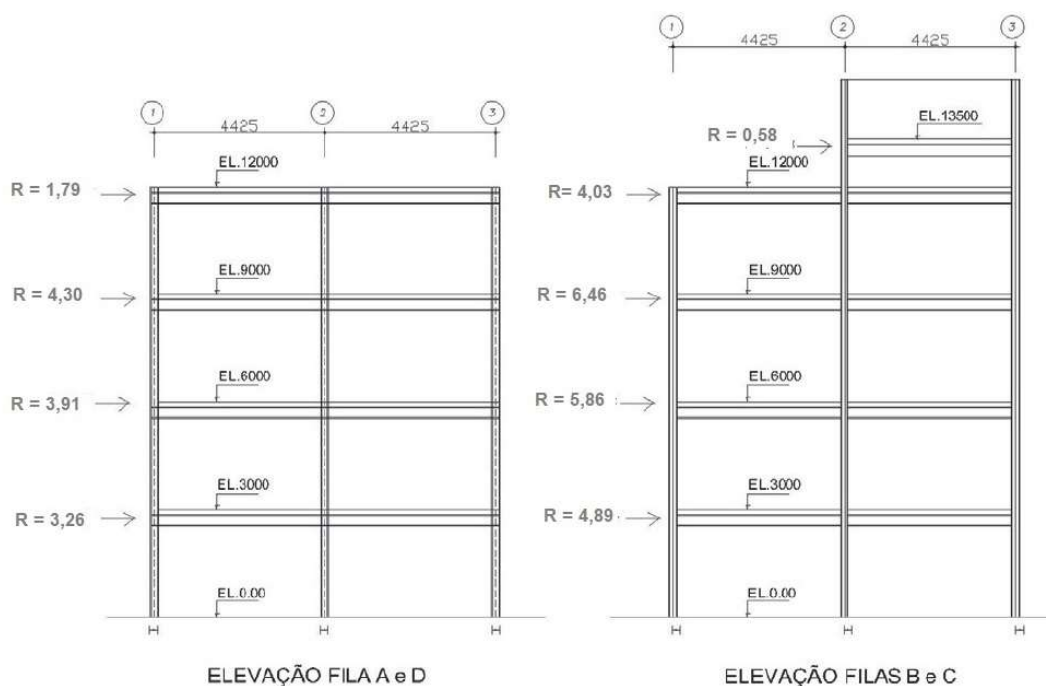


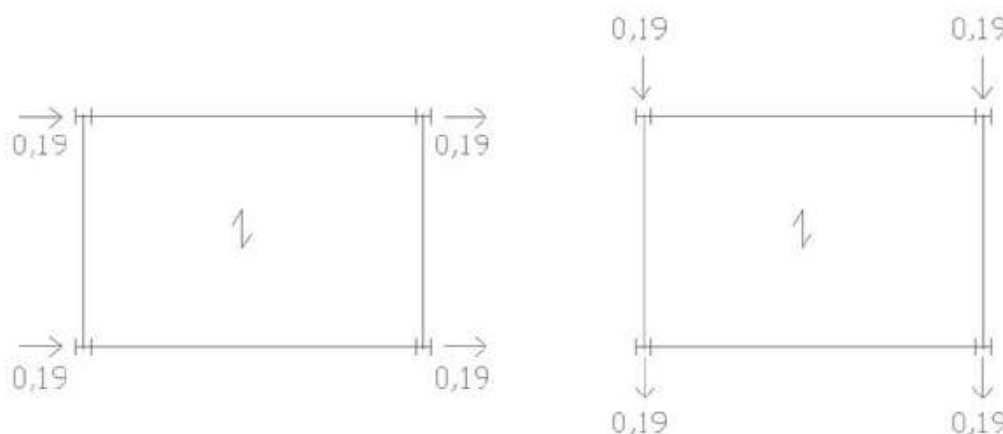
Figura 24 – Cargas devido ao vento aplicadas nos nós para as filas A-D e B-C. Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.4.3 Força nocional (FHE)

Para que se possa prever possíveis desaprumos de montagem da estrutura, é necessário considerar na análise estrutural imperfeições iniciais geométricas. Assim, deve-se aplicar em cada pavimento um deslocamento horizontal relativo entre os níveis inferior e superior (deslocamento interpavimento) de $h/333$, onde h é a altura do andar analisado. Este deslocamento é equivalente a introdução de uma força horizontal fictícia, denominada Força Nocional, igual a 0,3% das cargas gravitacionais de cálculo totais no andar. Então, por simplicidade as imperfeições iniciais geométricas são consideradas por meio da aplicação da Força Nocional.

Portanto, 0,3% das forças gravitacionais (CP+CA) devem ser aplicadas nas duas direções, a seguir é apresentado os valores da Força Nocional em cada nível da edificação.

A ABNT NBR 8800:2008 prescreve que não é necessário a inserção da Força Nocional para consideração de imperfeições geométricas iniciais, em combinações de ações que já existam forças horizontais.



PLANO DAS VIGAS EL. 13500

Figura 25 – Forças Nocionais nos planos das vigas sob a caixa d'água. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011.

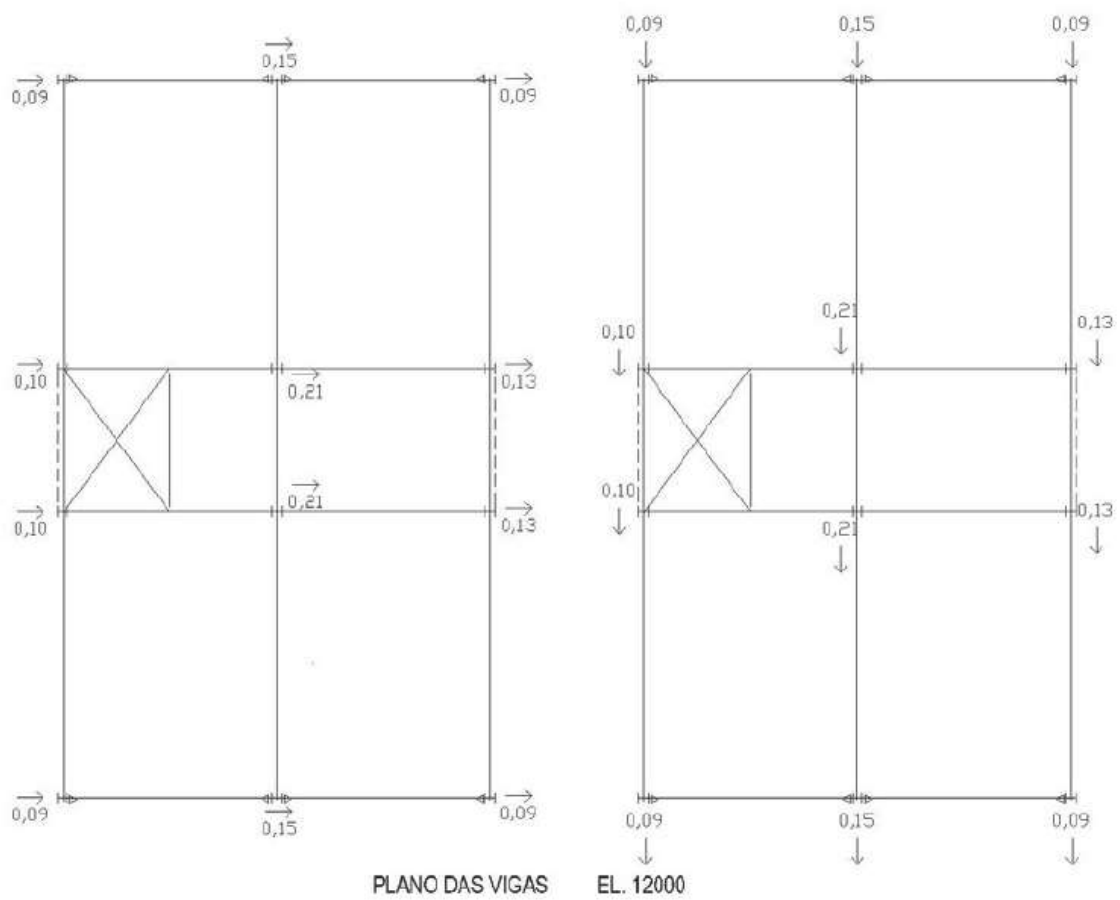


Figura 26 – Forças Nacionais nos planos das vigas da cobertura. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al, 2011.

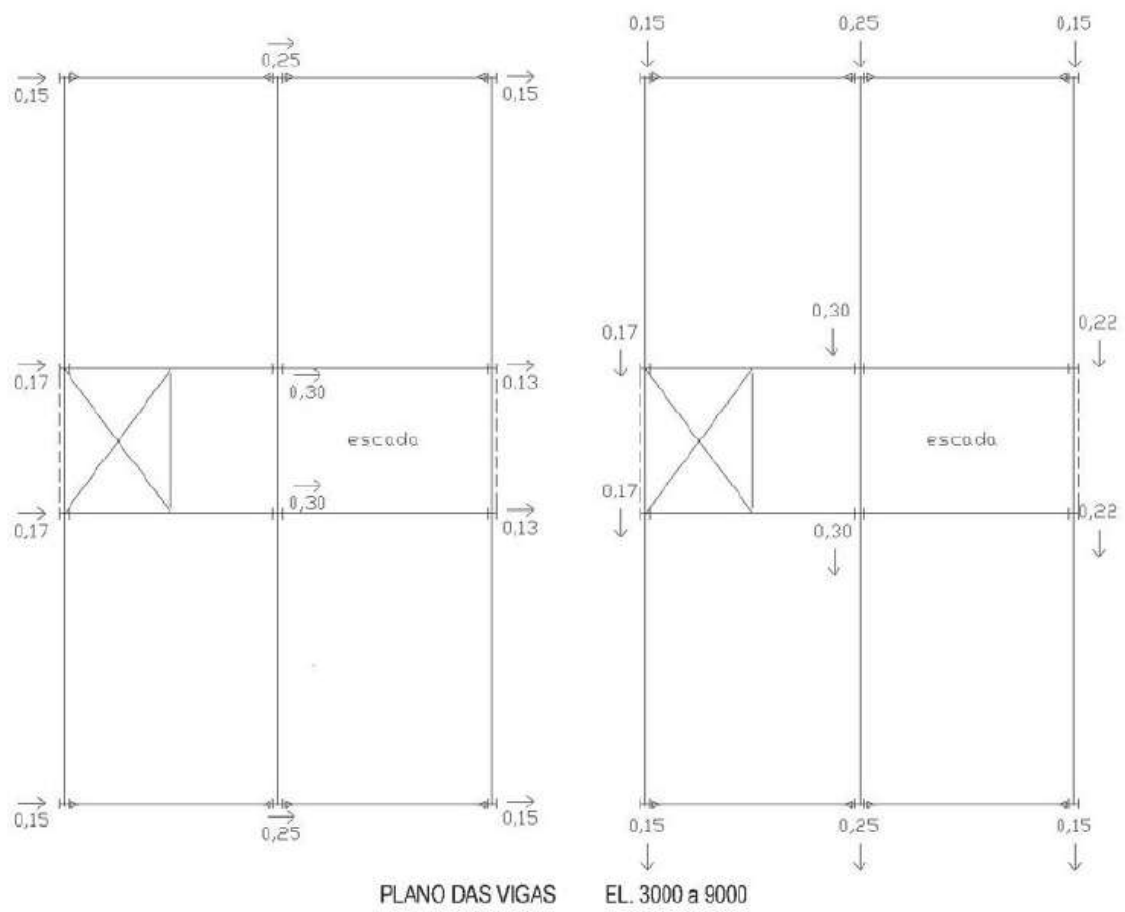


Figura 27 – Forças Nocionais nos planos das vigas do pavimento tipo. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL et al., 2011.

4.4.4 Combinações de ações

A seguir são apresentadas as combinações últimas normais e combinações de serviço possíveis para a verificação das condições de segurança da estrutura.

Combinações últimas normais:

Conforme prescrito pela ABNT NBR 8800:2008 em cada combinação foram incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação. Os valores dos coeficientes de ponderação foram obtidos conforme tabela 1 e 2 da ABNT NBR 8800:2008, presentes no anexo A deste trabalho.

Combinação 1: carga permanente mais variável, com imperfeições geométricas a 0°

$$1,4 CP + 1,4 CA + FHE 0$$

Combinação 2: carga permanente mais variável, com imperfeições geométricas a 90°

$$1,4 CP + 1,4 CA + FHE 90$$

Combinação 3: carga permanente, mais variável como ação principal, mais vento a 0°

$$1,4 CP + 1,4 CA + (1,4 \times 0,6 = 0,84) CV0$$

Combinação 4: carga permanente, mais variável como ação principal, mais vento a 90°

$$1,4 CP + 1,4 CA + (1,4 \times 0,6 = 0,84) CV90$$

Combinação 5: carga permanente, mais vento a 0° como ação principal, mais variável

$$1,4 CP + 1,4 CV0 + (1,4 \times 0,5 = 0,7) CA$$

Combinação 6: carga permanente, mais vento a 90° como ação principal, mais variável

$$1,4 CP + 1,4 CV90 + (1,4 \times 0,5 = 0,7) CA$$

Combinações de serviço:

Combinação 7: carga permanente mais vento a 0°

$$1,4 CP + 1,4 CV0$$

Combinação 8: carga permanente mais vento a 90°

$$1,4 CP + 1,4 CV90$$

4.4.5 Classificação da estrutura quanto a deslocabilidade

Os perfis inicialmente adotados para os elementos do modelo, foram determinados de acordo com os apresentados pelo Manual de Construção em Aço do CBCA. Os perfis soldados e laminados foram substituídos por perfis formados a frio de inércia próxima ao utilizado no manual.

