

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE UMA COLUNA METÁLICA COMPOSTA

por

Francisco Luiz Bresolin

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2013

ESTUDO DE UMA COLUNA METÁLICA COMPOSTA

por

Francisco Luiz Bresolin

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, Junho de 2013.

“Nossa maior fraqueza está em desistir”

Thomas Edison

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Angelo Pivotto Bresolin e Vera Lúcia Nuss Bresolin, pelo apoio e incentivo em todos os sentidos.

Ao meu irmão Angelo Augusto Bresolin, pelo exemplo a ser seguido e pela ajuda direta e indireta.

À minha noiva Crisliane Boito, que esteve sempre ao meu lado, apoiando com paciência e sabedoria, estando comigo nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Aos amigos e familiares próximos e distantes, que sempre demonstraram carinho e compreensão pelas ausências durante a graduação.

Aos colegas e amigos, que tive a oportunidade de conhecer nas empresas que trabalhei, pelo conhecimento e experiência que adquiri que foram enriquecedores na minha formação pessoal e profissional.

Ao meu orientador Ignacio Iturrioz pela ajuda e incentivo na realização deste trabalho.

Aos professores, e agora colegas engenheiros, pelo conhecimento transmitido.

Ao povo brasileiro pelo financiamento dos meus estudos.

RESUMO

Bresolin, F. B. **ESTUDO DE UMA COLUNA METÁLICA COMPOSTA**. 2013. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

O emprego de perfis compostos metálicos como elemento estrutural permite dar maior flexibilidade às estruturas que podem ser construídas, maior altura e maiores vãos podem ser atingidos empregando esta tipologia estrutural. Neste trabalho metodologias de análise para determinação de carga de flambagem são comparadas através de seus resultados. São utilizadas metodologias numéricas e analíticas neste comparativo. Entre os métodos utilizados é avaliado um método proposto pela norma NBR 8800 que combina resultados numéricos com expressões da norma, esse método apresentou resultados consistentes. Estes métodos híbridos que combinam expressões analíticas e métodos numéricos simples permitem chegar à determinação da carga de colapso em forma mais simples. Também é realizado um estudo para medir a sensibilidade do colapso deste tipo de estrutura frente a diversos cenários de dano. Finalmente uma discussão dos resultados obtidos é apresentada.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas metálicas compostas, Flambagem, Plasticidade

ABSTRACT

Bresolin, F. B. **STUDY OF A METALIC COMPOSED BEAM**. 2013. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

The usage of composed metallic profiles as structural elements allows more flexibility to the structures that can be built, bigger heights and spans can be achieved by using this structural typology. In this work, analytical methodologies for the determination of buckling load are compared through their results. Numerical and analytical methodologies are used in this comparison. Among the methods is evaluated a method of NBR 8800 that combines numerical results with the standard expressions, this method showed consistent results. Hybrid methods that combine analytical expressions and simple numerical methods allow the determination of the collapse charge in simpler ways, keeping the general view of how the structure works. In this context, in this work a specific composed element is studied, analyzing it with different calculation methodologies. A study is also performed to measure the collapse sensitivity of this kind of structure facing several damage scenarios. Finally, a discussion of the obtained results is presented.

KEYWORDS: Composed metal structures, Buckling, Plasticity.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
2.1. Flambagem	2
2.2. Influência do Cortante em Flambagem	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4. METODOLOGIA.....	5
4.1. Análise estrutural unifilar	5
4.2. Sistema de finitos utilizado	5
5. DESCRIÇÃO DO MODELO ESTUDADO.....	6
5.1. Análise matricial unifilar	7
5.2. Análise por elementos finitos.....	8
5.3. Análise empregando as Normas NBR 14762 e NBR 8800	9
6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	9
7. ESTUDO DA PERDA DE CAPACIDADE DE CARGA FRENTE AO DESGASTE	11
8. CONCLUSÃO	14
ANEXO A	16

1. INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas apresentam muitas vantagens frente à outros sistemas estruturais, entre eles o fato do metal possuir um alto potencial de reciclagem. A alta resistência do aço faz com que as estruturas construídas sejam leves. Entretanto a esbelteza das estruturas metálicas implicam em formas de colapso associadas à interação entre a flambagem e a plasticidade. Como desvantagem da utilização de estruturas metálicas, pode-se considerar a sua fácil deterioração frente a ações climáticas (corrosão e outras formas de degradação afetam notavelmente seu desempenho) e seu comportamento frente a ação do fogo. Outro inconveniente de trabalhar com estruturas de aço é a complexidade das expressões que permitem verificar sua resistência, pois são baseadas tradicionalmente em expressões analíticas calibradas através de ensaios experimentais. Estas expressões e metodologias propostas pelas normas, muitas vezes podem ser utilizadas em planilhas de cálculo, mas isso o torna menos compreensível, ocorrendo a possibilidade do usuário perder a perspectiva do que esta fazendo. Frente a este problema surge a possibilidade de trabalhar com metodologias híbridas que combinam expressões analíticas, fornecidas pelas normas com soluções numéricas simples. Estas soluções simples são, por exemplo, a solução de uma análise linear elástica ou a determinação de uma carga crítica de flambagem elástica. Este tipo de análise não precisa de um especialista em análise numérica nem de um sistema de análise sofisticado.

Dentro das estruturas metálicas a utilização de seções compostas é um caminho que permite obter super elementos verticais, utilizando elementos de dimensões reduzidas, que possam atingir grandes alturas ou vigas que possam vencer grandes vãos.

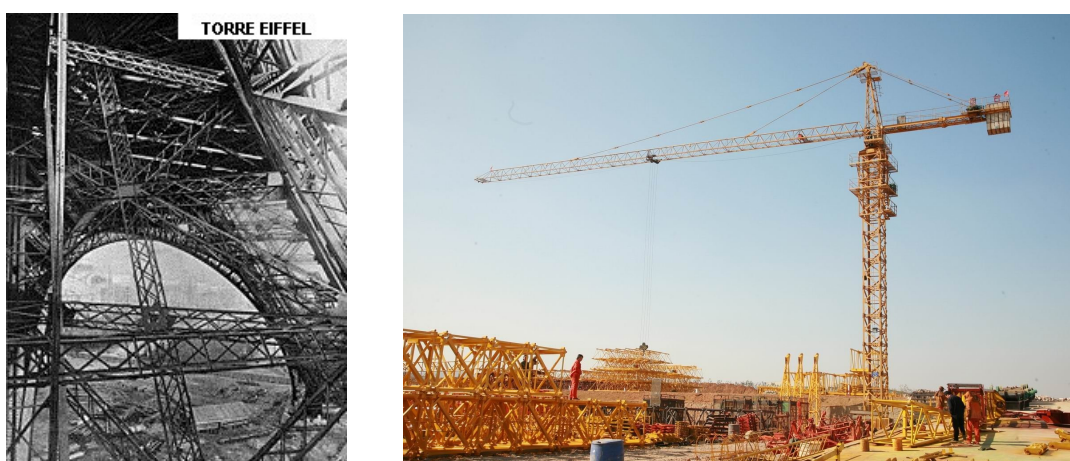


Figura 1.1 – Estruturas metálicas formadas por elementos compostos.

OBJETIVO GERAL

Estudar o comportamento de estruturas metálicas compostas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar uma estrutura metálica específica, empregando diversas metodologias de análise;
- Estudar a forma em que a estrutura composta analisada perde sua capacidade de carga frente a diferentes cenários de dano;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os conceitos por trás das formulações utilizadas neste trabalho.

Abaixo algumas das definições usadas neste trabalho:

P_{cr} – Carga crítica de flambagem elástica;

P_u – Carga de colapso por flambagem;

Perfil composto – Perfil formado por dois ou mais perfis principais ligados por barras de ligação em forma de treliça ou talas espaçadas;

2.1. Flambagem

É um fenômeno de instabilidade que acontece em estruturas submetidas à esforços compressivos. Este efeito aparece devido à dependência da rigidez do sistema solicitado com os esforços de compressão. Esta dependência da resposta da estrutura com o nível de solicitação compressiva, implicando em um comportamento não linear.

Flambagem de Euler (flambagem por flexão): O primeiro estudioso a formular o fenômeno de instabilidade foi Leonhard Euler que o propôs em 1757. Ele realizou a análise de uma viga na qual o esforço normal interagia com a rigidez à flexão. A expressão deduzida por Euler é válida somente para comportamento elástico linear do material, carregamento perfeitamente centrado e aplicado lentamente, hipótese dos pequenos deslocamentos e ausência de imperfeições. [Popov, 1978]

Na sequência é apresentada a equação diferencial que permite determinar a carga crítica de flambagem considerando a influência da distorção da seção transversal pelo esforço cortante.

