Gustavo Sobue

Modelagem Paramétrica de Pórticos Rolantes:

Estabilidade Estrutural e Otimização

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia

São Paulo

2005

Gustavo Sobue

Modelagem Paramétrica de Pórticos Rolantes:

Estabilidade Estrutural e Otimização

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:

Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:

Oscar Brito Augusto

São Paulo

2005

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 11 de agosto de 2005.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Sobue, Gustavo

Modelagem paramétrica de pórticos rolantes: estabilidade estrutural e otimização / G. Sobue. -- ed.rev. -- São Paulo, 2005. 90 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Pórticos rolantes 2.Máquinas de elevação e transporte 3.Elementos finitos 4.Parametrização e otimização I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Dedicatória

À minha família

Agradecimentos

À equipe de engenharia da Bardella pela oportunidade e auxílio técnico fornecido.

Ao meu amigo Germano, pelo incentivo e apoio.

Ao meu orientador Oscar e ao professor Nunes, pela paciência e colaboração.

Resumo

SOBUE, G. **Modelagem paramétrica de pórticos rolantes: estabilidade estrutural e otimização**. 2005. 90f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta de automatização de cálculo para projeto estrutural de pórticos rolantes. Com o apoio da geração automática de um modelo de elementos finitos e um memorial de cálculo, o projeto estrutural desses equipamentos pode ser rapidamente verificado quanto ao limite de escoamento do material e resistência à flambagem.

Optou-se pela utilização do método dos elementos finitos para o cálculo estrutural, pois se trata de uma ferramenta de cálculo moderna, que permite avaliar soluções para as quais não há ferramentas analíticas disponíveis. Porém, o tempo para geração de modelos de cálculo pode ser longo em relação ao cronograma do projeto, principalmente se houver a necessidade de se alterar a geometria inicial ou se existirem várias condições de carregamento a serem analisadas. A utilização de um pré-processador permite que várias alternativas sejam analisadas para escolha da que melhor atenda aos requisitos de projeto e de custo.

Assim como ocorre com outras estruturas de engenharia, não existe uma equação de dimensionamento, mas sim de verificação; as estruturas ótimas são procuradas por tentativa e erro com base na experiência do projetista. Para facilitar a busca de uma estrutura ótima, implementou-se também uma rotina para otimizar as estruturas metálicas do pórtico. Adotou-se como função objetivo nesta implementação a minimização da massa, o que no caso dos pórticos implica em redução da área da seção

transversal das vigas. Como restrições a esta redução adotaram-se o limite de escoamento do material e limite de estabilidade da estrutura (flambagem).

Foram utilizados os aplicativos Excel (Microsoft), Ansys (Ansys Inc.) e Mathcad (Mathsoft) de maneira integrada a fim de se obter uma interface amigável, uma análise estrutural confiável e a elaboração automática de um memorial de cálculo.

Palavras-chave: Pórticos rolantes. Máquinas de elevação e transporte. Elementos finitos.

Parametrização e otimização.

Abstract

SOBUE, G. **Gantry cranes parametric modeling: structural stability and optimization.** 2005. 90f. Thesis (Master) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

The objective of this work is to develop a tool to generate an automatic structural design of gantry cranes. With an automatic generation of finite element models and also a design report, this routine allows a fast verification against yield of material and structural instability.

The use of the finite element method was chosen for the structural design because it is a modern analysis tool that permits the evaluation of geometric configurations for which there are no analytical formulations available. However, the time necessary to build these models may be high, especially if there are changes in the initial geometry and many load cases. The use of a pre-processor allows the evaluation of a series of geometric alternatives, within which would be chosen the one with the lowest cost that attends the client's specifications.

Like many other engineering problems, there are no direct equations to find an adequate structure; there are only verification procedures available; the optimum structures are searched by trial and error, based on the designers' experience. To accelerate this search process, an optimization routine was developed. Mass reduction was adopted as the objective function, which leads to reduction of the cross section area of the beams. Yield strength and buckling were adopted as restrictions to this optimization.

Excel (Microsoft), Ansys (Ansys Inc) and Mathcad (Mathsoft) software were integrated to provide an user-friendly interface, reliable structural analysis and an automatic report generation.

Keywords: Gantry cranes. Transportation and lifting machines. Finite elements.
Parametrization and optimization.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO	16
1.2	METODOLOGIA	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	FREITAS, G. G, “MODELAGEM PARAMÉTRICA DE COMPORTAS HIDRÁULICAS. ANÁLISE DE TENSÕES E ESTABILIDADE ESTRUTURAL” [2]	18
2.2	HOUGAZ, A. B; DIAS, C. A, “3D FEM PARAMETRIC MODELING APPLIED TO OPTIMIZATION OF HULL GIRDER” [3].....	18
2.3	KOGAN, J, “CRANE DESIGN” [4]	19
2.4	NORMA NBR 8400/1984 [7]	19
2.5	PFEIL, W, “ESTRUTURAS DE AÇO” [8]	20
3	MODELO DE SÍNTESE	21
3.1	VIGA PRINCIPAL	22
3.2	VIGAS DE FECHAMENTO	23
3.3	PERNAS	24
3.4	VIGAS DE LIGAÇÃO.....	25
3.5	TRUQUES.....	26
4	DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA	28
4.1	MÓDULO ENTRADA DE DADOS.....	28
4.2	MÓDULO SIMULAÇÃO.....	31
4.2.1	<i>Leitura / tratamento / verificação de dados</i>	<i>32</i>

4.2.2	<i>Definição dos atributos dos elementos.....</i>	<i>33</i>
4.2.3	<i>Geração dos Nós.....</i>	<i>33</i>
4.2.4	<i>Geração dos Elementos.....</i>	<i>39</i>
4.2.5	<i>Carregamentos.....</i>	<i>44</i>
4.2.6	<i>Condições de Contorno</i>	<i>51</i>
4.2.7	<i>Solução</i>	<i>53</i>
4.2.8	<i>Pós-Processamento no Ansys</i>	<i>54</i>
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	55
5.1	LEITURA DOS DADOS.....	55
5.2	TRATAMENTO DOS DADOS.....	55
5.3	DETERMINAÇÃO DA COMBINAÇÃO CRÍTICA.....	57
5.4	TENSÕES ATUANTES NOS PAINÉIS	57
6	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	63
6.1	METODOLOGIA DE ESTUDO.....	63
6.1.1	<i>Introdução à otimização paramétrica utilizando o Ansys.....</i>	<i>64</i>
6.1.2	<i>Otimização de uma barra com duas variáveis de projeto.....</i>	<i>66</i>
6.1.3	<i>Otimização de uma barra com três variáveis de projeto</i>	<i>72</i>
6.1.4	<i>Otimização do volume das pernas de um pórtico rolante.....</i>	<i>78</i>
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE – EXEMPLOS DE TELAS DO PROGRAMA.....	89

Notações, Nomenclatura e Simbologias

- L – Comprimento da viga [m]
- H – Altura do Pórtico [m]
- V – Comprimento do Vão [m]
- Y – Altura do enrolador de cabos [m]
- B – Largura da aba da viga [m]
- H_v – Altura da viga [m]
- X – Distância entre as linhas de centro da alma e o centro de área da secção transversal da viga [m]
- C – Coeficiente aerodinâmico
- F_w – Força do vento [N]
- P_a – Pressão aerodinâmica [Pa]
- A – Superfície exposta ao vento [m²]
- I_y – Momento de inércia em relação ao eixo Y [m⁴]
- M_{f_y} – Momento fletor em relação ao eixo Y considerado no Ansys [Nm]
- Y_{max} – Distância da última nervura da viga na direção Y [m]
- Y'_{max} – Distância da última nervura da viga na direção Y considerada no Mathcad [m]
- Z_{max} – Distância da última nervura da viga na direção Z [m]
- Z'_{max} – Distância da última nervura da viga na direção Z considerada no Mathcad [m]
- σ_{f_y} – Tensão de flexão em relação ao eixo Y considerado no Ansys [Pa]
- σ'_{f_y} – Tensão de flexão em relação ao eixo Y considerado no Mathcad [Pa]
- σ' – Momento fletor [Nm]
- a – Maior lado de uma placa [m]
- b – Menor lado de uma placa [m]

α – Razão entre os lados de uma chapa retangular
 σ_c – Tensão de compressão [Pa]
 σ_t – Tensão de tração [Pa]
 τ – Tensão de cisalhamento [Pa]
 σ_N – Tensão normal [Pa]
 σ_Y – Tensão de flexão em relação ao eixo Y [Pa]
 σ_Z – Tensão de flexão em relação ao eixo Z [Pa]
 γ_{fl} – Coeficiente de segurança de flambagem local
 σ_1 – Tensão máxima atuante no painel [Pa]
 σ_{fi} – Tensão normal crítica de flambagem [Pa]
 σ_e – Tensão de Euler [Pa]
 τ_{fi} – Tensão de cisalhamento crítica de flambagem [Pa]
 K_σ – Coeficiente de flambagem para compressão
 K_τ – Coeficiente de flambagem para cisalhamento
 ψ – Razão entre as tensões máxima e mínima atuantes no painel
 ν – Coeficiente de Poisson
 σ_{fic} – Tensão de comparação de flambagem [Pa]
 σ_{rc} – Tensão de comparação reduzida de flambagem [Pa]
 E – Módulo de elasticidade do material [Pa]
 I_z – Momento de inércia em relação ao eixo Z [m⁴]
 P – Força aplicada [N]
 t – Espessura das chapas das vigas [mm]
 σ_{ad} – Tensão admissível [Pa]

V_v – Volume da viga [m^3]

W – Módulo de resistência [m^3]

G – Módulo de elasticidade transversal [Pa]

K – Coeficiente encontrado em ROARK [10] TABELA 10.1.

m – Coeficiente encontrado em ROARK [10] TABELA 15.1.

H_i – Altura da viga na secção inferior da Perna [m]

B_i – Largura da aba da viga na secção inferior da Perna [m]

B_s – Largura da aba da viga na secção superior da Perna [m]

H_s – Altura da viga na secção superior da Perna [m]

β – Relação das larguras das abas das secções superiores e inferiores das Pernas

γ – Relação das alturas das almas das secções superiores e inferiores das Pernas

H_{perna} – Altura da Perna [m]

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 –PÓRTICO ROLANTE DA USINA HIDRELÉTRICA DE LAJEADO	15
FIGURA 3.1 – VIGA PRINCIPAL.....	22
FIGURA 3.2 – BALANÇOS.....	23
FIGURA 3.3 – VÃO CENTRAL	23
FIGURA 3.4 – VIGAS DE FECHAMENTO	24
FIGURA 3.5 – PERNAS.....	25
FIGURA 3.6 – VIGAS DE LIGAÇÃO	25
FIGURA 3.7 – VIGAS CABECEIRAS.....	26
FIGURA 3.8 – BRAÇO DO MOMENTO NO TRUQUE.....	27
FIGURA 3.9 – ELEMENTOS DOS TRUQUES NO PÓRTICO	27
FIGURA 4.1 - DIVISÃO DO PROGRAMA	28
FIGURA 4.2 – EXEMPLOS DE VARIÁVEIS DA PLANILHA DIMENSÕES	30
FIGURA 4.3 – EXEMPLOS DE VARIÁVEIS DA PLANILHA PROPRIEDADES	31
FIGURA 4.4 – NÓS REFERENTES ÀS SOLDAS NAS UNIÕES ENTRE VIGAS	34
FIGURA 4.5 – NÓS DOS APOIOS COM TRUQUE.....	35
FIGURA 4.6 – NÓS DOS APOIOS SEM TRUQUE	36
FIGURA 4.7 – NÓS DA VIGA DE LIGAÇÃO	36
FIGURA 4.8 – NÓS DA PERNA.....	37
FIGURA 4.9 – NÓS DO BALANÇO	38
FIGURA 4.10 – NÓS DO VÃO	38
FIGURA 4.11 – NÓS DA VIGA DE FECHAMENTO	39
FIGURA 4.12 – ELEMENTO BEAM44 DO SOFTWARE ANSYS.....	40
FIGURA 4.13 – MODELO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DISCRETIZAÇÃO	41
FIGURA 4.14 – VARIAÇÃO DA TENSÃO X Nº DE ELEMENTOS.....	42
FIGURA 4.15 – VARIAÇÃO DA TENSÃO X Nº DE ELEMENTOS.....	42
FIGURA 4.16 – EXEMPLO DE ORIENTAÇÃO DOS ELEMENTOS	43
FIGURA 4.17 – LOAD STEP 1	46
FIGURA 4.18 – LOAD STEP 3	47

