

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DO ELEMENTO PRINCIPAL DE UM
CARREGADOR DE NAVIOS

por

Matheus Cros dos Santos

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, novembro de 2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

dos Santos, Matheus Cros
VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DO ELEMENTO PRINCIPAL DE UM
CARREGADOR DE NAVIOS / Matheus Cros dos Santos. --
2020.
29 f.
Orientador: Ignácio Iturrioz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. estruturas metálicas. 2. flambagem. 3.
plasticidade. 4. método dos estados limites. I.
Iturrioz, Ignácio, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Matheus Cros dos Santos

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DO ELEMENTO PRINCIPAL DE UM
CARREGADOR DE NAVIOS

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Contração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Ignácio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignácio Iturrioz

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, novembro de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Adelir e Mara, que me deram todo apoio, suporte e incentivo ao longo dos anos para que eu pudesse estudar e me capacitar profissionalmente.

Dedico também ao meu padrinho, amigo e segundo pai, a quem eu carinhosamente sempre chamei de Tio Paulo (*in memoriam*), que tanta falta faz na nossa família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha mãe, Mara, e ao meu pai, Adelir. Sem o suporte de ambos nada disso seria possível. Agradeço também ao meu irmão mais velho, Engenheiro Mecânico e Mestre em Engenharia, Fellipe, pelo companheirismo, suporte e conselhos ao longo de toda vida, além da inspiração de profissional e carreira a se seguir. Ao meu irmão mais novo, Vitor, pelo companheirismo e também compreensão nos momentos em que não pude estar tão presente devido aos estudos. A toda minha família que me acompanhou e incentivou ao longo da graduação e também a todo mundo que de alguma maneira foi importante nessa caminhada, meu muito obrigado.

Agradeço também à empresa TMSA e a todos que de alguma maneira colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA
MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DO ELEMENTO PRINCIPAL DE UM
CARREGADOR DE NAVIOS

dos Santos, Matheus Cros
matheuscros@yahoo.com.br

Resumo. *O desenvolvimento de estruturas metálicas relacionadas com funcionamento de portos é de fundamental importância na engenharia moderna. Em particular isso ocorre no Brasil, país com enorme competência como fornecedor de commodities ao mundo desenvolvido, porém ainda com uma infraestrutura com amplo espaço para crescimento. No presente contexto, o elemento principal de um carregador de navios é estudado neste trabalho por meio da aplicação de diversas estratégias de análise. Para elaborar as análises foram empregadas a metodologia clássica determinada pela norma brasileira de perfis metálicos (NBR 8800), a qual apresenta duas estratégias de cálculo para realizar a verificação. Também é modelado o componente utilizando um modelo numérico que considera diversos tipos de não-linearidade. Foram comparados os resultados obtidos utilizando diversas metodologias de cálculo, que se apoiam em hipóteses diferentes, conferindo assim a eficácia das metodologias empregadas no dimensionamento deste tipo de estrutura. Conclui-se, a partir desse estudo, que as metodologias apresentadas pela NBR 8800 possuem resultados similares, indicando a possibilidade de utilização de diferentes metodologias que eventualmente facilitem o dimensionamento de estruturas complexas.*

Palavras-chave: *Estruturas metálicas, flambagem, plasticidade, método dos estados limites.*

Structural verification of the main element of a shiploader

Abstract. *The development of metal structures associated with the operations of seaports is vital for modern engineering. Particularly, this occurs in Brazil, a country with a great competence as a commodities supplier to the developed world, although still has an infrastructure to be upgrowth. In this current context, the main element of a shiploader is studied in this research through the application of several analysis strategies. To elaborate on the analyzes, it was used the classic methodology determined by the Brazilian Standards Steel Design (NBR 8800), which presents two calculation strategies to perform the verification. The component is also modeled using a numerical model that considers several types of non-linearity. The results obtained were compared using different calculation methodologies, which are based on different hypotheses, conferring the effectiveness of the methodologies employed in the design of this type of structure. It is concluded, from this study, that the methodologies presented by NBR 8800 have similar results, indicating the possibility of using different methodologies that eventually facilitate the design of complex structures.*

Keywords: *metal structures, buckling, plasticity, limit state design*

NOMENCLATURA

| | | |
|---------------|---|-------------------|
| AA | Elemento constituinte de um perfil com duas bordas longitudinais vinculadas | |
| ELS | Estados limites de serviço | |
| ELU | Estados limites de utilização | |
| FLA | Flambagem local da alma | |
| FLM | Flambagem local da mesa | |
| FLT | Flambagem local por torção | |
| E | Módulo de elasticidade do aço | [GPa] |
| f_y | Resistência ao escoamento do aço | [MPa] |
| t_w | Espessura da alma | [m] |
| A | Área da seção transversão | [m ²] |
| A_g | Área bruta da alma | [m ²] |
| I | Momento de Inércia | [m ⁴] |
| J | Constante de torção | [m ⁴] |
| K | Coefficiente de flambagem de barras comprimidas | [adimensional] |
| M | Momento fletor | [kNm] |
| N | Força axial | [kN] |
| Q | Fator de redução total associado à flambagem local | |
| $Q_a; Q_s$ | Fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos | |
| R_d | Solicitação resistente de cálculo | |
| S_d | Solicitação de cálculo | |
| V | Força cortante | [kN] |
| W | Módulo de resistência elástico | [m ³] |
| Z | Módulo de resistência plástico | [m ³] |
| M_{rd} | Momento resistente de cálculo | [kNm] |
| $N_{c,Rd}$ | Força axial de compressão resistente de cálculo | [kN] |
| $N_{c,Sd}$ | Força axial de compressão solicitante de cálculo | [kN] |
| V_{Sd} | Força cortante solicitante de cálculo | [kN] |
| M_{Sd} | Momento fletor solicitante de cálculo | [kN] |
| V_{Rd} | Força cortante resistente de cálculo | [kN] |
| M_{Rd} | Momento fletor resistente de cálculo | [kN] |
| Q_{ki} | Carregamentos a quais a estrutura está submetida | |
| γ_i | Coefficiente de majoração das cargas | [adimensional] |
| R_k | Resistência característica do material | |
| γ_{mi} | Coefficiente de minoração da resistência interna | [adimensional] |
| γ_{a1} | Coefficiente de ponderação | [adimensional] |
| σ_e | Tensão crítica elástica normal | [MPa] |
| τ_e | Tensão crítica elástica de cisalhamento | [MPa] |
| N_e | Força axial de flambagem elástica | [kN] |
| σ_{Sd} | Tensão normal solicitante de cálculo | [MPa] |
| τ_{Sd} | Tensão de cisalhamento solicitante de cálculo | [MPa] |
| σ_{Rd} | Tensão normal resistente de cálculo | [MPa] |
| τ_{Rd} | Tensão de cisalhamento resistente de cálculo | [MPa] |
| W_{ef} | Módulo de resistência mínimo elástico | [m ³] |

| | | |
|---------------|--|----------------|
| M_R | Momento fletor correspondente ao início do escoamento | [kNm] |
| V_R | Esforço cortante correspondente ao início do escoamento | [kN] |
| V_{Pl} | Esforço cortante correspondente ao início da plastificação | [kN] |
| λ_0 | Índice de esbeltez reduzido | [adimensional] |
| λ_p | Índice de esbeltez correspondente à plastificação | [adimensional] |
| λ_r | Índice de esbeltez correspondente ao início do escoamento | [adimensional] |
| χ | Fator de redução associado à resistência a compressão | [adimensional] |
| γ_{f1} | parcela do coeficiente de ponderação das ações que considera a variabilidade das ações | [adimensional] |
| γ_{f2} | parcela do coeficiente de ponderação das ações que considera a simultaneidade de atuação das ações | [adimensional] |
| γ_{f3} | parcela do coeficiente de ponderação das ações que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações | [adimensional] |
| γ_g | Coeficiente de ponderação das ações permanentes | [adimensional] |
| γ_q | Coeficiente de ponderação das ações variáveis | [adimensional] |
| ψ_0 | Fator de redução de ações | [adimensional] |
| F_v | Carga vertical aplicada | [kN] |
| F_h | Carga horizontal aplicada | [kN] |
| M_{cr} | Momento fletor para a carga crítica de flambagem | [kN] |
| C_b | Fator de modificação para o momento fletor | [adimensional] |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Objetivos | 2 |
| 1.2 | Estrutura do presente trabalho | 2 |
| 2 | Fundamentação | 3 |
| 2.1 | Flambagem | 3 |
| 2.2 | Tipos de Análises | 4 |
| 2.3 | Método dos Estados-Limites | 5 |
| 3 | Metodologia | 6 |
| 3.1 | Norma ABNT NBR 8800:2008 | 6 |
| 3.2 | Modelos numéricos utilizados para determinar as cargas de colapso | 6 |
| 4 | Problema em estudo | 7 |
| 4.1 | Descrição do modelo físico | 7 |
| 4.2 | Análise por elementos finitos do pórtico superior via Ansys | 9 |
| 4.3 | Análise por elementos de barra do pórtico superior via Mastan | 10 |
| 5 | Resultados | 11 |
| 5.1 | Resultados obtidos para o método clássico da NBR 8800:2008 | 11 |
| 5.2 | Resultados obtidos com o método híbrido aplicando a NBR 8800:2008 | 13 |
| 5.3 | Verificação de carga crítica de flambagem pelo Mastan | 14 |
| 5.4 | Análise não-linear por Mastan | 14 |
| 6 | Conclusão | 15 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 16 |
| | ANEXO A – Tabela coeficiente de flambagem por flexão | 17 |
| | ANEXO B – Aplicação da metodologia clássica de dimensionamento da NBR 8800:2008 | 17 |
| | ANEXO C – Aplicação da metodologia híbrida de dimensionamento da NBR 8800:2008 | 19 |
| | APÊNDICE A – Resultados das análises dos modelos numéricos | 19 |

1 INTRODUÇÃO

Carregadores de navios são equipamentos fundamentais para o embarque de produtos em portos marítimos. Podem ser fixos ou móveis, com lanças inclináveis, telescópicas ou giratórias. Tais equipamentos operam com várias categorias de granéis, como grãos, açúcar, minério de ferro e minerais em geral, possuem como função básica a deposição dos granéis em navios, sendo a ponta final de uma rede complexa de transporte de grãos. A representação de um carregador de navios pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Carregador de navios utilizado em porto brasileiro



O projeto dessas estruturas metálicas para utilização portuária implica em um grande compromisso com sua segurança, pois a ocorrência do colapso pode ser catastrófica. Neste caso, obter resultados utilizando estratégias diversas pode permitir chegar a uma solução mais eficiente. Em função disto, as normas de estruturas metálicas nos últimos anos têm desenvolvido métodos híbridos que combinam expressões analíticas apresentadas pelas normas com soluções numéricas de dificuldade limitada, como, por exemplo, as análises elásticas e a determinação da carga de flambagem elástica.