Flambagem de Euler com influência do Cortante: Considere uma estrutura rotulada em ambas as extremidades e com uma carga P aplicada em uma extremidade, conforme a figura abaixo:

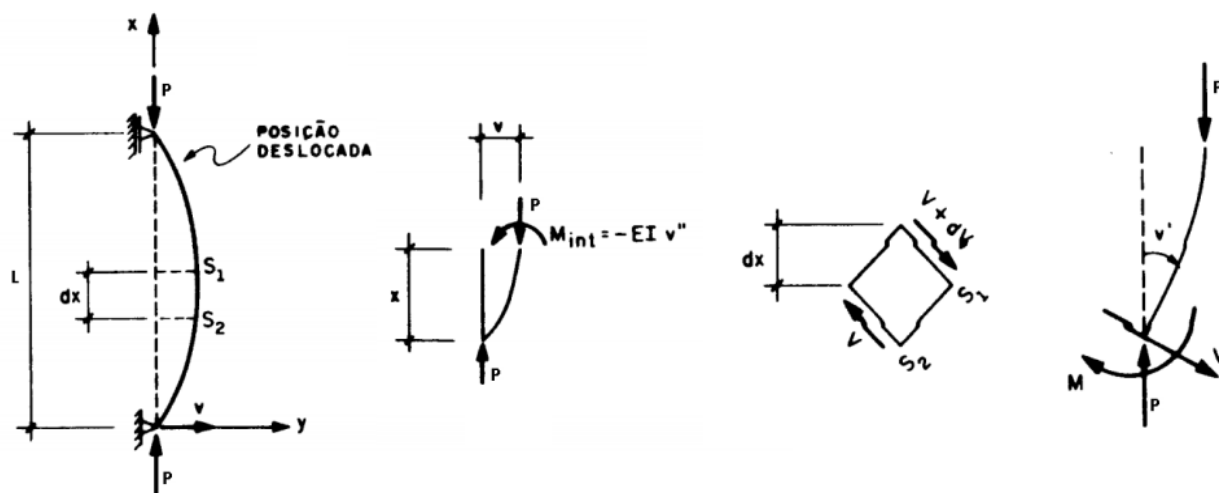


Figura 2.1 – Esboço Coluna Flambada representando Flexão e Cortante [Paula, 1994]

Considerando um deslocamento lateral v , surge então um momento atuando na estrutura M igual a Pv e um cortante V igual a Pv' , transcrevendo na equação de viga elástica:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{Pv}{EI} + \chi GAP \frac{d^2 v}{dx^2} \quad (2.1)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de inércia na direção na qual o elemento flamba, P é a carga aplicada sobre a coluna, A é a área da seção transversal e χ é um coeficiente que considera a distribuição dos esforços cortantes na seção transversal, que depende da forma da seção. Para seções retangulares o valor de χ é próximo a "1,2". Para seções compactas, seções I ou tubo seu valor é de aproximadamente "3". v é o deslocamento em y e x é a posição onde está sendo avaliada a equação no sentido do comprimento.

A solução da equação (diferencial) elástica da viga apresentada na Equação acima fica:

$$v = C_1 \text{sen}(\omega x) + C_2 \text{cos}(\omega x) \quad (2.2)$$

Onde C_1 e C_2 são as constantes a serem determinadas pelas condições de contorno. Com as condições de contorno da Figura 2.1 aplicadas ao problema, chegando seguinte equação que deve ser satisfeita:

$$C_1 \operatorname{sen}(\omega L) = 0 \quad C_2 = 0 \quad (2.3)$$

Onde L é o comprimento da coluna. A solução trivial da equação é $C_1 = 0$. Ao atingir a carga crítica de flambagem, surge a seguinte solução não-trivial:

$$\omega L = \sqrt{\frac{P}{EI} \frac{1}{1 - \chi GA}} L = n\pi \quad (2.4)$$

Que resulta na expressão:

$$P_{cr,n} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \frac{1}{\left(1 + \chi GA \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}\right)} \quad (2.5)$$

Onde n pode ter qualquer valor inteiro, com $n = 1$ representado a menor carga de flambagem. Generalizando, para $n = 1$ e usando nesta expressão um fator k que ajusta esta equação para outras condições de contorno, a expressão (2.5) fica:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \frac{1}{\left(1 + \chi GA \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2}\right)} \quad (2.6)$$

Onde P_{cr} é a carga crítica de flambagem.

A influência de considerar a deformação devida à distorção por cortante, no cálculo de elementos simples (seções maciças ou formadas por perfis simples caixão H, C entre outros) é pequena (aproximadamente 2%). Mas no caso de seções compostas a seção equivalente da viga sofre uma distorção considerável (o valor do χ equivalente cresce e neste caso considerar a deformação por cortante é importante). Para maiores informações sobre o coeficiente χ consultar Cowper, 1966.

Também no caso de cascas e ou placas comprimidas podem aparecer fenômenos de estabilidade que podem ser formulados analiticamente.

Em estruturas metálicas muitas vezes a flambagem e a plasticidade acontecem simultaneamente, sendo que o colapso se manifesta como uma interação destes dois fenômenos, ou como uma combinação de diferentes modos de flambagem (o perfil flambando como elemento unifilar e sua interação com as placas do mesmo que flambam como placas, flambagem local e distorcional). Mais informação sobre este particular é encontrado na extensa bibliografia que existe sobre o tema. (cita-se neste trabalho Camotín, 2001)

2.2. Influência do Cortante em Flambagem

Em colunas de seção composta a influência do esforço cortante é maior do que em vigas simples de alma cheia. Isso é devido à tensão cisalhante ser absorvida pela alma da seção. Em colunas de seção composta o ponto médio da seção geralmente é pouco rígido devido aos elementos que compõe essa região serem as barras de ligação que unem as vigas principais.

Portanto na análise de flambagem de colunas formadas por vigas de seção composta, deve ser levada em consideração a influência do esforço cortante na determinação das cargas críticas. Segue abaixo, um algoritmo de como pode ser obtido o coeficiente de forma χ em colunas de seção composta. Considere uma coluna formada por uma seção composta qualquer, como a apresentada na Figura 2.2:

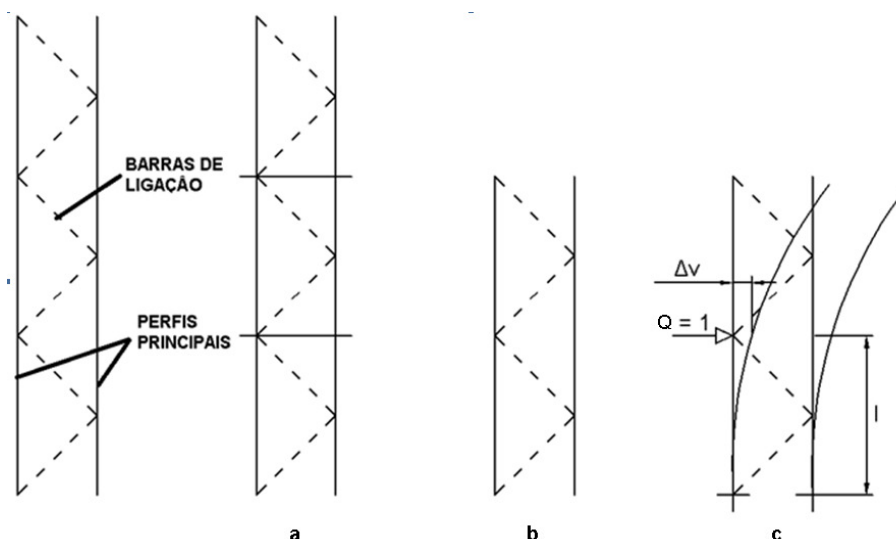


Figura 2.2 – Passo a passo para determinação do χ em estruturas compostas.

Abaixo estão descritos os passos presentes na figura e os passos realizados através de equações:

- Divida essa coluna no sentido do comprimento em módulos, os módulos devem ser os menores possíveis e todos os módulos devem ser iguais;
- Empilhe dois desses módulos;
- Engaste uma das extremidades. Na metade do comprimento da viga resultante, aplique uma carga unitária e perpendicular à linha neutra, no sentido em que se deseja obter o coeficiente de forma χ ;
- Obtenha a deformação cisalhante do módulo, através da equação:

$$\varphi \cong \frac{\Delta v}{l} \quad (2.7)$$

Onde φ é a deformação cisalhante, Δv é o deslocamento no sentido da força unitária no ponto de aplicação da força e l é o comprimento de um módulo.

- O termo χ é obtido pela equação:

$$\chi = \frac{\varphi AG}{Q} \quad (2.8)$$

Onde Q é a carga unitária aplicada no sentido perpendicular à linha neutra da viga, A é a área da seção transversal da seção composta (somente os perfis principais contribuem para a seção transversal) e G é o módulo de elasticidade transversal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É possível encontrar nas revistas técnicas internacionais numerosos trabalhos relacionados ao comportamento de perfis compostos, como exemplo, cita-se o trabalho de Georgieva et alli, 2012, que discute a conservatividade dos coeficientes utilizados nas normas americanas e européias para colunas compostas que usam perfil Z. Mostrando com dados experimentais que para este tipo de coluna, estas normas são altamente conservativas.