FIGURA 4.19 – LOAD STEP 5	48
FIGURA 4.20 – LOAD STEP 7	49
FIGURA 4.21 – CONDIÇÕES DE CONTORNO COM TRUQUE.....	52
FIGURA 4.22 – CONDIÇÕES DE CONTORNO SEM TRUQUE.....	53
FIGURA 5.1 – PONTOS ONDE SÃO CALCULADAS AS TENSÕES NO ANSYS	56
FIGURA 5.2 – PONTOS ONDE SÃO CALCULADAS AS TENSÕES NO MATHCAD.....	56
FIGURA 5.3 – TENSÕES CONSIDERADAS NA VERIFICAÇÃO À FLAMBAGEM	58
FIGURA 5.4 –DEFINIÇÃO DOS PAINÉIS NAS VIGAS.....	58
FIGURA 5.5 – TENSÃO NORMAL DE COMPRESSÃO NAS VIGAS.....	59
FIGURA 5.6 – TENSÃO DE FLEXÃO NO EIXO Z.....	59
FIGURA 5.7 – TENSÃO DE FLEXÃO NO EIXO Y	60
FIGURA 6.1 – ESQUEMA DO PRIMEIRO CASO DE ESTUDO.....	66
FIGURA 6.2 – UNIVERSO DE SOLUÇÕES DO PRIMEIRO CASO	69
FIGURA 6.3 – ESQUEMA DO SEGUNDO CASO DE ESTUDO.....	72
FIGURA 6.4 – VARIÁVEIS DAS SECÇÕES DAS PERNAS	79
FIGURA 6.5 – PAINÉIS DAS PERNAS	81
FIGURA A.1 – PLANILHA DE ENTRADA DE DADOS: DIMENSÕES	89
FIGURA A.2 – PLANILHA DE ENTRADA DE DADOS: SECÇÕES TRANSVERSAIS.....	89
FIGURA A.3 – PLANILHA DE ENTRADA DE DADOS: CARREGAMENTOS	90
FIGURA A.4 – PROCEDIMENTO DO MATHCAD PARA CÁLCULO DE FLAMBAGEM	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – RESULTADO DO ARMAZENAMENTO DOS NÓS	44
TABELA 4.2 – CARREGAMENTOS.....	44
TABELA 4.3– CARREGAMENTOS X LOAD STEPS	50
TABELA 4.4– COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTOS	50
TABELA 4.5– COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTOS MAJORADOS.....	51
TABELA 5.1 – COEFICIENTES DE FLAMBAGEM	62
TABELA 6.1 – 1º ANÁLISE DO 1º CASO	71
TABELA 6.2 – 2º ANÁLISE DO 1º CASO	71
TABELA 6.3 – 1º ANÁLISE DO 2º CASO: “SUBPROBLEM APPROXIMATION METHOD”	75
TABELA 6.4 – 2º ANÁLISE DO 2º CASO: “FIRST ORDER METHOD”	76
TABELA 6.5 – 3º ANÁLISE DO 2º CASO: “RAND”, “SWEEP”, “S.A.” E “F.O.”.....	77
TABELA 6.6 –3º CASO: “RAND”, “SWEEP”, “S.A.” E “F.O.”	81
TABELA 6.7 –VERIFICAÇÃO DOS VALORES DO PONTO ÓTIMO.....	82
TABELA 6.8 –3º CASO: RESULTADOS COM ESPESSURA MÍNIMA DE 1MM.....	83
TABELA 6.9 –VERIFICAÇÃO DOS VALORES DO PONTO ÓTIMO TENDO ESPESSURA MÍNIMA DE 1MM.....	83
TABELA 6.10 –3º CASO: RESULTADOS COM ESPESSURA MÍNIMA DE 1MM E SEM RESTRIÇÃO DE DESLOCAMENTO MÁXIMO NAS PERNAS	84
TABELA 6.11 –VERIFICAÇÃO DOS VALORES DO PONTO ÓTIMO TENDO ESPESSURA MÍNIMA DE 1MM SEM RESTRIÇÃO DE DESLOCAMENTO MÁXIMO NAS PERNAS	84

1 Introdução

Pórticos móveis são estruturas metálicas utilizadas para a movimentação de cargas, sendo comumente empregados em usinas hidrelétricas, eclusas de navegação, portos, mineradoras e indústrias em geral. São estruturas de grande responsabilidade devido às cargas envolvidas, assim como as tarefas realizadas. Surgiram no início do século XIX, após o desenvolvimento das máquinas a vapor, motores de combustão interna e motores elétricos. Entre os tipos mais comuns estão os pórticos rolantes, nos quais o sistema de levantamento está suspenso por um carro. Este tipo pórtico é recomendado quando a utilização de trilhos suspensos é impraticável. Na Figura 1.1, apresenta-se um exemplo de pórtico rolante de uma usina hidrelétrica.

Figura 1.1 –Pórtico Rolante da Usina Hidrelétrica de Lajeado

O fato de os pórticos atuais serem utilizados em grande parte por consórcios de empresas particulares leva à necessidade de desenvolvimento de projetos estruturais cada vez mais seguros e competitivos. A utilização de ferramentas modernas de cálculo

como as baseadas no Método de Elementos Finitos possibilitam este aumento na competitividade.

1.1 Objetivo do Trabalho

O presente trabalho visa automatizar o processo de verificação estrutural quanto ao escoamento e estabilidade estrutural de pórticos rolantes.

1.2 Metodologia

Devido à complexidade da análise estrutural, utilizou-se o software comercial de elementos finitos Ansys (Ansys Inc.) para a geração de modelos numéricos paramétricos, e o Excel (Microsoft Corporation) para entrada de dados de projeto (interface gráfica com usuário). Para a geração de um relatório automático, elaborou-se um roteiro de cálculo no software comercial Mathcad (MathSoft). Optou-se pela geração de rotinas de integração entre os softwares para evitar erros durante a transferência de dados e agilizar o processo.

1.3 Justificativa

Conforme citado, a geração das rotinas terá como principal benefício a redução do tempo de verificação estrutural. Como ganhos secundários, propiciará um aumento na garantia de qualidade dos cálculos, a possibilidade de se avaliar várias alternativas de projeto e a geração automática de um memorial de cálculo. A automação das tarefas de cálculo permitirá maximizar o tempo disponível para a busca de soluções de engenharia. Deve-se lembrar que, neste tipo de projeto de engenharia, o objetivo é a determinação de uma estrutura que atenda às necessidades do cliente com o menor custo possível. Porém, não existe um roteiro padrão de cálculo a ser seguido. Normalmente, estima-se

uma geometria inicial, verifica-se sua resistência estrutural e determina-se o seu custo. A partir desta, sugerem-se modificações que permitam reduzir o custo, respeitando-se os limites estruturais do projeto. Tamasaukas [9] descreve um procedimento para projeto básico de pontes rolantes, porém, nenhuma referência com a mesma abordagem foi encontrada para pórticos rolantes.

2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica do presente trabalho abrangeu conhecimentos de projetos de pórticos rolantes, programação e otimização. Os principais trabalhos que contribuíram para o entendimento destes tópicos estão descritos separadamente nos itens 2.1 a 2.5.

2.1 Freitas, G. G, “Modelagem Paramétrica de Comportas Hidráulicas. Análise de Tensões e Estabilidade Estrutural” [2]

O trabalho de Freitas [2] foi útil em três aspectos:

- Definição do escopo da parametrização adotada: Foi feita uma análise para se determinar do grau de parametrização de um pórtico rolante considerando a complexidade de implementação e vantagens adquiridas baseada nos resultados e conclusões de Freitas [2].
- Programação em etapas: Utilizou-se o conceito de dividir em módulos para estruturar o programa. Isto facilitou o desenvolvimento e realização de testes do mesmo.
- Verificação quanto à flambagem localizada: O procedimento de verificação descrito na NBR 8400 [7], pôde ser melhor compreendido através da descrição do estudo feito por Freitas [2] em que é apresentada uma comparação entre as soluções analítica e numérica para o coeficiente de segurança e modos de flambagem.

2.2 Hougaz, A. B; Dias, C. A, “3D FEM parametric Modeling Applied to Optimization of Hull Girder” [3]

Hougaz mostra um caso de aplicação de otimização paramétrica de uma estrutura de navio utilizando vários métodos de otimização. Embora Ansys [1] contenha explicações sobre os métodos e tipos de variáveis envolvidas, Hougaz as apresenta por

meio de exemplos. Isto facilitou o entendimento do procedimento de uma análise de otimização que utiliza o método dos elementos finitos de forma automática.

Além de disso, essa referência mostra o entendimento de uma análise de otimização de maneira gradativa uma vez que a metodologia adotada baseia-se na validação de casos simples para se ter uma aplicação final com maior confiança. Assim, os estudos de caso apresentados no Capítulo 6 desta dissertação basearam-se nos exemplos de testes apresentados por Hougaz.

2.3 Kogan, J, “Crane Design” [4]

Kogan esclarece aspectos de escopo do projeto (como, por exemplo, a escolha do tipo de equipamento), de funcionamento e condições de carregamento às quais um equipamento de movimentação de carga geralmente está submetido.

Embora o trabalho ora proposto esteja voltado somente para o dimensionamento da estrutura e não de todo o equipamento onde se incluem motores, moitão, rodas, esquema elétrico e etc, o trabalho de Kogan foi útil para o entendimento dos fatores que influenciam a confiabilidade da estrutura. Nos Capítulos 5, 6 e 7, por exemplo, apresentam-se uma classificação e explicação mais detalhada dos carregamentos externos, apesar de a norma utilizada neste trabalho, NBR 8400 [7], também apresentar os carregamentos e coeficientes de majoração que devem ser considerados no projeto.

2.4 Norma NBR 8400/1984 [7]

Diferente de Kogan [4], que apresenta critérios de projetos de maneira qualitativa citando a importância dos componentes e carregamentos, a Norma NBR 8400 determina critérios de projetos utilizados em pórticos rolantes considerando números como

capacidade do pórtico, velocidade máxima de vento, tensões admissíveis para cada caso de carregamento, etc. Estes critérios foram importantes para a implementação do módulo de pós-processamento, em que se tem a verificação ao escoamento e flambagem, e também para a determinação dos limites das restrições utilizadas na otimização das Pernas do pórtico.

2.5 Pfeil, W, “Estruturas de Aço” [8]

No capítulo 6 deste trabalho são apresentadas as formulações analíticas para cálculo de estabilidade de placas retangulares sujeitas a flexo-compressão e cisalhamento. Embora a NBR 8400 [7] contenha um roteiro de cálculo para a verificação de flambagem localizada, Pfeil esclarece de maneira mais didática a relação entre as tensões atuantes e a tensão crítica de comparação. Além disso, Pfeil [8] também complementa a explicação com exemplo de cálculo para casos de tensões críticas acima do limite de proporcionalidade. Isso enfatiza a necessidade de se ter duas condições a serem verificadas: uma é o coeficiente de segurança ser maior que 1 e outra é a tensão crítica de comparação ser menor que o limite de proporcionalidade do material.

3 Modelo de Síntese

Os resultados necessários de uma análise por elementos finitos para verificação estrutural de pórticos rolantes são deslocamentos, tensões máximas e esforços solicitantes no centro de área da secção transversal das vigas. Para se obter estes resultados de um modelo de pórtico rolante, uma análise estática linear utilizando elementos de viga é suficiente, visto que os fenômenos dinâmicos podem ser representados por carregamentos estáticos equivalentes. Considerando isto, tem-se um pequeno tempo de processamento e simplificação na geração de elementos quando comparado a outros tipos de modelagem.

Embora um pórtico 3D tenha uma geometria simples, o dimensionamento exige a verificação da estrutura em vários pontos das vigas que são submetidas a vários carregamentos. Isto faz que o número de nós aumente e torne mais complexa a parametrização. A função de cada nó e elemento, para este caso, será apresentada mais adiante. Porém, a fim de facilitar o entendimento da geração automática do modelo, neste Capítulo apresentam-se os principais componentes de um pórtico rolante.

Os tópicos a seguir apresentam todas as partes de um modelo de elementos finitos de pórtico rolante. Porém, cabe lembrar que no projeto de um pórtico rolante tem-se um pré-dimensionamento das vigas da estrutura para criar-se um modelo com as dimensões aproximadas do projeto final.

O pré-dimensionamento de todas as vigas é realizado assumindo cada uma das vigas como uma viga biapoiada, submetida a forças verticais, horizontais e momentos fletores. A solução é obtida pela aplicação das equações de equilíbrio estático em vigas. As vigas das Pernas dos pórticos são aproximadas por vigas em balanço. Neste caso, o

carregamento principal é um momento fletor oriundo das reações horizontais nos apoios do pórtico.

3.1 Viga Principal

A Viga Principal é a viga que suporta o carro. O carro é uma estrutura de aço que suporta os mecanismos responsáveis pelo levantamento da carga (gancho, moitão, motores, redutores, etc.). Assim, esta viga recebe diretamente o carregamento da estrutura do carro e também a carga a ser movimentada. Por isso esta viga é de grande importância uma vez que recebe as maiores solicitações de flexão. Na Figura 3.1, destacam-se as duas Vigas Principais.

Figura 3.1 – Viga Principal

Esta viga ainda é dividida em Balanços e Vão Central que podem ser observados na Figura 3.2 e Figura 3.3 respectivamente. Estas nomenclaturas são úteis para indicar a posição das cargas ao longo da viga.

Figura 3.2 – Balanços

Figura 3.3 – Vão Central

3.2 Vigas de fechamento

As Vigas de Fechamento, junto com as Vigas Principais, determinam um quadro na parte superior do pórtico, cuja função é proporcionar um mínimo de rigidez à torção no

plano do quadro. Além disso, ele também determina os limites da movimentação da carga na direção lateral (direção longitudinal das Vigas Principais).

Figura 3.4 – Vigas de Fechamento

3.3 Pernas

As Pernas são as vigas que apóiam o quadro formado na parte superior. Desta maneira, são elas que determinam a altura do pórtico.

