



“UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA
COMPUTACIONAL EM EXCEL PARA AUTOMATIZAR O
PROJETO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS ROLANTES**

**Guaratinguetá
2010**

UNESP  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JOSÉ CANDIDO DE CAMARGO VAZ

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL EM
EXCEL PARA AUTOMATIZAR O PROJETO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS
ROLANTES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr.Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2010



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JOSÉ CANDIDO DE CAMARGO VAZ

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. ALVARO MANOEL DE SOUZA SOARES
Unesp-Feg

Prof. Dr. ANSELMO MONTEIRO ILKIU
UNITAU

Outubro de 2010

Dedicatória

De modo especial a minha esposa Elenice e aos meus filhos Marina e Rafael que muito me apoiaram e motivaram durante este período de estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família que foram e são meus grandes incentivadores e sempre me apoiaram.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, que me apoiou e incentivou nas horas mais difíceis para a elaboração desta Dissertação.

Agradeço de forma especial ao grande amigo José Paulo Grando, pelo apoio, direcionamento profissional e incentivo no estudo realizado.

VAZ, J.C.C. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional em Excel para automatizar o projeto estrutural de pórticos rolantes. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para a automatização de cálculo para o projeto estrutural de pórticos rolantes. Através de memorial de cálculo analítico, e de um modelo de pórtico rolante, pode ser rapidamente verificado quando ao limite do escoamento do material, suas propriedades geométricas e suas resistências mecânicas, orientando o usuário para a escolha do dimensional da estrutura.

Optou-se pelo programa comercial Microsoft Excel, utilizando suas ferramentas e formulações internas, devido a sua facilidade de utilização, permitindo que várias alternativas sejam analisadas para escolha da que melhor atenda aos requisitos de projeto. Para facilitar o uso, as planilhas do Excel forma agrupadas em módulos, visando com isso desenvolver as atividades de informações de dados de forma simples, objetiva e integradas, a fim de se obter uma interface amigável e uma análise estrutural confiável.

Para a validação desta ferramenta proposta de cálculo analítico foi utilizado o programa comercial de elementos finitos ANSYS, através da análise de alguns exemplos de pórticos rolantes.

PALAVRAS-CHAVE: Pórticos rolantes. Análise estrutural. Ferramenta Computacional. Programa Especialista. Excel

VAZ, J.C.C. **Development of a computational tool in Excel to automate the structural design of gantry cranes.** 2010. 129 f. Thesis (Master Degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a computational tool to automate the calculation of the structural design of gantry cranes. Through Memorial analytical calculation, and a model gantry crane, can be fast verification against yield of material, its geometric properties and mechanical strength, guiding the user to choose the dimensional.

We choose the commercial program Microsoft Excel using its tools and internal formulations due to its ease of use, allowing multiple alternatives are analyzed to choose the one that best meets the design requirements. For ease of use, so Excel spreadsheets grouped into modules, thus aiming to develop the activities of data information in a simple, objective and integrated in order to achieve a friendly interface and reliable structural analysis.

For the validation of this proposed tool for analytical calculation we used the commercial finite element program ANSYS, by analyzing some examples of gantry cranes.

KEYWORDS: Gantry cranes. Structural analysis. Computacional tool. Program specialist. Excel.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Utilização de pórtico rolante	25
FIGURA 2.2 – Aplicação de pórtico rolante	26
FIGURA 2.3 – Tipos de perfil utilizado na construção estrutural dos pórticos	26
FIGURA 2.4 – Tipos de mecanismos de acionamento de pórticos	27
FIGURA 2.5 – Pórtico rolante viga dupla	28
FIGURA 2.6 – Detalhe do carro da estrutura.....	28
FIGURA 2.7 – Pórtico rolante viga simples	29
FIGURA 2.8 – Semipórtico	30
FIGURA 2.9 – Esquema da localização da viga principal	31
FIGURA 2.10 – Esquema da localização do trecho central da viga principal	31
FIGURA 2.11 – Esquema de um pórtico rolante somente com o trecho central (sem balanços)	32
FIGURA 2.12 – Pórtico rolante somente com trecho central	32
FIGURA 2.13 – Esquema da localização dos balanços da viga principal	33
FIGURA 2.14 – Esquema de posicionamento dos balanços da viga principal	33
FIGURA 2.15 – Pórtico com balanço apenas de uma extremidade.....	34
FIGURA 2.16 – Esquema da localização das vigas de fechamento	35
FIGURA 2.17 – Esquema das pernas do pórtico rolante.....	35
FIGURA 2.18 – Detalhe geométrico da seção da perna do pórtico.....	36
FIGURA 2.19 – Esquema das vigas de ligação do pórtico	37
FIGURA 2.20 – Pórtico com as rodas localizadas nas cabeceiras (viga ligação) ...	37
FIGURA 2.21 – Esquema do truque.....	38
FIGURA 2.22 – Esquema das direções x, y e z adotadas.....	41
FIGURA 2.23 – Esquema do peso próprio da estrutura e os acionamentos.....	42
FIGURA 2.24 – Esquema das cargas devido ao vento na direção Z	44
FIGURA 2.25 – Esquema das cargas devido ao vento na direção X.....	45
FIGURA 2.26 – Placa sujeita a tensão de compressão/tração e cisalhamento	49
FIGURA 2.27 – Região da placa (alma) da seção resistente.....	50