A seguir apresentam-se comentários referentes a trabalhos que realizaram estudos sobre diversos aspectos que devem ser considerados na modelagem de estruturas metálicas submetidas à compressão. Santos (2002) desenvolveu um estudo numérico de perfis metálicos tipo I, duplamente simétricos, sujeitos ao fenômeno da interação flambagem global-flambagem local e plasticidade utilizando o método dos elementos finitos, destacando a influência desta

interação na resistência do perfil para diversas relações de esbeltez do perfil e as chapas que o compõe. Nascimento (2013) estudou a aplicação dos métodos híbridos de flambagem das normas NBR8800 e NBR14762 em três perfis convencionais: perfil I, perfil caixão e perfil C, com diferentes particularidades. Realizou-se a comparação entre os resultados obtidos pela aplicação dos métodos híbridos com os resultados obtidos pela aplicação de outros métodos. Silva (2006) determinou o colapso de perfis de aço submetidos à compressão uniaxial centrada considerando os diversos tipos de não-linearidades. Os resultados obtidos foram comparados a NBR 8800, avaliando assim os procedimentos da norma e levantando algumas considerações importantes, como: (i) a influência das tensões residuais nas placas esbeltas; (ii) as imprecisões e simplificações da norma brasileira quanto à resistência pós-flambagem, ao limite de esbeltez e às tensões residuais; (iii) as imprecisões da norma brasileira pela desconsideração dos perfis I soldados formados por placas cortadas à maçarico, entre outros. Todas as referências citadas acima mostram aplicações do método híbrido comparadas com resultados obtidos com outros métodos, antecedentes ao estudo que será realizado nesse trabalho.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo realizar a análise estrutural de um componente de carregador de navios denominado “pórtico superior”, que pode ser visto na Figura 2. O pórtico investigado está sujeito a diversas cargas compressivas e possui estrutura esbelta, portanto sujeito aos efeitos da flambagem. A estrutura se mostrou um bom exemplo para ilustrar o método híbrido da NBR 8800:2008.

O estudo pretende determinar o comportamento da estrutura sob cargas compressivas e determinar a carga crítica de flambagem, comparando diversos métodos e assim validando a equivalência das metodologias aplicadas. Serão utilizados os seguintes métodos de análise: o tradicional proposto pela norma NBR8800, o proposto pela norma como método híbrido e também a determinação da carga de colapso utilizando modelos numéricos.

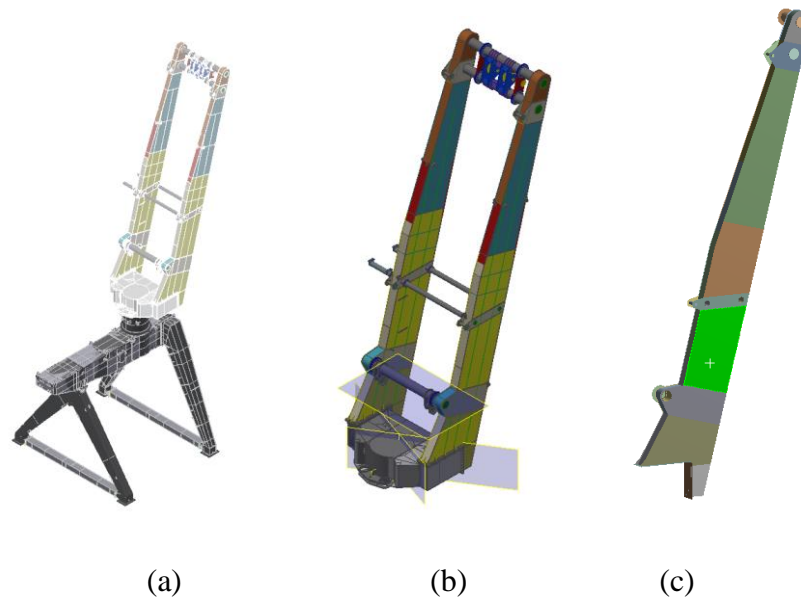
Como objetivos específicos, pode-se citar:

- Verificar um dos elementos do pórtico frente a um dos cenários de cargas previstos utilizando a metodologia clássica de cálculo proposto pela norma NBR 8800:2008;
- Utilizar a metodologia híbrida proposta pela norma NBR 8800:2008, na qual se combinam resultados em elementos finitos obtidos em modelos simples (modelo elástico linear e modelo de flambagem elástica) com expressões fornecidas pela norma, que permitem converter estes resultados parciais em medidas da situação na qual a estrutura colapsaria.
- Utilizar um modelo numérico via elementos de vigas para determinar a carga de colapso;
- Comparar e discutir os modelos de verificação propostos.

1.2 Estrutura do presente trabalho

O trabalho está ordenado da seguinte forma: após a presente introdução, na seção 2 se apresentam de forma sucinta os tópicos que permitem entender o desenvolvimento do trabalho. Posteriormente na seção 3 são apresentadas as metodologias utilizadas para o estudo. Na seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos aplicando-se as metodologias e, finalmente na seção 5, apresentam-se as conclusões e considerações finais. O trabalho tem três Anexos, onde são resumidas as principais informações utilizadas da norma NBR 8800:2008, apresentando as principais fórmulas, expressões e algumas considerações. E no último apêndice se apresentam alguns dos resultados obtidos com os métodos numéricos que não foram apresentados no corpo do texto.

Figura 2 - Pórtico superior de carregador de navios (a) vista global do carregador (b) vista do pórtico superior analisado (c) vista do elemento do pórtico estudado com detalhe.



2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Flambagem

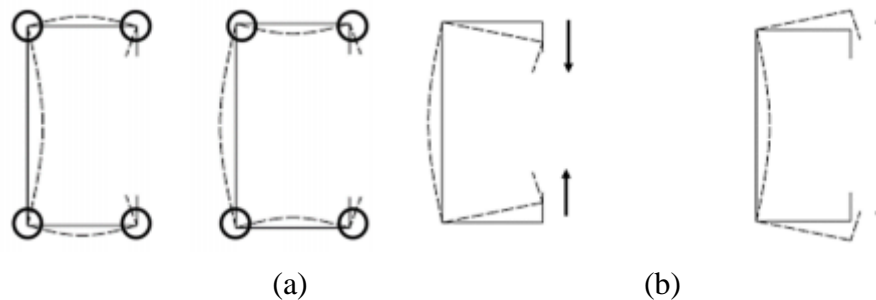
Conforme Silva (2006), a flambagem pode ser definida como o fenômeno de instabilidade que pode ocorrer quando se submete uma estrutura esbelta a cargas compressivas, com o aparecimento de grandes deslocamentos transversais decorrentes de pequenas variações no carregamento. Dentro do escopo das estruturas metálicas de elementos unifilares é comum classificar a flambagem se centrado na perspectiva deste tipo de estruturas da seguinte forma: **Flambagem global:** Ocorre no caso em que, aplicado uma carga compressiva no componente analisado, a estrutura flamba com um modo que não produz distorção da seção transversal. A flambagem pode ocorrer em três modos diferentes, em função das características geométricas da seção transversal do elemento. Os três modos de flambagem que podem acontecer são flexão, torção e flexo-torção. O modo de flambagem por torção só é possível acontecer no caso de seções com dois eixos de simetria. No caso de vigas submetidas à flexão em torno do eixo de maior inércia, pode acontecer a flambagem lateral por torção. Na Figura 3 pode-se observar os modos de flambagem por flexão e flexo-torção.

Figura 3 – Comportamento da seção transversal para flambagem global: (a) por flexão (b) por flexo-torção



Flambagem local: Neste caso o modo de flambagem acontece dentro de cada um dos elementos (um componente, que pode ser viga ou coluna, formado por um perfil I tem três elementos: duas mesas e uma alma). A flambagem local é analisada em cada elemento, considerando-o como uma placa isolada e considerando-o como se fosse uma placa com condições de contorno definidas de acordo a como o elemento está conectado às outras partes do componente. Portanto, nesse modo de flambagem, a susceptibilidade à flambagem é determinada pelas condições de contorno a que cada elemento está submetido e pela relação entre a largura e a espessura da placa. A Figura 4 (a) mostra a ocorrência de flambagem local em um perfil U enrijecido.