As Vigas Principais, solicitadas por flexão, transmitem o momento fletor para as Pernas. Portanto, o dimensionamento destas vigas deve considerar também a flexão além da compressão axial. Em alguns casos, adotam-se articulações em um dos pares de Pernas, próximas às Vigas Principais, para reduzir as solicitações de flexão e com isso diminuir a secção das vigas.

É comum adotar-se um par de Pernas com articulações e por consequência pelo menos um par de Pernas é dimensionado considerando a flexão para garantir a estabilidade do pórtico quanto ao tombamento. Nestes casos, como o momento fletor é transmitido pelas extremidades superiores, propõem-se vigas com um perfil variando de uma secção maior na extremidade superior para uma secção menor na extremidade inferior. Na

Figura 3.5, ilustram-se as Pernas com articulação (menores) e as pernas sem articulação (com secções diferentes nas extremidades).

Figura 3.5 – Pernas

3.4 Vigas de Ligação

A Viga de Ligação tem a função de prover estabilidade às Pernas. Pode ser denominada também de Viga Cabeceira quando as rodas são acomodadas em suas extremidades e não nos truques.

Figura 3.6 – Vigas de Ligação

Figura 3.7 – Vigas Cabeceiras

3.5 Truques

Os truques são componentes que não são considerados como vigas por tratarem-se de estruturas pouco esbeltas e rígidas. Porém, neste trabalho, não há interesse na análise dos truques e, por isso, foram modelados com elementos de vigas com rigidez alta em relação às demais do modelo. A função destes elementos é somente transmitir o momento causado pelo braço formado entre o ponto de apoio do pórtico no truque (eixo da articulação no truque) e o ponto de contato das rodas com os trilhos conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Braço do momento no Truque

Na Figura 3.9 são apresentados os elementos que representam os truques.

Figura 3.9 – Elementos dos Truques no Pórtico

4 Desenvolvimento do programa

O programa foi dividido em três módulos distintos: entrada de dados, simulação e análise dos resultados, conforme ilustrado na Figura 4.1. Optou-se por esta divisão devido à possibilidade de se desenvolver cada um paralelamente e para se realizar as atividades de entrada de dados e análise dos resultados fora do ambiente do software de elementos finitos.

Figura 4.1 - Divisão do Programa

4.1 Módulo Entrada de Dados

A função do módulo de entrada de dados é proporcionar ao usuário uma interface amigável com o programa de elementos finitos para facilitar a entrada dos dados de projeto. Estudaram-se algumas opções de softwares comerciais para realizar esta função: Ansys (Ansys Inc.) através da linguagem paramétrica UIDL (Ansys Interface Design Language), Mathcad (Mathsoft) e Excel (Microsoft Corporation). A utilização do Ansys foi descartada, pois implicaria na ocupação de uma licença para este software mesmo quando fosse utilizado somente para a entrada e dados. Além disso, o usuário precisaria de noções básicas de operação. O Mathcad também se mostrou inviável para

entrada de dados devido ao seu baixo desempenho quando utilizado com grande número de variáveis, figuras e tabelas. Assim, optou-se pelo Excel por ser de grande popularidade, fácil acesso e por apresentar bom desempenho para o envio de dados.

Para a integração com o módulo de simulação, o módulo de entrada de dados cria arquivos de texto contendo os valores dos parâmetros necessários para geração do modelo de elementos finitos, carregamentos, combinações dos carregamentos e controle do envio de dados.

Criou-se um arquivo padrão contendo três planilhas para que o usuário digite os valores dos dados de entrada. Cada planilha, semelhante a um formulário eletrônico, tem um formato para preenchimento dos valores das variáveis e foram nomeadas como DIMENSÕES, PROPRIEDADES e CARREGAMENTOS.

A planilha DIMENSÕES recebe os valores das dimensões principais do pórtico como, por exemplo, a altura das pernas, largura do vão, posição da cabine de comando, etc. Estas variáveis definem as coordenadas dos nós do modelo de elementos finitos. Na Figura 4.2 estão ilustrados alguns exemplos de variáveis.

Figura 4.2 – Exemplos de variáveis da planilha DIMENSÕES

A planilha PROPRIEDADES recebe os valores das dimensões das secções das vigas e das propriedades do material. Além disso, ela calcula automaticamente as propriedades geométricas e de resistência da secção como momentos de inércia, área e módulo de resistência. Na Figura 4.3 estão ilustrados alguns exemplos de cotas especificadas nesta planilha.

Figura 4.3 – Exemplos de variáveis da planilha PROPRIEDADES

A planilha CARREGAMENTOS recebe os valores referentes aos carregamentos adotados no modelo de elementos finitos como as massas dos mecanismos, forças de vento e acelerações.

Criaram-se quatro planilhas auxiliares para a organizar os dados a serem enviados ao módulo de processamento.

Todos os arquivos de texto são gerados por uma sub-rotina (macro) associada a um botão de comando. A sub-rotina foi implementada utilizando a linguagem de programação Visual Basic.

4.2 Módulo Simulação

A função do módulo de simulação é gerar automaticamente um modelo de elementos finitos de acordo com os dados recebidos pelo módulo de entrada de dados. Para realizar esta função, utilizou-se o programa de elementos finitos comercial ANSYS, que já traz sua própria linguagem de programação e customização que serve como ferramenta para a geração paramétrica de modelos de elementos finitos. Assim, utilizou-se a APDL (Ansys Parametric Design Language) para construir um pré-processador

destinado à pórticos rolantes. É importante citar que as rotinas desenvolvidas podem ser facilmente implementadas em outros softwares de elementos finitos. Para tal, bastaria desenvolver uma rotina em qualquer linguagem de programação que se converte os arquivos gerados pelo Excel no formato necessário para cada software.

As atividades desenvolvidas neste módulo foram divididas em oito partes para facilitar o desenvolvimento, alterações e compreensão por terceiros. São elas:

- Leitura / Tratamento / Verificação de dados
- Atributos dos elementos
- Criação da geometria
- Organização em componentes
- Carregamento e condições de contorno
- Solução
- Extração dos resultados
- Exportação dos resultados

4.2.1 Leitura / tratamento / verificação de dados

Esta etapa possui duas funções:

- Receber os dados de entrada
- Verificar dados incompatíveis

A leitura e o tratamento de dados são utilizados para converter os dados de entrada do usuário em valores que o programa irá efetivamente utilizar para a geração do modelo. Esta transformação se dá para facilitar a entrada de dados. Os valores comumente utilizados no desenvolvimento do projeto são convertidos em parâmetros de geometria de acordo com a lógica da parametrização.

A segunda função é verificar a coerência dos dados de entrada de duas maneiras:

- individualmente, verificando se o valor existe como grandeza física ou enumerativa, como por exemplo, números inteiros, não negativos, etc.
- coletivamente, verificando a compatibilidade entre os dados de entrada fisicamente, como por exemplo, a distância entre duas chapas e suas espessuras, ou, se a posição dos componentes estão compatíveis com os limites físicos da estrutura.

4.2.2 Definição dos atributos dos elementos

Este processo define os atributos de cada elemento denominados, pelo Ansys, de Propriedades Reais. As Propriedades Reais são conjuntos de dados utilizados para se determinar a rigidez de cada elemento e também os resultados durante o pós-processamento. Cada tipo de elemento está associado a um conjunto de parâmetros que definem as Propriedades Reais. No caso de modelo de pórtico rolante considerou-se o elemento de viga, cujas propriedades reais aplicadas neste modelo são: momentos de inércia, área de cisalhamento, altura, largura, área e posição do centro de área da secção transversal.

4.2.3 Geração dos Nós

A quantidade de nós necessários foi estabelecida para garantir a definição da geometria do pórtico, pontos de carregamento e, também, os pontos onde se queiram medir os esforços solicitantes.

Os nós de cada viga do modelo são apresentados mais adiante separadamente, porém, os nós das intersecções e soldas das vigas são comuns à maioria das partes por isso decidiu-se apresentá-los antes de cada viga do pórtico.

Nós das intersecções das vigas

Para se determinar as coordenadas de cada nó, assumiu-se que o elemento deve estar posicionado no centro de área das secções transversais. Nas intersecções das vigas, um nó é criado na posição da intersecção das linhas de centro das vigas. Além disso, nós representando as uniões soldadas são definidos no ponto de projeção da solda nas linhas dos elementos como mostra a Figura 4.4.

Considerando que as soldas são os pontos onde as vigas se unem realmente, o elemento formado pelo nó da intersecção das vigas e pelo nó da solda pode ser considerado somente um artifício para se ter conexões entre as vigas. Dessa forma estes elementos não tem função estrutural e, por isso, foram definidos como elementos rígidos de viga (MPC184).

Figura 4.4 – Nós referentes às soldas nas uniões entre vigas

Nós dos apoios

As posições dos nós dos apoios, assim como as próprias restrições, dependem da existência de truque no pórtico. Quando há truque, as posições destes nós são definidas pelo diâmetro da roda, altura do truque e altura da viga de ligação. Além disso, para representar o truque, define-se dois nós coincidentes posicionados entre a Viga de Ligação e o apoio para representar a articulação deste mecanismo. Na Figura 4.5 pode-se observar a posição destes dois nós coincidentes. A articulação do truque permite a rotação da estrutura em torno do eixo Z. Para isso, os dois nós coincidentes são acoplados em todos os graus de liberdade a menos da rotação em torno do eixo Z. Isso quer dizer que todos os deslocamentos de um nó serão os mesmos do outro nó para todos os graus de liberdade que estiverem acoplados.

Figura 4.5 – Nós dos apoios com truque

Quando não se tem truques, os nós que recebem as restrições são os nós das extremidades da viga cabeceira cuja linha de centro assumiu-se coincidente com o centro da roda conforme Figura 4.6.

Figura 4.8 – Nós da Perna

Nós das Vigas Principais

Os elementos das Vigas Principais são formados por nós que definem os balanços, vão central e posição das rodas do Carro. Para a geração dos nós da Viga Principal verifica-se primeiro a existência e quais são os tipos de balanços do pórtico. Em seguida é verificado se as posições dos nós do carro são coincidentes com algum outro nó. Os nós da Viga Principal estão ilustrados nas figuras Figura 4.9 e Figura 4.10.

Figura 4.9 – Nós do Balanço

Figura 4.10 – Nós do Vão

Existem ainda quatro nós referentes à quatro rodas do carro do moitão que ficam em contato com as Vigas Principais. Estes nós podem estar dispostos em diferentes posições dependendo da localização:

- 1) Carro com todas as rodas no balanço
- 2) Carro com duas rodas no balanço e duas no vão central
- 3) Carro com todas as rodas no vão central.

Nós da Viga de Fechamento

Os nós das Vigas de Fechamento são definidos pelas posições das uniões soldadas com a Viga Principal, uniões parafusadas e posição dos suportes da cabine de comando.

Figura 4.11 – Nós da Viga de Fechamento

4.2.4 Geração dos Elementos

Tipo de elemento

O elemento utilizado no modelo de elementos finitos é um elemento de viga com seis graus de liberdade em cada nó. Os nós I e J definem a orientação e sentido do sistema de coordenadas de cada elemento sendo que a origem se dá no nó I. Na Figura 4.12 está ilustrado o elemento de viga, chamado BEAM44, utilizado em todo o modelo.

Figura 4.12 – Elemento BEAM44 do software Ansys

Os nós I e J do elemento BEAM44 podem ter propriedades geométricas diferentes entre si para se definir as respectivas secções transversais. Nos pórticos, a secção da extremidade inferior das Pernas pode ser menor que a secção da extremidade superior.

A matriz de rigidez de um elemento que tem secções transversais diferentes em cada nó é a mesma daquele que tem secções iguais, porém, os valores de área da secção e dos três momentos de inércia contabilizados na matriz de rigidez são calculados respectivamente através das equações (1) e (2):

$$\bar{A} = \frac{A_1 + \sqrt{A_1 A_2} + A_2}{3} \quad (1)$$

$$\bar{I} = \frac{I_1 + \sqrt[4]{I_1^3 I_2} + \sqrt{I_1 I_2} + \sqrt[4]{I_1 I_2^3} + I_2}{5} \quad (2)$$

Onde: A_1 e A_2 são respectivamente as áreas das secções dos nós I e J

$\bar{A}$ é a média Heroniana das áreas.

I_1 e I_2 são respectivamente os momentos de inércia dos nós I e J

$\bar{I}$ é o momento de inércia equivalente

Desta maneira, os resultados do modelo podem ser influenciados pela discretização adotada e também pela razão entre as dimensões das secções transversais. Em ANSYS [

1] aconselha-se manter esta razão menor que 2 (dois), e, cita-se que se ela for maior que 10 (dez) a solução não será executada. Porém, não existe citações sobre a influência do grau de discretização nos resultados com este tipo de elemento. Para se avaliar tal fator, construiu-se um modelo simplificado baseado em dimensões da mesma ordem de grandeza das pernas de um pórtico conforme o esquema ilustrado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Modelo simplificado para análise de sensibilidade da discretização

Foram realizadas 50 análises variando-se o número de elementos. A cada análise incrementaram-se dois elementos iniciando-se com dois elementos até finalizar-se com cem elementos ao longo da viga esquematizada. Em cada análise foi levantado o valor da tensão de Von Mises na extremidade menor. Pela Figura 4.14 observa-se que os resultados praticamente não se alteram quando se tem mais de dez elementos ao longo da viga. A variação de resultados foi calculada em relação ao resultado convergido com cem elementos.