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.28 – Tipo de elemento utilizado – BEAM189	55
FIGURA 3.1 – Esquema da entrada de dados.....	57
FIGURA 3.2 – Esquema de carregamentos	57
FIGURA 3.3 – Esquema de análise dos resultados	58
FIGURA 3.4 – Esquema da iteração	58
FIGURA 3.5 – Esquema da tela da planilha “DIMPRINC”	59
FIGURA 3.6 – Esquema da tela da planilha “CONSID”	60
FIGURA 3.7 – Esquema da tela da planilha “AREA”	61
FIGURA 3.8 – Esquema da tela da planilha “VP”	62
FIGURA 3.9 – Esquema da tela da planilha “PERNAS”	63
FIGURA 3.10 – Esquema da tela da planilha “CARGAS”	64
FIGURA 3.11 – Esquema da tela da planilha “C1”	65
FIGURA 3.12 – Esquema da tela da planilha “C2”	66
FIGURA 3.13 – Esquema da tela da planilha “C2D”	67
FIGURA 3.14 – Esquema da tela da planilha “C3”	68
FIGURA 3.15 – Esquema da tela da planilha “C3D”	69
FIGURA 3.16 – Esquema da tela da planilha “C4”	70
FIGURA 3.17 – Esquema da tela da planilha “C4D”	71
FIGURA 3.18 – Esquema da tela da planilha “C5”	72
FIGURA 3.19 – Esquema da tela da planilha “C6”	73
FIGURA 3.20 – Esquema da tela da planilha “C7”	74
FIGURA 3.21 – Esquema da tela da planilha “C8”	75
FIGURA 3.22 – Esquema da tela da planilha “C9”	76
FIGURA 3.23 – Esquema da tela da planilha “C10”	77
FIGURA 3.24 – Esquema da tela da planilha “CC” – direção x e y.....	78
FIGURA 3.25 – Esquema da tela da planilha “CC” – direção z e y.....	79
FIGURA 3.26 – Esquema da tela da planilha “CC” – combinadas	80
FIGURA 3.27 – Esquema da tela da planilha “Flamb”	81
FIGURA 3.28 – Esquema da tela da planilha “LM”	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – Carregamento Combinado 1 – Cálculo Analítico Excel - Tensão ..	85
FIGURA 4.2 – Carregamento Combinado 1 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	85
FIGURA 4.3 – Carregamento Combinado 2 – Cálculo Analítico Excel - Tensão ..	86
FIGURA 4.4 – Carregamento Combinado 2 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	86
FIGURA 4.5 – Carregamento Combinado 3 – Cálculo Analítico Excel - Tensão ..	87
FIGURA 4.6 – Carregamento Combinado 3 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	87
FIGURA 4.7 – Carregamento Combinado 4 – Cálculo Analítico Excel - Tensão ..	88
FIGURA 4.8 – Carregamento Combinado 4 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	88
FIGURA 4.9 – Carregamento Combinado 5 – Cálculo Analítico Excel - Tensão ..	89
FIGURA 4.10 – Carregamento Combinado 5 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	89
FIGURA 4.11 – Carregamento Combinado 6 – Cálculo Analítico Excel - Tensão	90
FIGURA 4.12 – Carregamento Combinado 6 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	90
FIGURA 4.13 – Carregamento Combinado 7 – Cálculo Analítico Excel - Tensão	91
FIGURA 4.14 – Carregamento Combinado 7 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	91
FIGURA 4.15 – Carregamento Combinado 8 – Cálculo Analítico Excel - Tensão	92
FIGURA 4.16 – Carregamento Combinado 8 – Cálculo ANSYS - Tensão.....	92
FIGURA A.1 – Viga bi engastada.....	100
FIGURA A.2 – Momentos devidos ao giro unitário em A.....	100
FIGURA A.3 – Viga engastada rotulada	101
FIGURA A.4 – Momento devido ao giro unitário em A.....	101
FIGURA A.5 – Convenção de momentos positivos	102
FIGURA A.6 – Pórtico plano indeslocáveis	102
FIGURA A.7 – Pórtico sob ação de um binário M	103
FIGURA A.8 – Momento atuando no nó A.....	103
FIGURA A.9 – Geometria pórtico indeslocável	106
FIGURA A.10 – Esquema das reações devido às cargas externas e os momentos internos.....	110
FIGURA A.11 – Cargas externas e reações finais	112
FIGURA A.12 – Diagrama de esforço normal – pórtico indeslocável	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA A.13 – Diagrama de esforço cortante – pórtico indeslocável.....	113
FIGURA A.14 – Diagrama de momento fletor – pórtico indeslocável.....	114
FIGURA A.15 – Pórtico plano	114
FIGURA A.16 – Pórtico plano com deslocamento restringido	115
FIGURA A.17 – Pórtico plano com deslocamento imposto.....	116
FIGURA A.18 – Geometria pórtico deslocável	117
FIGURA A.19 – Esquema das reações devido às cargas externas e os momentos internos.....	121
FIGURA A.20 – Cargas externas e reações parciais.....	122
FIGURA A.21 – Deslocamento pórtico.....	123
FIGURA A.22 – Reações devido ao deslocamento	125
FIGURA A.23 – Reações e carga para equilibrar a estrutura.....	126
FIGURA A.24 – Esquema de reações devidas às cargas externas e os momentos internos.....	127
FIGURA A.25 – Cargas externas e reações finais	128
FIGURA A.26 – Diagrama de esforço normal – pórtico deslocável	129
FIGURA A.27 – Diagrama de esforço cortante – pórtico deslocável.....	129
FIGURA A.28 – Diagrama de momento fletor – pórtico deslocável.....	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Dados principais do equipamento.....	39
TABELA 2.2 – Tensões admissíveis segundo a Norma NBR 8400 Edição Março 1984	40
TABELA 2.3 – Combinações de carregamento	47
TABELA 2.4 – Combinações de carregamento majorado	47
TABELA 2.5 – Coeficiente de segurança na flambagem localizada	54
TABELA 4.1 – Tabela Comparação entre Excel e ANSYS.....	93
TABELA A.1 – Momentos de engastamento perfeito	100