Figura 4 - Comportamento da seção transversal para (a) flambagem local (b) para flambagem distorcional



Flambagem distorcional: A flambagem distorcional ocorre quando há translação dos pontos de união dos elementos adjacentes que compõe o perfil. A avaliação deste tipo de flambagem é complexa, nas normas são consideradas apenas algumas geometrias de perfis e condições de carregamento particulares. Na Figura 4 (b) apresenta-se a forma que adotaria a seção transversal para esse tipo de flambagem em uma seção U enrijecida. Cabe salientar que no caso de perfis laminados e soldados este tipo de flambagem não é crítica. Em perfis dobrados a frio, caracterizados por terem uma relação entre largura e espessura dos elementos maior, este modo de flambagem pode ser crítico.

2.2 Tipos de Análises

Diferentes análises podem ser utilizadas no cálculo de estruturas metálicas. Como citado por Almeida (2006), os diferentes tipos de análises diferenciam-se da seguinte forma:

Análise Elástica de Primeira Ordem: Nesta análise, o equilíbrio da estrutura é formulado considerando a geometria original sem deslocamentos (linearidade geométrica) e o material é considerado como elástico linear (linearidade física). O princípio da superposição dos efeitos é válido, pois a análise considera a hipótese de pequenos deslocamentos e o material se comporta de maneira elástica linear. Porém, essa análise não considera informações sobre a plasticidade e a estabilidade no comportamento da estrutura. Usualmente, essas influências são consideradas indiretamente ao fazer-se a verificação de forma isolada de cada elemento, considerando então o comprimento efetivo e fatores de amplificação dos momentos.

Análise Elástica de Segunda Ordem: Na análise elástica de segunda ordem o equilíbrio é formulado considerando a estrutura com não-linearidade geométrica, ou seja, na sua posição deslocada. O material ainda é elástico linear, seguindo, portanto, a linearidade física. Essa análise inclui os efeitos da estabilidade elástica, mas não representa diretamente a resistência inelástica real do elemento.

Análise Inelástica de Primeira Ordem: Nessa análise considera-se a geometria indeformada (linearidade geométrica) e a não-linearidade física do material. São incluídos os efeitos de

plastificação, representando desde modelos simples de rótulas plásticas até modelos que consideram a propagação da plastificação no interior das mesmas.

Análise Inelástica de Segunda Ordem: Considera-se para a formulação do equilíbrio a estrutura na posição deslocada (não-linearidade geométrica) e a não-linearidade física do material. Essa análise é a que melhor se aproxima do comportamento real de uma estrutura. Trate-se de uma análise não-linear física e geométrica.

2.3 Método dos Estados-Limites

Segundo Freitas et al (2007), um estado limite é uma condição onde a estrutura ou elemento estrutural torna-se inadequado para desempenhar a função proposta. Isto significa que a estrutura deve estar sob solicitações inferiores a certos valores limites, que dependem do material utilizado e do tipo de estrutura. Existem dois tipos de estados limites nesse método: estado limite de utilização e estado limite último. Conforme Sousa (2007), fatores de majoração de cargas e de minoração de resistência são introduzidos no método dos estados-limites. Tais fatores funcionam de maneira a contornar problemas derivados das variações aleatórias de variáveis envolvidas em dimensionamentos, como cargas, propriedades dos materiais, geometria e erros de execução que impedem garantir que uma estrutura seja totalmente segura. Tais fatores de majoração e minoração são baseados em dados estatísticos relativos a cada uma das variáveis envolvidas.

Conforme visto em Pfeil (2009), a equação que deve ser verificada é

$$S_d(Q_{ki}, \gamma_i) \leq R_d(R_k, \gamma_{mi}) \quad (1)$$

Onde S_d são as solicitações de projeto, R_d a resistência de projeto frente a um cenário de colapso, Q_{ki} são os carregamentos a quais a estrutura está submetida, R_k é a resistência característica do material e γ_i e γ_{mi} são coeficientes de majoração das cargas e minoração da resistência interna, respectivamente.

Algumas observações adicionais sobre a Equação 1:

- (i) S_d é função de combinações de carregamentos Q_{ki} baseados em valores característicos, ou seja, que tenha uma determinada probabilidade de acontecer. Por exemplo, ao se considerar a ação devido ao vento ela será calculada com uma velocidade do vento que tenha uma possibilidade de acontecer em um tempo de recorrência de 50 anos. Ou, por exemplo, ao se considerar cargas permanentes, ela será determinada considerando que, do estudo estatístico realizado, a probabilidade de ter estruturas mais pesadas do que a considerada para realizar a análise poderá ser de 5%. Por sua vez, γ_i é o coeficiente que majora o efeito da ação considerada. Seu valor está vinculado à natureza da variabilidade da ação.
- (ii) No caso das resistências R_d também serão considerados valores característicos definidos sobre uma probabilidade de acontecer. Por exemplo, o valor da tensão de escoamento poderá ter uma probabilidade de 5% de ter um valor menor que o valor considerado como R_k . Os coeficientes de minoração da resistência γ_{mi} são coeficientes que vão depender das características do material utilizado (aço, alumínio, madeira, concreto, etc), e do tipo de colapso associado à resistência (escoamento por tração é um tipo de colapso menos abrupto que a ruptura por tração, e, por isso, neste último caso o coeficiente de minoração será mais agressivo).
- (iii) Cabe salientar que nem γ_i nem γ_{mi} são coeficientes de segurança. A segurança é determinada pela distância em termos gerais entre os valores de S_d e R_d .

Há uma extensa bibliografia sobre o método dos estados limites. Ver bibliografia, entre outros, em Freitas et al (2007) e na norma ABNT NBR 8800 (2008), a qual realiza uma explicação clara de como proceder e apresenta as combinações e coeficientes a serem utilizados no caso de estruturas metálicas como as avaliadas no presente estudo.

3 METODOLOGIA

3.1 Norma ABNT NBR 8800:2008

O presente estudo baseou-se na ABNT NBR 8800 (2008) que estabelece, a partir do método dos estados-limites, os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto. Dentre seus diversos itens, estabelece o procedimento para ponderação de cargas em estruturas e apresenta metodologias para verificação de flambagem baseadas em expressões analíticas em termos das solicitações da estrutura. Tais expressões são funções das propriedades do material, do tipo de perfil utilizado e da esbeltez dos mesmos.

Na norma é importante destacar a metodologia para determinar a solicitação atuante e a determinação das resistências, prevendo diversos cenários de colapso. Nas seções 4.6, 4.7 e 4.8 da NBR 8800:2008 é apresentado o conteúdo completo da metodologia, assim como as principais tabelas a serem utilizadas para a determinação das combinações de carregamento críticas.

Metodologia clássica de dimensionamento: Nesta metodologia se aplicam as expressões analíticas baseadas nas resistências dos materiais e em expressões semi-empíricas que levam em consideração características particulares das estruturas utilizadas. Por exemplo, as curvas que permitem determinar a interação entre flambagem e plasticidade levam em conta as tensões residuais dos perfis utilizados que dependem do tipo do perfil (soldado ou laminado) e da sua forma (perfil C, perfil caixão, perfil H, entre outros). No Anexo B foi colocado em forma sucinta a aplicação dos cálculos realizados por este método para a estrutura estudada.

Metodologia híbrida proposta pela norma: Alternativamente ao método clássico de dimensionamento, é proposto na seção 5.5.2.3 da norma outro método de cálculo denominado nesse trabalho como *método híbrido*. Esse método utiliza parâmetros intermediários no cálculo da carga de colapso obtidos através de simulações numéricas com a aplicação de uma análise linear elástica e uma análise de flambagem elástica para a determinação das tensões normais e cisalhantes críticas. Tal método, que se diferencia do método anterior por trabalhar com tensões e não mais com solicitações, permite que elementos com geometrias complexas sejam estudados. O método híbrido será aplicado no presente estudo conforme definido pela norma, apresentado de maneira resumida neste trabalho no Anexo C.

3.2 Modelos numéricos utilizados para determinar as cargas de colapso

Outra metodologia que pode ser utilizada é determinar diretamente a carga de colapso utilizando um modelo que permita capturar todas as não linearidades envolvidas. No presente estudo, para este método, foi utilizado o *software Mastan*, que é um programa computacional de análise estrutural descrito por McGuire et al (2010) como um programa gráfico interativo que provê capacidade de pré-processamento, análise e pós-processamento. Entre as opções de pré-processamento, estão a definição da geometria da estrutura, condições de contorno, propriedade dos elementos e aplicação de cargas. As análises podem ser de primeira ou segunda ordem elástica ou inelástica sujeitas a cargas estáticas. Portanto este *software* permite analisar estruturas formadas por barras, sendo utilizado no presente estudo para que, de forma simplificada, seja considerada a não linearidade geométrica e física do problema estudado.

Para a verificação pelo método híbrido da norma, modelou-se a estrutura utilizando o *software Ansys*. O *Ansys* permite resolver análises estruturais estática e dinâmica, problemas de

transferência de calor, problemas de autovalores de flambagem e modo-frequência, entre outros (ANSYS, 2004). No modelo numérico realizado neste estudo, utilizou-se 142851 nós e 47840 elementos de casca de 8 nós com 6 graus de liberdade. De maneira a reduzir-se o custo computacional da simulação, modelou-se apenas uma perna do pórtico superior para simulação por elementos finitos. A partir do modelo numérico, realizou-se as análises linear elástica e linear de flambagem.

4 PROBLEMA EM ESTUDO

4.1 Descrição do modelo físico

Este trabalho foi desenvolvido com base em um equipamento com estrutura metálica denominado *Carregador de Navios*, que tem sua estrutura principal representada na Figura 2 (a). Para o presente estudo foi selecionado um dos componentes de maior interesse do Carregador de Navios. Tal componente, chamado de *pórtico superior* e representado na Figura 2 (b), foi escolhido por ter a estrutura mais esbelta e estar sujeito aos maiores esforços compressivos e de flexão.