Figura 4.14 – Variação da tensão x nº de elementos

Nos pórticos, as Pernas são geralmente as vigas com secção variada de maior comprimento. Para confirmar a influência da densidade da malha nos resultados das Pernas, foi realizada uma análise de convergência análoga à do teste anterior nas Pernas de um modelo completo de pórtico. Os resultados podem ser observados na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Variação da tensão x nº de elementos

Para vigas com seis elementos tem-se uma variação de aproximadamente 2% nos resultados de tensão. Isto indica que a parametrização feita com sete elementos terá uma

variação menor que 2% o que pode ser considerado aceitável em problemas de engenharia.

Geração dos elementos

De modo a facilitar a geração dos elementos e leitura dos resultados nos nós, adotou-se uma convenção de sentido de criação dos elementos: todos devem ser criados tal que o eixo axial do sistema local tenha sempre o mesmo sentido do respectivo eixo no sistema de coordenadas globais. Na Figura 4.16 estão ilustrados os nós I e J de dois elementos com os sistemas de coordenadas locais de cada elemento.

Figura 4.16 – Exemplo de orientação dos elementos

A geração dos elementos deve considerar o posicionamento dos nós (ordem) ao longo das vigas. Assim, no exemplo anterior deve-se garantir que o elemento nº 1 seja gerado a partir dos nós 33 e 106 nesta ordem. Para vigas onde a ordem dos nós pode variar, criou-se uma rotina que armazena os números dos nós com os seguintes critérios:

- O i -ésimo e i -ésimo+1 nós armazenados sejam nós adjacentes no modelo.
- O i -ésimo e o i -ésimo+1 nós correspondam respectivamente aos nós I e J de cada elemento para garantir o sentido de criação dos elementos (do nó I ao nó J).

Com o armazenamento das posições dos nós, foi possível desenvolver uma rotina que, baseada nas coordenadas, garante a geração de um elemento somente entre dois nós adjacentes. Esta rotina aplica-se na geração dos elementos da Viga Principal, Viga de Fechamento e Viga de Ligação que são as vigas onde pode ocorrer mudança na ordem dos nós. O restante das vigas não tem alteração da ordem dos nós, portanto, não se

utilizou tal rotina. Nestes casos, os elementos são sempre gerados com a mesma numeração de nós variando somente o comprimento dos elementos de acordo com a entrada de dados.

Para o exemplo anterior, tem-se a tabela seguinte onde é ilustrado o armazenamento das posições dos nós:

Tabela 4.1 – Resultado do armazenamento dos nós

Posição	1	2	3
Nº do Nó	33	106	1001

Se a disposição dos nós fosse 1001-33-106, a rotina garantiria que o elemento número um fosse gerado a partir dos nós 1001 e 33 e não mais pelos nós 33 e 106.

4.2.5 Carregamentos

Os carregamentos foram implementados de acordo com a NBR 8400 [7] e os previstos estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Carregamentos

A	Peso próprio da estrutura e mecanismos
B	Carga principal
C	Vento limite de serviço na direção do vão
D	Vento limite de serviço na direção lateral
E	Vento máximo na direção do vão com equipamento fora de operação
F	Vento máximo na direção lateral com equipamento fora de operação
G	Forças de inércia geradas pela aceleração do pórtico
H	Forças de inércia geradas pelo impacto do pórtico no pára-choque

No Ansys é possível organizar as forças aplicadas em subconjuntos chamados de Load Steps. Desta maneira, é possível obter-se resultados independentes para cada Load Step solucionando-os um a um. As análises abordadas neste trabalho são lineares e estáticas e, assim, através de combinações lineares dos resultados de cada Load Step é possível

calcular os resultados para as situações em que se aplica mais de um Load Step simultaneamente.

Utilizou-se os seguintes Load Steps para as definições dos carregamentos apresentados na Tabela 4.2.

Load Step 1

O Load Step 1 é o carregamento devido ao peso próprio da estrutura e mecanismos.

Foram consideradas as forças verticais devido à:

- a) massa do truque
- b) massa da escada distribuída em uma das pernas
- c) massa do enrolador de cabos concentrada em somente um nó
- d) massa da cabina, podendo ser distribuída em até três nós: um nas pernas e dois nas Vigas Principais ou Vigas de Ligação Superiores
- e) massas dos painéis elétricos e passadiços distribuídas nas Vigas Principais e/ou Vigas de Ligação Superior
- f) massa da estrutura e mecanismos do Carro distribuídos em quatro nós das Vigas Principais
- g) massa da estrutura do pórtico

Na Figura 4.17 estão ilustradas as forças referente ao Load Step 1.

Figura 4.17 – Load Step 1

Load Step 2

O Load Step 2 é o carregamento vertical devido à carga principal. Embora seja também devido ao peso próprio, este carregamento foi definido fora do Load Step 1 por existirem combinações em que a carga principal não se aplica. Este carregamento é aplicado nos nós do carro como no item “f” do Load Step 1

Load Step 3

O Load Step 3 é um dos carregamentos devido ao vento limite de serviço na direção do vão.

Segundo a NBR 8400 [7], a ação do vento depende essencialmente da forma do equipamento. O esforço devido à ação do vento em uma viga é a força cuja componente na direção do vento é dada pela equação:

$$F_w = C.A.P_a (3)$$

Onde: A é a área projetada da superfície ao vento

C, coeficiente aerodinâmico

P_a , pressão aerodinâmica

Todos os parâmetros para o cálculo das forças de vento, F_w , são fornecidos no módulo de entrada de dados.

Foram consideradas as forças devido à pressão aerodinâmica aplicada às áreas dos mecanismos e estruturas expostas ao vento na direção do vão, ou seja, na direção em que o pórtico se movimenta. Como exemplos, têm-se as áreas das almas das vigas, dos painéis elétricos e da cobertura do carro. Na Figura 4.18 estão ilustradas as forças referente ao Load Step 3.

Figura 4.18 – Load Step 3

Load Step 4

O Load Step 4 é o carregamento devido ao vento limite de serviço na direção do vão atuando na área da carga. Foi definido separadamente do Load Step 3 porque existem combinações em que a carga não é levada em consideração.

Load Step 5

O Load Step 5 é o carregamento devido ao vento limite de serviço na direção lateral, análogo ao Load Step 3. Na Figura 4.19 estão ilustradas as forças referente ao Load Step 5.

Figura 4.19 – Load Step 5

Load Step 6

O Load Step 6 é o carregamento devido ao vento limite de serviço na direção lateral, análogo ao Load Step 4.

Load Step 7

O Load Step 7 refere-se às forças estáticas que são equivalentes às forças dinâmicas devido à inércia quando há aceleração do pórtico. Segundo a NBR 8400 [7], a ação destas forças sobre a estrutura obtém-se pela aplicação dos procedimentos comuns de cálculo de força a partir das massas dos componentes e da aceleração lateral do pórtico.

Na Figura 4.17 estão ilustradas as forças referente ao Load Step 7.

Figura 4.20 – Load Step 7

Load Step 8

O Load Step 8 contempla a força de inércia atuando sobre a carga somente. Esta força é análoga às forças do Load Step 7 e foi definida separadamente por existirem combinações em que a carga não é considerada.

Definições dos tipos de carregamento através dos Load Steps

Os carregamentos descritos na Tabela 4.2 foram definidos pela aplicação dos “Load Steps” conforme combinações descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3– Carregamentos x Load Steps

Carregamentos	Load Steps envolvidos
A	1
B	2
C	3 + 4
D	5 + 6
E	3 x fator
F	5 x fator
G	7 + 8
H	7 x fator

Utilizando as combinações dos carregamentos, o equipamento pode ser avaliado sob todos os Casos de Solicitação segundo a NBR 8400 [7]. A Tabela 4.4 ilustra como podem ser combinados os carregamentos para representarem os Casos de Solicitação:

Tabela 4.4– Combinações de carregamentos

		Combinações						
		A	B	C	D	E	F	G
Carregamentos	A	x	x	x	x	x	x	x
	B	x	x	x	x			
	C			x				
	D		x					
	E							x
	F						x	
	G	x	x	x				
	H				x	x		
CASO		I	II	II	III	III	III	III

Onde: Caso I - serviço normal sem vento
 Caso II - serviço normal com vento limite de serviço
 Caso III - solicitações excepcionais

Para cada caso de solicitação existem fatores de majoração a serem considerados nos carregamentos definidos por norma. Estes fatores são fornecidos pelo usuário através da tabela de combinações conforme indicado abaixo:

Tabela 4.5– Combinações de carregamentos majorados

		Combinações						
Carregamentos	A	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	B	1.15	1.15	1.15	1.00			
	C			1.00				
	D		1.00					
	E							1.10
	F					1.10		
	G	2.00	2.00	2.00				
	H				1.00	1.00		
CASO		I	II	II	III	III	III	III

Desta maneira a tabela fornece a combinação e também os fatores adotados para cada carregamento em cada combinação.

4.2.6 Condições de Contorno

Como a parametrização adotada abrange pórticos que são construídos com truques e também sem truques, foram adotadas condições de contorno exclusivas para cada uma destas configurações.

Caso com truque

Nos nós que representam o ponto de contato das rodas foram aplicadas restrições nos três graus de liberdade de translação e em um de rotação.

Além disso, no Ansys pode-se garantir que o dois nós distintos tenham os mesmos deslocamentos em cada grau de liberdade. Para isso, existe um artifício chamado “CP” que representa um acoplamento entre dois nós.

Para representar as articulações dos truques, foram criados dois nós distintos, porém, coincidentes posicionados na linha de centro do eixo da articulação. Um dos nós faz

parte do elemento formado entre a roda e a articulação e o outro faz parte do elemento formado entre a articulação e a intersecção das Vigas de Ligação e Pernas.

Esses nós foram acoplados para representar a rotação do truque em torno do eixo de sua articulação. Para isso, todos os graus de liberdade dos dois nós coincidentes foram acoplados a menos da rotação em torno do eixo X. Na Figura 4.21, observa-se os graus de liberdade restritos nos apoios (rodas) e também os que foram acoplados na posição da articulação do truque.

Figura 4.21 – Condições de contorno com truque

Caso sem truque

Neste caso considera-se que as rodas estão acomodadas na viga cabeceira. Assim, não há braço articulado como o truque. As condições foram aplicadas somente nos três graus de liberdade de translação conforme a Figura 4.22.

Figura 4.22 – Condições de contorno sem truque

Neste trabalho, não há interesse em analisar em detalhes a roda do pórtico e sua interação com o caminho de rolamento, bem como a interação do eixo das rodas com o pórtico.

4.2.7 Solução

A solução foi dividida em dois tipos de análises: a estática e a de flambagem global da estrutura, ambas lineares aplicadas em cada caso de carregamento.

Dentre os diferentes tipos de métodos de solução disponíveis no software Ansys, optou-se por utilizar o “Frontal Solver” (substituição direta) para a solução do problema linear estático. Embora este método seja o que tenha a menor eficiência computacional, obtém-se uma solução exata para o sistema de equações lineares. Além disso, considerando o tamanho do modelo (até 100 nós), tipo de análise (linear estática) e tipo de elemento utilizado (viga) a eficiência dos métodos de solução se torna um fator desprezível.

Na análise linear de flambagem utilizou-se o método “Block Lanczos” com extração de um modo de flambar para se verificar a flambagem de coluna das pernas (flambagem global). Segundo Freitas [2] uma viga com três elementos é suficiente para representar o primeiro modo de flambagem, assim, como as condições para a ocorrência de

flambagem global são mais críticas nas Pernas, as quais foram modeladas com sete elementos, considerou-se que o modelo do pórtico é suficiente para esta análise.

A solução da flambagem local de placas foi implementada de forma analítica e será descrita adiante (Capítulo 5).

4.2.8 Pós-Processamento no Ansys

O usuário tem a opção de verificar as solicitações no próprio software de elementos finitos ou no módulo de análise dos resultados implementado no software Mathcad (conforme descrito no Capítulo 5).

Para facilitar a leitura dos resultados, geraram-se rotinas no Ansys que selecionam os nós das secções críticas e exportam os esforços solicitantes para o software Mathcad.

5 Análise de resultados

O módulo Análise de Resultados recebe resultados extraídos do modelo de elementos finitos para executar a verificação de flambagem de placas.

Nas Pernas dos pórticos, adotadas como vigas do tipo caixão, existem diafragmas e reforços internos que, junto com as abas e almas, determinam painéis que devem ser verificados quanto à flambagem localizada. Na Figura 5.4 está ilustrada a definição dos painéis nas vigas.

O procedimento de cálculo foi implementado no software comercial Mathcad 2000 (Mathsoft Engineering & Education, Inc).

5.1 Leitura dos dados

A integração do Mathcad com os softwares Ansys e Excel foi implementada com a leitura dos arquivos de texto gerados por cada um. Os arquivos gerados pelo Excel contêm informações referentes à geometria e propriedades do material. Os arquivos gerados pelo Ansys proporcionam as solicitações de cada combinação de carregamento.