Posição	Elemento Estrutural	Perfil
Vigas Internas	Eixo 1, 2 e 3	Cx 300x170x25x4,75
		Cx 300x170x25x2,25
Vigas Pórtico	Filas A a D	Cx 300x170x25x4,75
Contraventamento		Ue 100x50x17x2,65
Pilares	Filas e eixos	Ie 300x170x25x6,3

Quadro 4- Perfis que compõem a estrutura. Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

Conforme prescrição da ABNT NBR 8800:2008 as estruturas são classificadas quanto a deslocabilidade por meio da relação (μ_2/μ_1) entre os deslocamentos obtidos numa análise não linear geométrica e aqueles obtidos numa análise linear geométrica para cada andar da edificação.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura pode ser feita uma única vez tomando-se a combinação de ações que fornecer, além de forças horizontais, a maior resultante das ações gravitacionais.

Portanto, considerou-se a combinação 4 para a análise dos deslocamentos da edificação:

$$\text{Combinação 4- } 1,4 \text{ CP} + 1,4 \text{ CA} + (1,4 \times 0,6 = 0,84) \text{ CV90}$$

Para realizar esta análise foi utilizado o programa computacional de análise estrutural SAP 2000, sendo feita com a estrutura no espaço, considerando a rigidez da laje pelo efeito diafragma, obtendo assim o mesmo deslocamento em todo pavimento. A seguir estão apresentados os deslocamentos de 1ª e 2ª ordem em cada pavimento no plano dos pórticos.

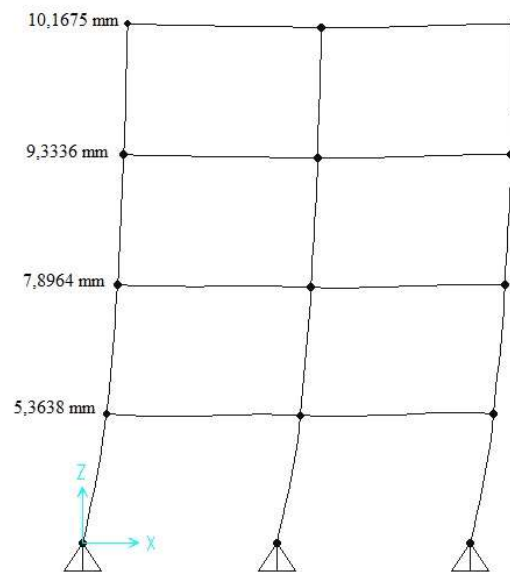


Figura 28 – Deslocamentos obtidos em uma análise linear geométrica- Filas A e D.

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

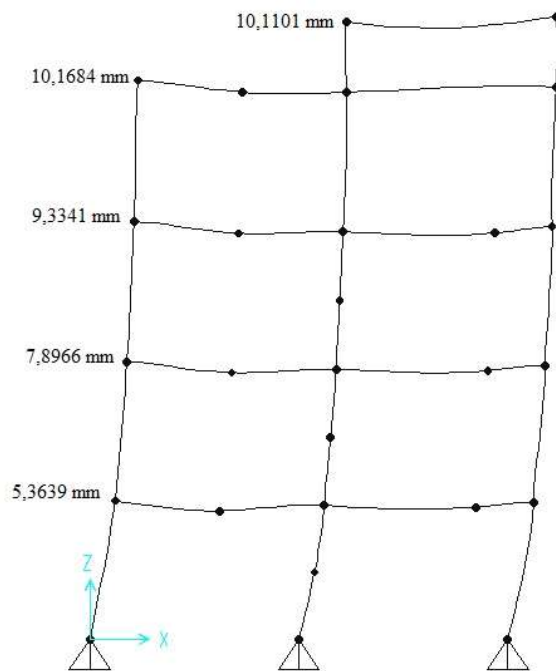


Figura 29 – Deslocamentos obtidos em uma análise linear geométrica- Filas B e C. Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

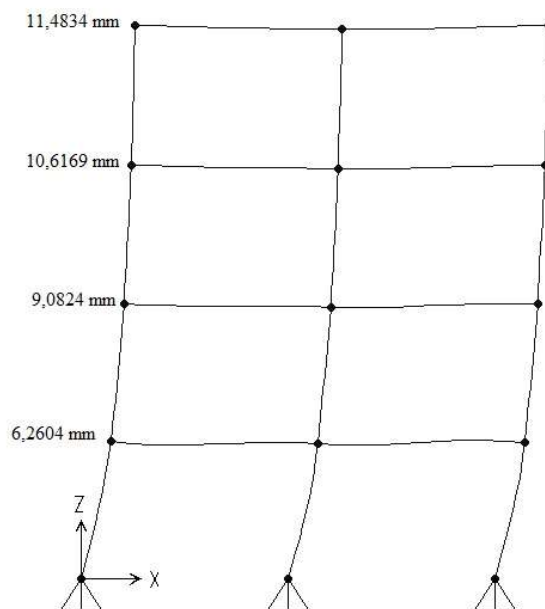


Figura 30 – Deslocamentos obtidos em uma análise não linear geométrica- Filas A e D. Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

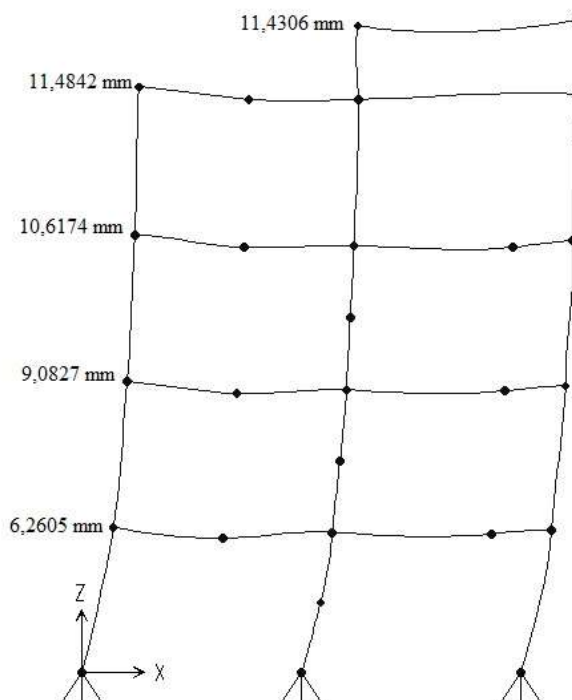


Figura 31 – Deslocamentos obtidos em uma análise não linear geométrica- Filas B e C.

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

Assim, com o auxílio do programa SAP 2000 foi possível encontrar o coeficiente B_2 , que representa em cada andar a relação (μ_2/μ_1) .

Tabela 7- Coeficiente B_2 - Filas A e D

Deslocabilidade obtida no Programa Sap 2000- Filas A e D			
Combinação 4: 1,4 CP + 1,4 CA + (1,4x0,6=0,84) CV90			
Andar	μ_1 (1ª ordem)	μ_2 (2ª ordem)	B_2
4º	10,1675	11,4834	1,13
3º	9,3336	10,6169	1,14
2º	7,8964	9,0824	1,15
1º	5,3638	6,2604	1,17

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

Tabela 8- Coeficiente B_2 - Filas B e C

Deslocabilidade obtida no Programa Sap 2000- Filas B e C			
Combinação 4: 1,4 CP + 1,4 CA + (1,4x0,6=0,84) CV90			
Andar	μ_1 (1ª ordem)	μ_2 (2ª ordem)	B ₂
Caixa d'agua	10,1101	11,4306	1,13
4º	10,1684	11,4842	1,13
3º	9,3341	10,6174	1,14
2º	7,8966	9,0827	1,15
1º	5,3639	6,2605	1,17

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

A ABNT NBR 8800:2008 prescreve a classificação da estrutura de acordo com o coeficiente B_2 calculado. Se o coeficiente B_2 , calculado com rigidezes originais, não ultrapassar 1,10, a estrutura é considerada muito pouco suscetível ao efeito P- Δ (efeito global de segunda ordem), sendo denominada de pequena deslocabilidade. Se o coeficiente B_2 for superior a 1,1 e igual ou inferior a 1,4 a estrutura é denominada de média deslocabilidade e quando o coeficiente B_2 ultrapassa o valor de 1,4, considera-se que a estrutura é de grande deslocabilidade.

Assim, ao analisar os valores dispostos nas Tabelas 5 e 6, é possível verificar que a estrutura em estudo com a utilização de perfis formados a frio é classificada de média deslocabilidade, estando o coeficiente B_2 em todos os andares no intervalo entre 1,1 e 1,4.

Nas estruturas de média deslocabilidade, os efeitos das imperfeições iniciais de material devem ser levados em conta na análise, reduzindo-se a rigidez à flexão e a rigidez axial das barras para 80 % dos valores originais e os esforços solicitantes devem ser obtidos considerando-se os efeitos globais e locais de segunda ordem.

4.5 Dimensionamento dos elementos da estrutura

Para o dimensionamento dos elementos da estrutura, será utilizado os perfis descritos no Quadro 5. Os valores dos esforços solicitantes de cálculo a serem verificados foram obtidos no programa SAP 2000 e estão apresentados em uma tabela no Apêndice A deste trabalho.

Devido a classificação da estrutura de média deslocabilidade, foram consideradas as imperfeições iniciais de material reduzindo a rigidez à flexão e a rigidez axial de todas as barras para 80% dos valores originais. Assim, no caso das barras de aço isso é feito considerando o módulo de elasticidade reduzido no programa.

$$E_{a,red} = 160.000MPa$$

Os elementos da estrutura serão dimensionados por dois métodos, as vigas e o contraventamento serão dimensionadas pelo método da largura efetiva e método da seção efetiva, já o pilar será dimensionado pelo método da largura efetiva e método da resistência direta.

4.5.1 Dimensionamento das vigas

Materiais:

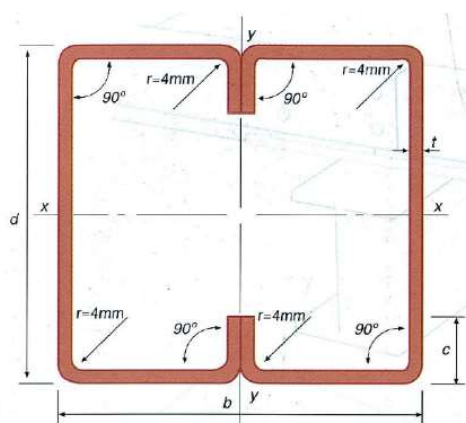
Concreto		Aço do Perfil: F35/Q35	
Classe de concreto (fck; MPa)	20	Tensão de Escoamento (fy; MPa)	340
Peso Próprio (kN/m ²)	25	Módulo de Elasticidade (Es; MPa)	200000

4.5.1.1 Vigas entre fila BC (el. 3000 a 13500)

Momento Máximo Solicitante de Cálculo: $M_{sd} = 19,92$ KN.m (Combinação 1, 2, 3 e 4)

Perfil: Cx 300x170x25x2,25 - fabricante METFORM

Propriedades Geométricas:



$$d = 300 \text{ mm}$$

$$b = 170 \text{ mm}$$

$$c = 25 \text{ mm}$$

$$t = 2,25 \text{ mm}$$

$$A = 22,60 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 2956,3 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 197,1 \text{ cm}^3$$

$$r_x = 11,44 \text{ cm}$$

$$I_y = 1105,4 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 130 \text{ cm}^3$$

$$r_y = 6,99 \text{ cm}$$

$$I_t = 2412,1 \text{ cm}^4$$

$$C_w = 8491,2 \text{ cm}^6$$

Flexão

O momento fletor resistente de cálculo M_{Ra} , deve ser tomado como o menor valor calculado com base no início do escoamento e com base na flambagem lateral com torção (FLT).