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – Tipos de carregamento.....	41
QUADRO 2.2 – Casos de solicitações de carregamento.....	46
QUADRO 2.3 – Coeficientes de flambagem – Norma NBR 8400.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Vão do pórtico	[m]
H	Altura do pórtico	[m]
V	Comprimento total da viga principal	[m];[mm]
Cbe	Comprimento do balanço esquerdo do pórtico	[m];[mm]
Cbd	Comprimento do balanço a direita do pórtico	[m];[mm]
Dz	Distância entre pernas na direção Z	[m];[mm]
Dp	Distância entre as rodas do pórtico	[m];[mm]
Lcar	Vão do carro (entre vigas)	[m];[mm]
Dc	Distância entre rodas do carro	[m];[mm]
nrc	Quantidade de número de rodas do carro	-----
nrp	Quantidade de número de rodas do pórtico	-----
F	Força aplicada pontual	[kN]; [kgf]
Fs	Carga de serviço atuante no pórtico	[kN];[tf]
Pport	Peso do pórtico parte estrutural	[kN];[tf]
Pcar	Peso do carro guincho	[kN];[tf]
Fg	Peso do bloco do gancho	[kN];[tf]
Pc	Peso do cabo de aço	[kN];[tf]
C	Coefficiente aerodinâmico	-----
Pa	Pressão aerodinâmica	[N/m ²]
Ws	Vento em serviço	[kgf/m ²]
Wfs	Vento fora de serviço	[kgf/m ²]
t	Espessura das chapas das vigas	[mm]
h1,h2	Altura da alma da viga	[mm]
Bi	Largura da aba da viga na seção inferior	[mm]
Bs	Largura da aba da viga na seção superior	[mm]
V	Esforço cortante	[kN]; [kgf]
M	Momento fletor	[kN.m]; [kgf.cm]
R	Reação nos apoios	[kN]; [kgf]
σ	Tensão de tração, compressão e combinada.	[MPa]; [kgf/cm ²]
τ	Tensão de cisalhamento	[MPa]; [kgf/cm ²]

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Coeficiente de distribuição dos momentos – processo de Cross	---
k	Coeficiente de rigidez da barra – processo de Cross	---
Y_{LN}	Distância da linha de referência à linha neutra	$[m]$
A	Área da seção	$[m^2]$
I_y	Momento de inércia em relação ao eixo Y	$[m^4]$
I_x	Momento de inércia em relação ao eixo X	$[m^4]$
W	Módulo de resistência à flexão	$[m^3]$
M_S	Momento estático	$[m^3]$
E	Módulo de Young do material	$[MPa]; [kgf/cm^2]$
f_y	Tensão de escoamento do material	$[MPa]; [kgf/cm^2]$
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
aport	Aceleração do pórtico	$[m/s^2]$

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Considerações gerais.....	20
1.2	Objetivo e justificativa da dissertação	22
1.3	Metodologia.....	23
1.4	Estrutura da dissertação.....	23
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
2.1	Introdução	25
2.2	O que são pórticos rolantes.....	26
2.2.1	Classificação e tipos construtivos	28
2.2.1.1	Construção viga dupla.....	28
2.2.1.2	Construção viga simples.....	28
2.2.1.3	Construção tipo semipórtico.....	29
2.2.2	Principais componentes.....	30
2.2.2.1	Viga principal	30
2.2.2.2	Viga de fechamento principal.....	34
2.2.2.3	Pernas	35
2.2.2.4	Vigas de ligação.....	36
2.2.2.5	Truques	38
2.3	Projeto estrutural de pórticos rolantes.....	39
2.3.1	Dados gerais de projeto do equipamento	39
2.3.2	Materiais utilizados e tensões admissíveis	40
2.3.3	Definições dos carregamentos	41
2.3.3.1	Caso 1 – Peso próprio da estrutura e dos seus mecanismos.....	42
2.3.3.2	Caso 2 – Carga de serviço	43

2.3.3.3	Caso 3 – Cargas devidas ao vento em serviço na direção Z	43
2.3.3.4	Caso 4 – Cargas devidas ao vento em serviço na direção X.....	45
2.3.3.5	Caso 5 – Cargas devidas ao vento fora de serviço na direção Z	45
2.3.3.6	Caso 6 – Cargas devidas ao vento fora de serviço na direção X.....	46
2.3.3.7	Caso 7 – Aceleração do pórtico (forças na direção Z).....	46
2.3.4	Combinações de carregamentos	46
2.3.5	Imposição de restrições	48
2.3.6	Análise de tensões	48
2.3.7	Análise de flambagem.....	48
2.3.7.1	Cálculo da tensão de referência de Euler, σ_E	50
2.3.7.2	Cálculo das tensões ideais de flambagem, σ_{fi} e τ_{fi}	51
2.3.7.3	Cálculo da tensão crítica de comparação, σ_{fici}	52
2.3.7.4	Cálculo da tensão reduzida de comparação, σ_{rc}	53
2.3.7.5	Cálculo do coeficiente de segurança à flambagem, γ_f	53
2.4	Modelo de elementos finitos do equipamento (software ANSYS)	54
3	CÁLCULOS ANALÍTICOS DO EQUIPAMENTO (DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EXCEL)	56
3.1	Introdução	56
3.2	Considerações de cálculo	56
3.3	Metodologia.....	57
3.3.1	Módulo de entrada de dados.....	58
3.3.1.1	Planilha “DIMPRINC”	59
3.3.1.2	Planilha “CONSID”	60
3.3.1.3	Planilha “AREA”	61
3.3.1.4	Planilha “VP”.....	62
3.3.1.5	Planilha “PERNAS”	63
3.3.2	Módulo carregamentos.....	63
3.3.2.1	Planilha “CARGAS”	64
3.3.2.2	Planilha “C1”	65
3.3.2.3	Planilha “C2” e “C2D”	66

3.3.2.4	Planilha “C3” e “C3D”	68
3.3.2.5	Planilha “C4” e “C4D”	70
3.3.2.6	Planilha “C5”	72
3.3.2.7	Planilha “C6”	73
3.3.2.8	Planilha “C7”	74
3.3.2.9	Planilha “C8”	75
3.3.2.10	Planilha “C9”	76
3.3.2.11	Planilha “C10”	77
3.3.3	Módulo análise dos resultados.....	77
3.3.4	Planilha “Flamb” – Flambagem nas vigas	81
3.3.5	Planilha “LM” – Lista de massa estimada estrutural.....	82
4	ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	83
4.1	Carregamento combinado 1	85
4.2	Carregamento combinado 2.....	86
4.3	Carregamento combinado 3.....	87
4.4	Carregamento combinado 4.....	88
4.5	Carregamento combinado 5.....	89
4.6	Carregamento combinado 6.....	90
4.7	Carregamento combinado 7.....	91
4.8	Carregamento combinado 8.....	92
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICES		
A	PROCESSO DE CROSS	
A.1	Processo de Cross.....	98
A.1.1	Princípios do processo de Cross	98
A.1.2	Momentos de engastamento perfeito	99
A.1.3	Rigidez das barras e coeficiente de transmissão de momentos	100
A.1.3.1	Barra bi-engastada.....	100
A.1.3.2	Viga engastada rotulada	101
A.1.4	Convenção de sinais.....	102