5.2 Tratamento dos dados

No procedimento analítico gerado no Mathcad adotou-se uma convenção de sinais para se determinarem as tensões atuantes em cada secção de interesse da viga a partir das solicitações calculadas no Ansys. O Ansys por sua vez, adota uma convenção de sinais diferente da utilizada no Mathcad. Para facilitar a integração da convenção de sinais dos valores exportados pelo Ansys e a convenção de sinais da rotina no Mathcad, foram adotados os valores absolutos das solicitações que o Ansys exporta.

O Ansys calcula, com o elemento utilizado neste trabalho, as tensões somente nas extremidades da secção de acordo com a altura e largura da viga conforme a Figura 5.1.

Figura 5.1 – Pontos onde são calculadas as tensões no Ansys

No procedimento de verificação à flambagem consideraram-se outros pontos da secção que não as extremidades. A Figura 5.2 indica quais foram os pontos adotados.

Figura 5.2 – Pontos onde são calculadas as tensões no Mathcad

Calcularam-se as tensões de flexão nos pontos de intersecção entre a alma e aba da viga considerando os valores de $Z'_{\max}$ e $Y'_{\max}$. Se tomarmos como exemplo o momento fletor no eixo Y temos que a tensão calculada pelo Ansys é:

$$\sigma_y = \frac{Mf_y}{I_y} \cdot Z_{\max} \quad (4)$$

Pelo Mathcad é:

$$\sigma'_y = \frac{Mf_y}{I_y} \cdot Z'_{\max} \quad (5)$$

Onde: σ_y e σ'_y são as tensões no Ansys e Mathcad respectivamente

Mf_y é o momento fletor no eixo Y

I_y é o momento de inércia no eixo Y

$Z_{\max}$ e $Z'_{\max}$ são as localizações dos pontos adotados no Ansys e Mathcad respectivamente

Desta maneira, foi preciso estabelecer uma associação entre os valores das solicitações de cada nó, com as respectivas características geométricas das secções. Cabe lembrar que o Ansys exporta somente as solicitações sem informar as respectivas características geométricas das secções. Os dados de geometria provêm do Módulo de Entrada de Dados (Excel). A associação foi feita utilizando-se variáveis indexadas e a Equação (6) é um o exemplo.

$$\sigma'_{I} = \frac{Mf_I}{I_I} \cdot Z'_I \quad (6)$$

Neste caso, o índice I associa as solicitações dispostas no vetor M_f às características mecânicas e geométricas das secções dispostas nos vetores I_I e Z'_I .

5.3 Determinação da combinação crítica

O Mathcad importa os resultados de todas as combinações de carregamento. Considerando que as solicitações são calculadas para cada nó de cada perna em todas as combinações, obtém-se 196 opções a serem verificadas. Para facilitar a identificação de qual é a combinação crítica, criou-se uma rotina que a identifica automaticamente tendo como critério a ocorrência do menor coeficiente de segurança à flambagem local.

5.4 Tensões atuantes nos painéis

As tensões atuantes nos painéis foram adotadas conforme os critérios de cálculo de flambagem de placas descritos na NBR 8400 [7] ou Pfeil [8]. A Figura 5.3 mostra as tensões consideradas no procedimento de verificação de flambagem.

Figura 5.3 – Tensões consideradas na verificação à flambagem

Onde: σ_c é a tensão de compressão

σ_t é a tensão de tração

τ é a tensão de cisalhamento.

Os painéis são determinados pelas intersecções das almas, abas e diafragmas. Na Figura 5.4 está ilustrada a posição dos painéis nas vigas.

Figura 5.4 – Definição dos painéis nas vigas

Nas pernas dos pórticos a tensão normal devido à força normal sempre será de compressão conforme a Figura 5.5. Convencionou-se que esta tensão terá sempre sinal negativo por estar sempre sob compressão.

Figura 5.5 – Tensão normal de compressão nas vigas

A tensão normal devido à flexão no eixo Z pode variar conforme indicado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Tensão de flexão no eixo Z

A tensão normal devido à flexão no eixo Y pode variar de forma análoga à flexão no eixo Z. Fazendo todas as combinações de sinais das sollicitações, observa-se que as tensões adotadas nos painéis da alma sempre seguem as seguintes composições:

- a) Tensão máxima de compressão nas almas: $-\sigma_N - \sigma_Z - \sigma_Y$

b) Tensão mínima nas almas com máxima compressão: $-\sigma_N + \sigma_Z - \sigma_Y$

Na aba tem-se as seguintes composições:

a) Tensão máxima de compressão nas abas: $-\sigma_N - \sigma_Z - \sigma_Y$

b) Tensão mínima nas abas com máxima compressão: $-\sigma_N - \sigma_Z + \sigma_Y$

Na Figura 5.7 estão ilustradas todas as combinações de sinais das solicitações. A posição (1) é o ponto de máxima tensão normal de compressão. A posição (2) é o ponto de mínima tensão normal na alma com máxima compressão. A posição (3) é o ponto de mínima tensão normal de compressão na aba com máxima compressão.

Figura 5.7 – Tensão de flexão no eixo Y

Para analisar a flambagem de placa nas pernas dos pórticos recorre-se à formulação do coeficiente de segurança, γ_{fi} , apresentado na Equação (7) conforme Pfeil [8], Mason [5] e Norma 8400 [7] para os casos de placas submetidas simultaneamente à flexo-compressão e cisalhamento. A condição crítica de flambagem elástica será satisfeita se γ_{fi} for maior que um.

$$\frac{1}{\gamma_{fl}} = \frac{1+\psi}{4} \frac{\sigma_1}{\sigma_{fi}} + \sqrt{\left(\frac{3-\psi}{4} \frac{\sigma_1}{\sigma_{fi}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{fi}}\right)^2} \quad (7)$$

onde

ψ é relação entre as tensões máx. e mín. no painel;

σ_1 e τ são as tensões atuantes nos painéis;

σ_{fi} e τ_{fi} são as tensões críticas de flambagem para os casos de ocorrência de pura compressão e puro cisalhamento respectivamente.

Mason [5] cita que a correlação entre as tensões críticas dos casos elementares de compressão/cisalhamento e a tensão crítica para o caso combinado decorre de análises comparativas de resultados teóricos e experimentais.

As tensões σ_{fi} e τ_{fi} , Equações (9) e (10) respectivamente, são calculadas a partir da tensão de referência de Euler, Equação (8), e dos coeficientes de flambagem K encontrados na Tabela 5.1.

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (8)$$

$$\sigma_{fi} = \sigma_e K_\sigma \quad (9)$$

$$\tau_{fi} = \sigma_e K_\tau \quad (10)$$

Tabela 5.1 – Coeficientes de flambagem

1	2	3	4
CARGA	tensão de flambagem	região de validade	coeficiente de flambagem
Tensões de compressão linearmente distribuídas. $0 \leq \psi \leq 1$	$\sigma_{fi} = k \sigma_E$	$\alpha \geq 1$ $\alpha < 1$	$k = \frac{8,4}{\psi + 1,1}$ $k = (\alpha + \frac{1}{\alpha})^2 \frac{2,1}{\psi + 1,1}$
Tensões de compressão e de tração linearmente distribuídas com predominância de compressão $-1 < \psi < 0$	$\sigma_{fi} = k \sigma_E$	K' para o caso acima $K'' = 23,9$	$k = (1 + \psi)k' - \psi K'' + 10 \psi (1 + \psi)$ Sendo k' coeficiente de flambagem para $\psi = 0$ (linha 2) e k'' o coeficiente de flambagem para $\psi = -1$ (linha 4)
Tensões de compressão e de tração linearmente distribuídas com valores extremos de igual valor $\psi = -1$ ou predominância de tração $\psi < -1$	$\sigma_{fi} = k \sigma_E$	$\alpha \geq \frac{2}{3}$ $\alpha < \frac{2}{3}$	$k = 23,9$ $k = 15,87 + \frac{1,87}{\alpha^2} + 8,60^2$
Tensões de cisalhamento uniformemente distribuídas	$\tau_{fi} = k \sigma_E$	$\alpha \geq 1$ $\alpha < 1$	$k = 5,34 + \frac{4,00}{\alpha^2}$ $k = 4,00 + \frac{5,34}{\alpha^2}$

O coeficiente de segurança descrito na Equação (7) é válido para o regime elástico. Pfeil [8], Mason [5] e a Norma 8400 [7] descrevem um procedimento empírico para verificar se a flambagem ainda ocorre no regime elástico. Para esta verificação define-se a tensão crítica de comparação σ_{flc} :

$$\sigma_{flc} = \gamma_{fl} \sqrt{\sigma_1 + 3\tau} \quad (11)$$

Caso σ_{flc} ultrapasse o limite de proporcionalidade do material substitui-se σ_{flc} por uma tensão de comparação reduzida, σ_{rc} , que pode ser encontrada na Tabela 47 da Norma 8400 [7] para aços comumente utilizados em pórticos rolantes.

6 Otimização estrutural

Considerou-se a função objetivo como sendo as massas das pernas para simplificação do problema de otimização. Muitas vezes a real função objetivo é o custo que é função da quantidade de material (massa) e mão de obra. Uma estrutura esbelta (menor massa) pode ter um custo de fabricação maior. Como o custo de mão de obra é função do mercado, optou-se por desconsiderar este valor neste trabalho cujo objetivo é apenas mostrar a aplicabilidade da metodologia de otimização em projetos de pórticos.

Adotou-se as seguintes restrições do projeto estrutural:

- Escoamento do material
- Flambagem localizada dos painéis das pernas
- Flambagem de coluna nas Pernas

O Ansys aborda a opção de otimização paramétrica ou a topológica. No primeiro caso tem-se a otimização de um conjunto de parâmetros que definem o problema. No segundo caso, o objetivo da otimização é maximizar a rigidez tendo como variável de projeto a distribuição da massa.

No caso da otimização das pernas do pórtico, propõe-se otimizar a massa através da redução da área da secção transversal das Pernas. Como a área é expressa por um conjunto de parâmetros no modelo de elementos finitos, optou-se pela aplicação da otimização paramétrica.

6.1 Metodologia de estudo

Adotou-se a metodologia apresentada a seguir para gradativamente compreender a aplicação de um algoritmo de otimização em um pórtico rolante:

- Introdução à implementação da otimização paramétrica utilizando o Ansys.
- Estudo de otimização de uma barra com duas variáveis de projeto.

- Estudo de otimização de uma barra com três variáveis de projeto.
- Implementação da otimização das pernas do pórtico rolante com quatro variáveis de projeto.

6.1.1 Introdução à otimização paramétrica utilizando o Ansys

Para utilizar os procedimentos de otimização no Ansys foi necessário um estudo de como deve ser feita a implementação das rotinas de otimização integrando-as ao modelo paramétrico em APDL. Para tal, realizou-se as atividades descritas no manual do Ansys e as principais são:

- Construção do modelo de elementos finitos paramétrico
- Definição das restrições e função objetivo
- Declaração das variáveis de otimização
- Escolha do método de otimização

Construção do modelo de elementos finitos paramétrico

Foram feitos dois modelos simples de barra descritos nos itens 6.1.2 e 6.1.3.

Para a aplicação no pórtico rolante esta etapa ficou implícita no desenvolvimento descrito no Capítulo 4.

Definição das restrições e função objetivo

As restrições são funções expressas por parâmetros que delimitam o universo de soluções viáveis do problema de otimização.

A função objetivo é a função, expressa também por parâmetros, que deve ser minimizada.

Declaração das variáveis de otimização

As variáveis de otimização são as que determinam, junto com as restrições, o universo de soluções possíveis para um determinado problema. A seguir, tem-se a descrição dos tipos de variáveis de otimização:

- **Variáveis de projeto:** são os parâmetros que variam durante o processo de otimização para se encontrar o ponto ótimo.
- **Variáveis de estado:** são as variáveis dos valores medidos no modelo de elementos finitos para se comparar com as restrições.
- **Variável da função objetivo:** é a variável que recebe o valor calculado pela função objetivo a cada iteração do processo de otimização.

As variáveis declaradas para o caso do pórtico estão descritas no item 6.1.4.

Escolha do método de otimização

Para uma otimização paramétrica utilizando o Ansys, dispõe-se de dois métodos de solução: “Subproblem Approximation” e “First Order”.

O método do “Subproblem Approximation” é dividido em duas etapas:

- Aproximação
- Conversão para um problema sem restrições

Na primeira etapa, o valor da função objetivo é calculado para várias combinações das variáveis de projeto. A partir da dispersão destes dados, a curva da função objetivo é interpolada ficando definida pelas aproximações. O levantamento dos pontos pode ser feito aleatoriamente ou através de ferramentas auxiliares que o software dispõe.

Uma vez determinada a curva aproximada, aplicam-se os métodos de otimização para localizar o mínimo da função objetivo.

As variáveis de estado e os limites das variáveis de projeto restringem o universo de soluções. A segunda etapa é definida pela conversão de um problema com restrições para um sem restrições uma vez que as técnicas de minimização são mais eficientes para estes problemas. Para respeitar as restrições, são impostas penalidades durante a otimização. Estas penalidades são parâmetros calculados a cada iteração que levam em consideração o desvio da aproximação em relação à função objetivo quando restrita.