El Aghoury et alli, 2010, compara dados experimentais com códigos europeus e norte-americanos de projeto de colunas compostas e resultados de elementos finitos. Mostra que os resultados experimentais são compatíveis tanto com os códigos quanto com a análise em finitos, embora o próprio autor afirme ter usado colunas curtas nos testes (realizados testes com colunas compostas formadas por três módulos).

Uziak e Gizejowski, 1994, comparam duas metodologias de análise de estruturas compostas, pelo “EUROCODE 3” como referência e pelo “Polish National Steelwork Design Code” com o objetivo de testá-lo, esse último apresenta um cálculo mais simplificado. O autor utiliza para comparação uma coluna composta formada por duas vigas U. O método em teste atende os requisitos propostos.

Bonab et alli, 2013, apresenta dados experimentais de colunas composta por perfis U de chapa dobrada ligadas por cantoneiras. O autor compara uma análise elástica utilizando a equação de flambagem de Euler com efeito de cortante com resultados experimentais, dentro do regime elástico os resultados são satisfatórios. Embora nove dos dezoito experimentos tenham sido descartados por terem saído do regime elástico, por sofrerem não linearidades como plasticidade e imperfeições geométricas.

Paula, 1994, mostra os fundamentos por trás das principais teorias de flambagem. Neste trabalho o autor atenta ao fato que em estruturas compostas não devem ser negligenciadas as influências do cortante na obtenção das cargas críticas de flambagem.

No âmbito da UFRGS Grigoletti, 2008, e Bonatto, 2009, utilizam modelos não-lineares de elementos finitos implementados no software Ansys 13 considerando a incorporação de imperfeições e comparam estes modelos com resultados experimentais, o modelo de elementos finitos não linear utilizado neste trabalho está baseado no desenvolvido por estes dois autores.

Pizzato, 2012, utiliza também este modelo de elementos finitos aplicado na análise da seção mestra de um barco. Este autor propõe um índice global para avaliar a sensibilidade da perda de espessura nas diferentes partes da embarcação.

O índice proposto por este autor é apresentado a seguir:

$$I_{nl} = \frac{\Delta Colapso_n\tilde{a}o_linear}{\Delta Colapso_linear} = \frac{1 - \frac{P_u}{P_{u,i}}}{1 - \frac{A f_y}{A_i f_y}} \quad (3.1)$$

Onde P_u é a carga última com a espessura reduzida, $P_{u,i}$ é a carga última com a espessura original, A_{red} é a área transversal com espessura reduzida, A_i é a área original e f_y é a tensão de escoamento do material. Variantes sobre esta expressão são discutidas na Dissertação de Pizzatto (2012), a potencialidade do índice será também explorada sobre uma viga metálica composta submetida a diferentes cenários de perda de espessura.

4. METODOLOGIA

Nesta seção são descritas brevemente as ferramentas utilizadas para realizar as análises:

4.1. Análise estrutural unifilar

Para a análise unifilar foi utilizado o software MASTAN2. Este é um software livre que permite realizar análise linear e não linear em estruturas unifilares. O programa permite levar em conta a influência da distorção na análise introduzindo o fator de forma como uma propriedade geométrica. Deste software foram utilizadas a análise linear estática e análise de flambagem linear.

A análise linear estática se trata de resolver a equação $[K]\{u\} = \{P\}$, onde $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura, $\{u\}$ é o deslocamento dos nós e $\{P\}$ o carregamento aplicado. Para a análise de flambagem linear, o software segue a metodologia apresentada no ANEXO A deste trabalho.

4.2. Sistema de finitos utilizado

O software de elementos finitos utilizado é o ANSYS 14.0, se trata de um software comercial desenvolvido pela ANSYS INC para análise numérica de problemas de engenharia.

Os elementos utilizados no presente trabalho são descritos a seguir: Para as vigas principais da coluna composta foi usado o elemento de casca SHELL181, este é um elemento

apropriado para análise de estruturas classificadas como cascas finas ou para estruturas classificadas com cascas moderadamente espessas. Baseia-se na teoria de Mindlin-Reissner (para cascas semi-espessas).

É um elemento de quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, que pode ter deslocamentos nas direções x , y e z além de rotações sobre os eixos x , y e z . Este elemento é adequado para casos em que ocorrem grandes rotações e grandes deformações em análises não-lineares. Na Figura 4.1 se apresenta a geometria, e o sistema de coordenadas do elemento.

Para as ligações entre as vigas principais da coluna composta foi usado o elemento de viga BEAM188, este é um elemento apropriado para análise de vigas moderadamente curtas. Esse elemento baseia-se na teoria de vigas de Timoshenko (para vigas curtas).

É um elemento de dois nós com seis graus de liberdade em cada nó. Este elemento é adequado para casos em que ocorrem grandes rotações e grandes deformações em análises não-lineares. A abaixo é mostrada a geometria, e o sistema de coordenadas do elemento.

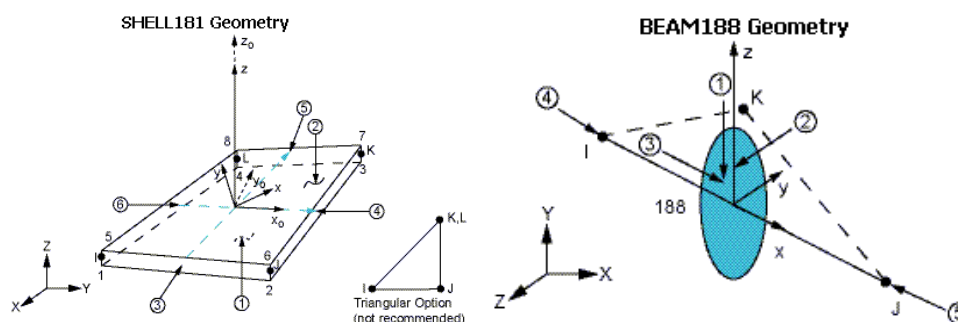


Figura 4.1 – Geometria dos elementos SHELL181 e BEAM188 [ANSYS, 1994]

5. DESCRIÇÃO DO MODELO ESTUDADO

Nesta seção são analisadas quatro colunas compostas com o objetivo de comparar as metodologias apresentadas neste trabalho. A coluna composta analisada tem altura de 4,5 metros, mas pode-se dividi-la em módulos de 300 mm totalizando 15 módulos. Um esboço do módulo de 300 mm pode ser visualizado na Figura 5.1 (a), e os diferentes elementos que compõem a coluna composta na Figura 5.1 (b).

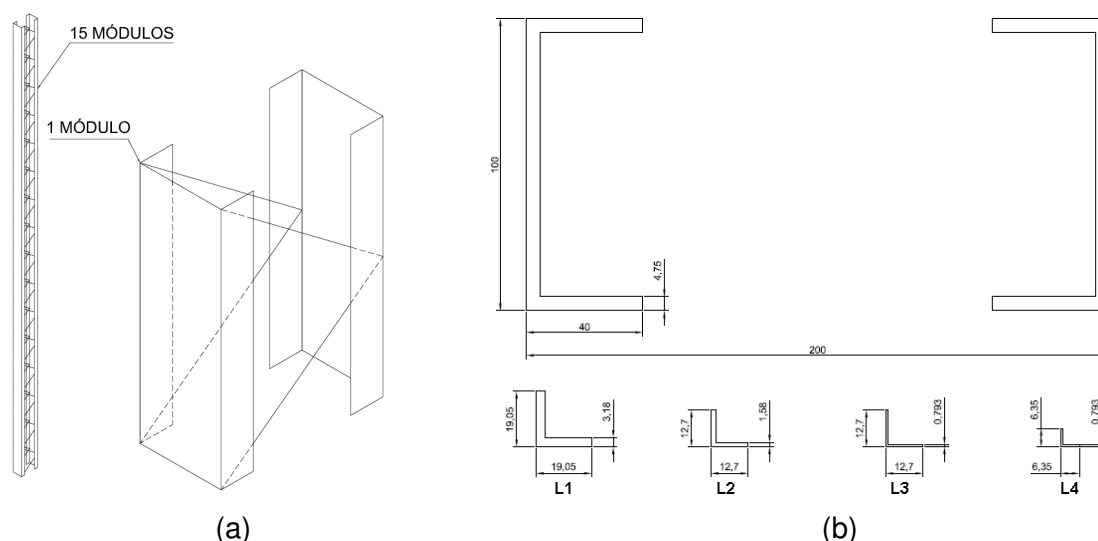


Figura 5.1 – (a) Configuração geométrica da coluna composta, (b) elementos utilizados na construção da coluna composta (dimensões em milímetros).

Na Figura 5.1 (a) as barras de ligação (cantoneiras) são representadas por linhas. Na Figura 5.1 (b) estão desenhadas na mesma escala a viga U e as cantoneiras com as quais

serão construídas as quatro configurações estudadas. Abaixo, listados, os quatro casos estudados nesta seção:

- Perfil Principal: U 100x40x4,75 Barra de Ligação: L19,05x19,05x3,18
- Perfil Principal: U 100x40x4,75 Barra de Ligação: L12,7x12,7x1,58
- Perfil Principal: U 100x40x4,75 Barra de Ligação: L12,7x12,7x0,793
- Perfil Principal: U 100x40x4,75 Barra de Ligação: L6,35x6,35x0,793

São alteradas somente as barras de ligação entre as análises realizadas. As propriedades relevantes dos perfis estão na tabela abaixo.