A.1.5	Coeficientes de distribuição	102
A.2	Processo de Cross para estrutura indeslocáveis.....	105
A.2.1	Processo de Cross para um nó apenas (um grau de liberdade rotação)	105
A.2.2	Processo de Cross para dois ou mais nós	105
A.2.3	Exemplo da aplicação do processo de Cross em pórtico rolante indeslocável	106
A.2.3.1	Pórtico rolante com cargas concentradas no meio da viga principal.....	106
A.2.3.1.1	Geometria	106
A.2.3.1.2	Características principais e carregamento atuante.....	107
A.2.3.1.3	Momentos para engastamento perfeito	107
A.2.3.1.4	Cálculo dos coeficientes de distribuição para cálculo de momentos.....	108
A.2.3.1.5	Cálculo dos momentos internos do pórtico	109
A.2.3.1.6	Diagrama de esforço normal, esforço cortante e momento fletor	113
A.3	Processo de Cross para estrutura deslocáveis.....	114
A.3.1	Processo de Cross para um ou mais nós.....	114
A.3.2	Exemplo da aplicação do processo de Cross em pórtico rolante deslocável	116
A.3.2.1	Pórtico rolante com carga concentrada sobre a perna do pórtico.....	117
A.3.2.1.1	Geometria	117
A.3.2.1.2	Características principais e carregamento atuante.....	118
A.3.2.1.3	Momentos para engastamento perfeito	118
A.3.2.1.4	Cálculo dos coeficientes de distribuição para o cálculo de momentos.....	119
A.3.2.1.5	Cálculo dos momentos internos do pórtico	120
A.3.2.1.6	Cálculo dos esforços devido aos deslocamentos	122
A.3.2.1.7	Cálculo da equação de equilíbrio.....	126
A.3.2.1.8	Esforços solicitantes internos	126
A.3.2.1.9	Diagrama de esforço normal, esforço cortante e momento fletor	129

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentamos uma introdução geral sobre esta dissertação, abrangendo desde a importância do tema de trabalho até a explicação da estrutura desta dissertação, passando por uma abordagem dos elementos estruturais que envolvem este estudo.

1.1 Considerações gerais

Com a crescente utilização do pórtico rolante como elemento de movimentação de equipamentos e cargas, tem-se a necessidade da realização de cálculos estruturais de maneira eficiente, rápida e de baixo custo, com uma margem de erro aceitável em relação a programas comerciais complexos e de alto custo.

A análise estrutural dos componentes do pórtico rolante é realizada geralmente, com o auxílio do programa comercial ANSYS que envolve um conhecimento básico do método dos elementos finitos, dos principais comandos e de custo elevado para a sua aquisição.

O material bibliográfico utilizado na presente dissertação foi resultados de pesquisa realizado em bibliotecas, internet, dissertações e material de aula de faculdades renomadas. A seguir são listados os principais materiais que contribuíram para o desenvolvimento com seus respectivos autores.

NBR 8400 (1984) – Através desta Norma NBR 8400, específica para o cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas, obtemos os valores normalizados de velocidade do vento de serviço e fora de serviço, coeficientes de majoração de cargas, tensões admissíveis de cada caso de carregamento, definições orientativas para dimensionamento classificação das estruturas, etc. Essas definições são necessárias para uma padronização de cálculo entre fornecedores de equipamento foram úteis para a análise das tensões e flambagem atuante na estrutura do pórtico rolante;

Erbiste (1987) – O autor apresenta no capítulo 5 deste livro, as formulações analíticas para o cálculo de estabilidade de placas retangulares sujeito a flexo-compressão e cisalhamento, através de uma seqüência de cálculo de fácil compressão. Posteriormente essa parte teórica é dada um exemplo da aplicação dessas fórmulas;

Pfeil (1982) – O autor apresenta no capítulo 6 deste livro as equações para o cálculo da flambagem elástica de placas retangulares sujeitas a flexo-compressão e cisalhamento, segundo as normas alemãs e posteriormente incorporadas à norma brasileira NB14/68 e posteriormente NBR 8400/1984, inclusive assim como no Erbiste, também faz a análise da tensão quando ocorre caso de flambagem no regime inelástica. Também apresenta exemplos de cálculo de flambagem;

Sobue (2005) – O autor em sua dissertação de mestrado, deixa claro a não existência de ferramentas analíticas disponíveis para o cálculo estrutural de pórtico rolante. O objetivo da sua dissertação foi desenvolver uma ferramenta de cálculo para servir como dados de entrada para o software ANSYS;

Junior (1979) – Neste livro o autor explica todo o desenvolvimento teórico do processo de Cross, ou da distribuição dos momentos, para a resolução das vigas contínuas e dos pórticos formados de barras de alma cheia. Em seu prefácio explica “Procurou-se fazer obra didática, destinada em primeiro lugar aos alunos de nossas escolas de engenharia e arquitetura, mas que possa servir, também, àqueles que, como calculistas, necessitam de diversas tabelas que auxiliem na determinação das grandezas sobre as quais se baseia este notável processo de cálculo de estruturas” e completa: “Em nossa opinião, o processo de Cross é uma das mais valiosas contribuições já apresentadas para o cálculo dos pórticos, segundo os princípios do método clássico de resolução de estruturas hiperestáticas.”