Momento calculado com base no início do escoamento**Método da largura efetiva**

a) Verificação da mesa comprimida (elemento 2)

O cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda é feito considerando-se as prescrições do item 9.2.3 apresentados pela ABNT NBR14762:2010.

$$b = 8,5 - 4t = 8,5 - (4 \times 0,225) = 7,6 \text{ cm}$$

O valor de referência de índice de esbeltez reduzido do elemento (λ_{po}) é calculado conforme equação a seguir:

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{E}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{7,6}{0,225}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{20000}{34}\right)}\right]} = 2,24$$

$$\lambda_{po} = 2,24 \geq 0,673:$$

$$d = 2,5 - 2t = 2,5 - 2 \times 0,225 = 2,05 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{2,05^3 \times 0,225}{12} = 0,162 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 [0,487 \lambda_{po} - 0,328]^3 = 399 \times 0,225^4 [0,487 \times 2,24 - 0,328]^3 = 0,454 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 [56 \lambda_{po} + 5] = 0,225^4 [56 \times 2,24 + 5] = 0,334 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 0,334 \text{ cm}^4$$

$$n = (0,582 - 0,122 \lambda_{po}) \geq 1/3$$

$$n = (0,582 - 0,122 \times 2,24) < 1/3$$

$$n = 0,333$$

$$D = 2,5 - tr = 2,5 - 0 = 2,5 \text{ cm}$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,6} = 0,329 \text{ cm}$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,80$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,162}{0,334} = 0,485$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b) (I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,329) \times (0,485)^{0,333} + 0,43 \leq 4$$

$$k = 2,93$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{7,6}{0,225}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{2,93 \times 20000}{34}\right)}\right]} = 0,856$$

$\lambda_p = 0,856 > 0,673$, haverá flambagem local do elemento 2

$$b_{ef} = b \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b$$

$$b_{ef} = \frac{7,6}{0,856} \left(1 - \frac{0,22}{0,856}\right) \leq 7,6$$

$$b_{ef} = 6,60 \text{ cm}$$

b) Verificação do enrijecedor de borda (elemento 3)

$$d = 2,5 - 2t = 2,5 - (2 \times 0,225) = 2,05 \text{ cm}$$

Na primeira iteração do cálculo por aproximações sucessivas, considera-se que o enrijecedor de borda está submetido a um diagrama de tensão uniforme, de valor igual ao da tensão que solicita a mesa do perfil.

Elemento AL $\rightarrow k = 0,43$

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{2,05}{0,225}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{0,43 \times 20000}{34}\right)}\right]} = 0,603$$

Como $\lambda_p = 0,603 < 0,673$, não haverá flambagem local.

$d_{ef} = d = 2,05 \text{ cm}$ (largura efetiva do enrijecedor de borda)

$$d_s = \left(\frac{I_s}{I_a}\right) d_{ef} \leq d_{ef}$$

$$d_s = \left(\frac{0,162}{0,334}\right) \times 2,05 \leq 2,05$$

$$d_s = 0,994 \text{ cm}$$

c) Verificação da alma (elemento 1)

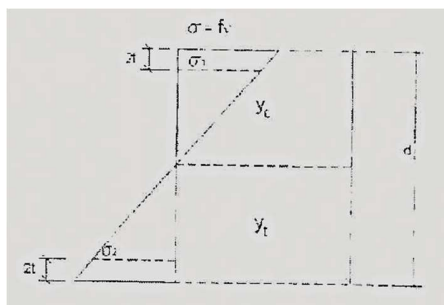
Nesta etapa, a posição da Linha Neutra da Seção Efetiva (LNe) é determinada considerando-se um processo iterativo, conseguindo-se a convergência quando a posição da LNe de uma iteração não diferenciar mais do que 5% da posição da LNe da iteração anterior.

Os cálculos das propriedades da seção efetiva do perfil são realizados empregando-se o “método linear”, isto é, todo o material é admitido como concentrado na linha média da seção (linha do esqueleto) e os elementos são tratados isoladamente como linhas retas (parte plana) ou curvas (dobras). Os valores assim obtidos são multiplicados pela espessura t , de maneira a obter as propriedades geométricas desejadas.

O Teorema do Eixo Paralelo é utilizado para os cálculos do momento de inércia da seção efetiva.

Primeira iteração: considerando a alma totalmente efetiva			
Elemento	L	y	L*y
Mesa Superior	6,60	0,11	0,74
Canto Superior Esquerdo	0,53	0,24	0,12
Canto Superior direito	0,53	0,24	0,12
Enrijecedor Superior	0,99	0,95	0,94
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00
Alma	29,10	15,00	436,50
Mesa Inferior	7,60	29,89	227,15
Enrijecedor Inferior	2,05	28,53	58,48
Canto Inferior Esquerdo	0,53	29,76	15,77
Canto Inferior Direito	0,53	29,76	15,77
Soma	48,46		755,60

$$y_{cg} = \frac{Ly}{L} = \frac{755,60}{48,46} = 15,59 \text{ cm}$$



Considerando-se a semelhança entre triângulos retângulos, tem-se:

$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{34(15,59 - 2 \times 0,225)}{15,59} = 33,02 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{34(14,41 - 2 \times 0,225)}{15,59} = -30,45 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-30,45}{33,02} = -0,92$$

Onde Ψ é a relação σ_2/σ_1 empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local k .

A equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local k é determinando analisando a Tabela 5 da ABNT NBR 14762:2010 presente no Anexo B deste trabalho.

$$\text{Caso d : } k = 4 + 2(1 - \Psi)^3 + 2(1 - \Psi)$$

$$k = 4 + 2(1 - (-0,92))^3 + 2(1 - (-0,92))$$

$$k = 22$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma_1}\right)}\right]} = \frac{\frac{29,1}{0,225}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{22 \times 20000}{33,02}\right)}\right]} = 1,179$$

Como $\lambda_p = 1,179 > 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na alma do perfil. Portanto, deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_{ef} = b \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b$$

$$b_{ef} = 29,1 \frac{1}{1,179} \left(1 - \frac{0,22}{1,179}\right) \leq 29,1$$

$$b_{ef} = 20,08 \text{ cm}$$

$$b_c = y_{cg} - 2t = 15,59 - 2 \times 0,225 = 15,14 \text{ cm}$$

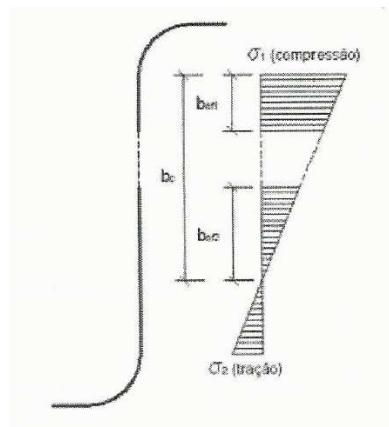
$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{3 - \Psi} = \frac{20,08}{3 - (-0,92)} = 5,12 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 b_{ef} = 0,5 \times 20,08 = 10,04 \text{ cm}$$

b_{ef1} e b_{ef2} são as larguras efetivas indicadas na tabela do Anexo B.

$$b_{ef} + b_{ef2} \leq b_c = 5,12 + 10,04 = 15,16 \text{ cm} > 15,14 \text{ cm} \text{ então } b_{ef1} + b_{ef2} = 15,14 \text{ cm}$$

b_{ef1} e b_{ef2} são as larguras efetivas para o elemento 1 solicitado por um gradiente de tensão, indicadas na figura a seguir:



A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 15,14 - 15,14 = 0 \text{ cm}$$

Como não há parte inefetiva da alma, a posição da linha neutra não sofre alteração.

Logo, a convergência é obtida.

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Verificação da alma					
Elemento	L	y	L*y	L*y ²	I' _x
Mesa Superior	6,60	0,11	0,74	0,08	0,00
Canto Superior Esquerdo	0,53	0,24	0,12	0,03	0,01
Canto Superior direito	0,53	0,24	0,12	0,03	0,01
Enrijecedor Superior	0,99	0,95	0,94	0,89	0,08
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alma	29,10	15,00	436,50	6547,50	2053,51
Mesa Inferior	7,60	29,89	227,15	6788,80	0,00
Enrijecedor Inferior	2,05	28,53	58,48	1668,04	0,72
Canto Inferior Esquerdo	0,53	29,76	15,77	469,45	0,01
Canto Inferior Direito	0,53	29,76	15,77	469,45	0,01
Soma	48,46		755,60	15944,25	2054,34

$$I_{x'} = \sum Ly^2 + \sum I'_x - [(y_{cg})^2 \sum L]$$

$$I_{x'} = 15944,25 + 2054,34 - [(15,59)^2 \times 48,46] = 6220,48 \text{ cm}^3$$

$$I_x = I_{x'} t = 6220,48 \times 0,225 = 1399,61 \text{ cm}^4$$

$I_{x'}$ é o momento de inércia da seção efetiva considerando-se o “método linear”.

I_x é o momento de inércia da seção efetiva do perfil.

O módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida é calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme segue:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1399,61}{15,59} = 89,78 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Ue}$$

$$W_{ef} = 2 \times 89,78 = 179,56 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Cx}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{179,56 \times 34}{1,1} = 5550,04 \text{ kN.cm}$$

Método da seção efetiva

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base no início do escoamento, tem-se pelo método da seção efetiva que:

$$t_r = 0$$

$$b_f = 85 \text{ mm}$$

$$b_w = 300 \text{ mm}$$

$$D = 25 \text{ mm}$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{85}{300} = 0,283$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{25}{300} = 0,083$$

Com base na Tabela 13 da ABNT NBR 14762:2010, presente no anexo C deste trabalho, para a relação acima que se enquadra no caso b, com $\mu < 0,2$

$$0,2 \rightarrow 32$$

$$0,283 \rightarrow kl$$

$$0,3 \rightarrow 29,3$$

$$\frac{0,2 - 0,283}{0,2 - 0,3} = \frac{32 - kl}{32 - 29,3} \rightarrow kl = 29,8$$

O momento fletor de flambagem local elástica pode ser calculado por:

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b_w/t)^2} W_c = 29,8 \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,3^2)(30/0,225)^2} 197,10 = 5972,17 \text{ KN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_t}} = \sqrt{\frac{197,10 \times 34}{5972,17}} = 1,06$$

$\lambda_p = 1,06 > 0,673$, portanto há flambagem local

$$W_{ef} = \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{197,10}{1,06} \left(1 - \frac{0,22}{1,06}\right) = 147,35 \text{ cm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{147,35 \times 34}{1,1} = \mathbf{4554,45 \text{ kN.cm}}$$

Momento calculado com base na flambagem lateral com torção (FLT)

O momento fletor resistente de cálculo referente à flambagem lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado por:

$$M_{Rd} = [x_{FLT} W_{c,ef} f_y] / \gamma$$

$W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base no método da largura efetiva, adotando $\sigma = x_{FLT} f_y$, ou no método da seção efetiva.

Método da largura efetiva

Obtido o valor de σ , procede-se os cálculos de forma análoga à momento calculado com base no início do escoamento, utilizando-se o processo iterativo para a determinação da posição da LNe da seção efetiva e das propriedades geométricas correspondentes.

a) Verificação da mesa comprimida (elemento 2)

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para barras com seção fechada (caixão), sujeitas a flexão em torno do eixo x, temos a seguinte expressão:

$$M_e = C_b (N_{ey} GJ)^{0,5}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 1105,4}{(1 \times 300)^2} = 2424,41 \text{ kN}$$

$$M_e = 1 \times (2424,41 \times 7700 \times 2412,1)^{0,5} = 212200,33 \text{ kN.cm}$$

$$W_c = W_x = 197,10 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_o = \left[\frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[\frac{(197,1 \times 34)}{212200,33} \right]^{0,5} = 0,178$$

Para $\lambda_o = 0,178 < 0,6 \rightarrow x_{FLT} = 1,0$ então;

$$\sigma = x_{FLT} f_y = 1,0 \times 34 = 34 \text{ KN/cm}^2$$

Assim, a tensão utilizada para o cálculo do momento na flambagem lateral com torção (FLT) é o $f_y = 34 \text{ KN/cm}^2$, uma vez que considerando a equação do perfil caixa para M_e o valor de x_{FLT} encontrado é igual a 1. Dessa forma $M_{RdFLT} = M_{Rdescoameto} = 5550,04 \text{ kN.cm}$ para o método da largura efetiva e $M_{RdFLT} = M_{Rdescoameto} = 4554,45 \text{ kN.cm}$ para o método da seção efetiva.

Verificação a flambagem distorcional

Barras com seção transversal fechada não está sujeita a flambagem distorcional.

Conclusão

O momento fletor resistente de cálculo é o menor dos momentos determinados com base no início do escoamento ou para a flambagem lateral com torção, utilizando o método da largura efetiva e o método da seção efetiva.

O valor do momento fletor resistente de cálculo com base no início do escoamento é igual ao da flambagem lateral com torção, sendo o menor valor encontrado pelo método da seção efetiva:

$$M_{Rd} = 4554,45 \text{ kNcm} > M_{sd} = 1992,00 \text{ kNcm} \quad \text{Perfil Atende!}$$

4.5.1.2 Vigas do pórtico e vigas entre filas AB-CD

-Vigas do Pórtico

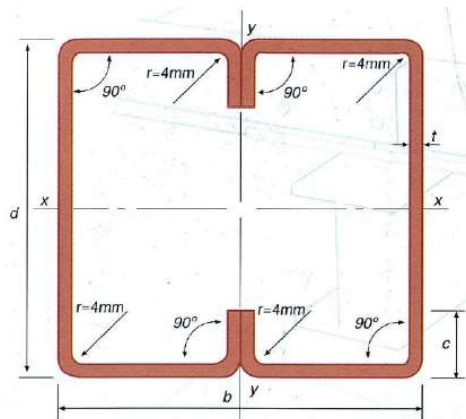
Momento Máximo Solicitante de Cálculo: $M_{sd} = 49,77 \text{ kN.m}$ (Combinação 4)

-Vigas Filas AB-CD

Momento Máximo Solicitante de Cálculo: $M_{sd} = 118,6 \text{ kN.m}$ (Combinação 4)

Perfil: Cx 300x170x25x4,75 - fabricante METFORM

Propriedades Geométricas:



$$d = 300 \text{ mm}$$

$$r_x = 11,27 \text{ cm}$$

$$b = 170 \text{ mm}$$

$$I_y = 2372,27 \text{ cm}^4$$

$$c = 25 \text{ mm}$$

$$W_y = 271,5 \text{ cm}^3$$

$$t = 4,75 \text{ mm}$$

$$r_y = 7,15 \text{ cm}$$

$$A = 46,43 \text{ cm}^2$$

$$I_t = 4902,44 \text{ cm}^4$$

$$I_x = 5898,26 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 393,22 \text{ cm}^3$$

Flexão

O momento fletor resistente de cálculo M_{Ra} , deve ser tomado como o menor valor calculado com base no início do escoamento e com base na flambagem lateral com torção (FLT).