No Método “First Order”, assim como no método “Subproblem Aproximation”, a solução da otimização é obtida a partir de um problema sem restrições. A cada iteração são feitos cálculos de gradientes das variáveis dependentes em relação às variáveis de projeto para localizar o ponto ótimo. Os gradientes determinam a direção da busca do ponto ótimo dentro do universo de soluções. Neste caso a otimização é baseada nos resultados do modelo e nos gradientes calculados a cada iteração. Isto é o que difere este método do primeiro, pois naquele a otimização é baseada nas curvas aproximadas pelos resultados de cada iteração.

6.1.2 Otimização de uma barra com duas variáveis de projeto

Inicialmente aplicou-se o procedimento de otimização para se obter o menor volume de uma viga em balanço conforme o esquema ilustrado na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Esquema do primeiro caso de estudo

Assumiu-se, para este caso, que o comprimento não pode mudar. Assim, o menor volume da viga será obtido com a menor área da secção transversal.

O modelo teve como variáveis de projeto H_v e t , que, são respectivamente a altura e a espessura da viga.

As seguintes restrições foram aplicadas:

- A tensão normal tem que ser menor que a tensão de escoamento do material

$$\sigma \leq \sigma_{ad} \quad (12)$$

- A tensão normal tem que ser menor que a tensão crítica de flambagem

$$\frac{H_v}{t} \leq 1.5 \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \quad (13)$$

Para validar o procedimento que integra o modelo de elementos finitos com as rotinas de otimização, este problema de otimização foi resolvido de três maneiras:

- Analiticamente
- Utilizando a rotina de minimização de funções do Mathcad
- Utilizando os recursos de otimização do Ansys com um modelo paramétrico

Para que se pudessem comparar os resultados entre os métodos de solução, assumiu-se os seguintes valores para a determinação do problema:

$$P = 1$$

$$L = 100$$

$$E = 100$$

$$\sigma_{ad} = 5$$

Solução analítica

Sabemos:

$$M_z^f = P \cdot L$$

Momento fletor (14)

$$I_z = \frac{t \cdot H_v^3}{12}$$

Momento de Inércia (15)

$$W = \frac{H_v^2 \cdot t}{6} \quad \text{Módulo de resistência (16)}$$

$$\sigma = \frac{Mf_z}{W} = \frac{6 \cdot P \cdot L}{H_v^2 \cdot t} \quad \text{Tensão de flexão (17)}$$

$$V_v = H_v \cdot t \cdot L \quad \text{Função objetivo (18)}$$

Fazendo $H_v(t)$ a partir da primeira restrição (12), tem-se:

$$\frac{6 \cdot P \cdot L}{H_v^2 \cdot t} \leq \sigma_{ad} \Rightarrow H_v \geq \sqrt{\frac{6 \cdot P \cdot L}{\sigma_{ad}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (19)$$

Ao tomar-se a igualdade da inequação (19) em (18), tem-se:

$$V_v = \sqrt{\frac{6 \cdot P \cdot L^3 \cdot t}{\sigma_{ad}}} \quad (20)$$

Como esperado, observa-se que quanto menor é a espessura menor é o volume.

Analisando a segunda restrição, observamos que ela não depende de H_v conforme é observado no desenvolvimento seguinte:

$$\frac{H_v}{t} \leq 1.5 \sqrt{\frac{E \cdot H_v^2 \cdot t}{6 \cdot P \cdot L}} \Rightarrow t \geq \sqrt[3]{\left(\frac{1}{1.5 \cdot \sqrt{\frac{E}{6 \cdot P \cdot L}}} \right)^2} \quad (21)$$

Considerando as variáveis de projeto e as restrições, temos o universo de soluções que está ilustrado na Figura 6.2.

Figura 6.2 – Universo de soluções do primeiro caso

Analisando na Figura 6.2 o comportamento do volume nas fronteiras da região viável, observa-se que o ponto ótimo é o ponto de intersecção das curvas das restrições. Assim, para calcular o ponto ótimo basta igualarmos as equações das restrições. Fazendo isso, tem-se:

$$H_v = 9.3024$$

$$t = 1.3867$$

$$V_v = 1289.99$$

Solução pelo Mathcad

O Mathcad possui um rotina chamada “minimize” que , segundo o Help [6], minimiza uma função dados os valores iniciais das variáveis e restrições. O método utilizado para minimizar não é citado. O seguinte procedimento foi implementado no Mathcad:

$V(H,t) := H \cdot t \cdot L$	Função objetiva
$H := 10$	Valores iniciais das variáveis de projeto: H e t
$t := 1$	
Given	Restrições
$\frac{6 \cdot P \cdot L}{H^2 \cdot t} \leq \sigma_{ad}$	Escoamento
$\frac{H}{t} \leq 1.5 \cdot \sqrt{\frac{E}{\frac{6 \cdot P \cdot L}{H^2 \cdot t}}}$	Flambagem
$R := \text{Minimize}(V, H, t)$	Solução
$R = \begin{pmatrix} 9.302 \\ 1.387 \end{pmatrix}$	Resultados das variáveis de projeto
$V(R_0, R_1) = 1289.99$	Volume encontrado

Solução do Ansys

Utilizou-se um modelo paramétrico com elementos de viga com três graus de liberdade em cada nó.

Notou-se que os valores iniciais das variáveis de projeto influem nos resultados da otimização. Para avaliar a sensibilidade dos resultados, foram realizadas várias soluções de otimização utilizando-se o método “Subproblem Approximation”. Na Tabela 6.1 estão apresentados os resultados.

Tabela 6.1 – 1º análise do 1º caso

Valores iniciais		Valores finais		
H _v	t	H _v	t	V _v
2,00	0,01	5,9568	3,4893	2078,50
5,00	0,10	5,5473	3,9300	2180,00
8,00	1,00	9,4294	1,3868	1307,70
8,00	1,30	9,3015	1,3874	1290,50
9,00	1,30	9,3093	1,3867	1290,40
9,00	1,39	9,3020	1,3874	1290,30
10,00	4,00	9,3043	1,3868	1290,30
13,00	6,00	9,3213	1,3871	1293,00
20,00	10,00	9,3040	1,3870	1290,20

Para diminuir o efeito dos valores iniciais nos resultados da otimização, optou-se, neste caso, pela aplicação de mais uma restrição ao problema:

$$\frac{t}{H_v} < 0,2 \quad (22)$$

Com esta restrição obteve-se os resultados encontrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – 2º análise do 1º caso

Valores iniciais		Valores finais		
H _v	t	H _v	t	V _v
2,00	0,01	10,884	1,3881	1510,8
5,00	0,10	9,3087	1,3875	1291,6
8,00	1,00	9,3065	1,3868	1290,6
8,00	1,30	9,2914	1,3900	1291,5
9,00	1,30	9,2976	1,3882	1290,7
9,00	1,39	9,3023	1,3869	1290,1
10,00	4,00	9,2900	1,3883	1290,9
13,00	6,00	9,3018	1,3878	1290,9
20,00	10,00	9,2975	1,3882	1290,7

Analisando os resultados, observa-se que as soluções pelo Mathcad e Ansys estão bem correlacionadas e que a influência dos valores iniciais diminuíram.

6.1.3 Otimização de uma barra com três variáveis de projeto

Para um problema com mais de duas variáveis é difícil localizar o ponto ótimo graficamente como foi feito na solução analítica do caso anterior. Considerou-se, porém, suficiente a validação da solução do Ansys através da comparação com a solução do Mathcad. Desta maneira, foi feito novamente um estudo de otimização do volume de uma barra engastada, porém, com três variáveis de projeto. O esquema do problema está ilustrado na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Esquema do segundo caso de estudo

Assumiu-se, neste caso, que o comprimento não pode mudar. Assim, o menor volume da viga pode ser obtido com a menor área da secção transversal.

O modelo teve como variáveis de projeto t, B e H_v que são respectivamente a espessura da chapa, largura e altura da viga.

As seguintes restrições foram aplicadas:

- A tensão normal tem que ser menor que a tensão de escoamento do material

$$\sigma \leq \sigma_{ad} \quad (23)$$

- A tensão normal tem que ser menor que a tensão crítica de flambagem.

Utilizou-se a fórmula de carga crítica de flambagem segundo Roark [10] – tabela 15.1.

$$P' = \frac{m\sqrt{EI_y KG}}{L^2} \leq P \quad (24)$$

onde P' é a carga crítica de flambagem

G é o módulo de elasticidade transversal

m e K são coeficientes que podem ser encontrados em ROARK [10].

Diferente do primeiro caso, adotaram-se unidades e valores das propriedades de material comumente utilizados no dimensionamento de uma viga de aço:

$$P = 10.000 \text{ N}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$E = 206.000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ad} = 250 \text{ MPa}$$

Solução pelo Mathcad

O seguinte procedimento foi implementado no Mathcad:

$P := 1 \cdot 10^4$ $\sigma_{ad} := 250 \cdot 10^6$	$l := 10$ $E := 2.06 \cdot 10^{11}$	$\nu := 0.3$	Dados de entrada:
<hr/>			
Mf := P·l			Momento Fletor
$J(B,H,t) := \frac{B \cdot t^3}{6} + \frac{t(H - 2 \cdot t)^3}{12} + 2 \cdot (B \cdot t) \cdot \left[\frac{(H - t)}{2} \right]^2$			Características geométricas
$J_y(B,H,t) := \frac{t \cdot B^3}{12} + \frac{(H - 2 \cdot t) \cdot t^3}{12}$			
$W(B,H,t) := \frac{J(B,H,t)}{\left(\frac{H}{2} \right)}$			
<hr/>			
$K1(B,t) := B \cdot t^3 \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \frac{t}{B} \cdot \left(1 - \frac{t^4}{12 \cdot B^4} \right) \right]$			Coefficientes da fórmula de flambagem
$K2(H,t) := \frac{1}{3} \cdot (H - 2 \cdot t) \cdot t^3$			
$\alpha := 0.15$			
$D(t) := \frac{t^2 + \frac{t^2}{4}}{t}$			
$K(B,H,t) := 2 \cdot K1(B,t) + K2(H,t) + 2 \cdot \alpha \cdot D(t)^4$			
$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$			
$I_f(B,t) := \frac{t \cdot B^3}{12}$			
$m(B,H,t) := 4.01 + 11.7 \cdot \sqrt{I_f(B,t) \cdot E \cdot H^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot K(B,H,t) \cdot G \cdot l^2}}$			
<hr/>			
A(B,H,t) := 2·(B·t) + (H - 2·t)·t			Função Objetivo - Área da seção
$\sigma(B,H,t) := \frac{Mf}{W(B,H,t)}$			Tensão
$Pc(B,H,t) := m(B,H,t) \cdot \frac{\sqrt{E \cdot J_y(B,H,t) \cdot K(B,H,t) \cdot G \cdot l}}{l^2}$			Flambagem
<hr/>			
B := 0.1 H := 0.1 t := 0.001			Valores iniciais
<hr/>			
Given			
0.1 < H < 1			Limites das variáveis de projeto
0.003 < t < 0.01			
0.1 < B < 1			
<hr/>			
σ(B,H,t) < σ _{ad}			Restrição de escoamento
Pc(B,H,t) > P			Restrição de flambagem
<hr/>			
R := Minimize(A,B,H,t)			Resultados
$R = \begin{pmatrix} 0.39433665 \\ 0.30663117 \\ 0.003 \end{pmatrix}$	Largura Altura Espessura		
$A(R_0,R_1,R_2) = 3.2679 \times 10^{-3}$	Área		

Solução do Ansys

Utilizou-se o um modelo análogo ao modelo do caso anterior diferindo somente as propriedades da secção transversal.

Foram realizadas várias soluções de otimização utilizando o método do “Subproblem Approximation” para se verificar a influência dos valores iniciais das variáveis de projeto nos resultados da otimização. Na Tabela 6.3 estão apresentados os resultados.

Tabela 6.3 – 1º análise do 2º caso: “Subproblem Approximation Method”

Valores iniciais			Valores finais			
B [m]	H _v [m]	t [m]	B [m]	H _v [m]	t [m]	Área [m ²]
0,10	0,10	0,001	0,27205	0,99769	3,0612E-3	4,7010E-3
0,20	0,20	0,002	0,28523	0,88884	3,0228E-3	4,3929E-3
0,30	0,30	0,003	0,33015	0,49735	3,2423E-3	3,7325E-3
0,40	0,40	0,004	0,36410	0,36262	3,1944E-3	3,4642E-3
0,50	0,50	0,005	0,38677	0,44924	3,0249E-3	3,6805E-3
0,60	0,60	0,006	0,36434	0,64865	3,0432E-3	4,1729E-3

Analisando a Tabela 6.3 verifica-se que os resultados têm uma variação de até 34% no valor da função objetivo (área) e de até 270% na variável H_v. Isto constata uma grande influência dos valores iniciais nos resultados da otimização. Para tentar diminuir esta influência, utilizou-se o método “First Order” para a otimização do problema ao invés do método “Subproblem Approximation”. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – 2º análise do 2º caso: “First Order Method”

Valores iniciais			Valores finais			
B [m]	H _v [m]	t [m]	B [m]	H _v [m]	t [m]	Área [m ²]
0,10	0,10	0,001	0,35272	0,46724	3,0000E-3	3,5000E-3
0,20	0,20	0,002	0,37478	0,39446	3,0000E-3	3,4140E-3
0,30	0,30	0,003	0,37030	0,39536	3,0000E-3	3,3899E-3
0,40	0,40	0,004	0,35118	0,37346	3,5009E-3	3,7418E-3
0,50	0,50	0,005	0,37090	0,39929	3,0000E-3	3,4053E-3
0,60	0,60	0,006	0,36337	0,39255	3,0000E-3	3,3398E-3

Na Tabela 6.4, observa-se uma variação de aproximadamente 6% nos resultados da variável B e de 14% da variável H_v. Comparando-se com os resultados do método “Subproblem Approximation”, Tabela 6.3, confirma-se que o método “First Order” pode ser mais preciso conforme citado em ANSYS [1]. Porém, isso ainda não implica que o “First Order” se aproxima mais do mínimo global. Os resultados obtidos utilizando o método “First Order” podem representar um ponto de mínimo local, e, neste caso, ANSYS [1] sugere a utilização do método “Subproblem Approximation” antes da execução do método “First Order”.