A estrutura do *pórtico superior* é formada por chapas de aço soldadas em formato de viga caixão e está sujeito a esforços provocados pela estrutura do Carregador de Navios. Com a definição do elemento para estudo, definiu-se uma região para verificação de flambagem pelo método clássico de dimensionamento da NBR 8800:2008. A região selecionada pode ser vista, destacada em verde, na Figura 2 (c).

Para o *pórtico superior* foram considerados o peso próprio da estrutura e equipamentos como ações permanentes; e as cargas de vento e cargas móveis como ações variáveis. As cargas móveis são definidas como o esforço proveniente do guincho de elevação usado para colocar e retirar uma pá carregadeira de dentro dos navios, conforme pode ser visto na Figura 5. Também na Figura 5 podem ser vistos alguns pontos da estrutura do Carregador de Navios: 1) pórtico superior; 2) lança traseira e contrapeso; 3) lança móvel; 4) pá carregadeira considerada na análise como carga móvel. Foi selecionado para análise pela metodologia clássica de dimensionamento da NBR 8800:2008 uma seção intermediária da estrutura, destacada em verde na Figura 6 (a). A região possui altura de 3,6 m e a seção, destacada em vermelho na Figura 6 (a), é uma viga caixão com 2,25 m de altura e 0,525 m de largura, com espessura da alma de 0,0125 m e espessura da mesa de 0,0224 m, conforme Figura 6 (b).

Figura 5 - Carregador de Navios com pá carregadeira

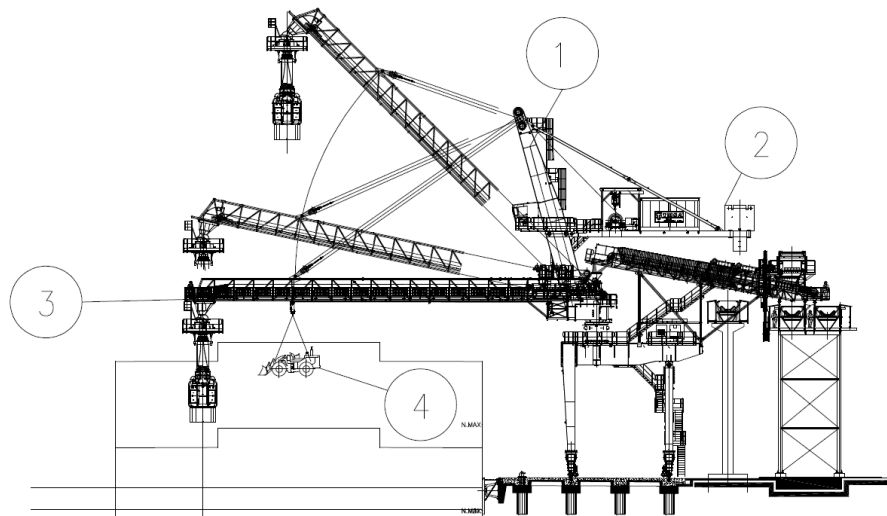
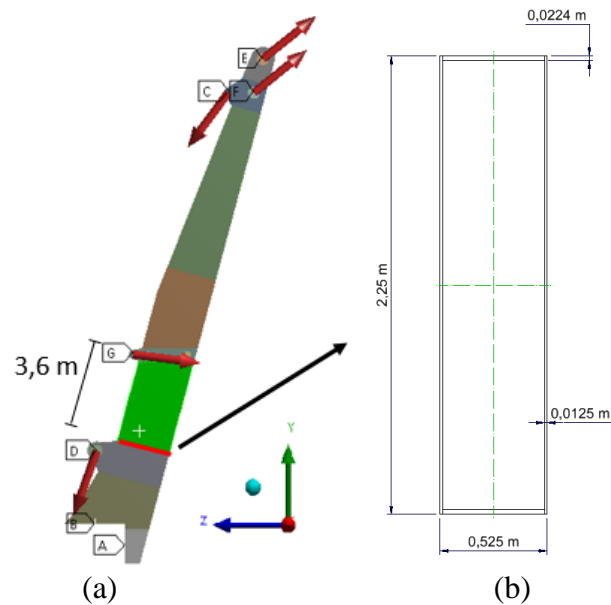


Figura 6 – (a) Carga atuante em uma das pernas do pórtico superior (b) vista de seção da região selecionada para estudo pelo método clássico da NBR 8800



Na Figura 6 (a) também pode-se observar a direção e sentido de aplicação das cargas atuantes na estrutura. As cargas solicitantes da estrutura em estudo em termos da carga vertical aplicada F_v e da carga horizontal aplicada F_h são dadas na Tabela 1. O Carregamento I (F_{vI}, F_{hI}) considera as ações devido ao peso próprio da estrutura e equipamentos, o Carregamento II (F_{vII}, F_{hII}) considera as ações devido ao vento e o Carregamento III (F_{vIII}, F_{hIII}) considera as ações devido a pá carregadeira. As regiões da Tabela 1 correspondem ao identificado na Figura 6 (a).

Tabela 1 – Cargas atuantes no Pórtico Superior

| Região | F_{vI} (kN) | F_{hI} (kN) | F_{vII} (kN) | F_{hII} (kN) | F_{vIII} (kN) | F_{hIII} (kN) |
|--------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| C | -631 | 1120 | 3 | -7 | 17 | 69 |
| D | -425 | 362 | -9 | -1 | -103 | 84 |
| E | 61 | -181 | -0,5 | 0,5 | 15 | -46,5 |
| F | 61 | -181 | -0,5 | 0,5 | 15 | -46,5 |
| G | -60 | -1120 | 1 | 8 | 29 | -15 |

Para a determinação das cargas solicitantes conforme método dos estados-limites com fatores de majoração e minoração, baseando-se na Tabela 1 e Tabela 2 da NBR 8800:2008, selecionou-se os coeficientes γ_g , γ_q e ψ_0 conforme Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Seleção de coeficientes de ponderação e combinação

| Ações permanentes | | |
|-----------------------------|------------|----------|
| Tipo de carregamento | γ_g | ψ_0 |
| Peso próprio e equipamentos | 1,4 | - |
| Ações variáveis | | |
| Tipo de carregamento | γ_q | ψ_0 |
| Vento | 1,4 | 0,6 |
| Pá carregadeira e guincho | 1,5 | 0,7 |

Para o *pórtico superior* em estudo tem-se duas combinações:

- I) Na primeira, as ações devido ao vento são consideradas as ações variáveis principais e o fator de combinação ψ_0 é aplicado apenas nas ações provenientes da pá carregadeira;
- II) Na segunda, as ações devido à pá carregadeira são consideradas as ações variáveis principais e o fator de combinação ψ_0 é aplicado apenas nas ações provenientes do vento agindo na estrutura;

Utilizando-se a metodologia apresentada na seção 4.7.7 da NBR 8800:2008, é então determinado as cargas solicitantes de cálculo. Para exemplificar a metodologia, será mostrado a seguir o cálculo para a definição da Combinação I. Para a Combinação II procede-se de maneira análoga.

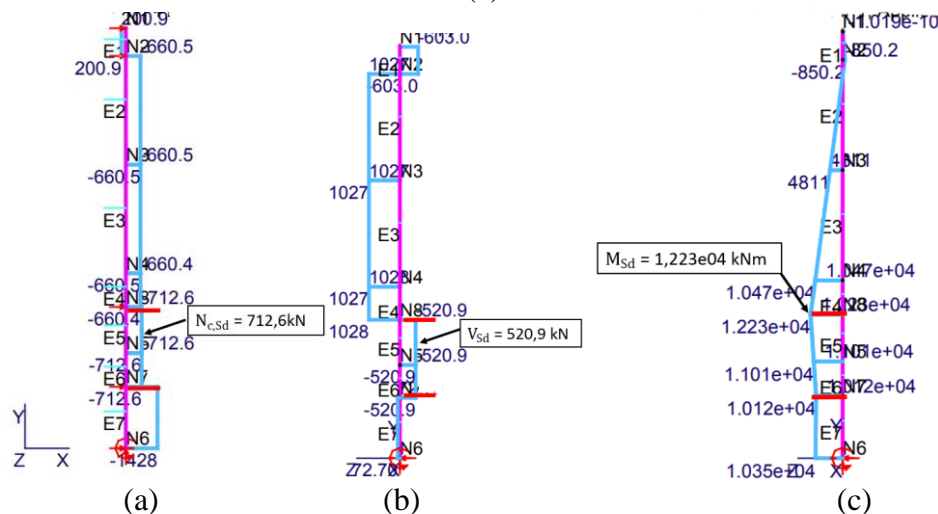
$$F_{v_{c,Sd}} = -631 \cdot 1,4 + 3 \cdot 1,4 + 17 \cdot 1,5 \cdot 0,7 = -861,35 \text{ kN}$$

$$F_{h_{c,Sd}} = 1120 \cdot 1,4 - 7 \cdot 1,4 + 69 \cdot 1,5 \cdot 0,7 = 1630,65 \text{ kN}$$

Para as outras forças, procedendo em forma similar, obtém-se: $F_{v_{D,Sd}} = -715,75 \text{ kN}$, $F_{h_{D,Sd}} = 593,6 \text{ kN}$, $F_{v_{E,Sd}} = 100,45 \text{ kN}$, $F_{h_{E,Sd}} = -301,5 \text{ kN}$, $F_{v_{F,Sd}} = 100,45 \text{ kN}$, $F_{h_{F,Sd}} = -301,5 \text{ kN}$, $F_{v_{G,Sd}} = -52,15 \text{ kN}$, $F_{h_{G,Sd}} = -1548,4 \text{ kN}$.