Tabela 5.1 – Propriedades do perfis utilizados nas configurações analisadas

Propriedades			U 100x40x4,75	Perfil Composto	L1	L2	L3	L4
					L19,05x19,05x3,18	L12,7x12,7x1,58	L12,7x12,7x0,793	L6,35x6,35x0,793
Espessura	T	mm	4,75	Não aplica	3,18	1,58	0,793	0,793
Altura	H	mm	100	200	19,05	12,7	12,7	6,35
Largura	L	mm	40	100	19,05	12,7	12,7	6,35
Dist. Centróide	x'	mm	9,1	Não aplica	5,9	3,8	3,5	1,9
Área seção transv.	A	mm ²	767	1534	111	37,6	19,5	9,44
Momento Inércia x	I _{xx}	mm ⁴	1059000	2118000	3608	562,9	308,6	35,29
Momento Inércia y	I _{yy}	mm ⁴	110900	12345000	3608	562,9	308,6	35,29

As propriedades relevantes do material utilizado estão na tabela abaixo (valores adotados).

Tabela 5.2 – Tabela das propriedades do material utilizado

Propriedades			
Mód. Elast. Longitudinal	E	MPa	200000
Mód. Elast. Transversal	G	MPa	77000
Tensão de Escoamento	f _y	MPa	250
Tensão de Ruptura	σ _r	MPa	400

As estruturas foram analisadas impondo as seguintes condições de contorno.

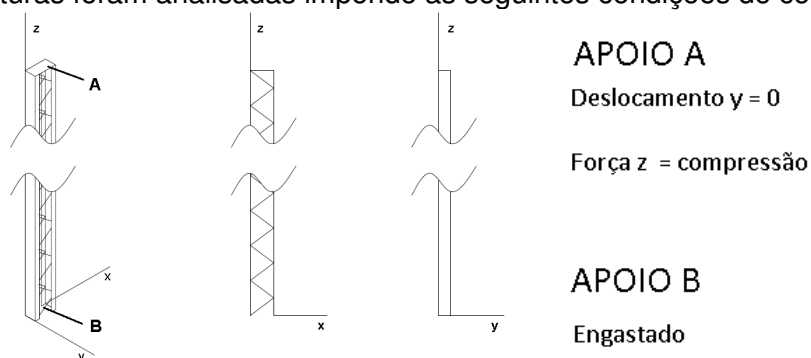


Figura 5.2 – Descrição das condições de contorno.

5.1. Análise matricial unifilar

Utilizando as equações 2.7 e 2.8, são obtidos os valores χ para cada modelo. A partir daí são simulados modelos unifilares pelo método de análise matricial (MASTAN2):

- (i) Utilizando o valor do coeficiente χ , numa coluna unifilar equivalente a coluna composta;
- (ii) Modelando a coluna composta;

Abaixo representação dos modelos gerados:

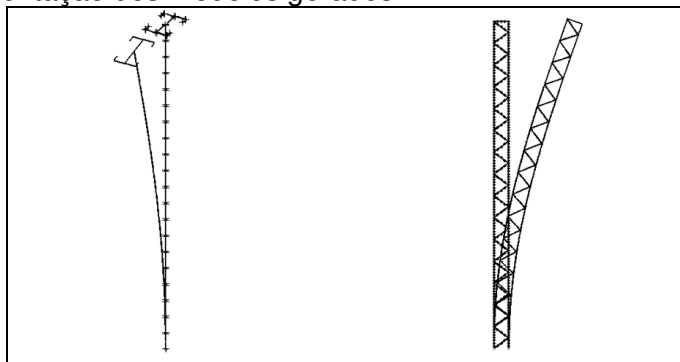


Figura 5.3 – À esquerda da figura o modelo unifilar (i), à direita da figura modelo unifilar composto (ii)

Na tabela abaixo estão os valores obtidos para χ e as cargas críticas obtidas pelo modelo (i) e (ii). No modelo (i) a coluna foi dividida em vinte elementos e no modelo (ii) cada barra foi dividida em quatro elementos.

Tabela 5.3 – Tabela com os valores obtido nos modelos unifilares

Barra Ligação	L1	L2	L3	L4
χ (adimensional)	7,54	19,85	35,54	66,66
P_{cr} (i)	295141	286213	275479	256028
P_{cr} (ii)	363444	337580	307925	258943

5.2. Análise por elementos finitos

Nesta seção é analisada a estrutura por elementos finitos de casca e elementos unifilares:

- (iii) Análise linear via elementos finitos para determinação da carga crítica;
- (iv) Análise não-linear via elementos finitos determinando a carga última;

As figuras abaixo representam alguns detalhes do modelo e as condições de contorno:

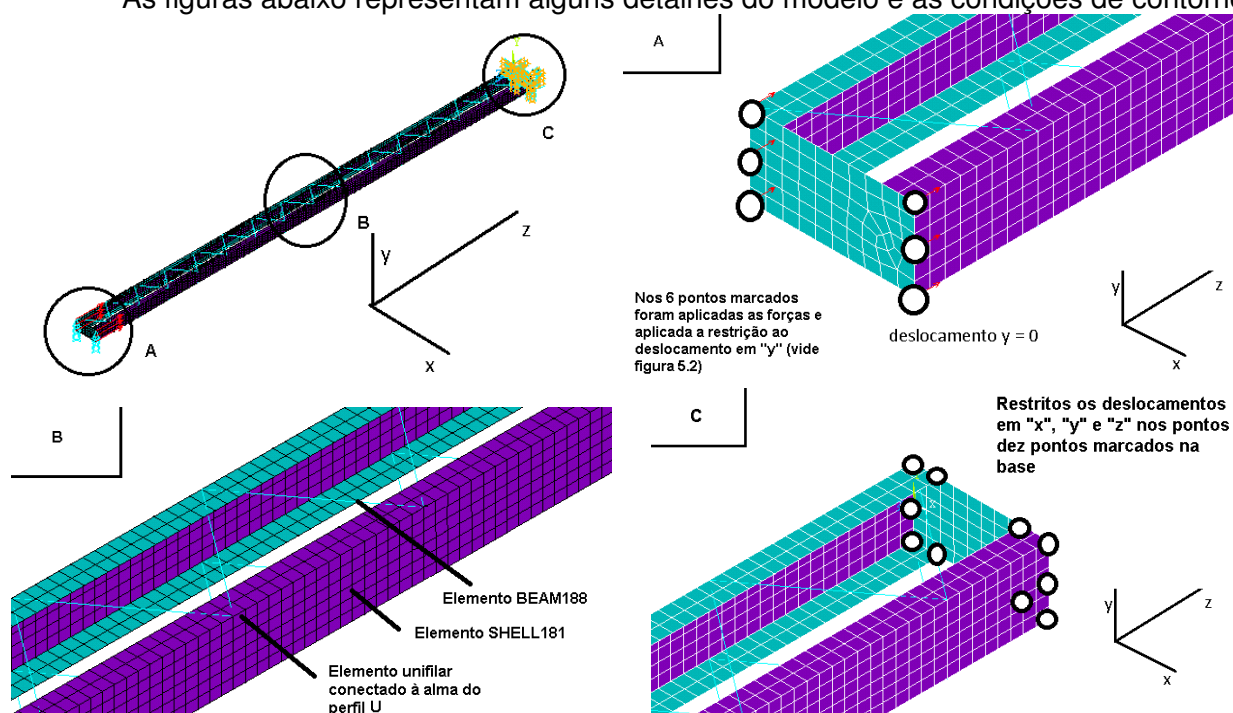


Figura 5.4 – Modelo de elementos finitos da coluna composta em estudo

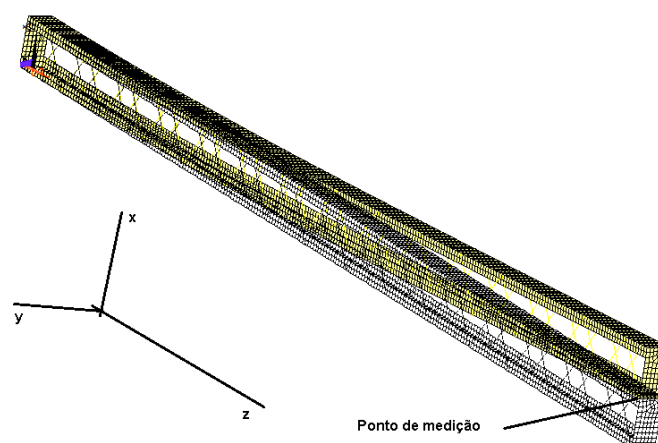


Figura 5.5 – Modelo da coluna deformada (instante em que o “Ponto de medição” deslocou 15 mm na direção do eixo “z”)

Na Tabela 5.4 são apresentadas as cargas críticas de flambagem elástica e as cargas últimas obtidas considerando um modelo de análise não linear físico e geométrico. A análise não-linear empregou plasticidade e imperfeições geométricas. Abaixo os dados obtidos destas análises.