Momento calculado com base no início do escoamento

Método da largura efetiva

a) Verificação da mesa comprimida (elemento 2)

O cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda é feito considerando-se as prescrições do item 9.2.3 apresentados pela ABNT NBR14762:2010.

$$b = 8,5 - 4t = 8,5 - (4 \times 0,475) = 6,6 \text{ cm}$$

O valor de referência de índice de esbeltez reduzido do elemento (λ_{po}) é calculado conforme equação a seguir:

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{E}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{6,6}{0,475}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{20000}{34}\right)}\right]} = 0,92$$

$$\lambda_{po} = 0,92 \geq 0,673:$$

$$d = 2,5 - 2t = 2,5 - 2 \times 0,475 = 1,55 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,55^3 \times 0,475}{12} = 0,147 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 [0,487 \lambda_{po} - 0,328]^3 = 399 \times 0,475^4 \times [0,487 \times 0,92 - 0,328]^3 = 0,035 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 [56 \lambda_{po} + 5] = 0,475^4 [56 \times 0,92 + 5] = 2,877 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 0,035 \text{ cm}^4$$

$$n = (0,582 - 0,122 \lambda_{po}) \geq 1/3$$

$$n = (0,582 - 0,122 \times 0,92) < 1/3$$

$$n = 0,47$$

$$D = 2,5 - tr = 2,5 - 0 = 2,5 \text{ cm}$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{6,6} = 0,379 \text{ cm}$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,80$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,147}{0,035} = 4,2 > 1$$

$$\frac{I_s}{I_a} = 1$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b) (I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,379) \times (1)^{0,333} + 0,43 \leq 4$$

$$k = 3,36$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{6,6}{0,475}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{3,36 \times 20000}{34}\right)}\right]} = 0,329$$

$\lambda_p = 0,329 < 0,673$, não haverá flambagem local do elemento 2

$$b_{ef} = b = 6,6 \text{ cm}$$

b) Verificação do enrijecedor de borda (elemento 3)

$$d = 2,5 - 2t = 2,5 - (2 \times 0,475) = 1,55 \text{ cm}$$

Na primeira iteração do cálculo por aproximações sucessivas, considera-se que o enrijecedor de borda está submetido a um diagrama de tensão uniforme, de valor igual ao da tensão que solicita a mesa do perfil.

Elemento AL $\rightarrow k = 0,43$

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{1,55}{0,475}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{0,43 \times 20000}{34}\right)}\right]} = 0,216$$

Como $\lambda_p = 0,216 < 0,673$, não haverá flambagem local do elemento 3.

$$d_{ef} = d = 1,55 \text{ cm}$$

c) Verificação da alma (elemento 1)

Nesta etapa, a posição da Linha Neutra da Seção Efetiva (LNe) é determinada considerando-se um processo iterativo, conseguindo-se a convergência quando a posição da LNe de uma iteração não diferenciar mais do que 5% da posição da LNe da iteração anterior.

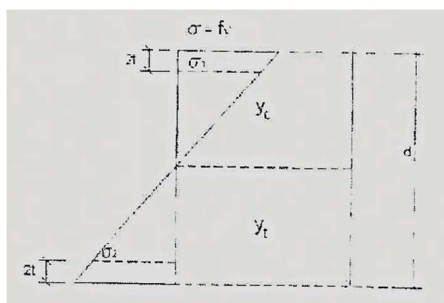
Os cálculos das propriedades da seção efetiva do perfil são realizados empregando-se o “método linear”, isto é, todo o material é admitido como concentrado na linha média da seção (linha do esqueleto) e os elementos são tratados isoladamente como linhas retas (parte plana) ou curvas (dobras). Os valores assim obtidos são multiplicados pela espessura t , de maneira a obter as propriedades geométricas desejadas.

O Teorema do Eixo Paralelo é utilizado para os cálculos do momento de inércia da seção efetiva.

Primeira iteração: considerando a alma totalmente efetiva

Verificação da alma			
Elemento	L	y	L*y
Mesa Superior	6,60	0,24	1,57
Canto Superior Esquerdo	1,12	0,50	0,55
Canto Superior direito	1,12	0,50	0,55
Enrijecedor Superior	1,55	1,73	2,67
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00
Alma	28,10	15,00	421,50
Mesa Inferior	6,60	29,76	196,43
Enrijecedor Inferior	1,55	28,28	43,83
Canto Inferior Esquerdo	1,12	29,50	33,00
Canto Inferior Direito	1,12	29,50	33,00
Soma	48,87		733,12

$$y_{cg} = \frac{Ly}{L} = \frac{733,12}{48,87} = 15 \text{ cm}$$



Considerando-se a semelhança entre triângulos retângulos da Figura 0, tem-se:

$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg}-2t)}{y_{cg}} = \frac{34(15,00-2x0,475)}{15,00} = 31,85 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t-2t)}{y_{cg}} = \frac{34(15,00-2x0,475)}{15,00} = -31,85 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-31,85}{31,85} = -1$$

Onde Ψ é a relação σ_2/σ_1 empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local k .

A equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local k é determinado analisando a Tabela 5 da ABNT NBR 14762:2010 presente no Anexo B deste trabalho.

$$\text{Caso d : } k = 4 + 2(1 - \Psi)^3 + 2(1 - \Psi)$$

$$k = 4 + 2(1 - (-1))^3 + 2(1 - (-1))$$

$$k = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma_1}\right)}\right]} = \frac{\frac{28,1}{0,475}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{24x20000}{31,85}\right)}\right]} = 0,507$$

Como $\lambda_p = 0,507 < 0,673$, não haverá flambagem local na alma do perfil.

$$b_{ef} = b = 28,10 \text{ cm}$$

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = b - b_{ef} = 28,1 - 28,1 = 0,00 \text{ cm}$$

Como não há parte inefetiva da alma, a posição da linha neutra não sofre alteração.

Logo, a convergência é obtida.

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Verificação da alma					
Elemento	L	y	L*y	L*y ²	I'x
Mesa Superior	6,60	0,24	1,57	0,37	0,00
Canto Superior Esquerdo	1,12	0,50	0,55	0,28	0,05
Canto Superior direito	1,12	0,50	0,55	0,28	0,05
Enrijecedor Superior	1,55	1,73	2,67	4,61	0,31
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alma	28,10	15,00	421,50	6322,50	1849,00
Mesa Inferior	6,60	29,76	196,43	5846,32	0,00
Enrijecedor Inferior	1,55	28,28	43,83	1239,19	0,31
Canto Inferior Esquerdo	1,12	29,50	33,00	973,74	0,05
Canto Inferior Direito	1,12	29,50	33,00	973,74	0,05
Soma	48,87		733,12	15361,02	1849,84

$$I_{x'} = \sum Ly^2 + \sum I'_x - [(y_{cg})^2 \sum L] = 15361,02 + 1849,84 - [(15)^2 \times 48,87] = 6215,11 \text{ cm}^3$$

$$I_x = I_{x'} t = 6215,11 \times 0,475 = 2952,18 \text{ cm}^4$$

$I_{x'}$ é o momento de inércia da seção efetiva considerando-se o “método linear”.

I_x é o momento de inércia da seção efetiva do perfil.

O módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida é calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme segue:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{2952,18}{15,00} = 196,81 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Ue}$$

$$W_{ef} = 2 \times 196,81 = 393,62 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Cx}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{393,62 \times 34}{1,1} = \mathbf{12166,44 \text{ kN.cm}}$$

Método da seção efetiva

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base no início do escoamento, tem-se pelo método da seção efetiva que:

$$t_r = 0$$

$$b_f = 85 \text{ mm}$$

$$b_w = 300 \text{ mm}$$

$$D = 25 \text{ mm}$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{85}{300} = 0,283$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{25}{300} = 0,083$$

Com base na Tabela 13 da ABNT NBR 14762:2010, presente no anexo C deste trabalho, para a relação acima que se enquadra no caso b, com $\mu < 0,2$

$$0,2 \rightarrow 32$$

$$0,283 \rightarrow kl$$

$$0,3 \rightarrow 29,3$$

$$\frac{0,2 - 0,283}{0,2 - 0,3} = \frac{32 - kl}{32 - 29,3} \rightarrow kl = 29,8$$

O momento fletor de flambagem local elástica pode ser calculado por:

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b_w/t)^2} W_c = 29,8 \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,3^2)(30/0,475)^2} 393,22 = 53101,12 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{393,22 \times 34}{53101,12}} = 0,502$$

$\lambda_p = 0,502 < 0,673$, portanto não há flambagem local

$$W_{ef} = W_x = 393,22 \text{ cm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{393,22 \times 34}{1,1} = 12154,07 \text{ kN.cm}$$

Momento calculado com base na flambagem lateral com torção (FLT)

O momento fletor resistente de cálculo referente à flambagem lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado por:

$$M_{Rd} = [x_{FLT} W_{c,ef} f_y] / \gamma$$

$W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base no método da largura efetiva, adotando $\sigma = x_{FLT} f_y$, ou no método da seção efetiva.

Método da largura efetiva

Obtido o valor de σ , procede-se os cálculos de forma análoga à momento calculado com base no início do escoamento, utilizando-se o processo iterativo para a determinação da posição da LNe da seção efetiva e das propriedades geométricas correspondentes.

a) Verificação da mesa comprimida (elemento 2)

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x, temos a seguinte expressão:

$$M_e = C_b (N_{ey} GJ)^{0,5}$$

-Vigas do Pórtico

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 2372,27}{(1 \times 442,5)^2} = 2391,48 \text{ kN}$$

$$M_e = 1 \times (2391,48 \times 7700 \times 4902,44)^{0,5} = 300458,77 \text{ kN.cm}$$

$$W_c = W_x = 393,22 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_o = \left[\frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[\frac{(393,22 \times 34)}{300458,77} \right]^{0,5} = 0,211$$

-Vigas entre Filas AB-CD

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 2372,27}{(1 \times 600)^2} = 1300,74 \text{ kN}$$

$$M_e = 1 \times (1300,74 \times 7700 \times 4902,44)^{0,5} = 221588,26 \text{ kN.cm}$$

$$W_c = W_x = 393,22 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_o = \left[\frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[\frac{(393,22 \times 34)}{221588,26} \right]^{0,5} = 0,246$$

Para $\lambda_o = 0,211$ e $0,246 < 0,6 \rightarrow x_{FLT} = 1,0$ então;

$$\sigma = x_{FLT} f_y = 1,0 \times 34 = 34 \text{ KN/cm}^2$$

Assim, a tensão utilizada para o cálculo do momento na flambagem lateral com torção (FLT) é o $f_y = 34 \text{ KN/cm}^2$, uma vez que considerando a equação do perfil caixa para M_e o valor de x_{FLT} encontrado é igual a 1. Dessa forma $M_{RdFLT} = M_{Rdescoameto} = 12166,44 \text{ kN.cm}$ para o método da largura efetiva e $M_{RdFLT} = M_{Rdescoameto} = 12154,07 \text{ kN.cm}$ para o método da seção efetiva.

Verificação a flambagem distorcional

Barras com seção transversal fechada não está sujeita a flambagem distorcional.

Conclusão

O momento fletor resistente de cálculo é o menor dos momentos determinados com base no início do escoamento ou para a flambagem lateral com torção, utilizando o método da largura efetiva e o método da seção efetiva.

O valor do momento fletor resistente de cálculo com base no início do escoamento é igual ao da flambagem lateral com torção, sendo o menor valor encontrado pelo método da seção efetiva:

$$M_{Rd} = 12154,07 \text{ kN.cm} > M_{Sd} = 4977,00 \text{ kN.cm (vigas do pórtico)}$$

$$M_{Rd} = 12154,07 \text{ kN.cm} > M_{Sd} = 11860,00 \text{ kN.cm (vigas entre filas AB - CD)}$$

Perfil Atende!