Nesta dissertação procuramos desenvolver uma ferramenta de automatização de cálculo analítico prática e de fácil acesso para o projeto estrutural de pórticos rolantes. Com o apoio da geração seqüencial automática de um memorial de cálculo, o projeto

estrutural desses equipamentos pode ser rapidamente verificado quanto ao limite de escoamento do material, suas propriedades geométricas e suas resistências mecânicas.

Optou-se pela utilização do programa comercial Microsoft Excel (MS-EXCEL), utilizando suas ferramentas e formulações internas.

A validação desta ferramenta proposta de cálculo analítico será efetuada utilizando o programa comercial de elementos finitos ANSYS através da análise de alguns exemplos de pórticos rolantes, para facilitar a compreensão da ferramenta de automatização desenvolvida.

Segundo Sobue (2005), “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*”.

1.2 Objetivo e justificativa da dissertação

Esta dissertação visa à elaboração de uma ferramenta na plataforma Excel, construído de maneira de fácil compreensão e raciocínio que tem como finalidade: agilizar, automatizar os cálculos dos esforços atuantes em modelos de simulação de pórticos pré-estabelecidos.

Através das planilhas do programa Excel é possível se ter uma fácil visualização da geometria dos pórticos, das cargas atuantes, do seu posicionamento, dos gráficos, para cada caso isolado de carregamento e também das combinações de cargas proposto.

O presente estudo também terá a função de auxiliar o projetista no desenvolvimento inicial do dimensionamento das diversas seções do pórtico rolante, como vigas principais, cabeceiras, pernas e vigas de ligações, permitindo que os valores dessas variáveis sejam facilmente modificados através de uma simples troca de células pré-determinadas nas planilhas do Excel.

Desta forma a ferramenta permite realizar um estudo dessas variáveis de maneira isolada ou com vários fatores simultâneos, isso de maneira rápida e sem a necessidade da utilização do programa ANSYS. Outra vantagem refere a uma tabulação dos resultados fornecidos pela ferramenta, com uma análise simples e rápida.

Com a seqüência de operações propostas pela ferramenta poderá o calculista ter as dimensões das peças, peso estimado da estrutura e analisar as tensões atuantes na estrutura dentro de uma tolerância de erro aceitável, mas com a utilização de uma ferramenta de baixo custo e acessível a qualquer usuário de computador e do programa Excel.

1.3 Metodologia

Devido à complexidade da análise estrutural, utilizando-se o software comercial de elementos finitos ANSYS (Ansys Inc.) para a geração de modelos numéricos, utilizamos um programa comercial amplamente difundido que é o Excel (Microsoft Corporation) para o cálculo do equipamento.

Elaborou-se um roteiro de cálculo, com entrada de dados simples em planilhas Excel padronizadas e de saída de resultados tabelados, para os diversos elementos estruturais do pórtico rolante, obtendo assim uma agilização do processo e facilidade da leitura dos resultados obtidos.

A ferramenta irá auxiliar o projetista na definição dos valores das variáveis envolvidas, no processo de carregamento da estrutura do pórtico rolante como: forças exercidas pelo peso próprio, carga de serviço, ação do vento e coeficientes de majoração editada em normas, permitindo assim que os valores dessas variáveis sejam facilmente modificados através “botões” pré-estabelecidos próprios do programa Excel. Desta forma a ferramenta permitirá realizar um estudo dessas variáveis de maneira isolada ou com vários fatores simultâneos.

1.4 Estrutura da dissertação

No capítulo 1 apresenta a introdução à dissertação, uma revisão do estado arte de com um resumo da origem dos diversos cálculos aplicados no desenvolvimento teórico da dissertação.

No capítulo 2 é apresentado um resumo dos fundamentos teóricos do processo de cálculo da estrutura do pórtico rolante com as suas definições e considerações.

No capítulo 3 é mostrada de uma maneira parcial a seqüência de cálculos analíticos que serão desenvolvidos na ferramenta computacional utilizando o software Excel.

No capítulo 4 são mostrados através de tabelas comparativas os resultados obtidos com a utilização do método analítico (software Excel) e o método de elementos finitos (software ANSYS).

No capítulo 5 são mostrados as conclusões e comentários gerais sobre os procedimentos adotados e sugestões para trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

No capítulo 6 são citadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

No apêndice A são mostrado a processo de Cross, que é utilizado no desenvolvimento da ferramenta computacional utilizando o software Excel.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

A finalidade deste capítulo é a familiarização com os aspectos conceituais e construtivos de um equipamento de manuseio e transporte de cargas – pórticos rolantes

Pórticos rolantes são utilizados em sua maioria na movimentação de cargas, em áreas externas ou em galpões fechados, conforme Figura 2.1.



a) Área externa.



b) Ambiente fechado.

Figura 2.1 – Utilização de pórtico rolante.

Estes equipamentos são empregados para movimentar cargas nos sentido vertical e horizontal, em locais predeterminados e em pequenas distâncias. A cada movimento da carga está associado um mecanismo independente, que poderá ser motorizado ou não, dependendo do esforço envolvido ou tempo necessário para a execução do movimento propriamente dito.

As principais utilizações deste equipamento são, por exemplo, em Usinas Hidroelétricas e Eclusas, durante a montagem e manutenção dos equipamentos hidroelétricos, como comportas hidráulicas, grades de proteção e movimentação de peças de grande porte e peso em Instalações Portuárias para a movimentação de cargas e containeres, em Mineradoras e Indústrias em geral. Na Figura 2.2, são mostrado algumas aplicações do pórtico rolante.



a) Transporte de carga geral.



b) Transporte de containeres.

Figura 2.2 – Aplicação de pórtico rolante.

2.2 O que são pórticos rolantes

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 de equipamentos de levantamento e movimentação de carga estão os pórticos rolantes.

Pórticos móveis são estruturas metálicas formadas por vigas que podem ser de perfis laminados ou os tipos mais comuns de chapas formando caixão soldado. Na Figura 2.3 são mostrados estes modelos. São construídos para trabalhar com suas rodas totalmente sobre pistas de rolamento apoiadas normalmente ao nível do piso.



a) Perfil laminado.



b) Vigas em chapas soldadas.