Tabela 5.4 – Cargas determinadas pela análise de elementos finitos (unidades em [N])

Barra Ligação	L1	L2	L3	L4
P_{cr} (iii)	338340	323150	305200	275520
P_u (iv)	222898	220729	216022	206285

5.3. Análise empregando as Normas NBR 14762 e NBR 8800

Nesta seção são obtidos os valores de:

- (v) Carga última pela norma NBR 14762;
- (vi) Carga última pela norma NBR 8800 na metodologia híbrida, utilizou-se os valores de carga crítica obtidos na análise elástica linear via elementos finitos (iii);

Tabela 5.5 – Cargas últimas pelas Normas (unidades em [N])

Barra Ligação	L1	L2	L3	L4
P_u – (v)	224929	224929	224929	224929
P_u – (vi)	238632	233369	226650	214166

A estrutura analisada neste trabalho não pode ser verificada pela norma NBR 14762, pois não atende ao requisito do índice de esbeltez ser menor de 200. Cabe salientar que a norma não considera o valor do cortante na flambagem, por isso, ao utilizar barras de ligação menos resistentes a carga última que a norma NBR 14762 determina, não diminui.

6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, através dos dados obtidos é feita uma comparação das metodologias. Primeiramente as cargas críticas serão avaliadas.

Tomando como referência os resultados de (iii) (obtido via análise de elementos finitos), A seguir se apresentam a comparação dos resultados.

Tabela 6.1 – Cargas críticas de flambagem [kN] para cada método e a razão destas cargas com a com carga de referência

Barra Ligação	L1	L2	L3	L4
$P_{cr} - (i)$	0,87 295	0,89 286	0,90 275	0,93 256
$P_{cr} - (ii)$	1,07 363	1,04 338	1,01 308	0,94 259
$P_{cr} - (iii)$	1,00 338	1,00 323	1,00 305	1,00 276
Euler com cortante	0,87 295	0,89 286	0,90 276	0,93 257

Na Figura 6.1 são apresentadas as cargas críticas de flambagem elástica aplicando diferentes metodologias, os resultados se mostraram compatíveis. O resultado obtido com o modelo (i), unifilar da viga composta para diagonais da mais alta rigidez, mostrou certa divergência o qual deveria ser melhor estudado. O método “Euler com cortante” está descrito na seção 2.1, o valor de carga crítica é obtido pela Equação (2.6).

A seguir é realizada a comparação dos resultados em termos das cargas últimas obtidas nas análises realizadas. Foram descartados desta tabela os valores obtidos pela NBR 14762, devido à norma não cobrir os casos estudados neste trabalho.

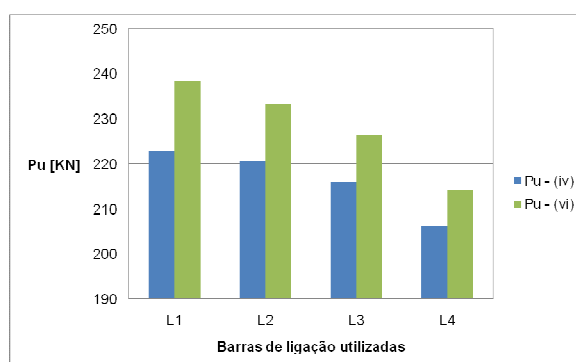
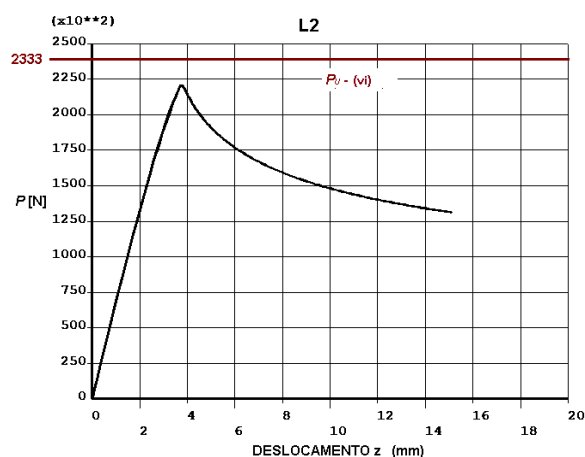
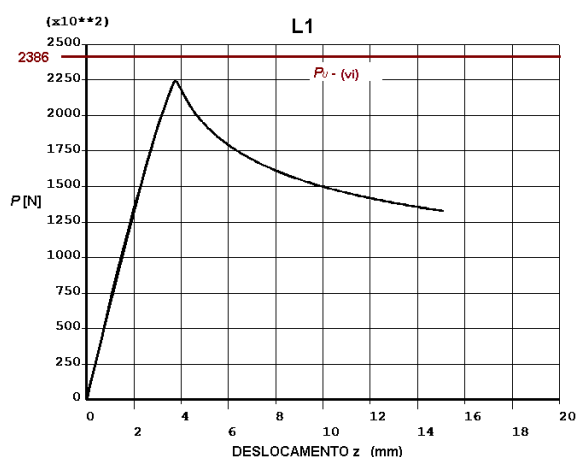


Figura 6.1 – Cargas últimas obtidas



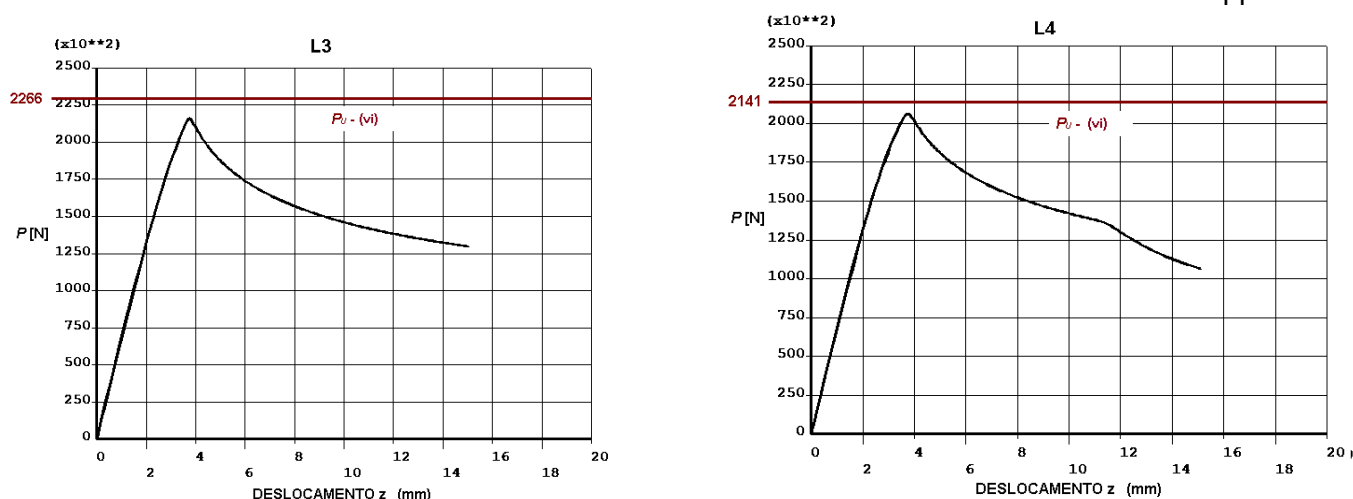


Figura 6.2 – Gráficos mostrando o comportamento das quatro configurações estudadas (L1 a L4), frente a carga aplicada versus deslocamento do “Ponto de medição” (conforme Figura 5.5). Estão plotadas as cargas últimas pelo método (iv).

Com a análise não linear realizada (iv) tomada como referência. O gráfico mostra que o método híbrido da norma NBR 8800 (vi), apresenta resultados compatíveis com a análise não linear.

7. ESTUDO DA PERDA DE CAPACIDADE DE CARGA FRENTE AO DESGASTE

Nesta seção é avaliada uma coluna composta de aço, comumente utilizada em galpões industriais, estas colunas geralmente sofrem degradação devido ao ambiente em que se encontram. Um dos casos onde essa degradação é crítica ocorre nas barras de ligação diagonais, onde se acumulam dejetos ácidos sobre a estrutura.