Com os valores obtidos para Combinação I e Combinação II, é então realizada a análise dos esforços para a determinação de $N_{c,Sd}$, V_{Sd} e M_{Sd} na seção selecionada para estudo. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos para a Combinação I, sendo marcado em vermelho a região em estudo. Análise similar foi realizada para a Combinação II.

Figura 7 – Análise de esforços na estrutura (a) Carregamento normal (b) Carregamento cortante (c) Momento fletor



A Tabela 3 mostra as duas combinações de cargas solicitantes de cálculo na seção em estudo utilizando o método dos estados limites. É selecionada para realizar a verificação da estrutura a combinação mais desfavorável para as solicitações nessa seção (Combinação I).

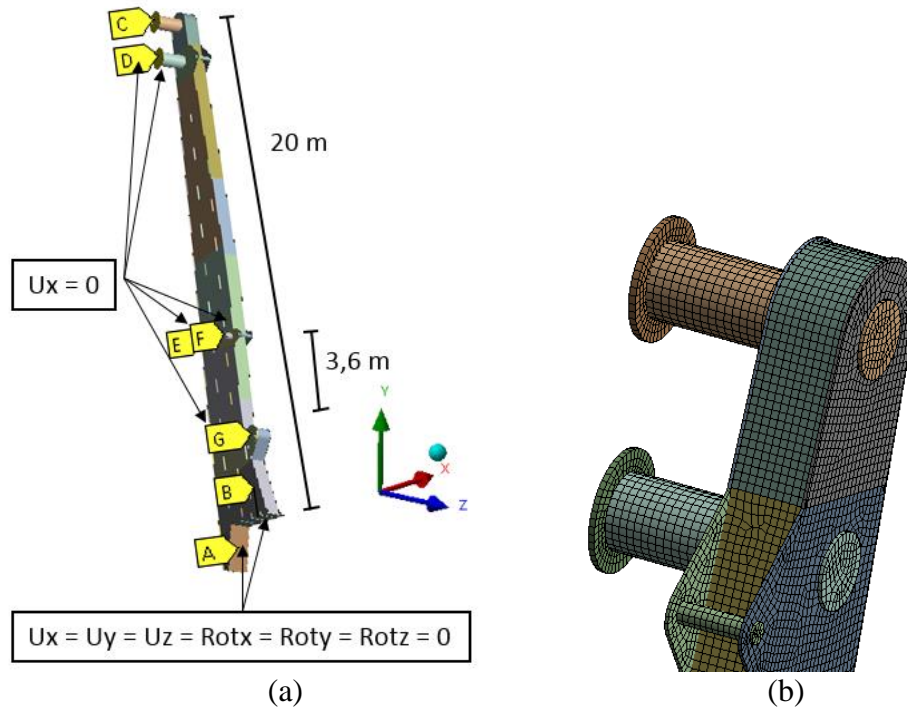
Tabela 3 – Combinações de cargas solicitantes de cálculo

| Combinação | $N_{c,Sd}$ | V_{Sd} | M_{Sd} |
|------------|------------|----------|-----------|
| I | -712,6 kN | 520,9 kN | 12230 kNm |
| II | -680 kN | 528,7 kN | 12080 kNm |

4.2 Análise por elementos finitos do pórtico superior via Ansys

Para realizar a simulação da operação da estrutura em estudo, utilizou-se o software comercial de elementos finitos *Ansys*. O modelo numérico foi modelado conforme demonstrado na Figura 8 (b), utilizando 142851 nós e 47840 elementos de casca de 8 nós com 6 graus de liberdade.

Figura 8 – (a) Estrutura utilizada para simulação numérica no Ansys (b) detalhe da malha de elementos finitos



As regiões A e B da Figura 8 (a) representam as áreas onde os graus de liberdade de rotação e translação são restringidos, enquanto as demais regiões de C até G representam os pontos onde são fixados a translação no eixo x da estrutura. Foram aplicadas as cargas solicitantes da estrutura, conforme Figura 6 (a), de maneira que as cargas correspondam a configuração de cargas da Combinação 1 normalizadas referente a maior componente em valor absoluto (1630650). Estes valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Cargas aplicadas no modelo numérico desenvolvido por elementos finitos

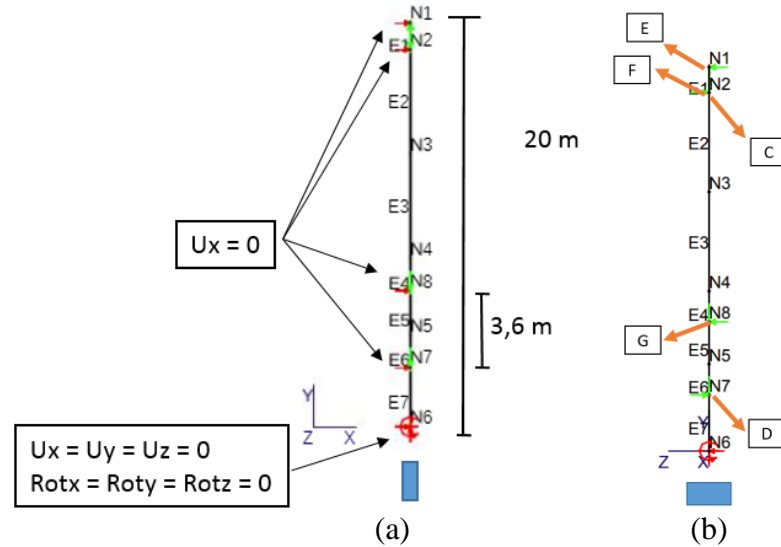
| Região | Carga Vertical (N) | Carga Horizontal (N) |
|--------|-----------------------------|------------------------|
| C | $-861,35/1630,65 = -0,5282$ | $-1630,65/1630,65 = 1$ |
| D | -0,4389 | -0,3640 |
| E | 0,0616 | 0,1848 |
| F | 0,0616 | 0,1848 |
| G | -0,0319 | 0,9495 |

Após, realizou-se a análise linear elástica e a análise de flambagem elástica, verificando (i) qual a carga crítica de flambagem para a estrutura, (ii) qual a tensão crítica elástica normal σ_e e (iii) qual a tensão crítica elástica de cisalhamento τ_e . Os valores obtidos em tais análises serão utilizados na aplicação do método híbrido.

4.3 Análise por elementos de barra do pórtico superior via *Mastan*

Com a utilização do *software Mastan* foi modelado de maneira simplificada o elemento vertical do pórtico superior. Foram aplicadas as cargas correspondentes a Combinação 1 apresentadas no fim da seção 4.1, conforme Figura 9 (b). As condições de contorno podem ser vistas na Figura 9 (a).

Figura 9 – Modelagem da estrutura via *Mastan* (a) Vista plano Y-X com condições de contorno (b) Vista plano Y-Z com cargas aplicadas



Em N6 os deslocamentos de translação e rotação são restringidos, e em N1, N2, N7 e N8 a translação em x é restringida, conforme indicado na Figura 9. As cargas são aplicadas nos nós N1, N2, N7 e N8, conforme configuração de carregamento da Combinação 1 (ver fim da seção 4.1).

Realizou-se a análise de flambagem elástica, obtendo-se então o fator da carga crítica de flambagem. Também foi realizada uma análise considerando não-linearidade física e geométrica da estrutura em forma simplificada. Neste caso o material é considerado com um comportamento elástico perfeitamente plástico e também é considerada a possibilidade de a estrutura ter grandes deslocamentos. É importante salientar que, conforme visto em Nascimento (2013), neste tipo de análise aplica-se um nível de cargas que levaria a estrutura ao colapso e, durante a análise não-linear, esta carga é aplicada em incrementos produzindo após cada incremento um ajuste iterativo para procurar o equilíbrio de cada configuração. Em Gringoletti (2008), foram avaliados diversos modelos de colapso e, utilizando um modelo de elementos finitos não-linear físico e geométrico empregando modelo de casca, chegou-se a resultados próximos dos obtidos por normas de cálculo.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados obtidos para o método clássico da NBR 8800:2008

Determinação do $N_{c,Rd}$: Realizou-se, para as cargas normais à estrutura, a verificação de carga de colapso conforme metodologia clássica da NBR 8800:2008 para os dois eixos de inércia da seção em estudo apresentada na Figura 6. Conforme pode ser observado na Figura 2 (b), no sentido de menor inércia da seção tem-se travamentos laterais na estrutura enquanto que no sentido de maior inércia da seção não há, de maneira que os coeficientes de flambagem K e comprimento do perfil L variam conforme o eixo analisado. A Tabela 5 apresenta para os dois casos os valores do momento de inércia I, coeficiente de flambagem K, comprimento do perfil L e força axial de flambagem elástica N_e . O coeficiente de flambagem K é obtido a partir da Tabela 12 do Anexo A, considerando-se o caso em que há travamento lateral, portanto considera-se fixo nas duas extremidades, e o caso em que no sentido da flambagem não há travamento, portanto a extremidade superior considera-se livre e a extremidade inferior considera-se engastada. O comprimento do perfil L também é definido a partir disso, sendo no primeiro sentido de flambagem considerado apenas o comprimento entre travamentos laterais

e no segundo sentido de flambagem considera-se o comprimento total da estrutura. Para a definição da força axial resistente de cálculo $N_{c,Rd}$, selecionou-se o menor N_e . Os valores obtidos e considerados são apresentados na Tabela 6. Vale ressaltar que para o presente estudo analisou-se a seção em apenas um corte da viga, porém para uma verificação completa da estrutura é necessário que as outras regiões e seções sejam também analisadas.