Figura 2.3 – Tipos de perfil utilizado na construção estrutural dos pórticos.

O sistema de movimentação da carga bem como do pórtico pode ser feita manualmente, nos modelos mais simples ou através de motores elétricos acionados através de botoeira pendente móvel, que é interligada ao quadro de comando elétrico do pórtico, através do qual aciona os motores do deslocamento dos ganchos verticalmente e horizontal e o deslocamento do pórtico. Existem os modelos mais completos com cabine fechada, onde o operador tem o total controle do equipamento através de uma mesa de operação. Uma sirene intermitente pode ser instalada ao pórtico para avisar quando o equipamento está em uso.

Na Figura 2.4 são mostrados os tipos de acionamento manual e totalmente elétrico com cabine fechada.



a) Movimentação manual do pórtico com botoeira pendente.



b) Movimentação totalmente elétrica com cabine fechada para o operador.

Figura 2.4 – Tipos de mecanismos de acionamento de pórticos.

Esses equipamentos são projetados para operar normalmente dentro das normas da ABNT – NBR 8400, FEM 1001, CMAA 70 e AISE 6.

2.2.1 Classificação e tipos construtivos

2.2.1.1 Construção viga dupla

Os pórticos rolantes de construção viga dupla são fabricados com duas vigas principais paralelas soldadas do tipo de seção em caixão soldado. As vigas principais são montadas sobre quatro pernas metálicas de construção tipo caixão, apoiadas em duas vigas de ligação inferior (cabeceiras), onde são instaladas as rodas metálicas de movimentação do pórtico, conforme apresentada na Figura 2.5.

O sistema de elevação e movimentação das cargas para pórticos rolantes de viga duplas é feito através do uso de carro guincho também chamado de trolley, conforme mostrado na Figura 2.6.

A principal aplicação deste tipo de pórtico é em locais onde necessita de um máximo de altura útil do gancho da talha e/ou locais que necessitem de grandes dimensões de vão entre centro de rodas.



Figura 2.5 – Pórtico rolante viga dupla.

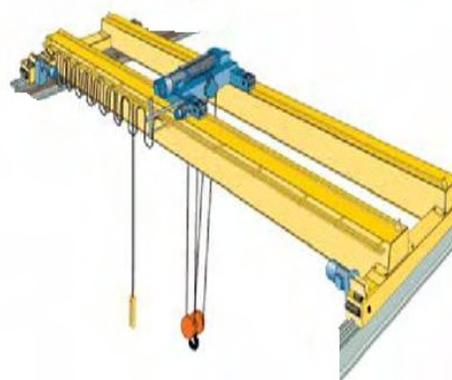


Figura 2.6 – Detalhe do carro da estrutura.

2.2.1.2 Construção viga simples

Os pórticos rolantes de construção viga simples são fabricados em vigas do tipo perfil laminado ou também em tipo de seção em caixão soldado. A viga principal

única é montada sobre quatro pernas metálicas do tipo perfil metálico ou de construção tipo caixão, apoiadas em duas vigas de ligação inferior (cabeceiras), onde são instaladas as rodas de movimentação do pórtico. Dependendo da capacidade de manuseio das cargas essas rodas podem metálicas ou mesmo de borrachas, conforme apresentada na Figura 2.7.

O sistema de elevação e movimentação das cargas para pórticos rolantes de viga simples é feito através do uso de talha elétricas ou manuais, que normalmente são instaladas na base inferior da viga principal.

A principal aplicação deste tipo de pórtico é em locais onde não é necessário o máximo de altura útil do gancho da talha e/ou menores dimensões de vão entre centros de rodas.

Comparando com o tipo de pórtico de construção viga dupla, sua estrutura é mais leve e reduz-se o ganho da altura útil do gancho igual à altura de sua viga. Para ambas as construções as pistas de rolamento podem ser fixas diretamente no piso ou em vigas de concreto por insertos metálicos chumbados no momento de efetuar a concretagem.



Figura 2.7 – Pórtico rolante viga simples.

2.2.1.3 Construção tipo semipórtico

São equipamentos compostos de um misto de ponte rolante e pórtico rolante, ou seja, o equipamento apóia-se em uma de suas extremidades sobre trilhos em estrutura

fixa (ponte rolante) e a outra extremidade sobre rodas no solo (pórtico rolante). Este tipo de construção é mostrado na Figura 2.8.



Figura 2.8 – Semipórtico.

2.2.2 Principais Componentes

Neste item são apresentados os principais componentes de um pórtico rolante, com o objetivo de mostrar a localização e posicionamentos dos esforços atuantes.

2.2.2.1 Viga Principal

Esta viga é mais importante da estrutura do pórtico rolante, pois é nela que está instalada o carro da estrutura e por também receber as maiores solicitações de carga a flexão. O carro é uma estrutura de aço onde são instalados os mecanismos responsáveis pelo levantamento da carga (motores, moitão, gancho, redutores, etc.), conforme apresentada anteriormente na Figura 2.6.

Assim, esta viga recebe diretamente o carregamento da estrutura do carro e também a carga a ser movimentada.

A viga principal em pórticos de dupla viga é composta de 2 vigas estruturais paralelas que são divididas em um trecho central e em balanços, conforme apresentada na Figura 2.9.

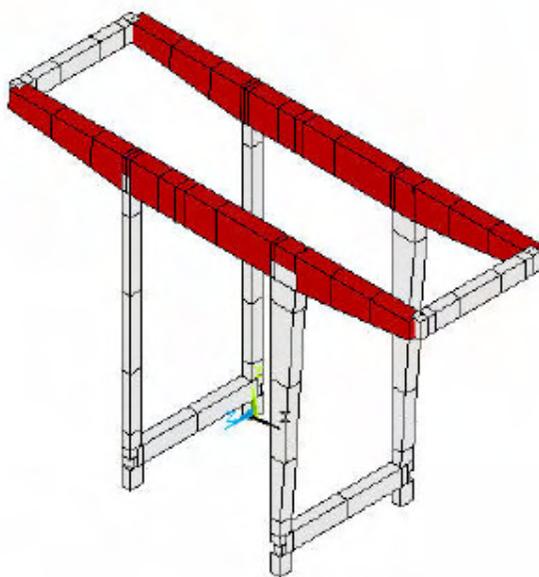


Figura 2.9 – Esquema da localização da viga principal (Sobue, 20050)

Na Figura 2.10 é mostrado em destaque o trecho central da viga principal.