4.5.2 Dimensionamento dos pilares

Materiais:

Concreto		Aço do Perfil: F35/Q35	
Classe de concreto (fck; MPa)	20	Tensão de Escoamento (fy; MPa)	340
Peso Próprio (KN/m ²)	25	Módulo de Elasticidade (Es; MPa)	200000

4.5.2 .1 Pilares

Força Axial Máxima Solicitante de Cálculo: $N_{sd} = -689,46 \text{ kN}$ (Combinação 1)

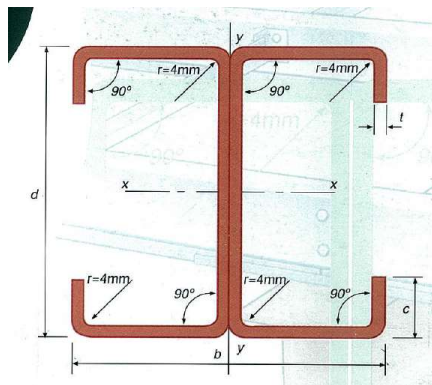
Momento Máximo Solicitante de Cálculo: $M_{sd} = 49,77 \text{ kN.m}$ (Combinação 4)

Perfil: Ie 300x170x25x6,3 - fabricante METFORM

Propriedades Geométricas:

d = 300 mm	rx = 11,167 cm
b = 170 mm	Iy = 702,0 cm ⁴
c = 25 mm	Wy = 46,8 cm ³
t = 6,3 mm	ry = 3,41 cm

$$\begin{aligned}
 A &= 60,3 \text{ cm}^2 & I_t &= 7,98 \text{ cm}^4 \\
 I_x &= 7507,4 \text{ cm}^4 & C_w &= 164000 \text{ cm}^6 \\
 W_x &= 500,49 \text{ cm}^3 & r_o &= 11,67 \text{ cm}
 \end{aligned}$$



Compressão

A força de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor calculado com base na flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção, e na flambagem distorcional.

Determinação de $N_{c,Rd}$ com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção

A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,2)$$

Método da largura efetiva

- a) Determinação da Tensão $\sigma = \chi f_y$ a ser aplicada na seção transversal do perfil

A força axial de flambagem global elástica N_e de um perfil com seção duplamente simétrica, cujo eixo x é o eixo de simetria, é o menor valor dentre os obtidos por flexão ou por flexo-torção.

- Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 7507,4}{(1 \times 300)^2} = 16465,57 \text{ kN}$$

- Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 702}{(1 \times 300)^2} = 1539,66 \text{ kN}$$

- Força axial de flambagem global elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{11,67^2} \left\{ 7700 \times 7,98 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 164000}{(1 \times 300)^2} \right] \right\} = 3092,31 \text{ kN}$$

Como $N_{ey} = 1539,66 \text{ kN} < N_{ez} = 3092,31 \text{ kN} < N_{ex} = 16465,57 \text{ kN} \rightarrow N_e = 1539,66 \text{ kN}$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Af_y}{Ne}} = \sqrt{\frac{60,3 \times 34}{1539,66}} = 1,15$$

Onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido da barra associado à flambagem global.

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow x = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,15^2} = 0,57$$

x é o fator de redução associado a instabilidade global da barra.

$$\sigma = x f_y = 0,57 \times 34 = 19,38 \text{ kN/cm}^2$$

- b) Determinação da área efetiva A_{ef}

- Verificação da Alma (elemento 1)

$$b = 30 - 4t = 30 - 4 \times 0,63 = 27,48 \text{ cm}$$

A equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local k é determinando analisando a Tabela 5 da ABNT NBR 14762:2010 presente no anexo B deste trabalho.

Caso a: $k = 4$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma} \right)} \right]} = \frac{\frac{27,48}{0,63}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{4 \times 20000}{19,38} \right)} \right]} = 0,715$$

$\lambda_p = 0,715 > 0,673$, haverá flambagem local no elemento 1

$$b_{ef} = b \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \leq b$$

$$b_{ef} = 27,48 \frac{1}{0,715} \left(1 - \frac{0,22}{0,715} \right)$$

$$b_{ef} = 26,60 \text{ cm}$$

➤ Verificação da Mesa (elemento 2)

O cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda é feito considerando-se as prescrições do item 9.2.3 apresentados pela ABNT NBR14762:2010.

$$b = 8,5 - 4t = 8,5 - 4 \times 0,63 = 5,98 \text{ cm}$$

O valor de referência de índice de esbeltez reduzido do elemento (λ_{po}) é calculado conforme equação a seguir:

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{E}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{5,98}{0,63}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{20000}{19,38}\right)}\right]} = 0,47$$

$\lambda_{po} = 0,47 \leq 0,673$, não há flambagem local na ausência de enrijecedores

Então não haverá flambagem local no elemento 2

$$b_{ef} = b = 5,98 \text{ cm}$$

➤ Verificação do enrijecedor de borda (elemento 3)

$$d = 2,5 - 2t = 2,5 - 2 \times 0,63 = 1,24 \text{ cm}$$

Na primeira iteração do cálculo por aproximações sucessivas, considera-se que o enrijecedor de borda está submetido a um diagrama de tensão uniforme, de valor igual ao da tensão que solicita a mesa do perfil.

Elemento AL $\rightarrow k = 0,43$

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{1,24}{0,63}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{0,43 \times 20000}{19,38}\right)}\right]} = 0,098$$

Como $\lambda_p = 0,098 < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = d = 1,24 \text{ cm}$$

Área efetiva

$$A_{ef} = A - A_{inef}$$

$$A = 60,3 \text{ cm}^2$$

$$A_{inef} = [(27,48 - 26,6) + 2x(5,98 - 5,98) + 2x(1,24 - 1,24)]x0,63 = 0,55 \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = \frac{60,3}{2} - 0,55 = 29,6 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{Perfil Ue}$$

$$A_{ef} = 2x29,6 = 59,2 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{Perfil Ie}$$

c) Determinação de $N_{c,Rd}$

$$N_{c,Rd} = \frac{x A_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{0,57x59,2x34}{1,2} = 956,08 \text{ kN/cm}^2$$

Método da resistência direta

O valor característico da força axial de compressão resistente $N_{c,Rk}$ deve ser tomado como o menor valor calculado para a flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Re}$, $N_{c,Rl}$ e $N_{c,Rdist}$, respectivamente.

A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{N_{c,Rk}}{\gamma} \quad (\gamma = 1,20)$$

- Flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção

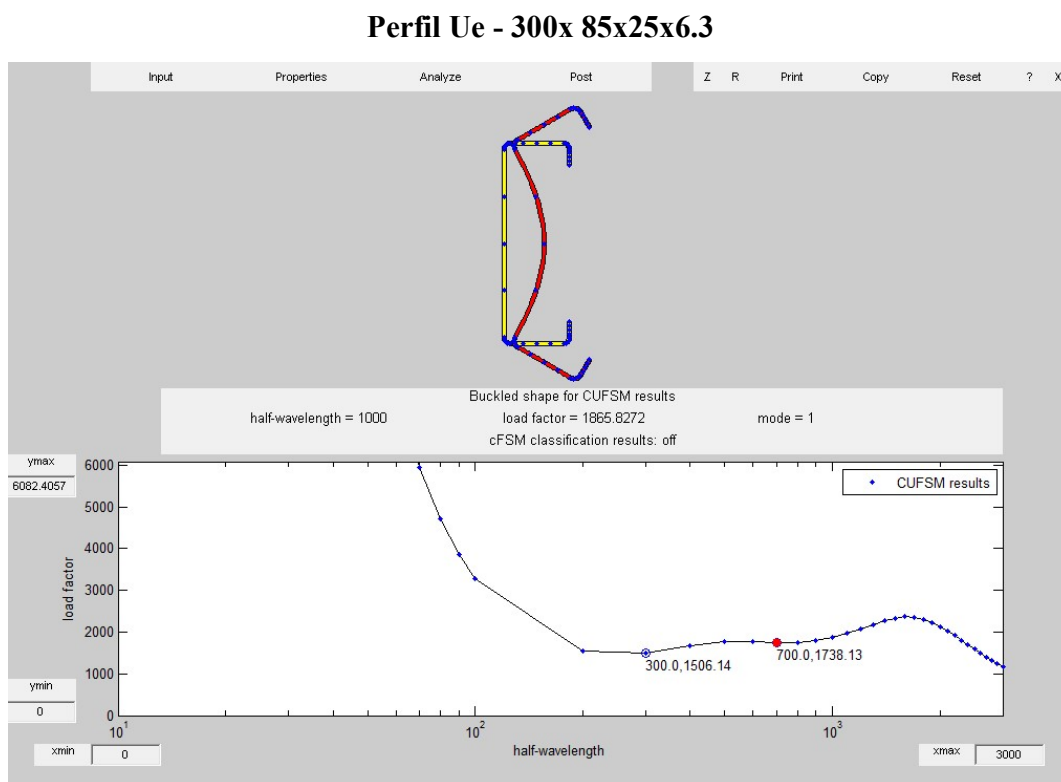
Força axial de flambagem global elástica $\rightarrow N_e = 1539,66 \text{ kN}$

Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global $\rightarrow \lambda_0 = 1,15$

$$N_{c,Re} = (0,658^{\lambda_0^2}) A_g f_y = (0,658^{1,15^2}) \times 60,3 \times 34 = 1178,91 \text{ kN}$$

- Flambagem local

Os valores da força axial de flambagem elástica local (N_l), e da força axial de flambagem distorcional elástica (N_{dist}), foram obtidos com base no programa CUFSM 3.12 e os resultados são apresentados a seguir:



Para meia onda com comprimento de 30 cm $\rightarrow N_l = 1506,14 \text{ kN}$

Para meia onda com comprimento de 70 cm $\rightarrow N_{dist} = 1738,13 \text{ kN}$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{N_{c,Re}}{N_l}} = \sqrt{\frac{1178,91}{2 \times 1506,14}} = 0,63$$

Para $\lambda_l = 0,63 < 0,776$, tem-se:

$$N_{c,Rl} = N_{c,Re} = 1178,91 \text{ kN}$$

- Flambagem distorcional

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_{dist}}} = \sqrt{\frac{60,3 \times 34}{2 \times 1738,13}} = 0,77$$

Para $\lambda_{dist} = 0,77 > 0,561$ tem-se:

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A_g f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} = \left(1 - \frac{0,25}{0,77^{1,2}}\right) \frac{60,3 \times 34}{0,77^{1,2}} = 1845,73 \text{ kN}$$

$$N_{c,Re} = N_{c,Rl} = 1178,91 \text{ kN} < N_{c,Rdist} = 1845,73 \text{ kN} \rightarrow N_{c,Rk} = 1178,91 \text{ kN}$$

Determinação de $N_{c,Rd}$

$$N_{c,Rd} = \frac{N_{c,Rk}}{\gamma} = \frac{1178,91}{1,2} = \mathbf{982,43 \text{ kN}}$$

Conclusão

A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor calculado pelo método da largura efetiva, com base na flambagem da barra por flexão e torção e pelo método da resistência direta, com base na flambagem global, local e distorcional. Assim o menor valor encontrado foi pelo método da largura efetiva:

$$N_{c,Rd} = \mathbf{956,08 \text{ kN}} \geq N_{c,Sd} = \mathbf{689,46 \text{ kN}}$$

Perfil Atende!

Flexão

O momento fletor resistente de cálculo M_{Ra} , deve ser tomado como o menor valor calculado com base no início do escoamento e com base na flambagem lateral com torção (FLT).

Momento calculado com base no início do escoamento

Método da largura efetiva

a) Verificação da mesa comprimida (elemento 2)

O cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda é feito considerando-se as prescrições do item 9.2.3 apresentados pela ABNT NBR14762:2010.

$$b = 8,5 - 4t = 8,5 - (4 \times 0,63) = 5,98 \text{ cm}$$

O valor de referência de índice de esbeltez reduzido do elemento (λ_{po}) é calculado conforme equação a seguir:

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{E}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{5,98}{0,63}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{20000}{34}\right)}\right]} = 0,628$$

$\lambda_{po} = 0,628 \leq 0,673$, não há flambagem local na ausência de enrijecedores.

Então não haverá flambagem local no elemento 2

$$b_{ef} = b = 5,98 \text{ cm}$$

b) Verificação do enrijecedor de borda (elemento 3)

$$d = 2,5 - 2t = 2,5 - (2 \times 0,63) = 1,24 \text{ cm}$$

Na primeira iteração do cálculo por aproximações sucessivas, considera-se que o enrijecedor de borda está submetido a um diagrama de tensão uniforme, de valor igual ao da tensão que solicita a mesa do perfil.

$$\text{Elemento AL} \rightarrow k = 0,43$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{1,24}{0,63}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{0,43 \times 20000}{34}\right)}\right]} = 0,130$$

Como $\lambda_p = 0,130 < 0,673$, não haverá flambagem local do elemento 3.

$$d_{ef} = d = 1,24 \text{ cm}$$

c) Verificação da alma (elemento 1)

Nesta etapa, a posição da Linha Neutra da Seção Efetiva (LNe) é determinada considerando-se um processo iterativo, conseguindo-se a convergência quando a posição da LNe de uma iteração não diferenciar mais do que 5% da posição da LNe da iteração anterior.

Os cálculos das propriedades da seção efetiva do perfil são realizados empregando-se o “método linear”, isto é, todo o material é admitido como concentrado na linha média da seção (linha do esqueleto) e os elementos são tratados isoladamente como linhas retas (parte plana) ou curvas (dobras). Os valores assim obtidos são multiplicados pela espessura t , de maneira a obter as propriedades geométricas desejadas.