Tabela 5 – Valores para definição da menor força axial de flambagem elástica N_e

| | I (m ⁴) | K | L (m) | N_e (kN) |
|--------|---------------------|---|-------|------------|
| Eixo x | 0,0515 | 2 | 20 | 65145 |
| Eixo z | 0,0041 | 1 | 3,6 | 649563 |

Tabela 6 – Valores obtidos para verificação de força axial resistente de cálculo e propriedades mecânicas do material

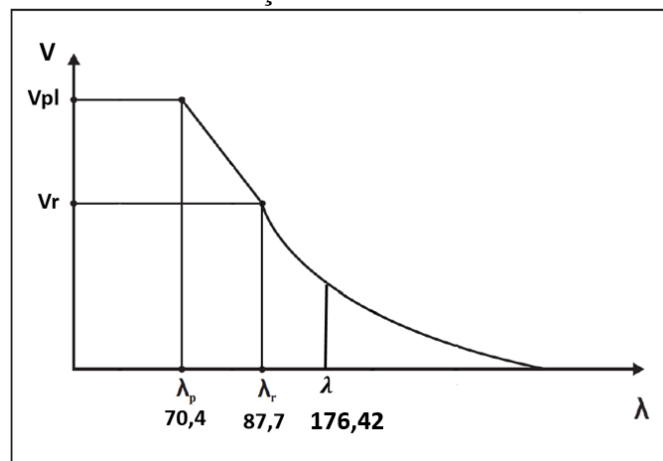
| Q | χ | A_g (m ²) | f_y (MPa) | E (GPa) | γ_{a1} | λ_0 | $N_{c,Rd}$ (kN) |
|------|--------|-------------------------|-------------|---------|---------------|-------------|-----------------|
| 0,77 | 0,91 | 0,07865 | 250 | 205 | 1,1 | 0,48 | 12518 |

Determinação do V_{Rd} : Os resultados para a metodologia de cálculo de V_{Rd} da metodologia clássica da norma são apresentados na Tabela 7. A Figura 10 apresenta a relação entre os parâmetros de esbeltez referente à plastificação λ_p e referente ao início do escoamento λ_r . É possível observar que a flambagem ocorre na região antes do início do escoamento da estrutura, portanto a carga crítica de flambagem é igual à carga de colapso.

Tabela 7 – Valores obtidos para verificação da força cortante resistente de cálculo

| λ | λ_r | λ_p | $V_{p\ell}$ (kN) | A_w (m ²) | k_v | γ_{a1} | V_{Rd} (kN) |
|-----------|-------------|-------------|------------------|-------------------------|-------|---------------|---------------|
| 176,42 | 87,7 | 70,4 | 8269 | 0,0551 | 5 | 1,1 | 1486 |

Figura 10 – Curva de relação entre os índices de esbeltez



Determinação do M_{Rd} : A Tabela 8 traz os resultados para os três tipos de verificação de flambagem devido ao momento fletor atuante na estrutura. Conforme mencionado na Equação 19 do Anexo B, é considerado como M_{Rd} o menor valor calculado. A situação mais crítica foi determinada pelo M_{Rd} de FLT, que prevê a plastificação como governante do colapso da estrutura, pois λ é menor do que λ_p . Portanto, $M_{Rd} = 15779$ kNm.

Tabela 8 – Valores obtidos para verificação do momento fletor resistente de cálculo

| | λ | λ_p | λ_r | $M_{p\ell}$ (kNm) | M_{Rd} (kNm) | W_{ef} (m ³) | M_r (kN) |
|-----|-----------|-------------|-------------|-------------------|----------------|----------------------------|------------|
| FLA | 176,42 | 107,7 | 163,2 | 17357 | 23140 | 0,095 | 23901 |
| FLT | 15,65 | 60,26 | 96,42 | 17357 | 15779 | - | - |
| FLM | 23,43 | 32,1 | 40,1 | 17357 | 15779 | - | - |

Por haver interação de efeitos solicitantes na estrutura, o critério estabelecido na Equação 24 do Anexo B deve ser atendido. Para os resultados de $N_{c,Rd}$, V_{Rd} e M_{Rd} obtidos na seção 5.1 temos:

$$\left(\frac{712,6}{12518} + \frac{12230}{15779}\right) + \left(\frac{520,9}{1486}\right)^2 = 0,95 \quad (2)$$

Por ser menor que 1, o critério então é atendido, assim como a verificação individual das ações conforme Equações 4, 10 e 11.

5.2 Resultados obtidos com o método híbrido aplicando a NBR 8800:2008

Com o modelo numérico em elementos finitos visto na seção 4.2, e aplicando as cargas conforme Tabela 4, realizou-se a análise linear elástica da estrutura. Utilizando o mesmo modelo numérico, aplicou-se a análise linear de flambagem. A Figura 11 (a) apresenta o resultado do primeiro modo de flambagem, selecionado por ser o primeiro modo de flambagem a interagir com a região analisada nesse estudo. Nota-se que a flambagem ocorre localmente na alma. O fator multiplicador (autovalor) obtido foi de 3,4899e06. Como se obteve flambagem local na chapa lateral da estrutura, os valores de tensão utilizados foram os valores apresentados para esta região. Para o cálculo do índice de esbeltez reduzido é utilizado o valor de σ_e , que é obtido a partir da mínima tensão normal da análise linear elástica multiplicado pelo fator multiplicador (autovalor) obtido na análise de flambagem. A Figura 11 (b) ilustra com detalhes o procedimento realizado para cálculo de σ_e . Para τ_e é realizado procedimento similar, porém considerando-se a máxima cortante no cálculo. A Figura 13 do Apêndice A ilustra o procedimento para τ_e . A partir dos resultados obtidos na análise elástica linear, multiplicando-se pelo fator de divisão das cargas definido como 1630650, encontra-se os valores para σ_{Sd} e τ_{Sd} . O procedimento é ilustrado em detalhes na Figura 14 e na Figura 15 do Apêndice A. σ_{Rd} e τ_{Rd} são calculados conforme Equações 23 e 24 a partir de σ_e e τ_e . Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 9, para a tensão normal, e na Tabela 10, para a tensão de cisalhamento.

Figura 11 – (a) Estrutura deformada da simulação por elementos finitos de flambagem elástica linear para a estrutura do pórtico. (b) Cálculo da tensão crítica elástica σ_e

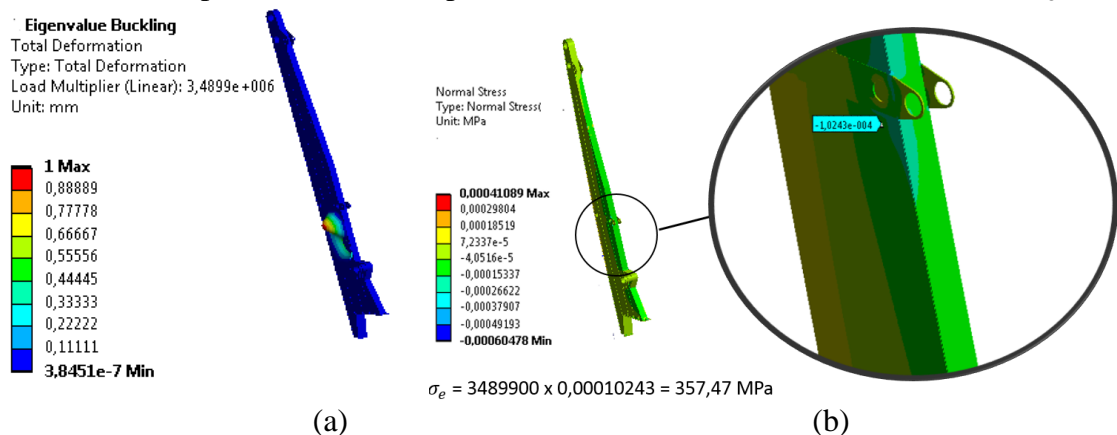


Tabela 9 – Resultados para o estado-limite de flambagem sob efeito de tensão normal

| σ_{Sd} (MPa) | σ_e (MPa) | λ_0 | χ | σ_{Rd} (MPa) |
|---------------------|------------------|-------------|--------|---------------------|
| 167 | 357 | 0,83 | 0,74 | 170 |

Tabela 10 - Resultados para o estado-limite de flambagem sob efeito de tensão cisalhante

| τ_{Sd} (MPa) | τ_e (MPa) | λ_0 | χ | τ_{Rd} (MPa) |
|-------------------|----------------|-------------|--------|-------------------|
| 32 | 68 | 1,48 | 0,39 | 54 |