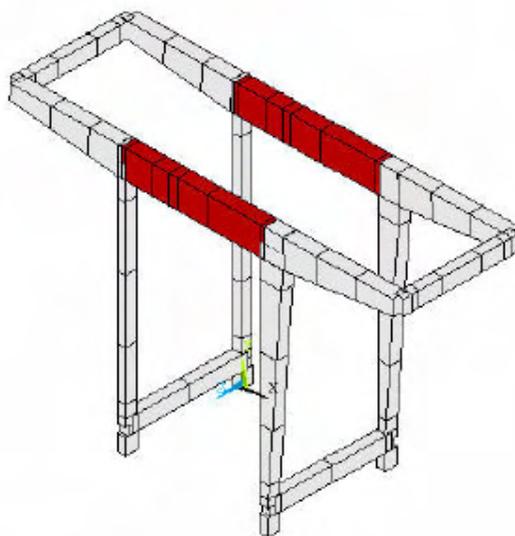


Figura 2.10 – Esquema da localização do trecho central da viga principal.

Na Figura 2.11 mostra o esquema de um pórtico rolante somente com o trecho central da viga principal, sem balanços.

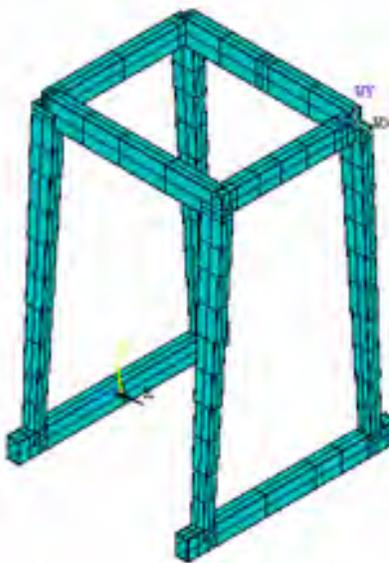


Figura 2.11 – Esquema de um pórtico rolante somente com o trecho central (sem balanços).

Na Figura 2.12 mostra a foto de um pórtico rolante sem os balanços da viga principal.



Figura 2.12 – Pórtico rolante somente com o trecho central.

Na Figura 2.13 mostra o esquema de um pórtico rolante com os balanços da viga principal nas duas extremidades.

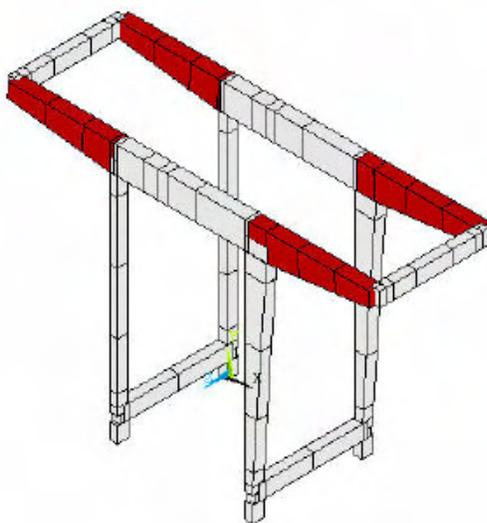
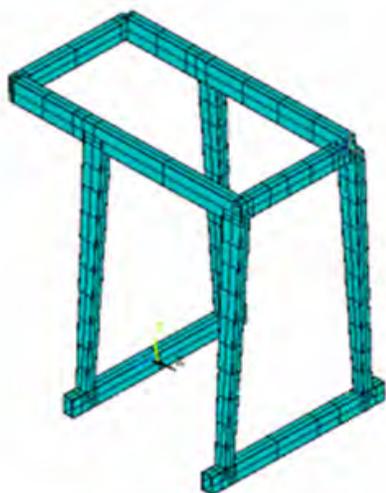
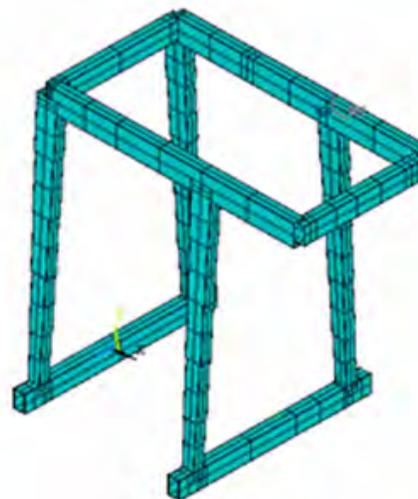


Figura 2.13 – Esquema da localização dos balanços da viga principal.

Na Figura 2.14 mostra o esquema dos possíveis posições dos balanços na viga principal.



a) Balanço lado esquerdo.



b) Balanço lado direito.

Figura 2.14 – Esquema de posicionamento dos balanços da viga principal.

A Figura 2.15 apresenta um pórtico rolante de usina hidroelétrica com balanço apenas em uma extremidade.



Figura 2.15 – Pórtico com balanço apenas de uma extremidade.

2.2.2.2 Viga de Fechamento Principal

As vigas de fechamento, junto com as vigas principais, determinam um quadro na parte superior do pórtico rolante, cuja função é proporcionar rigidez à torção no plano do quadro. Além disso, ele também tem a função de limitar a movimentação do carro na direção longitudinal das Vigas Principais.

A Figura 2.16 apresenta o posicionamento das vigas de fechamento principal, junto às vigas principais do pórtico.