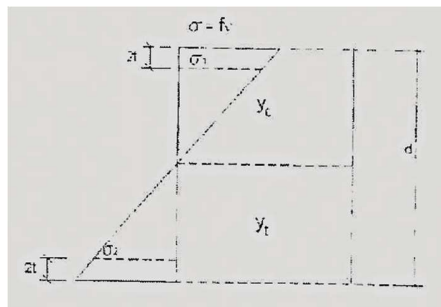
O Teorema do Eixo Paralelo é utilizado para os cálculos do momento de inércia da seção efetiva.

Primeira iteração: considerando a alma totalmente efetiva

Verificação da alma			
Elemento	L	y	L*y
Mesa Superior	5,98	0,32	1,88
Canto Superior Esquerdo	1,48	0,66	0,98
Canto Superior direito	1,48	0,66	0,98
Enrijecedor Superior	1,24	1,88	2,33
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00
Alma	27,48	15,00	412,20
Mesa Inferior	5,98	29,69	177,52
Enrijecedor Inferior	1,24	28,12	34,87
Canto Inferior Esquerdo	1,48	29,34	43,53

Canto Inferior Direito	1,48	29,34	43,53
Soma	47,85		717,82

$$y_{cg} = \frac{Ly}{L} = \frac{717,82}{47,85} = 15,00\text{cm}$$



Considerando-se a semelhança entre triângulos retângulos da Figura 0, tem-se:

$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg}-2t)}{y_{cg}} = \frac{34(15,00-2 \times 0,63)}{15,00} = 31,14 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t-2t)}{y_{cg}} = \frac{34(15,00-2 \times 0,63)}{15,00} = -31,14 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-31,14}{31,14} = -1,0$$

Onde Ψ é a relação σ_2/σ_1 empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local k .

A equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local k é determinado analisando a Tabela 5 da ABNT NBR 14762:2010 presente no anexo B deste trabalho.

$$\text{Caso d : } k = 4 + 2(1 - \Psi)^3 + 2(1 - \Psi)$$

$$k = 4 + 2(1 - (-1,0))^3 + 2(1 - (-1,0))$$

$$k = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma_1}\right)}\right]} = \frac{\frac{27,48}{0,63}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{24 \times 20000}{31,14}\right)}\right]} = 0,37$$

Como $\lambda_p = 0,37 < 0,673$, não haverá flambagem local na alma do perfil.

$$b_{ef} = b = 27,48 \text{ cm}$$

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = b - b_{ef} = 27,48 - 27,48 = 0,00 \text{ cm}$$

Como não há parte inefetiva da alma, a posição da linha neutra não sofre alteração.

Logo, a convergência é obtida. Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Verificação da alma					
Elemento	L	y	L*y	L*y ²	I' _x
Mesa Superior	5,98	0,32	1,88	0,59	0,00
Canto Superior Esquerdo	1,48	0,66	0,98	0,64	0,13
Canto Superior direito	1,48	0,66	0,98	0,64	0,13
Enrijece dor Superior	1,24	1,88	2,33	4,38	0,16
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alma	27,48	15,00	412,20	6183,00	1729,29
Mesa Inferior	5,98	29,69	177,52	5269,57	0,00
Enrijecedor Inferior	1,24	28,12	34,87	980,51	0,16
Canto Inferior Esquerdo	1,48	29,34	43,53	1277,35	0,13
Canto Inferior Direito	1,48	29,34	43,53	1277,35	0,13
Soma	47,85		717,82	14994,04	1730,12

$$I_{x'} = \sum Ly^2 + \sum I'_x - [(y_{cg})^2 \sum L] = 14994,04 + 1730,12 - [(15,00)^2 \times 47,85] = 5957,91 \text{ cm}^3$$

$$I_x = I_{x'} t = 5957,91 \times 0,63 = 3753,48 \text{ cm}^4$$

$I_{x'}$ é o momento de inércia da seção efetiva considerando-se o “método linear”.

I_x é o momento de inércia da seção efetiva do perfil.

O módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida é calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme segue:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{3753,48}{15,00} = 250,23 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Ue}$$

$$W_{ef} = 2 \times 250,23 = 500,46 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Ie}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{500,46 \times 34}{1,1} = \mathbf{15468,76 \text{ kN.cm}}$$

Momento calculado com base na flambagem lateral com torção (FLT)

O momento fletor resistente de cálculo referente à flambagem lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado por:

$$M_{Rd} = [x_{FLT} W_{c,ef} f_y] / \gamma$$

$W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base no método da largura efetiva, adotando $\sigma = x_{FLT} f_y$, ou no método da seção efetiva.

Método da largura efetiva

Obtido o valor de σ , procede-se os cálculos de forma análoga à momento calculado com base no início do escoamento, utilizando-se o processo iterativo para a determinação da posição da LNe da seção efetiva e das propriedades geométricas correspondentes.

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica, sujeitas a flexão em torno do eixo x, temos a seguinte expressão:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

$$N_{ey} = 1539,66 \text{ KN}$$

$$N_{ez} = 3092,31 \text{ KN}$$

$$M_e = 1 \times 11,67 \times (1539,66 \times 3092,31)^{0,5} = 25463,89 \text{ KN.cm}$$

$$W_c = W_x = 500,49 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_o = \left[\frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[\frac{(500,49 \times 34)}{25463,89} \right]^{0,5} = 0,82$$

Para $0,6 < \lambda_o = 0,82 < 1,336$

$$x_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_o^2) = 1,11(1 - 0,278 \times 0,82^2) = 0,90$$

$$\sigma = x_{FLT} f_y = 0,90 \times 34 = 30,6 \text{ kN/cm}^2$$

a) Verificação da mesa comprimida (elemento 2)

O cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda é feito considerando-se as prescrições do item 9.2.3 apresentados pela ABNT NBR14762:2010.

$$b = 8,5 - 4t = 8,5 - (4 \times 0,63) = 5,98 \text{ cm}$$

O valor de referência de índice de esbeltez reduzido do elemento (λ_{po}) é calculado conforme equação a seguir:

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{E}{\sigma} \right)} \right]} = \frac{\frac{5,98}{0,63}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{20000}{30,6} \right)} \right]} = 0,60$$

$\lambda_{po} = 0,60 < 0,673$ não há flambagem local na ausência de enrijecedores

Então não haverá flambagem local no elemento 2

$$b_{ef} = b = 5,98 \text{ cm}$$

b) Verificação do enrijecedor de borda (elemento 3)

$$d = 2,5 - 2t = 2,5 - (2 \times 0,63) = 1,24 \text{ cm}$$

Na primeira iteração do cálculo por aproximações sucessivas, considera-se que o enrijecedor de borda está submetido a um diagrama de tensão uniforme, de valor igual ao da tensão que solicita a mesa do perfil.

Elemento AL $\rightarrow k = 0,43$

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{1,24}{0,63}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{0,43 \times 20000}{30,6}\right)}\right]} = 0,124$$

Como $\lambda_p = 0,124 < 0,673$, não haverá flambagem local do elemento 3.

$$d_{ef} = d = 1,24 \text{ cm}$$

c) Verificação da alma (elemento 1)

Nesta etapa, a posição da Linha Neutra da Seção Efetiva (LNe) é determinada considerando-se um processo iterativo, conseguindo-se a convergência quando a posição da LNe de uma iteração não diferenciar mais do que 5% da posição da LNe da iteração anterior.

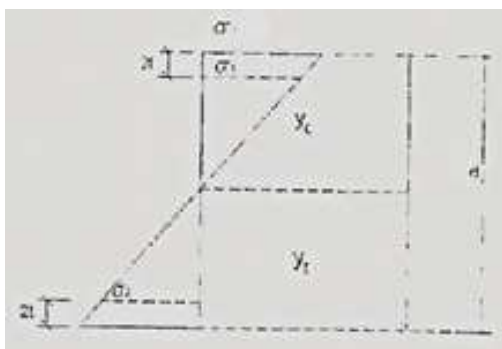
Os cálculos das propriedades da seção efetiva do perfil são realizados empregando-se o “método linear”, isto é, todo o material é admitido como concentrado na linha média da seção (linha do esqueleto) e os elementos são tratados isoladamente como linhas retas (parte plana) ou curvas (dobras). Os valores assim obtidos são multiplicados pela espessura t , de maneira a obter as propriedades geométricas desejadas.

O Teorema do Eixo Paralelo é utilizado para os cálculos do momento de inércia da seção efetiva.

Primeira iteração: considerando a alma totalmente efetiva

Verificação da alma			
Elemento	L	y	L*y
Mesa Superior	5,98	0,32	1,88
Canto Superior Esquerdo	1,48	0,66	0,98
Canto Superior direito	1,48	0,66	0,98
Enrijecedor Superior	1,24	1,88	2,33
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00
Alma	27,48	15,00	412,20
Mesa Inferior	5,98	29,69	177,52
Enrijecedor Inferior	1,24	28,12	34,87
Canto Inferior Esquerdo	1,48	29,34	43,53
Canto Inferior Direito	1,48	29,34	43,53
Soma	47,85		717,82

$$y_{cg} = \frac{Ly}{L} = \frac{717,82}{47,85} = 15 \text{ cm}$$



Considerando-se a semelhança entre triângulos retângulos da Figura 0, tem-se:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma(y_{cg}-2t)}{y_{cg}} = \frac{30,6(15,00-2 \times 0,63)}{15,00} = 28,03 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma(y_t-2t)}{y_{cg}} = \frac{30,6(15,00-2 \times 0,63)}{15,00} = -28,03 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-28,03}{28,03} = -1$$

Onde Ψ é a relação σ_2/σ_1 empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local k .

A equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local k é determinado analisando a Tabela 5 da ABNT NBR 14762:2010 presente no anexo B deste trabalho.

$$\text{Caso d : } k = 4 + 2(1 - \Psi)^3 + 2(1 - \Psi)$$

$$k = 4 + 2(1 - (-1))^3 + 2(1 - (-1))$$

$$k = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma_1}\right)}\right]} = \frac{\frac{27,48}{0,63}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{24 \times 20000}{28,03}\right)}\right]} = 0,35$$

Como $\lambda_p = 0,35 < 0,673$, não haverá flambagem local na alma do perfil.

$$b_{ef} = b = 27,48 \text{ cm}$$

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = b - b_{ef} = 27,48 - 27,48 = 0,00 \text{ cm}$$

Como não há parte inefetiva da alma, a posição da linha neutra não sofre alteração.

Logo, a convergência é obtida.

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Verificação da alma					
Elemento	L	y	L*y	L*y ²	I'x
Mesa Superior	5,98	0,32	1,88	0,59	0,00
Canto Superior Esquerdo	1,48	0,66	0,98	0,64	0,13
Canto Superior direito	1,48	0,66	0,98	0,64	0,13
Enrijecedor Superior	1,24	1,88	2,33	4,38	0,16
Elemento Inefetivo da Alma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alma	27,48	15,00	412,20	6183,00	1729,29
Mesa Inferior	5,98	29,69	177,52	5269,57	0,00
Enrijecedor Inferior	1,24	28,12	34,87	980,51	0,16
Canto Inferior Esquerdo	1,48	29,34	43,53	1277,35	0,13
Canto Inferior Direito	1,48	29,34	43,53	1277,35	0,13
Soma	47,85		717,82	14994,04	1730,12

$$I_{x'} = \sum Ly^2 + \sum I'_x - [(y_{cg})^2 \sum L] = 14994,04 + 1730,12 - [(15)^2 \times 47,85] = 5957,91 \text{ cm}^3$$

$$I_x = I_{x'} t = 5957,91 \times 0,63 = 3753,48 \text{ cm}^4$$

$I_{x'}$ é o momento de inércia da seção efetiva considerando-se o “método linear”.

I_x é o momento de inércia da seção efetiva do perfil.

O módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida é calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme segue:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{3753,48}{15,00} = 250,23 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Ue}$$

$$W_{ef} = 2 \times 250,23 = 500,46 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Perfil Ie}$$

$$M_{Rd} = \frac{x_{FLT} W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{0,9 \times 500,46 \times 34}{1,1} = \mathbf{13921,88 \text{ kN.cm}}$$

Método da resistência direta

O valor característico do momento fletor resistente M_{Rk} deve ser tomado como o menor valor calculado para a flambagem global, local e distorcional, M_{Re} , M_{Rl} e M_{Rdist} , respectivamente.