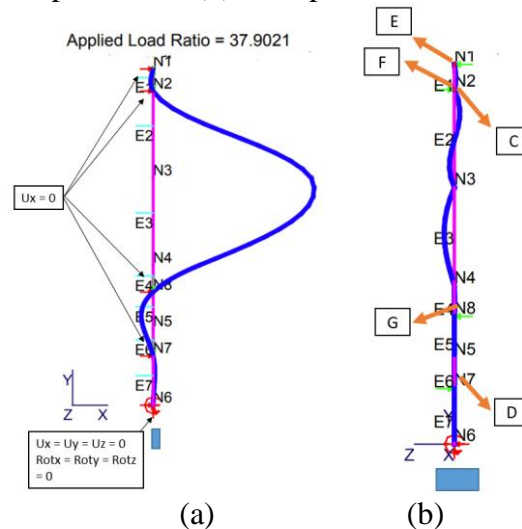
Verifica-se então que σ_{Sd} é menor que σ_{Rd} e τ_{Sd} é menor que τ_{Rd} , atendendo assim aos critérios da norma. De maneira a possibilitar a comparação entre o método híbrido e o método convencional da norma, considerando-se que o primeiro analisa tensões e o segundo analisa solicitações, estabeleceu-se, para comparação com o fator de 0,95 obtido na Equação 2, o seguinte fator considerando que a situação mais crítica é produzida pela tensão principal de compressão:

$$\left(\frac{167}{170}\right) = 0,98 \quad (3)$$

5.3 Verificação de carga crítica de flambagem pelo *Mastan*

Outro método usado foi a análise para carga crítica de flambagem elástica realizada no *Mastan*, com cargas solicitantes aplicadas conforme Figura 9 e definidas no fim da seção 4.1, de maneira a verificar o comportamento da estrutura frente à Combinação I de cargas solicitantes. Apresentou como resultado a Figura 12 (a) e (b), onde se tem o primeiro modo de flambagem e o fator multiplicador (*applied load ratio*) (37,9021). O fator multiplicador é o autovalor da análise que, multiplicando as cargas solicitantes na região analisada conforme Figura 7 (a), (b) e (c), define o conjunto de cargas que levam a estrutura a flambar elasticamente. Obtém-se então o seguinte conjunto de cargas crítico: $N = 712,6\text{kN} * 37,9021 = 27009 \text{ kN}$; $V = 520,9\text{kN} * 37,9021 = 19743 \text{ kN}$; $M = 12230\text{kNm} * 37,9021 = 463542 \text{ kNm}$.

Figura 12 – Resultado da simulação de flambagem elástica linear pelo *Mastan*. (a) vista plano Y-X (b) vista plano Y-Z



5.4 Análise não-linear por *Mastan*

Se utilizou também o *software Mastan*, para realizar uma análise de segunda ordem não-linear para determinar a carga de colapso da estrutura, com as mesmas condições de contorno da análise linear. Aumentou-se as cargas aplicadas de maneira a ficarem cinquenta vezes maiores que as cargas determinadas para a Combinação 1. Na Figura 16 do Apêndice A tem-se o resultado apresentado. A razão de aplicação de carga (*applied load ratio*) (0,653) multiplicado pelas cargas solicitantes na região analisada, conforme Figura 7 (a), (b) e (c), levando-se em consideração a majoração em cinquenta vezes das cargas, define o conjunto de forças que levam a estrutura ao colapso. Obtém-se então o seguinte conjunto de cargas crítico: $N = 712,6 \text{ kN} * 50 * 0,653 = 23266 \text{ kN}$; $V = 520,9 \text{ kN} * 50 * 0,653 = 17007 \text{ kN}$; $M = 12230\text{kNm} * 50 * 0,653 = 399309 \text{ kNm}$.

A Tabela 11 apresenta o resumo dos resultados obtidos no estudo, considerando-se a metodologia clássica da NBR 8800:2008 e a análise realizada via *Mastan*. O momento fletor para a carga crítica de flambagem M_{cr} considerando o método clássico da norma é calculado conforme definido na Tabela G.1 da NBR 8800:2008 para FLT, com $C_b = 1$.

Tabela 11 – Comparação dos valores obtidos pelas diferentes metodologias aplicadas

| | Carga crítica de flambagem | | | Carga de colapso | | |
|----------------------|----------------------------|------------------|--|------------------|------------------|----------------|
| | Esforço Normal | Esforço Cortante | Momento Fletor (M_{cr}) | Esforço Normal | Esforço Cortante | Momento Fletor |
| NBR8800 – Clássico | 65145 kN | 1486 kN | $\frac{2 \cdot 1 \cdot 2,05E+11 \sqrt{0,017 \cdot 0,078}}{15,65} = 973581$ kNm | 12518 kN | 1486 kN | 15779 kNm |
| Modelo <i>Mastan</i> | 27009 kN | 19743 kN | 463542 kNm | 23266 kN | 17007 kN | 399309 kNm |

É possível notar, comparando o método clássico e o método híbrido, que os resultados obtidos foram coerentes, como mostra a comparação das expressões (2) e (3). Algumas ambiguidades devem ser estudadas com maior profundidade, como por exemplo a forma de determinar a configuração de flambagem associada com o modo de colapso.

6 CONCLUSÃO

Foram realizadas duas análises seguindo as metodologias apresentadas na NBR 8800:2008, uma utilizando o método clássico, através de soluções analíticas, e outra utilizando o método híbrido, que associa soluções analíticas e numéricas. Utilizou-se o método dos elementos finitos para realizar a verificação linear da estrutura frente ao colapso por flambagem. Além disso utilizou-se o *software Mastan* para calcular a configuração de flambagem elástica e a configuração de colapso empregando um modelo não-linear físico e geométrico. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que:

Os resultados obtidos mostram que a metodologia híbrida da NBR 8800:2008 apresenta resultados coerentes com a metodologia clássica da norma, ao mesmo tempo em que sua aplicação se mostrou mais simples, principalmente quando considera-se geometrias complexas. Porém, verificou-se que não é trivial a determinação do modo de flambagem a ser considerado para se definir σ_e e τ_e da norma, principalmente quando ocorre flambagem local nos elementos solicitados.

Os resultados obtidos pelo programa *Mastan* não foram coerentes com os apresentados pela norma devido a este modelo de vigas não capturar a interação da flambagem local da mesa e alma do elemento vertical avaliado.

Sugere-se para próximos trabalhos a análise não-linear física e geométrica da estrutura por elementos finitos, conforme Grigoletti (2008) e Nascimento (2013); a verificação de todas as seções da estrutura pelo método clássico da norma, comparando com o resultado do método híbrido; e a comparação entre o método clássico e o método híbrido da NBR 8800:2008 utilizando outras estruturas com diferentes tipos de solicitações.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2. Ed. NBR-8800 Rio de Janeiro. 2008. 237p.
- ALMEIDA, A. C. B. **Análise Inelástica de Pórticos Planos Considerando a Plasticidade Distribuída e o Efeito das Tensões Residuais nos Perfis Estruturais de Aço**. 2006. 165p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- ANSYS, INC. **ANSYS Verification Manual**. Ansys Release 9.0. Canonsburg, 2004.
- FREITAS, M.S da R.; CASTANHEIRA, A.M.; FREITAS, A. M. S. **Confiabilidade de Vigas Metálicas dimensionadas pela norma brasileira NBR 8800**. Ouro Preto: Revista Escola Minas 60 (2): 261-269, abr, jun, 2007.
- GRIGOLETTI, G. de C. **Otimização Via Algoritmos Genéticos de Perfis U Formados a Frio Submetidos à Compressão Utilizando o Método da Resistência Direta**. 2008. 184p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- MCGUIRE, W.; GALLAGHER, R. H.; ZIEMIAN, R. D. **Matrix Structural Analysis**. Segunda edição. New York: John Wiley & Sons, 2000. 459p.
- NASCIMENTO, G. R. **Comparação crítica entre diferentes métodos para calcular a carga de colapso em estruturas de aço**. 2013. 137p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- PFAIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2009. 357 p.
- SANTOS, W. S. **Interação Flambagem Global – Flambagem Local em Pilares Metálicos de Seção I Duplamente Simétricos Sob Compressão Uniforme**. 2002. 120p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.
- SILVA, A. L. R. C. **Análise Numérica Não-Linear da Flambagem Local de Perfis de Aço Estrutural Submetidos à Compressão Uniaxial**. 2006. 205p. Tese de Doutorado. DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- SOUSA, J. L. A. O. **Filosofias de Projeto – Estruturas Metálicas I**, 2007. Disponível em <<http://www.fec.unicamp.br/~jls/EC-804-1s07/Introducao/FilosProj.pdf>> Acesso em: nov. 2020.
- TRICHES, F. J. **Análise Estrutural das Colunas de Sustentação de um Silo Metálico**. 2011. 93p. Dissertação de Mestrado – PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2011.

ANEXO A – TABELA COEFICIENTE DE FLAMBAGEM POR FLEXÃO

Tabela 12 – Coeficientes de flambagem por flexão

| | | | | | | |
|--|---|------|-----|-----|-----|-----|
| A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
| | | | | | | |
| Valores teóricos de K_x ou K_y | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |
| Valores recomendados | 0,65 | 0,80 | 1,2 | 1,0 | 2,1 | 2,0 |
| Código para condição de apoio | Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres | | | | | |

ANEXO B – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CLÁSSICA DE DIMENSIONAMENTO DA NBR 8800:2008

Conforme metodologias para verificação do dimensionamento de estruturas metálicas frente a cargas compressivas, cortantes e de momento fletor apresentadas nas seções 5.3 e 5.4 da NBR 8800:2008, temos:

No dimensionamento das estruturas, deve ser atendida a condição

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (4)$$

Onde $N_{c,Sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo e $N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo. A força axial de compressão resistente de cálculo associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flambagem, foi determinada pela seguinte expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (5)$$

A determinação do fator χ depende da interação entre flambagem elástica e plasticidade da seção em estudo e é dado em função do índice de esbeltez reduzido (λ_0):

$$\text{- para } \lambda_0 \leq 1,5: \chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (6)$$

$$\text{- para } \lambda_0 > 1,5: \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (7)$$

O índice de esbeltez reduzido, λ_0 , é definido por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (8)$$

Onde f_y é a tensão de escoamento do material, definida como 250 MPa, e N_e é a força axial de flambagem elástica, definida por:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (9)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material, definido como 205 GPa, I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo analisado e KL é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo analisado.