No software Ansys também há disponíveis ferramentas (algoritmos) que podem ser utilizadas para melhorar a eficiência dos métodos de otimização. Dois exemplos são as rotinas chamadas “Random Design Generation” e “Sweep tool”. Ambas ferramentas não otimizam o problema proposto, pois elas somente melhoram a definição do universo de soluções aumentando o número de soluções viáveis antes de se iniciar a otimização. Com isso, as aproximações do método “Subproblem Approximation” são executadas com mais precisão e conseqüentemente também o resultado da otimização.

A ferramenta “Random Design Generation” gera soluções do problema a ser otimizado variando randomicamente os valores iniciais das variáveis de projeto. O número de soluções executadas ou o número de soluções viáveis registradas pode ser controlado.

Além disso, existe a opção de se manter no banco de dados da otimização somente os resultados viáveis.

O algoritmo “Sweep tool” gera soluções considerando os valores especificados entre os limites das variáveis de projeto. A faixa de valores possíveis para cada variável de projeto foi discretizada em dez partes.

Para verificar se os resultados obtidos com método “First Order” representam um ponto de mínimo local, o problema foi resolvido utilizando-se as rotinas “Random Design Generation” e “Sweep tool” seguidas pela execução dos métodos “Subproblem Approximation” e também “First Order”. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.5 – 3ª análise do 2º caso: “RAND”, “SWEEP”, “S.A.” e “F.O.”

Valores iniciais			Valores finais			
B [m]	H _v [m]	t [m]	B [m]	H _v [m]	t [m]	Área [m ²]
0,10	0,10	0,001	0,35551	0,43847	3,0000E-3	3,4305E-3
0,20	0,20	0,002	0,37551	0,36806	3,0000E-3	3,3392E-3
0,30	0,30	0,003	0,36213	0,42359	3,0000E-3	3,4256E-3
0,40	0,40	0,004	0,36699	0,39977	3,0131E-3	3,3779E-3
0,50	0,50	0,005	0,38606	0,31327	3,0000E-3	3,2382E-3
0,60	0,60	0,006	0,35193	0,39165	3,0000E-3	3,2686E-3

Comparando os resultados apresentados na Tabela 6.4 com os da Tabela 6.6 observa-se que os resultados tiveram pouca mudança indicando que utilizando-se somente o método “First Order” os resultados podem estar próximos do mínimo global para este caso. Porém, pela mesma comparação, nota-se que os últimos resultados são menos sensíveis aos valores iniciais das variáveis de projeto. Sugere-se a utilização das ferramentas “Random Design Generation” e “Sweep tool” bem como os dois métodos de otimização para a otimização de problemas mais complexos.

6.1.4 Otimização do volume das pernas de um pórtico rolante

O modelo de elementos finitos descrito no Capítulo 5 foi utilizado como modelo paramétrico para o caso de estudo de otimização do volume das pernas de um pórtico rolante.

Considerando a boa correlação entre a solução pelo Ansys e Mathcad nos casos de estudo anteriores, e, a inviabilidade da solução por elementos finitos neste último software, somente a solução pelo Ansys, análoga à última solução do caso anterior, foi adotada neste caso.

Determinação das variáveis de projeto

O volume das pernas pode ser alterado através das variáveis indicadas na Figura 6.4. Porém, algumas destas variáveis não podem ser declaradas como variáveis de projeto, pois existem restrições de projeto e montagem que impedem a alteração do valor da variável durante o processo de otimização. Assim, para se determinar as variáveis de projeto, considerou-se as seguintes condições de projeto e montagem:

- a) A altura da secção inferior da Perna, H_i , deve ser igual à largura da secção da Viga Cabeceira para que as abas da primeira transmitam os esforços para as almas desta última.
- b) A largura da secção superior perna, B_s , deve ser igual à largura da Viga principal, pois as respectivas abas geralmente se emendam durante a montagem.
- c) A altura da Perna é uma dimensão determinada pelo tipo e tamanho de carga a ser movimentada. Não pode ser variável de projeto para que não se alterem as especificações técnicas do equipamento.

Desta maneira, apenas as variáveis γ , β , t_{aba} e t_{alma} foram declaradas como variáveis de projeto.

Figura 6.4 – Variáveis das secções das Pernas

As restrições aplicadas basearam-se nos critérios de projeto conforme se segue:

- Escoamento do material: a tensão de Von Mises nas Pernas não deve ultrapassar o valor da tensão limite de escoamento do material
- Flambagem de coluna das Pernas ($\lambda > 1$): o autovalor encontrado através da análise de flambagem de primeira ordem (problema de autovalor) para cada caso de carregamento deve ser maior que um.
- Flambagem dos painéis das Pernas: a tensão comparação de flambagem local dos painéis ilustrados na Figura 6.5, deve ser menor que a tensão crítica conforme descrito no Capítulo 5 pela Equação (7).

- Deslocamento da Perna: o maior deslocamento das Pernas deve ser menor que $\frac{H_{perna}}{400}$, onde H_{perna} é a altura da perna. Este critério é comumente adotado em projetos de pórticos para se obter uma estrutura rígida o suficiente para não causar oscilações da carga ou do pórtico durante os movimentos de direção da carga e translação do pórtico respectivamente. Este critério também é adotado para que o operador do equipamento tenha relativo conforto diminuindo-se as oscilações da cabine de comando quando está fixada nas Vigas Principais ou nas Pernas perto das Vigas Principais. Embora não seja um critério exigido por norma muitos usuários de pórticos solicitam que essa condição seja observada.
- Chapas com espessura mínima de 8mm. Devido a problemas de fabricação, como empenamento das chapas durante a soldagem por exemplo, a espessura das chapas deve possuir no mínimo 8mm baseando-se em experiências de projetistas em pórticos com capacidade de até 100t.
- Limites para γ e β : $1,0 < \gamma < 2$ e $1,0 < \beta < 2$. Estes limites garantem que a razão entre as dimensões das secções dos elementos das pernas sejam sempre menor que 2 evitando erros numéricos devido á variação da secção transversal utilizando o elemento BEAM44. Tomando-se γ e β maiores que 0,5, essa mesma restrição pode ser repetida, porém, devido à ocorrência de maior momento fletor na parte superior, tem-se que as secções superiores serão maiores que as inferiores, e assim, γ e β serão maiores que um.

Figura 6.5 – Painéis das Pernas

Como nos casos anteriores, foram realizados vários cálculos de otimização partindo-se de diferentes valores iniciais das variáveis de projeto.

Tabela 6.6 –3º caso: “RAND”, “SWEEP”, “S.A.” e “F.O.”

Valores iniciais				Valores finais				
t aba [mm]	T alma	γ	β	t aba [mm]	t alma [mm]	γ	β	V_v [m ³]
08,00	08,00	1,00	1,00	8,0000	8,0000	1,1786	1,0515	0,19431
12,67	12,67	1,11	1,11	8,0000	8,1177	1,1949	1,2621	0,18826
17,33	17,33	1,22	1,22	8,0329	8,1106	1,2034	1,4191	0,18445
22,00	22,00	1,33	1,33	8,0205	8,0000	1,2199	1,0247	0,19743
26,67	26,67	1,44	1,44	8,0488	8,0000	1,2292	1,0240	0,19822
31,33	31,33	1,56	1,56	8,0205	8,1428	1,1999	1,0232	0,19840
36,00	36,00	1,67	1,67	8,0205	8,1428	1,2009	1,0387	0,19771
40,67	40,67	1,78	1,78	8,0205	8,1428	1,2017	1,0529	0,19709
45,33	45,33	1,89	1,89	8,0205	8,1428	1,2024	1,0641	0,19661
50,00	50,00	2,00	2,00	8,0206	8,1428	1,2030	1,0737	0,19622

Os resultados Tabela 6.6 apresentaram variação de até 7%. Esta variação foi considerada razoável quando comparada com o valor da massa total do pórtico. Além disso, as variáveis de espessuras, são de fato, variáveis discretas e os valores adotados para o ponto ótimo sempre serão aproximados para os valores de espessuras encontradas no mercado.

Adotou-se como valores do ponto ótimo: $t_{aba} = 8,00$, $t_{alma} = 8,00$, $\gamma = 1,20$ e $\beta = 1,00$.

Para validar esta sugestão, o programa foi alimentado com estes valores e observou-se que todas as restrições foram respeitadas conforme valores apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 –Verificação dos valores do ponto ótimo

Critério	Valor	Valor admissível
Escoamento	80,47Mpa	<166,67Mpa
Autovalor (caso crítico)	8,32	>1,00
Coef. Segurança de flambagem local	2,38	>1,00
Deslocamento da Perna	0,030m	<0,030m
Espessura mínima	8,00mm	>8,00mm

O deslocamento das Pernas e a mínima espessura de chapa são restrições baseadas em experiências de engenheiros projetistas. Na Tabela 6.7 observa-se que a restrição do deslocamento das Pernas e a espessura mínima são as dominantes, ou seja, pode-se dizer que o projeto ótimo das estruturas das Perna limita-se pelas restrições que não são exigidas por normas ou outro critério de resistência dos materiais mas sim por restrições subjetivas que podem variar de projeto para projeto. Desta maneira, foram realizados dois testes para se verificar alternativas de projetos. Um dos testes foi realizado tendo o limite inferior da restrição de espessura de chapa igual a um milímetro. O outro teste foi realizado com 1mm de espessura mínima de chapa e também sem a restrição de deslocamento mínimo das Pernas.

Os resultados do primeiro teste estão apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 –3º caso: Resultados com espessura mínima de 1mm

Valores iniciais				Valores finais				
t_{aba} [mm]	t_{alma} [mm]	γ	β	t_{aba} [mm]	t_{alma} [mm]	γ	β	V_v [m ³]
08,00	08,00	1,00	1,00	4,8800	2,9300	1,3800	1,0000	0,09932
12,67	12,67	1,11	1,11	5,3862	2,5115	1,9029	1,0909	0,10421
17,33	17,33	1,22	1,22	5,1597	2,9985	1,3883	1,0069	0,10353
22,00	22,00	1,33	1,33	5,7371	3,0506	1,3762	1,0140	0,11066
26,67	26,67	1,44	1,44	5,7707	2,9611	1,3881	1,0084	0,11023
31,33	31,33	1,56	1,56	5,2978	2,8701	1,9147	1,1331	0,10824
36,00	36,00	1,67	1,67	5,1471	2,7812	1,9122	1,1395	0,10486
40,67	40,67	1,78	1,78	5,1855	2,8076	1,9123	1,1349	0,10585
45,33	45,33	1,89	1,89	5,1840	2,8321	1,9120	1,1535	0,10577
50,00	50,00	2,00	2,00	5,1431	2,8727	1,9121	1,1309	0,10656

Adotou-se como valores do ponto ótimo: $t_{aba} = 5,00$, $t_{alma} = 3,00$, $\gamma = 1,70$ e $\beta = 1,10$.

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 6.9 que as restrições dominantes passaram a ser a flambagem local e o deslocamento das Pernas.

Tabela 6.9 –Verificação dos valores do ponto ótimo tendo espessura mínima de 1mm

Critério	Valor	Valor admissível
Escoamento	154,72Mpa	<166,67Mpa
Autovalor (caso crítico)	8,20	>1,00
Coef. Segurança de flambagem local	1,01	>1,00
Deslocamento da Perna	0,030m	<0,030m
Espessura mínima	2,97mm	>1,00mm

O segundo teste foi executado com espessura mínima de 1mm e também sem a restrição de deslocamento máximo nas Pernas. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 –3º caso: Resultados com espessura mínima de 1mm e sem restrição de deslocamento máximo nas Pernas

Valores iniciais				Valores finais				
t_{aba} [mm]	t_{alma} [mm]	γ	β	t_{aba} [mm]	t_{alma} [mm]	γ	β	V_v [m ³]
08,00	08,00	1,00	1,00	4,9293	2,0621	1,0073	1,0149	0,08316
12,67	12,67	1,11	1,11	5,2972	1,9057	1,2661	1,0052	0,08882
17,33	17,33	1,22	1,22	5,2116	2,1203	1,0116	1,0118	0,08712
22,00	22,00	1,33	1,33	5,2753	2,1147	1,2658	1,0151	0,09097
26,67	26,67	1,44	1,44	5,2723	2,1287	1,2655	1,0149	0,09112
31,33	31,33	1,56	1,56	5,1795	2,2023	1,2620	1,0116	0,09105
36,00	36,00	1,67	1,67	5,3206	2,1445	1,2661	1,0152	0,09191
40,67	40,67	1,78	1,78	5,3440	2,1367	1,2661	1,0153	0,09208
45,33	45,33	1,89	1,89	5,2222	2,2039	1,3678	1,0220	0,09256
50,00	50,00	2,00	2,00	5,2222	2,2039	1,3678	1,0220	0,09256

Adotou-se como valores do ponto ótimo: $t_{aba} = 5,00$, $t_{alma} = 2,00$, $\gamma = 1,25$ e $\beta = 1,00$.