Estes dejetos ácidos atacam a pintura expondo o metal base, iniciando um processo rápido de deterioração. O procedimento para minimizar este efeito é a lavagem da estrutura para retirada destes resíduos, se o grau de deterioração da pintura for grande, a pintura antiga deve ser removida a superfície da estrutura deve ser lixada e realizada uma repintura. Abaixo imagens ilustrando esta situação:



Figura 7.1 – Coluna composta coberta por dejetos ácidos

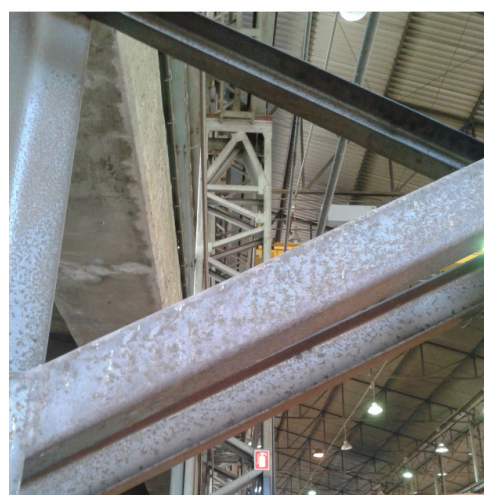


Figura 7.2 – Barra de ligação, após realização de lavagem

Em colunas, as barras de ligação dos perfis principais, por se encontrarem em diagonal, favorecem o acúmulo de dejetos sobre as mesmas. Por isso, essa é a região das colunas que mais sofre com este tipo de degradação.

No caso desta patologia de deterioração se desenvolver, a seção das barras estudadas diminui influenciando no valor da carga de colapso da coluna composta.

Nesta seção se estudam vários cenários de deterioração através da evolução dos índices de dano globais.

Para este estudo é proposto um índice chamado de “Índice de Não Linearidade Logarítmico” ou $I_{nl.log}$, baseado no índice proposto por Pizzato, 2012, chamado índice não linear I_{nl} , apresentado na Equação (3.1) deste trabalho. A nova proposta de índice é apresentada abaixo:

$$I_{nl.log} = \frac{1 - \log\left(\frac{P_u}{P_{u,i}}\right)}{1 - \log\left(\frac{A_{f_y}}{A_i f_y}\right)} \quad (7.1)$$

Na Tabela 7.1 é apresentado um comparativo entre o método I_{nl} e o método $I_{nl.log}$. Considere estruturas, cada qual com um grau de deterioração (cada estruturas tem área 10% menor que a anterior). Devido às características desta estrutura hipotética, para as primeiras quatro configurações, quando a seção diminui sua área de seção transversal em 10 %, a carga última diminui em 5%. A partir da quinta configuração a diminuição da carga crítica é de 50%. Os valores para as nove configurações analisadas são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Valores das cargas últimas e das áreas da seção transversal

Configuração	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
P_u	100,00	95,00	90,25	85,74	34,30	13,72	5,49	2,19	0,88
Área	100,00	90,00	81,00	72,90	65,61	59,05	53,14	47,83	43,05

Se apresentam os resultados na Figura 7.3 em termos dos dois índices globais, são plotados o proposto por Pizzato, 2012, I_{nl} e o proposto neste trabalho $I_{nl.log}$.

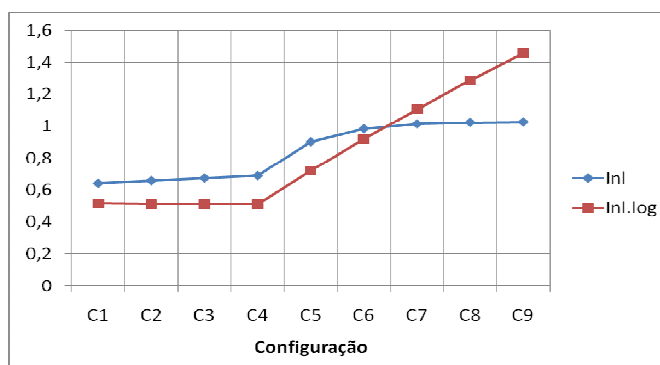


Figura 7.3 – Comparativo do índice I_{nl} e $I_{nl.log}$

Na Figura 7.3 se observa que, enquanto se manter na mesma proporção a redução da resistência pela área da seção transversal tanto o índice $I_{nl.log}$ quanto o I_{nl} mantém-se lineares. Ao diminuir apreciavelmente a carga resistente, o $I_{nl.log}$ mantém sua tendência, enquanto o índice I_{nl} tende ao valor “1”. Vê-se desta forma que a nova proposta de índice se mostra mais sensível a mudanças no comportamento da estrutura deteriorada.

Neste trabalho o índice $I_{nl.log}$ é utilizado para analisar o comportamento de uma coluna ao sofrer desgaste, essa coluna possui todas as características e propriedades utilizadas na seção 5, foi adotada a barra de ligação (L12,7x12,7x3,18) e a metodologia (vi) para verificação.

São reduzidas as dimensões das abas e a espessura em 0,436 mm em forma sucessiva para cada configuração, somando seis configurações distintas. Na Figura 7.4 se apresentam os resultados desta análise.

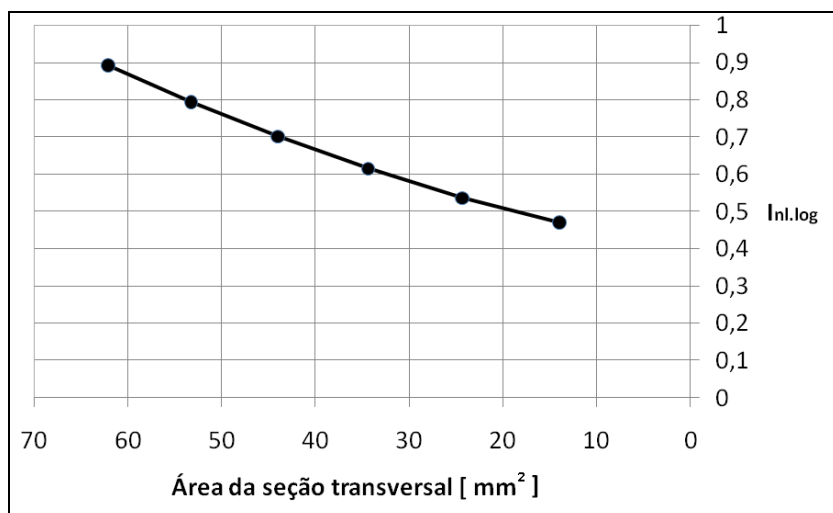


Figura 7.4 – $I_{nl.log}$ aplicado a estrutura estudada

Através do gráfico acima é possível prever que ao perder espessura:

- A curva não apresenta mudanças bruscas em sua trajetória, ao diminuir a seção resistente não há uma transição no modo de colapso da estrutura;

No próximo caso é estudado o comportamento dessa mesma coluna, ao reduzir a seção transversal de um trecho de um dos perfis principais, conforme Figura 7.5, a espessura desse trecho é reduzida de 3 mm para 1 mm (nos perfis U do restante da estrutura a espessura é de 4,76 mm). A barra de ligação utilizada é a L6,35x6,35x0,793.

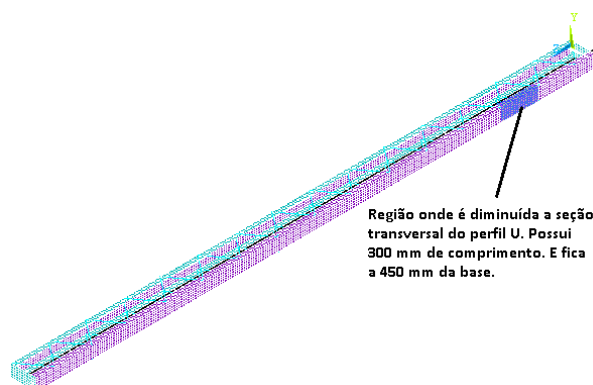


Figura 7.5 – Região onde foi diminuída a espessura da coluna composta, no perfil U

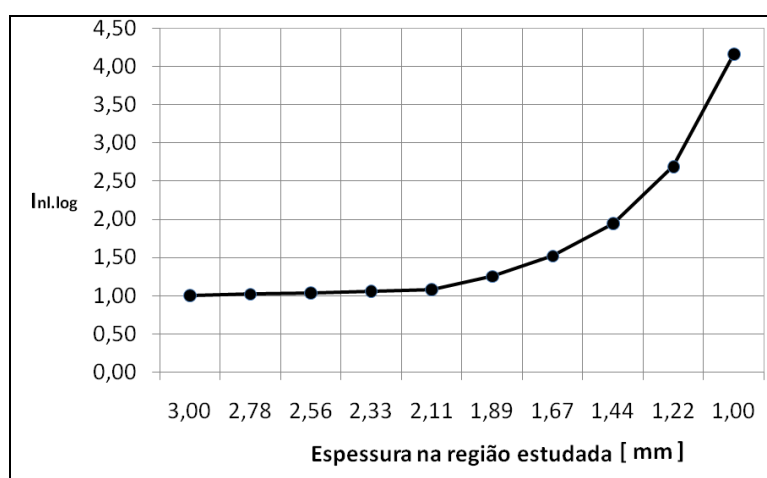


Figura 7.6 – Comportamento do $I_{nl.log}$ à medida que a espessura é diminuída

Pela Figura 7.6 é possível prever que ao perder espessura nesta região:

- Até haver 2,11 mm de espessura restante, a coluna diminui praticamente na mesma proporção a área de seção transversal e a resistência mecânica, isso é sabido devido ao $I_{nl.log}$ permanecer próximo a “1”;
- A partir de 2,11 mm de espessura restantes ocorre uma não linearidade na curva do $I_{nl.log}$, passando a ter uma inclinação positiva, isto indica que qualquer redução da seção transversal a partir desse ponto é crítica. A partir de 2,11 mm de espessura, qualquer redução impacta severamente na resistência mecânica da estrutura, como se pode ver nas figuras abaixo:

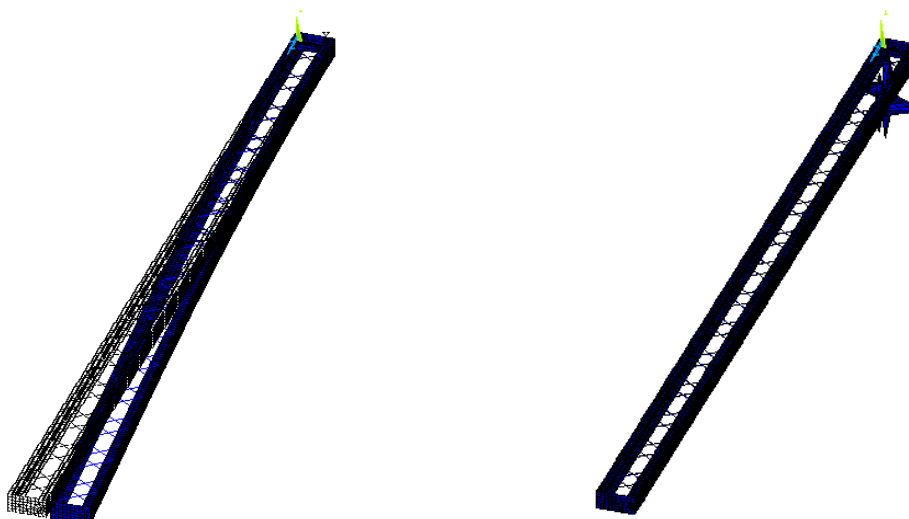


Figura 7.7 – Na figura à esquerda, o primeiro modo de flambagem para a estrutura com 2,11 mm de espessura na região estudada. Na figura à direita, o primeiro modo de flambagem para a estrutura com 1,89 mm de espessura na região estudada.

- Portanto a mudança na inclinação da curva naquele instante indica alguma diferença abrupta na forma que a estrutura, se comporta frente às cargas que suporta. Neste caso, para esta configuração, a estrutura passa a falhar de flambagem global para flambagem local;
- A curva formada pelo $I_{nl.log}$ vai aumentando sua inclinação a partir de 2,11 mm de espessura, isso indica que se torna cada vez mais crítica qualquer redução de espessura nesta região;

8. CONCLUSÃO

No presente trabalho se avaliou utilizando diferentes metodologias de cálculo para uma coluna metálica composta e se estudou diversos cenários de deterioração utilizando índices de dano globais. Do presente trabalho é possível obter as seguintes conclusões:

O método de análise, aqui chamado Híbrido forneceu resultados coerentes e com menor esforço de cálculo por parte do usuário. Representando uma alternativa viável.

Os índices de não linearidade podem ser utilizados para determinar quais são as vigas críticas de uma estrutura complexa, avaliando quais vigas ao perder resistência mecânica apresentam maior diferença na resposta do sistema. Determinando quais são as vigas críticas é possível programar manutenções que as verifiquem com maior frequência aumentando a segurança da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- “Ansys, Inc. Theory”**, 1995.
- Bonab, A. P.; Hashemi, B. H.; Hosseini, M.; **“Experimental investigation for the behavior of battened beam-columns composed of four equals slender angles”**, Elsevier, 2013.
- Bonab, A. P.; Hashemi, B. H.; Hosseini, M.; **“Experimental evaluation of the elastic buckling and compressive capacity of laced columns”**, Elsevier, 2013.
- Bonato, R.; **“Estudo do comportamento estrutural e otimização de cantoneiras de aço formadas a frio”**, 2009.
- Cowper, G. R.; **“The Shear Coefficient in Timoshenko’s Beam Theory”**, 1966.
- Georgieva, I.; Schueremans, L. R. H.; Pyl, L.; **“Composed columns from cold-formed steel Z-profiles: Experiments and code base predictions of the overall compression capacity”**, Elsevier, 2012.
- Grigoletti, G. C.; **“Otimização via algoritmos genéticos de perfis U formados a frio submetidos à compressão utilizando o método da resistência direta”**, 2012.
- Paula G. D.; **“Alguns aspectos da fundamentação teórica e dimensionamento de elementos comprimidos de aço”**, 1994.
- “MASTAN2”**; <http://www.mastan2.com/> acessado em 10/06/2013.
- McGuire, W.; Gallaguer, R.H.; Ziemian R.D.; **“Matrix Structural Analysis”**, John Wiley & Sons, 2nd edition, 1999.
- “NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados à frio”**, ABNT, 2010.
- “NBR 8800 – Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”**, ABNT, 2008.
- Pizzato, L. N.; **“Cálculo e análise de sensibilidade do momento último frente à redução de espessura nas chapas de embarcações de navegação interior”**, 2012.
- Popov, E. P.; **“Introdução à Mecânica dos Sólidos”**, Edgard Blucher, 1978.
- Reis, A.; Camotin, D.; **“Estabilidade Estrutural”**, Mc Graw Hill de Portugal, 2001.
- Uziak, J.; Gizejowski, M.; **“Coupled buckling design of steel laced columns”**, 1994.

ANEXO A

Formulação matricial da Flambagem Linear:

A equação diferencial apresentada em (2.1) se traduz em uma estrutura unifilar com vários graus de liberdade, onde é possível obter a equação:

$$[K_n(\lambda)] \{u\} = \{P\} \quad (\text{A.1})$$

Onde P é o vetor de cargas aplicado à estrutura, e o coeficiente λ é:

$$\lambda = N / N_{cr} \quad (\text{A.2})$$

Onde N_{cr} é a carga crítica de flambagem e a matriz K_n é uma função não linear em λ .

Para resolver este problema desenvolve-se em séries de Taylor a matriz $[K_n(\lambda)]$ e utilizando somente os dois primeiros termos da série chega-se a equação $[K_e + \lambda K_g]$. Em forma análoga a equação de uma reta $[a+xb]$, onde $a = K_e$; $b = K_g$; $x = \lambda$. Substituindo esta equação em (A.1), obtêm a versão linearizada de (A.1):

$$[K_e + \lambda K_g] \{u\} = \{0\} \quad (\text{A.3})$$

Onde K_e é a matriz de rigidez de um problema elástico linear, K_g é uma matriz de coeficientes constantes chamada de matriz geométrica e o vetor de forças P foi substituído por um vetor de zeros. Desta equação interessa conhecer qual é o valor de λ que produz deslocamentos frente a cargas nulas, o que equivale a obter o valor da carga crítica N_{cr} , sendo que o valor N é dado do problema (nível do esforço normal aplicado na estrutura). O vetor de deslocamentos u indica como a estrutura deforma quando a carga N atinge seu valor crítico.

Para poder determinar o menor valor de λ que verifica esta condição e o vetor u associado a ele é necessário resolver um problema de autovalores e autovetores.

Esta forma de proceder tem a limitação de considerar que a flambagem se produz a partir da configuração indeformada. Uma forma de análise mais sofisticada consiste em resolver o problema não linear, resolvendo-o de forma incremental, ao considerar a análise não linear esta pode incluir o fato de que os deslocamentos são finitos (a chamada não linearidade geométrica) e que o material tem uma lei constitutiva não linear (a chamada não linearidade do material). O problema não linear em cada incremento pode ser resolvido utilizando diversos algoritmos, um dos mais clássicos é o chamado método de Newton-Raphson.

Maiores informações sobre os métodos de análise não linear são encontrados no manual do Ansys, 1994, e especificamente para elementos unifilares em McGuire, 2000.

Os passos a seguir apresentam o algoritmo de Newton-Raphson para resolução do problema não-linear, considere uma estrutura unifilar com uma matriz de rigidez $[K]$ e carga aplicada $\{P^T\}$:

- a. Admite-se um deslocamento $\{u_0\}$, $\{u_0\}$ é o deslocamento dos nós da estrutura na última iteração, caso seja a primeira iteração $\{u_0\} = \{0\}$;
- b. A partir deste valor é obtida sua respectiva matriz de rigidez tangente $[K_i^T]$ e o coeficiente $\{P_i^{n_i}\}$ que é o carregamento que a estrutura faz para recuperar a configuração original ($i=0$);
- c. Calcula-se $\{\Delta u_i\}$ a partir da equação abaixo:

$$[K_i^T] \{\Delta u_i\} = \{P^a\} - \{P_i^{n_i}\} \quad (\text{A.4})$$

Onde $\{P^a\}$ é a carga que deve ser atingida pelo $\{P_i^{n_i}\}$ ao realizar as iterações, $\{\Delta u_i\}$ é o deslocamento causado devido ao carregamento $\{P^a\} - \{P_i^{n_i}\}$;

- d. Calcula-se $\{u_{i+1}\}$ a partir da equação abaixo:

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\}$$

- e. Repete-se os passos “b”, “c”, “d” até obter a convergência, a convergência é obtida quando $|\{P^a\} - \{P_i^{nr}\}| < R$. Quando for obtida a convergência da atual iteração, volta-se ao passo um para realizar um incremento de carga conforme Figura A.2.