O fator de redução total Q é calculado conforme Anexo F da NBR 8800:2008, onde a seção em estudo é definida como um elemento AA.

Para a seção em estudo, foram realizadas análises de flambagem no eixo x e no eixo z , sendo calculado para cada caso um índice de esbeltez reduzido diferente e selecionado como força axial de compressão resistente $N_{c,Rd}$ o menor valor encontrado. Ainda segundo a NBR

8800:2008, considerando-se os esforços por força cortante e momento fletor, as seguintes condições devem ser atendidas:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (10)$$

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (11)$$

Para seções caixão fletidas em relação a um eixo central de inércia, a força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}) é dada conforme o seguinte procedimento:

- para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$V_{Rd} = \frac{V_{p\ell}}{\gamma_{a1}} \quad (12)$$

- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{p\ell}}{\gamma_{a1}} \quad (13)$$

- para $\lambda > \lambda_r$:

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{p\ell}}{\gamma_{a1}} \quad (14)$$

Sendo:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (15)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (16)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (17)$$

Sendo o fator k_v tomado igual a 5,0 e $V_{p\ell}$ é a força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento, definida como:

$$V_{p\ell} = 0,60 A_w f_y \quad (18)$$

O termo A_w é a área efetiva de cisalhamento, que foi tomada igual a:

$$A_w = 2 h t_w \quad (19)$$

Onde h é a altura total da alma e t_w é a espessura da alma.

Para a determinação do momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} da estrutura metálica, as expressões utilizadas seguem um procedimento similar aos procedimentos anteriores para força de compressão e cortante, sendo apresentado de forma sucinta a seguir. O procedimento completo pode ser encontrado nos anexos G e H da norma ABNT NBR8800:2008.

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} é tomado como o menor valor calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$M_{Rd} = \text{MIN} (M_{FLT}, M_{FLM}, M_{FLA}) \quad (20)$$

Onde M_{FLT} é definido como o momento fletor resistente de cálculo para o estado limite de flambagem lateral com torção; M_{FLM} é o momento fletor resistente de cálculo para o estado limite de flambagem local da mesa comprimida; e M_{FLA} é o momento fletor resistente de cálculo para o estado limite de flambagem local da alma.

Para perfis submetidos a diferentes tipos de solicitações (N_{Sd} , V_{Sd} e M_{Sd}) atuando em conjunto, a verificação do estado limite se dá também com a seguinte condição:

$$\left(\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right) + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{T_{Sd}}{T_{Rd}} \right)^2 \leq 1,0 \quad (21)$$

Onde T_{Sd} é o momento de torção solicitante de cálculo e T_{Rd} é o momento de torção resistente de cálculo. Por serem inexistentes no estudo em questão, ambos termos são desprezados.

ANEXO C – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA HÍBRIDA DE DIMENSIONAMENTO DA NBR 8800:2008

A tensão resistente de cálculo para os estados-limites últimos deve ser igual ou superior à tensão solicitante de cálculo, expressas em termos de tensão normal ou de tensão de cisalhamento determinadas pela teoria da elasticidade.

Assim, temos:

- Para o estado limite de tensão de tração sobre efeito da tensão normal:

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (22)$$

Onde σ_{Sd} é a máxima tensão principal, determinada por uma análise elástica linear de elementos finitos.

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

$$\sigma_{Sd} \leq \frac{\chi f_y}{\gamma_{a1}} \quad (23)$$

Onde σ_{Sd} é a mínima tensão principal, determinada por uma análise elástica linear de elementos finitos.

- Para os estados-limites de flambagem sob efeito de tensão de cisalhamento:

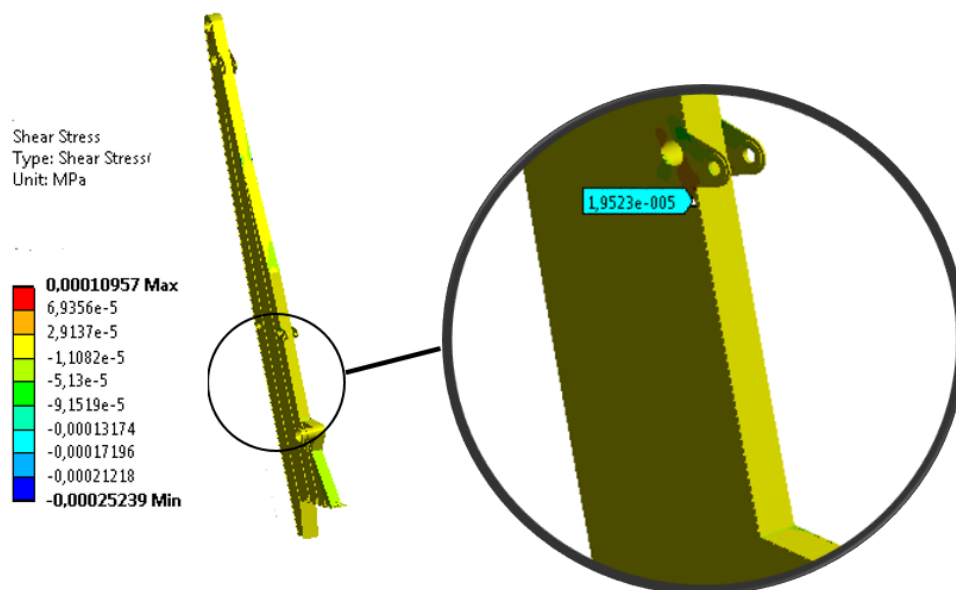
$$\tau_{Sd} \leq \frac{0,60 \chi f_y}{\gamma_{a1}} \quad (24)$$

Onde τ_{Sd} é a máxima tensão cortante, determinada também por uma análise elástica linear de elementos finitos.

O fator de redução associado à resistência à compressão χ é determinado conforme expressões (6) e (7) propostas pela norma NBR 8800 (2008) apresentadas no Anexo B do presente trabalho, adotando-se $\lambda_0 = \sqrt{f_y/\sigma_e}$ para tensões normais e $\lambda_0 = \sqrt{0,60 f_y/\tau_e}$ para tensões de cisalhamento. A tensão crítica elástica normal σ_e e a tensão crítica elástica de cisalhamento τ_e são determinadas neste estudo via análise por elementos finitos, resolvendo uma análise de flambagem elástica da estrutura analisada.

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS MODELOS NUMÉRICOS

Figura 13 – Determinação de τ_e



$$\tau_e = 3489900 \times 0,000019523 = 68 \text{ MPa}$$

Figura 14 – Determinação de σ_{sd}

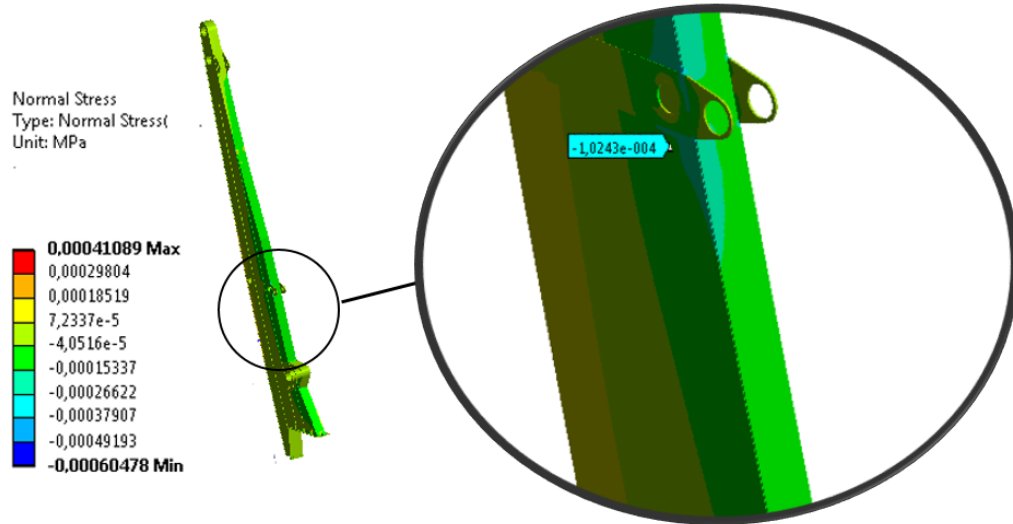


Figura 15 – Determinação de τ_{sd}

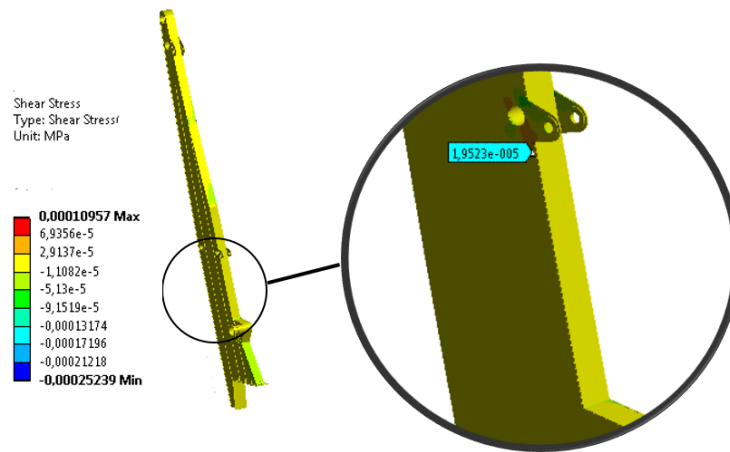


Figura 16 – Modo de colapso da estrutura pela análise não-linear física e geométrica via *Mastan* (a) vista plano Y-X (b) vista plano Y-Z