O momento fletor resistente de calculo M_{Rd} é dada por:

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma} \quad (\gamma = 1,10)$$

- Flambagem lateral com torção

Momento fletor de flambagem lateral com torção elástico $\rightarrow M_e = 25463,89 \text{ kN}$

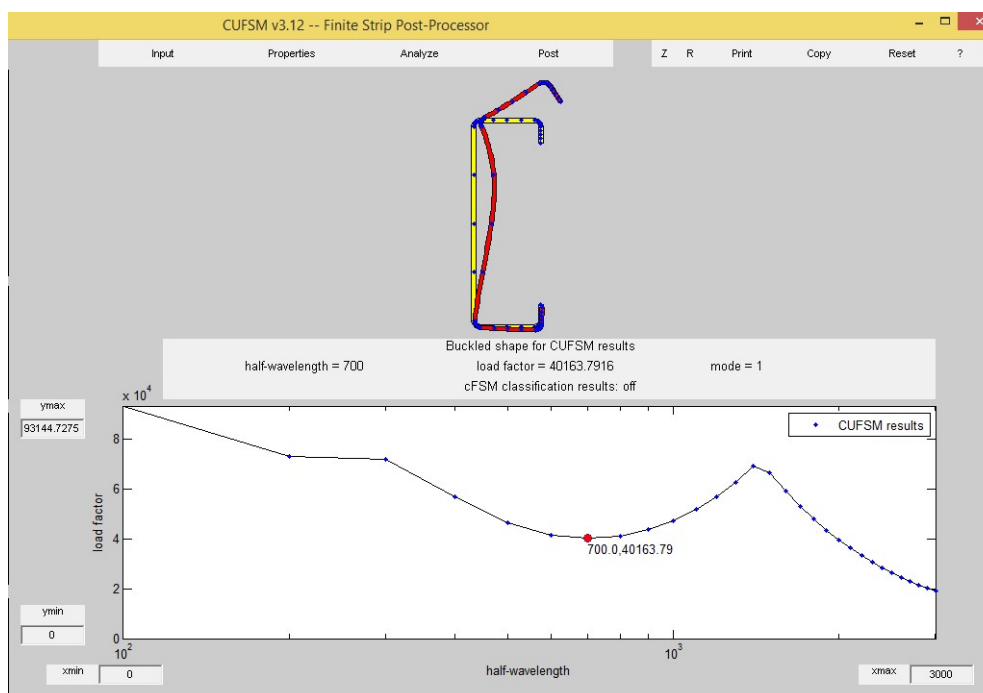
Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global $\rightarrow \lambda_0 = 0,82$

$$M_{Re} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2)Wf_y = 1,11x(1 - 0,278x0,82^2)x500,49x34 = 15357,72 \text{ kN.cm}$$

- Flambagem local

Os valores do momento fletor de flambagem elástica local (M_l), e do momento fletor de flambagem distorcional elástica (M_{dist}), foram obtidos com base no programa CUFSM 3.12 e os resultados são apresentados a seguir:

Perfil Ue - 300x 85x25x6.3



Para meia onda com comprimento de 70 cm → $M_l = 40163,79 \text{ kN.cm}$

$$M_{dist} = 40163,79 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{Re}}{M_l}} = \sqrt{\frac{15357,72}{2 \times 40163,79}} = 0,44$$

Para $\lambda_l = 0,44 < 0,776$ tem-se:

$$M_{Rl} = M_{Re} = 15357,72 \text{ kN.cm}$$

- Flambagem distorcional

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}} = \sqrt{\frac{500,49 \times 34}{2 \times 40163,79}} = 0,46$$

Para $\lambda_{dist} = 0,46 < 0,673$ tem-se:

$$M_{Rdist} = W f_y = 500,49 \times 34 = 17016,66 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rl} = M_{Re} = 15357,72 \text{ kN.cm} < M_{Rdist} = 17016,66 \text{ kN.cm} \rightarrow M_{Rk} = 15357,72 \text{ kN.cm}$$

Determinação de M_{Rd}

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma} = \frac{15357,72}{1,1} = \mathbf{13961,56 \text{ kN.cm}}$$

Conclusão

O momento fletor resistente de cálculo é o menor dos valores determinados com base no início do escoamento ou para a flambagem lateral com torção, sendo dimensionados pelo método da largura efetiva e método da resistência direta.

Assim, o menor valor encontrado foi pelo método da largura efetiva

$$M_{Rd} = 13921,88 \text{ kNcm} > M_{Sd} = 4977,00 \text{ kN.cm}$$

Perfil Atende!

Flexão Composta

A força axial solicitante de cálculo e o momento fletor e solicitante de cálculo devem satisfazer a seguinte equação de interação:

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo, considerada constante na barra;

$M_{x,Sd}$; $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos x e y, respectivamente;

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo;

$M_{x,Rd}$; $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente.

$$N_{c,Sd} = 689,46 \text{ kN}$$

$$M_{x,Sd} = 4977,00 \text{ kN.cm}$$

$$M_{y,Sd} = 0$$

$$N_{c,Rd} = 956,08 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = 13921,88 \text{ kNcm}$$

Resultando:

$$\frac{689,46}{956,08} + \frac{4977}{13921,88} = 1,08 > 1$$

Perfil aceitável!

4.5.3 Contraventamento

Neste trabalho foi abordado apenas os esforços transmitidos pelas barras comprimidas, desprezando-se as barras tracionadas. Assim, o dimensionamento do contraventamento será realizado considerando-se apenas a força axial solicitante de cálculo das barras comprimidas.

Materiais:

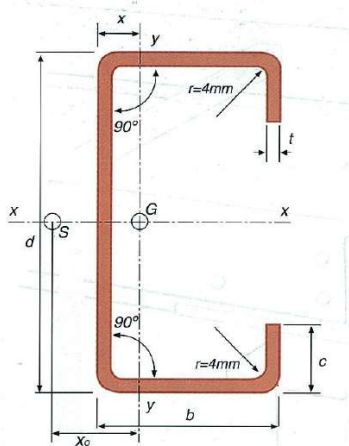
Aço do Perfil: ASTM A36	
Tensão de Escoamento (fy; MPa)	250
Módulo de Elasticidade (Es; MPa)	200000

Força Axial Máxima Solicitante de Cálculo: $N_{sd} = -33,07 \text{ kN}$ (Combinação 5)

Perfil: Ue 100x50x17x2,65- fabricante METFORM

Propriedades Geométricas:

d = 100 mm	rx = 3,94 cm
b = 50 mm	Iy = 19,3 cm ⁴
c = 17 mm	Wy = 6,0 cm ³
t = 2,65 mm	ry = 1,85 cm
A = 5,68 cm ²	It = 0,13 cm ⁴
Ix = 87,9 cm ⁴	Cw = 475,7 cm ⁶
Wx = 17,6 cm ³	ro = 5,98 cm



Compressão

A força de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor calculado com base na flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção, e na flambagem distorcional.

Determinação de $N_{c,Rd}$ com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção

A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,2)$$

Método da largura efetiva

- a) Determinação da Tensão $\sigma = \chi f_y$ a ser aplicada na seção transversal do perfil

A força axial de flambagem global elástica N_e de um perfil com seção monossimétrica, cujo eixo x é o eixo de simetria, é o menor valor dentre os obtidos por flexão ou por flexo-torção.

- Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x :

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 87,9}{(424,26)^2} = 96,39 \text{ kN}$$

- Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y :

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 19,3}{(212,13)^2} = 84,66 \text{ kN}$$

- Força axial de flambagem global elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{5,98^2} \left\{ 7700 \times 0,13 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 475,7}{(212,13)^2} \right] \right\} = 86,34 \text{ kN}$$

- Força axial de flambagem global elástica por flexo-torção:

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez} \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$= \frac{96,39 + 84,66}{2 \left[1 - \left(\frac{-4,10}{5,98} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 96,39 \times 84,66 \left[1 - \left(\frac{-4,10}{5,98} \right)^2 \right]}{(96,39 + 84,66)^2}} \right] = 53,43 \text{ kN}$$

Como $N_{exz} = 53,43 \text{ kN} < N_{ey} = 84,66 \text{ kN} \rightarrow N_e = 53,43 \text{ kN}$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{5,68 \times 25}{53,43}} = 1,63$$

Onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido da barra associado à flambagem global.

$$\lambda_0 = 1,63 > 1,5 \rightarrow x = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = \frac{0,877}{1,63^2} = 0,33$$

x é o fator de redução associado a instabilidade global da barra.

$$\sigma = x f_y = 0,33 \times 25 = 8,25 \text{ kN/cm}^2$$

b) Determinação da área efetiva A_{ef}

➤ Verificação da Alma (elemento 1)

$$b = 10 - 4t = 10 - (4 \times 0,265) = 8,94 \text{ cm}$$

A equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local k é determinando analisando a Tabela 5 da ABNT NBR 14762:2010 presente no anexo B deste trabalho.

Caso a: $k = 4$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma} \right)} \right]} = \frac{\frac{8,94}{0,265}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{4 \times 20000}{8,25} \right)} \right]} = 0,153$$

$\lambda_p = 0,153 < 0,673$, não haverá flambagem local no elemento 1

$$b = b_{ef} = 8,94 \text{ cm}$$

➤ Verificação da Mesa (elemento 2)

O cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda é feito considerando-se as prescrições do item 9.2.3 apresentados pela ABNT NBR14762:2010.

$$b = 5 - 4t = 5 - 4 \times 0,265 = 3,94 \text{ cm}$$

O valor de referência de índice de esbelteza reduzido do elemento (λ_{po}) é calculado conforme equação a seguir:

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{E}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{3,94}{0,265}}{\left[0,623 \sqrt{\left(\frac{20000}{8,25}\right)}\right]} = 0,485$$

$\lambda_{po} 0,485 < 0,673$, não haverá flambagem local na ausência de enrijecedores.

Então não haverá flambagem local no elemento 2

$$b_{ef} = b = 3,94 \text{ cm}$$

➤ Verificação do enrijecedor de borda (elemento 3)

$$d = 1,7 - 2t = 1,7 - 2 \times 0,265 = 1,17 \text{ cm}$$

Na primeira iteração do cálculo por aproximações sucessivas, considera-se que o enrijecedor de borda está submetido a um diagrama de tensão uniforme, de valor igual ao da tensão que solicita a mesa do perfil.

Elemento AL $\rightarrow k = 0,43$

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{1,17}{0,265}}{\left[0,95\sqrt{\left(\frac{0,43 \times 20000}{8,25}\right)}\right]} = 0,144$$

Como $\lambda_p = 0,144 < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = d = 1,17 \text{ cm}$$

Área efetiva

$$A_{ef} = A - A_{inef}$$

$$A = 5,68 \text{ cm}^2$$

$$A_{inef} = 0$$

$$A_{ef} = A = 5,68 \text{ cm}^2$$

c) Determinação de $N_{c,Rd}$

$$N_{c,Rd} = \frac{x A_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{0,33 \times 5,68 \times 25}{1,2} = 39,05 \text{ kN}$$

Método da seção efetiva

Para o cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção, tem-se pelo método da seção efetiva que:

$$x = 0,33 \text{ (calculado anteriormente pelo MLE)}$$

$$t_r = 0$$

$$b_f = 50 \text{ mm}$$

$$b_w = 100 \text{ mm}$$

$$D = 17 \text{ mm}$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{50}{100} = 0,5$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{17}{100} = 0,17 \rightarrow 0,1 \leq \frac{D}{b_w} \leq 0,3$$

Com base na Tabela 10 da ABNT NBR 14762:2010, presente no anexo C deste trabalho, para a relação acima que se enquadra no caso b, com $\mu < 0,2$

$$kl = 18,7$$

A força axial de flambagem local elástica pode ser calculado por:

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b_w/t)^2} A = 18,7 \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,3^2) \left(\frac{10}{0,265}\right)^2} 5,68 = 1348,31 \text{ kN}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{x A_{ef} f_y}{N_l}} = \sqrt{\frac{0,33 \times 5,68 \times 25}{1348,31}} = 0,186$$

$\lambda_p = 0,186 < 0,673$, portanto não há flambagem local

$$A_{ef} = A = 5,68 \text{ cm}^2$$

$$N_{c,Rd} = \frac{x A_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{0,33 \times 5,68 \times 25}{1,2} = 39,05 \text{ kN}$$

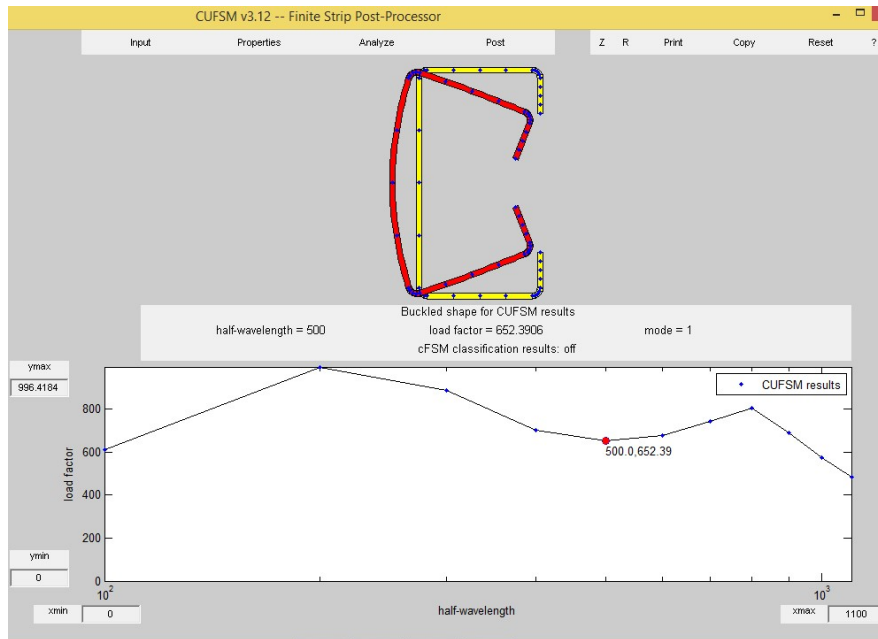
Verificação a flambagem distorcional

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas a flambagem distorcional, a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = x_{dist} A f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,2)$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}} \right)^{0,5}$$

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica. Para o cálculo de N_{dist} foi utilizado o programa CUFSM 3.12, baseado no método das Faixas Finitas, o resultado está apresentado a seguir:



Para meia onda com comprimento de 50 cm $\rightarrow N_{dist} = 652,39 \text{ kN}$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{5,68 \times 25}{652,39} \right)^{0,5} = 0,467$$

$\lambda_{dist} = 0,467 < 0,561$, então x_{dist} que corresponde ao fator de redução da força axial de compressão, associado a flambagem distorcional é igual 1.

$$x_{dist} = 1$$

$$N_{c,Rd} = \frac{x_{dist} Af_y}{\gamma} = \frac{1 \times 5,68 \times 25}{1,2} = 118,33 \text{ kN}$$

Conclusão

A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$, deve ser tomada como o menor valor calculado com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção e na flambagem distorcional.