A Figura A.1 abaixo mostra duas iterações de um mesmo incremento, nota-se que ao realizar a segunda iteração (“b”) o vetor de carga $\{P^{nr}\}$ se aproxima do vetor de carga $\{P^a\}$. Neste incremento se objetiva satisfazer a equação $|\{P^a\} - \{P_i^{nr}\}| < R$, onde R é uma tolerância quanto a essa equação. Ao satisfazer a equação $|\{P^a\} - \{P_i^{nr}\}| < R$, procede-se conforme Figura A.2.

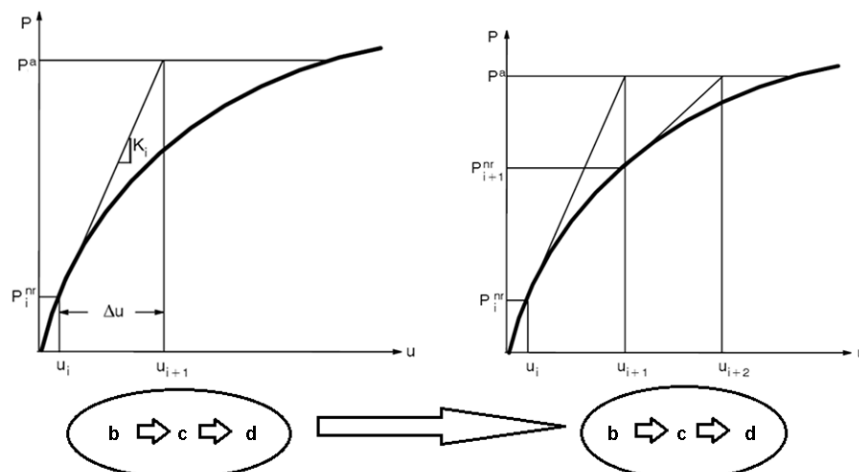


Figura A.1 – Iterações dois até quatro, a matriz de rigidez K_i , deslocamento u e a força P em duas iteração [ANSYS, 1994]

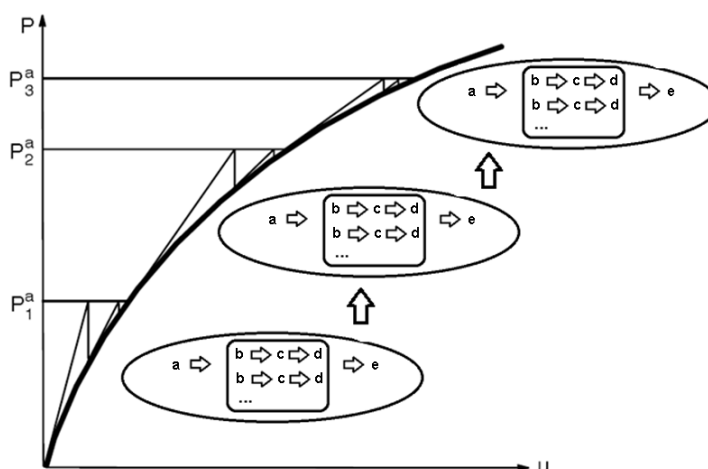


Figura A.2 – Iterações “a” até “e”, ao convergir três incrementos $\{P_1^a\}$, $\{P_2^a\}$ e $\{P_3^a\}$ [ANSYS, 1994]

Conforme Figura A.2, quando as iterações atingem o valor do incremento de carga $\{P^a\}$, parte-se para um próximo incremento de carga $\{P^a\}$ e suas respectivas iterações.

Ao incluir não-linearidades no problema, como plasticidade, devem ser adicionados passos intermediários nas iterações, todos os passos de uma mesma iteração devem estar em equilíbrio, dentro de uma tolerância, para a solução convergir. Algumas operações a mais devem ser feitas, mas o processo é semelhante ao descrito.

As análises aqui apresentadas podem-se generalizar para outros tipos de modelos como cascas, placas e elementos sólidos. Seu tratamento matricial também será similar empregando o método dos elementos finitos.

Método das larguras efetivas:

Este método serve para verificar as vigas quanto à flambagem, as normas NBR 14762 e NBR 8800 se utilizam deste método em suas verificações. O método consiste em reduzir as larguras efetivas dos elementos (placas) da estrutura, após essa redução são verificadas diversas interações de flambagem, como flambagem local, flambagem global, escoamento mais flambagem local. Este método divide as seções em elementos e os verifica separadamente, por exemplo, uma seção U possui três elementos conforme figura abaixo:

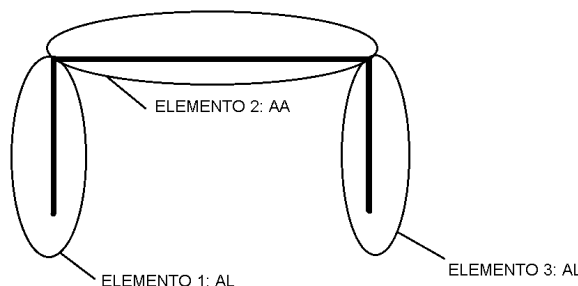


Figura A.3 – Elementos AA são presos dos dois lados, elementos AL somente em um lado

Abaixo é demonstrada essa metodologia através de expressões da norma NBR 14762. Primeiramente se obtém o coeficiente σ_{cr} através da equação:

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{fl}\pi^2 E}{12(1-\nu^2)\left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (\text{A.6})$$

Onde σ_{cr} é a tensão convencional de flambagem elástica do elemento, k_{fl} é o coeficiente de flambagem local do elemento, ele depende se o elemento é AA (ligado-ligado) ou AL (ligado-livre), ν é o coeficiente de Poisson do elemento, b é a largura do elemento e t é a espessura do elemento.

Com estes valores se obtém o índice de esbeltez reduzido do elemento λ_p :

$$\lambda_p = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^{0,5} = \frac{b/t}{0,95\left(\frac{k_{fl}E}{\sigma}\right)^{0,5}} \quad (\text{A.7})$$

Onde σ é a tensão normal de compressão, esse valor é definido conforme o carregamento sobre a viga, para o caso de compressão $\sigma = \chi f_y$. Com o coeficiente λ_p é obtido conforme prescrições da norma o termo b_{ef} , largura efetiva, com o qual se obtém também conforme prescrições da norma o termo A_{ef} , área efetiva, que é usado nas verificações das estruturas.

Norma NBR 14762:

Pela NBR 14762 (Dimensionamento de estruturas de aço por perfis formados à frio) a carga de colapso de flambagem por compressão, é obtida através da equação:

$$P_u = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad (\text{A.8})$$

Onde P_u é a carga última da coluna, γ é um coeficiente de ponderação de resistências (neste trabalho será usado $\gamma = 1$ para anular este coeficiente) e o f_y é um coeficiente que representa a tensão de escoamento do material.

Para obter o coeficiente χ é necessário determinar a carga de flambagem de Euler, com este valor se obtém λ_0 , e finalmente com o λ_0 se obtém χ , conforme equações abaixo:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \quad (\text{A.9})$$

(este P_{cr} é para o caso de flambagem por flexão)

$$\lambda_0 = \left(\frac{f_y}{P_{cr}/A} \right)^{0,5} \quad (\text{A.10})$$

Onde:

$$\lambda_0 \leq 1,5 \quad \chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (\text{A.11})$$

$$\lambda_0 > 1,5 \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (\text{A.12})$$

As condições que a norma impõe, para colunas compostas, ao usar estas expressões são:

- o índice de esbeltez " $k/Lr < 200$ ", onde r é o raio de giração;
- o índice de esbeltez de cada barra deve ser inferior:
 - à metade do índice de esbeltez máximo do conjunto, para o caso de travejamento por presilhas;
 - ao índice de esbeltez máximo do conjunto para travejamento em treliça. O índice de esbeltez das barras de travejamento deve ser inferior a 140;

Aplicando o coeficiente χ na Equação (A.8) se obtém a carga última de flambagem P_u pela NBR 14762.

Norma NBR 8800:

Esta norma é aplicada a estruturas de aço formadas por perfis laminados e soldados. No contexto deste trabalho será utilizada a seção 5.5.2.3 da norma NBR 8800, que possibilita trabalhar com um método híbrido, no qual se combinam expressões analíticas propostas pela norma e soluções de elementos finitos de análise linear elástica e de flambagem elástica.

Para atender a norma, a tensão resistente de cálculo para os estados-limites últimos deve ser igual ou superior à tensão solicitante de cálculo σ_{Sd} , conforme equações abaixo, para o caso de esforços normais de compressão:

Para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.13})$$

Para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{\chi f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.14})$$

Onde o coeficiente χ é obtido utilizando a P_{cr} de uma análise numérica (neste trabalho será usado $\gamma_{a1} = 1$ para anular este coeficiente).