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 6.11 que a restrição dominante passou a ser somente a tensão admissível de escoamento.

Tabela 6.11 –Verificação dos valores do ponto ótimo tendo espessura mínima de 1mm sem restrição de deslocamento máximo nas Pernas

Critério	Valor	Valor admissível
Escoamento	166,61Mpa	<166,67Mpa
Autovalor (caso crítico)	7,38	>1,00
Coef. Segurança de flambagem local	1,35	>1,00
Espessura mínima	1,84mm	>1,00mm

Observando os resultados dos dois últimos testes verifica-se que as Pernas podem ter seus volumes reduzidos se as restrições baseadas nas experiências dos engenheiros projetistas forem amenizadas.

Como o intuito deste trabalho não é analisar os critérios de projetos, os resultados apresentados nos dois últimos testes são apenas indicativos de que se pode considerar,

dependendo do projeto, espessuras menores ou deslocamentos maiores nos projetos estruturais das Pernas dos pórticos.

7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Conforme já observado por Freitas [2], a utilização de um pré-processador garantiu a qualidade do modelo, já que há um maior domínio na entrada de dados. Erros que comumente ocorrem durante a aplicação de vários carregamentos, várias propriedades físicas e condições de contorno são bem controladas quando se utiliza a geração automática de modelos. Além disso, a estrutura do programa apresentada neste trabalho tem a entrada de dados e a análise dos resultados fora do ambiente do Ansys. Esta estrutura permite que o usuário execute o cálculo sem conhecer (operar) o software de elementos finitos uma vez que este pode ser acionado remotamente no modo “batch” através das rotinas implementadas no Excel. Assim, conseguiu-se aumentar o controle dos erros citados anteriormente, que são geralmente, cometidos por usuários pouco experimentados.

O estudo dos três casos de aplicação do Ansys em otimização mostrou que não existe um procedimento genérico aplicável a qualquer problema. Cada caso possui suas restrições e método de solução. Assim, entende-se que os problemas de otimização não devem ser solucionados somente como problemas matemáticos. A análise do ponto de vista de engenharia (restrições de projeto e fabricação) é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados, principalmente quando se têm muitas variáveis de projeto.

Como temas para trabalhos futuros sugere-se a parametrização de outros tipos de pórticos rolantes. Os pórticos com talha fixa, pórticos com somente uma viga principal,

ou aqueles que possuem vigas extras como reforçadores não foram incluídos no escopo deste trabalho.

Propõe-se também que seja feito um levantamento de custos em função das variáveis de projeto. Deve-se lembrar que qualquer função expressa por parâmetros pode ser minimizada. Desta maneira, é possível implementar a minimização de custos durante a execução do projeto baseado no estudo de otimização adotado neste trabalho.

Referências*

- [1] ANSYS Inc. **ANSYS Documentation**, Release 7.0. Documentação eletrônica disponível no aplicativo Ansys.
- [2] FREITAS G. G. **Modelagem Paramétrica de Comportas Hidráulicas: Análise de Tensões e Estabilidade Estrutural**, 2001. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval), EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- [3] HOUGAZ, A. B; DIAS, C. A. **3D FEM parametric Modeling Applied to Optimization of Hull Girder**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS & ARTIC ENGINEERING, 22., 2003, Cancun. **Proceedings...** Cancun: American Society of Mechanical Engineers, 2003. p.10.
- [4] KOGAN, J. **Crane Design: Theory and Calculations of Reliability**, Jerusalém: Universities Press, 1976. 365p.
- [5] MASON, J. **Pontes Metálicas e Mistas em Viga Reta: Projeto e Cálculo**, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1976. 202p.
- [6] Mathsoft Engineering & Education, Inc. **MATHCAD Help System**, Version 11.0. Documentação eletrônica disponível no aplicativo Mathcad.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400**: cálculo de equipamentos para levantamento e movimentação de cargas. Rio de Janeiro, 1984.
- [8] PFEIL, W.; **Estruturas de Aço**, 3º edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1982. 584p.
- [9] TAMASAUKAS, A. **Metodologia do Projeto Básico de Equipamentos de Manuseio e Transporte de Cargas – Ponte Rolante – Aplicação Não- Siderúrgica**, 2000, 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [10] YOUNG, W. C.; BUDYNAS, R. G. **Roark's Formulas for Stress and Strain**, 7th edition. New York: McGraw-Hill, 2002. 852p.

* De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

Apêndice – Exemplos de telas do programa

DADOS DE CONCEPÇÃO DO PÓRTECO

Envio: 23 17/9/2004 21:35:56

POSICÃO	FEST.	PASS.	PAUL.	CABL.	H' SUP.	CABL.	ESCA.	ENRO.	BALA.	ARTL.
VIGA PRINCIPAL TRÁS	VIGA1	1								
VIGA PRINCIPAL FREITE	VIGA2	1	1	1						
VIGA FECHAMENTO ESO.	VFE				1					
VIGA FECHAMENTO DIR.	VFD									
PERNA TRÁS ESQUERDA	PERIA1									
PERNA TRÁS DIREITA	PERIA2				2					
PERNA FREITE DIREITA	PERIA3									
PERNA FREITE ESQUERDA	PERIA4				1			1		
VIGA CABECEIRA ESO.	VCE								1	
VIGA CABECEIRA DIREITA	VCD									
LADO ESQUERDO	ESO.									
LADO DIREITO	DIR.									
TRUQUE										1

DADOS PARA OS IÓIS PRINCIPAIS

V1 [m]	7.3000
V2 [m]	7.5000
B1 [m]	
B2 [m]	
B3 [m]	
B4 [m]	
D1 [m]	5.7500
D2 [m]	5.7500
D3 [m]	6.0000
H1 [m]	12.8196
H2 [m]	12.8196
PPERIA [m]	1.3000
ARTIC [m]	1.0117
P1 [m]	2.0000
P2 [m]	1.0000
P3 [m]	1.0117
ARTIC TRUQUE [m]	0.7000
X1 [m]	0.5380

DADOS PARA CÁLCULO DO RISCO DE FLAMBIAGEM

a_viga1 [m] 1.5 Dimensão das placas das pernas e vigas de ligação inferior no sentido paralelo aos esforços de compressão

a_viga2 [m] 1.5 Dimensão das placas das demais vigas no sentido paralelo aos esforços de compressão

dist. [m] 1.05 Distância do diáfagma da perna em relação à linha de centro da Viga Principal

Diagramas: Tipo 1 (cross-section of a beam with dimensions B1, B2, B3, B4, and D1) and OU (alternative cross-section with dimensions P1 and P3).

Figura A.1 – Planilha de entrada de dados: dimensões

FATOR PARA DENSIDADE NO MEF

Envio: 23 17/9/2004 21:35:56

PROPRIEDADES DO AÇO	FATOR PARA DENSIDADE NO MEF
Mód Elasticidade E [N/m²]	2.10E+11
Poisson ν	0.3
Densidade ρ [kg/m³]	7850
Tensão Escoamento σ_y [Pa]	2.50E+08

PROPRIEDADES DAS SEÇÕES

Seção	Constante	Extrem
Viga Cabeceira		
Viga Perna Lado Esquerdo		
Viga Principal		
Balanço Esquerdo		
Balanço Direito		
Viga Fechamento		
Viga Perna Lado		

DIMENSÕES DAS VIGAS

Dimensão	Valor
Largura da aba sup. b1 [mm]	500.0
Largura da aba inf b [mm]	510.0
Altura da alma + 2* t_f H [mm]	719.0
Espeçura da aba t_f [mm]	9.5
Espeçura da alma t_w [mm]	8.0
Posição da alma x [mm]	217.000

PROPRIEDADES CALCULADAS

Propriedade	Valor
Área [m²]	1.1200E-02
Inércia [m⁴]	1.6530E-03
Mód. resistência σ_{wy}	4.5979E-05

Figura A.2 – Planilha de entrada de dados: seções transversais

CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES UTILIZADAS															
1	CARREGAMENTO	1	2	3	4	5	6	7	DADOS PARA CARREGAMENTO						
2	Carregamento	1	2	3	4	5	6	7	Envio: 23/17/9/2004 21:39:56						
3									MASSA						
4	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Carga [kg]	1.02E+05					
5	2	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	Massa do carro [kg]	2.50E+04					
6	3								Massa do passageiro da VP1 [kg]	4.92E+02					
7	4								Massa do passageiro da VP2 [kg]	1.10E+03					
8	5								Massa do passageiro da VLD [kg]	2.47E+02					1-Vig
9	6								Massa do passageiro da VLD [kg]	1.60E+02					2-Vig
10	7	2.00	2.00	2.00					Massa dos painéis nas Vigas de Fechamento [kg]	0.00E+00					3-Per
11	8								Massa dos painéis no balanço esquerdo [kg]	wp1 0.00E+00					4-Per
12	CASO	1	2	2	3	3	3	3	Massa dos painéis no balanço direito [kg]	wp2 1.00E+03					5-Per
13									Massa dos painéis no balanço direito [kg]	wp3 0.00E+00					6-Per
14	Posição do carro (1=BE, 2=VAOI, 3=BD)								Massa da escada [kg]	we 3.71E+02					7-Per
15									Massa do enrolador de cabos [kg]	3.10E+02					8-Per
16									Massa da cabina de comando [kg]	1.05E+03					9-Cat
17									Massa de cada trupe [kg]	1.60E+03					10-Cat
18									Massa do trilho [kg]						11-Cat
19									Massa do festoon [kg]						12-Pl
20															13-M
21									ACELERAÇÃO						
22									Aceração do carro [m/s²]	4.60E-02					14-Vig
23									Acel Portico [m/s²]	7.81E-02					15-Cat
24									Aceração Pórtico Máxima Choque Para-choque [m/s²]	1.00E+00					16-Pa
25									DIMENSÕES UTILIZADAS NO CARREGAMENTO						
26									Altura do trilho [m]						18-Pa
27									Off-set trilho [m]	2.30E-01					19-Pa
28									Braco em X cabine [m]	3.75E+00					20-Pa
29									Braco em Y cabine [m]						21-Cat
30									Braco em X painel [m]						22-Cat
31									Braco em Y painel [m]	2.10E+00					1-Vig
32									Braco em Z painel [m]						2-Vig
33									Braco em Z nass VP1 [m]	4.54E-01					3-Per

Figura A.3 – Planilha de entrada de dados: carregamentos

VERIFICAÇÃO DO RISCO DE FLAMBAGEM LOCALIZADA	
TENSÕES ADMISSÍVEIS :	
$E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$	Módulo de elasticidade
$\nu = 3 \times 10^{-1}$	Poisson
$\sigma_y = 2.5 \times 10^3 \text{ MPa}$	Tensão de escoamento do aço
$\sigma_{ta} = 1.8797 \times 10^3 \text{ MPa}$	Tensão admissível a tração (ou compressão) simples
$\tau_a = 1.0832 \times 10^3 \text{ MPa}$	Tensão admissível ao cisalhamento
TENSÕES ATUANTES NA ABA	
$\sigma_{max_sec} = \left(\frac{M_{x_max_sec}}{W_{x_sec}} + \frac{M_{y_max_sec}}{W_{y_sec}} + \frac{N_{max_sec}}{A_{sec}} \right) Mx$	
$\sigma_{max_sec} = 94960237.5556 \text{ Pa}$	Tensão normal máxima para combinada no escoamento
$\tau_{max_sec} = \frac{Mx \cdot Q_{x_sec} \cdot M_{x_max_sec}}{2 \cdot I_{x_sec} \cdot y_{x_sec}}$	
$\tau_{max_sec} = 1.0557 \times 10^6 \text{ Pa}$	Cisalhamento máximo na aba
$\sigma_{comb_sec} = \sqrt{\sigma_{max_sec}^2 + 3 \cdot \tau_{max_sec}^2}$	
$\sigma_{comb_sec} = 8.498 \times 10^7 \text{ Pa}$	Tensão de comparação no escoamento na aba
$\sigma_{2max_sec} = \left(\frac{M_{x_max_sec}}{W_{x_sec}} + \frac{M_{y_max_sec}}{W_{y_sec}} + \frac{d_{y_sec}}{y_{x_sec}} \cdot \frac{M_{x_max_sec}}{I_{x_sec}} + \frac{N_{max_sec}}{A_{sec}} \right) Mx$	
$\sigma_{2max_sec} = 8.1208 \times 10^7 \text{ Pa}$	Tensão normal máxima p/ tensão de comparação na flambagem na aba
$\tau_{med_sec} = \frac{Mx \cdot Q_{x_sec}}{2 \cdot I_{x_sec} \cdot y_{x_sec} \cdot t_{ab_sec}}$	
	Cisalhamento médio p/ tensão de comparação na flambagem na aba

Figura A.4 – Procedimento do Mathcad para cálculo de flambagem