Para a flambagem por flexão, torção ou flexo-torção foram utilizados o método da largura efetiva e o método da seção efetiva, a qual foram encontrado o mesmo resultado de $N_{c,Rd} = 39,05 \text{ kN}$, sendo este valor menor que o calculado com base na flambagem distorcional.

$$N_{c,Rd} = 39,05 \text{ kN} > N_{sd} = 33,07 \text{ kN}$$

Perfil Atende!

4.6 Consumo de aço

Após verificar que os perfis adotados atendem as condições de dimensionamento da estrutura, realizou-se o cálculo do consumo de aço desta edificação, os valores estão apresentados a seguir:

Tabela 9- Consumo de aço da edificação em PFF

Consumo de Aço Perfil Formado a Frio					
Perfil	Elemento	Qtd. de barras	Comp. (m)	Massa (Kg/m)	Subtotal (Kg)
Cx 300x170x25x4,75	Vigas AB-CD	24	6	36,45	5248,80
Cx 300x170x25x2,25	Vigas B-C	17	3	17,74	904,74
Cx 300x170x25x4,75	Vigas Pórtico	34	4,425	36,45	5483,90
Ue 100x50x17x2,65	Contraventamento	16	4,243	4,46	302,78
Ie 300x170x25x6,3	Pilar	52	3	47,34	7385,04
Total (Kg)					19325,26

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2018.

5 CONCLUSÃO

Toda a edificação foi modelada no programa SAP 2000 afim de obter os esforços solicitantes e os deslocamentos nos nós das barras. Para obter os deslocamentos foi realizada a análise de 1ª e 2ª ordem, constatou-se que a estrutura em perfis formados a frio é classificada de média deslocabilidade, estando o coeficiente B_2 , que corresponde a relação entre os deslocamentos obtidos em uma análise não linear geométrica e aqueles obtidos numa análise linear geométrica, no intervalo entre 1,1 e 1,4, conforme apresentado na memória de cálculo.

Na análise presente no Manual de Construção em Aço do CBCA, que utiliza como estrutura os perfis laminados e soldados classificou-se a mesma de pequena deslocabilidade, a qual o coeficiente B_2 não ultrapassou o valor de 1,10.

Notou-se que com o emprego de perfis formados a frio na estrutura da edificação ela tornou-se mais suscetível ao efeito $P - \Delta$ (efeito global de segunda ordem), o que não inviabilizou a utilização desses perfis, apenas modificou a forma de obter os esforços. Os esforços solicitantes foram obtidos considerando os efeitos globais e locais de segunda ordem, também foi necessário levar em conta os efeitos das imperfeições iniciais de material, que corresponde em reduzir a rigidez á flexão e rigidez axial das barras para 80% dos valores originais, considerando o módulo de elasticidade reduzido no programa.

Os perfis adotados foram determinados substituindo os perfis soldados e laminados por perfis formados a frio de inércia próxima aos que foram determinados pelo manual, assim todos os perfis inicialmente adotados atenderam as prescrições de dimensionamento, no entanto os perfis formados a frios apresentaram um consumo de aço 18% maior do que com a utilização de perfis soldados e laminados.

A diferença de consumo de aço confere devido a mudança na classificação da estrutura obtendo maiores esforços solicitantes, no manual ainda algumas vigas foram dimensionadas como vigas mistas o que possibilitou a utilização de perfis menores. A estrutura presente neste trabalho em perfil formado a frio também poderia ser refinada realizando um novo dimensionamento com perfis menores afim de tornar a estrutura mais leve.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

CATÁLOGO DE SISTEMAS METFORM. Perfis de Aço. São Paulo, 2011. 16 p.

CHODRAUI, G. M. B.; Flambagem por Distorção da Seção Transversal em Perfis de Aço Formados a Frio Submetidos à Compressão Centrada e à Flexão. 2003. 186f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto. São Paulo: Pearson, 2016. 496 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL; BELLEI, I.H.; BELLEI, H.N.. Manual de Construção em Aço: Edifícios de pequeno porte estruturados em aço. 4. ed. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2011. 107 p.

KIMURA, E. F. A.. Comportamento Estrutural de Perfis Formados a Frio com Seção Transversal Composta de U Enrijecido em Temperaturas Elevadas. 2014. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PIRES FILHO, C. A. B.. Avaliação da Aplicação da Análise de Segunda Ordem em Pórticos de Edifícios Correntes em Aço. 2011. 261 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RODRIGUES, F. C. Estudos avançados em estruturas de aço de perfis formados a frio: Apostila para o curso de especialização em estruturas, v.1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

RODRIGUES, F. C. (coordenador); CALDAS, R. B.. Manual de Construção em Aço: Steel Framing: Engenharia. Rio de Janeiro IABr/CBCA, 2014. 192 p.

SILVA, E.L; PIERIN, I.; PIGNATTA E SILVA V. Manual de Construção em Aço: Estruturas compostas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2014. 192 p.

SILVA, E.L; PIGNATTA E SILVA V. Manual de Construção em Aço: Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2008. 119 p.

SILVA, V.P.; FRUCHTENGARTEN, J.; CAMPELLO, E.M.B. Dimensionamento de estruturas de aço: Apostila para a disciplina PEF 2402 – estruturas metálicas e de madeira. São Paulo: Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 150 p.

APÊNDICE A

Quadro dos esforços solicitantes de cálculo obtidos pelo Programa SAP 2000

Resumo dos esforços Solicitantes Sap 2000						
Pórticos						
Filas A e D						
Combinação	Pilar			Viga		
	N (KN)	M (KN.m)	V (KN)	N (KN)	M (KN.m)	V (KN)
1 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 0	-409,86	-5,36	3,03	0	-10,04	11,51
2 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 90	-409,86	-5,06	3,38	0	-8,63	11,18
3 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV0	-409,86	-5,13	3,41	0	-8,7	11,22
4 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV90	-409,87	-22,52	6,33	0	-25,29	18,55
5 NL: 1,4 CP + 1,4 CV0 + 0,7CA	-363,99	-4,81	3,20	0	-8,45	11,09
6 NL: 1,4 CP + 1,4 CV90 + 0,7 CA	-364	-36,56	10,76	0	-37,15	23,63
Filas B e C						
1 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 0	-689,46	-49,45	39,6	0	-49,45	82,78
2 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 90	-689,09	-49,33	39,54	0	-49,33	82,72
3 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV0	-688,27	-49,60	49,90	0	-49,60	82,84
4 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV90	-689,39	-49,77	39,55	0	-49,77	82,93
5 NL: 1,4 CP + 1,4 CV0 + 0,7CA	-580,86	-32,44	26,22	0	-32,44	53,69
6 NL: 1,4 CP + 1,4 CV90 + 0,7 CA	-582,72	-32,71	25,65	0	-32,71	53,83

Resumo dos esforços Solicitantes Sap 2000

Eixo 1										
Combinação	Pilar N (KN) M (KN.m) V (KN)	Vigas AB e CD			Vigas BC			Contraventamento		
		N (KN)	M (KN.m)	V (KN)	N (KN)	M (KN.m)	V (KN)	N (KN)	M (KN.m)	V (KN)
1 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 0	0	0	90,09	60,06	0	0	0	-11,09	-0,3	-0,01
2 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 90	0	0,13	90,09	60,06	0	0	0	-14,91	-0,03	-0,01
3 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV0	0	0	90,09	60,06	0	0	0	-21,39	-0,02	-0,01
4 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV90	0	0	90,09	60,06	0	0	0	-10,64	-0,03	-0,01
5 NL: 1,4 CP + 1,4 CV0 + 0,7CA	0	0	79,7	53,13	0	0	0	-27,02	-0,02	-0,01
6 NL: 1,4 CP + 1,4 CV90 + 0,7 CA	0	0	79,7	53,13	0	0	0	-9,22	-0,03	-0,01
Eixo 2										
1 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 0	0	0	118,6	92,4	0	19,92	26,57	-	-	-
2 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 90	0	0,2	118,6	92,4	-0,06	19,92	26,57	-	-	-
3 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV0	0	0	118,6	92,4	0	19,92	26,57	-	-	-
4 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV90	0	0	118,6	92,4	0	19,92	26,57	-	-	-
5 NL: 1,4 CP + 1,4 CV0 + 0,7CA	0	0	117,5	78,33	0	18,62	24,83	-	-	-
6 NL: 1,4 CP + 1,4 CV90 + 0,7 CA	0	0	117,5	78,33	0	18,62	24,83	-	-	-
Eixo 3										
1 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 0	0	0	90,09	60,06	0	14,18	18,9	-17,98	-0,5	-0,02
2 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + FHE 90	0	0,13	90,09	60,06	0,04	14,18	18,9	-22,08	-0,05	-0,02
3 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV0	0	0	90,09	60,06	0	14,18	18,9	-28,82	-0,04	-0,01
4 NL: 1,4 CP + 1,4 CA + 0,84 CV90	0	0	90,09	60,06	0	14,18	18,9	-18,42	-0,05	-0,02
5 NL: 1,4 CP + 1,4 CV0 + 0,7CA	0	0	79,7	53,13	0	13,31	17,75	-33,07	-0,03	-0,01
6 NL: 1,4 CP + 1,4 CV90 + 0,7 CA	0	0	79,77	53,13	0	13,31	17,75	-15,84	-0,04	-0,01

ANEXO A

Coeficiente de Ponderação das Combinações Últimas Normais

ABNT NBR 8800 - Projeto de revisão – Setembro 2006

19

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_r = \gamma_n \gamma_B$

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{1) 3)}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{1) 4)}					
	Efeito da temperatura ²⁾		Ação do vento		Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	
Normais	1,20		1,40		1,50	
Especiais ou de construção	1,00		1,20		1,30	
Excepcionais	1,00		1,00		1,00	

NOTAS:

¹⁾ Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

²⁾ O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado como ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

³⁾ Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem iguais ou superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isto não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

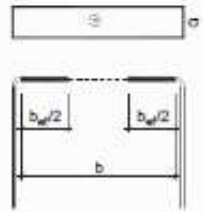
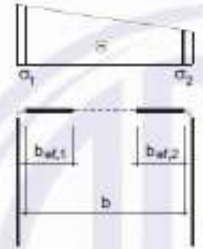
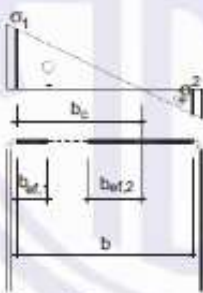
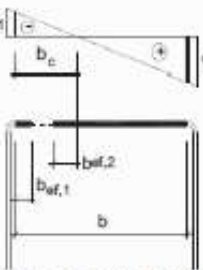
⁴⁾ Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem iguais ou superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isto não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

Tabela 2 — Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis

Ações		γ_{r2} ¹⁾		
		ψ_0	ψ_1 ⁴⁾	ψ_2 ⁵⁾
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ³⁾	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
¹⁾ Ver alínea c) de 4.7.5.3. ²⁾ Edificações residenciais de acesso restrito. ³⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ⁴⁾ Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar ψ_1 igual a 1,0. ⁵⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.				

ANEXO B

Coeficiente de Flambagem Local (k) para elementos AA

Tabela 5 — Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AA		
Caso a		$k = 4,0$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
Caso c	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.</p>	$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
Caso d	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.</p>	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = 0,5b_{ef}$ sendo $b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$

NOTA O sinal (-) indica compressão.

ANEXO C

Valores do Coeficiente de flambagem local k_l

Tabela 13 — Valores do coeficiente de flambagem local k_l da seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b			Caso c
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido			Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
		$\mu \leq 0,2$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,3$	
0,2	18,4	32,0	25,8	21,2	31,0
0,3	9,6	29,3	23,8	19,7	28,9
0,4	5,6	24,8	20,7	18,2	25,6
0,5	3,6	18,7	17,6	16,0	19,5
0,6	2,6	13,6	13,3	13,0	14,2
0,7	1,9	10,2	10,1	10,1	10,6
0,8	1,5	7,9	7,9	7,9	8,2
0,9	1,2	6,2	6,3	6,3	6,6
1,0	1,0	5,1	5,1	5,1	5,3

NOTA 1 b_f , b_w e D são a largura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.

NOTA 2 $\mu = D/b_w$.

NOTA 3 Para valores intermediários interpolar linearmente.