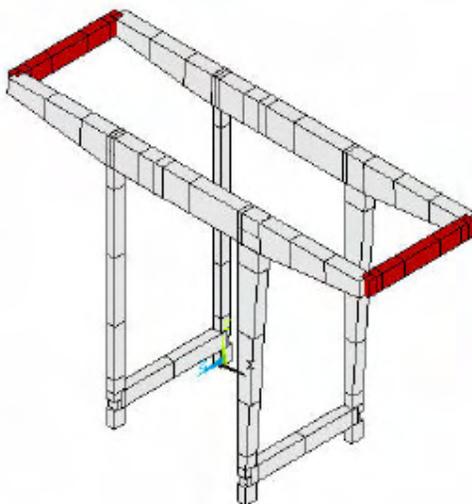


Figura 2.16 – Esquema da localização das vigas de fechamento.

2.2.2.3 Pernas

As Pernas são estruturas em vigas, com seção normalmente de caixão, que apóiam o quadro formado pelas vigas principais e de fechamento da parte superior. Através da altura destas pernas que se determina a altura do pórtico. São em número de quatro, conforme mostrado na Figura 2.17.

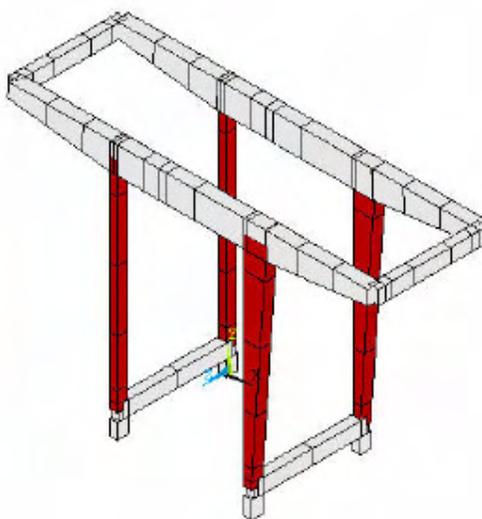


Figura 2.17 – Esquema das pernas do pórtico rolante.

O dimensionamento dessas pernas-vigas é feito à flexão que recebe das vigas principais além das cargas de compressão axial.

É comum adotar-se um par de pernas com articulações e por conseqüência 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 da viga principal as pernas pelas extremidades superiores, é usual a estrutura dessas pernas com um perfil variando de uma seção maior na extremidade superior junto à viga principal para uma seção menor na extremidade inferior (Sobue, 2005). A Figura 2.18 apresenta detalhe da construção geométrica das pernas do pórtico.



Figura 2.18 – Detalhe geométrico da seção da perna do pórtico.

2.2.2.4 Vigas de Ligação

As Vigas de Ligação tem a função de travamento das pernas. Elas se localizam junto à parte inferior das pernas do pórtico. Também são conhecidas como viga cabeceira, quando as rodas são acomodadas em suas extremidades e não diretamente nos terminais das pernas do pórtico. Cada cabeceira recebe dois conjuntos de rodas,

sendo uma livre e outra motriz, acionada por conjunto moto freio reductor. A Figura. 2.19 apresenta a localização desse elemento estrutural do pórtico.

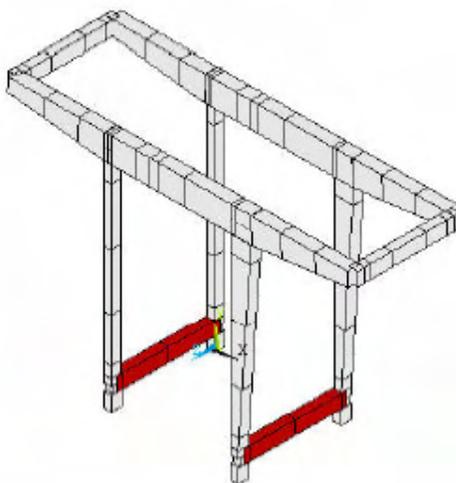


Figura 2.19 – Esquema das vigas de ligação do pórtico.

A Figura 2.20 mostra o esquema dos terminais da perna ligando a viga de ligação, cabeceiras, através de um terminal rotulado. Nesta configuração as rodas se apresentam instaladas nas vigas de ligação.

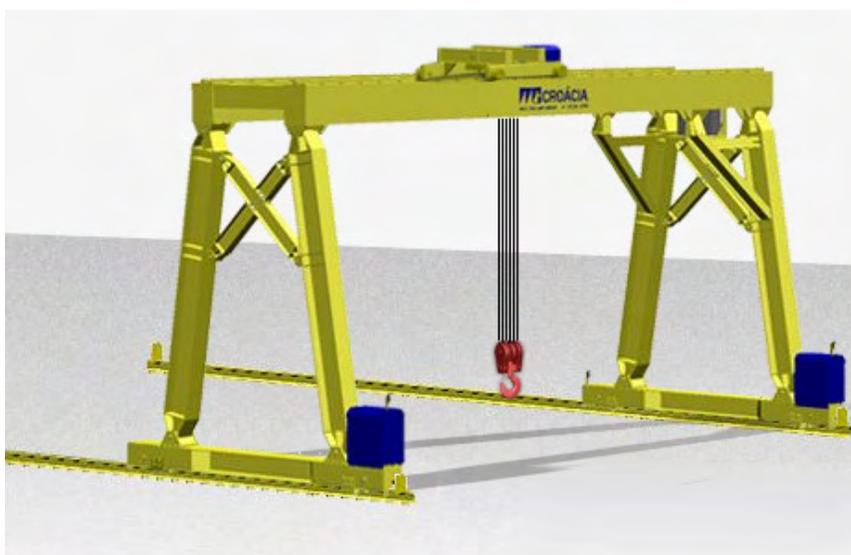


Figura 2.20 – Pórtico com as rodas localizadas nas cabeceiras (viga de ligação).

2.2.2.5 Truques

Os truques são componentes mecânicos formados normalmente por duas rodas em cada peça, com a função de transmissão dos esforços da estrutura através do contato das rodas com os trilhos, que estão apoiado com o solo, conforme Figura 2.21. Nesta dissertação, não foi considerado os truques nos cálculos.

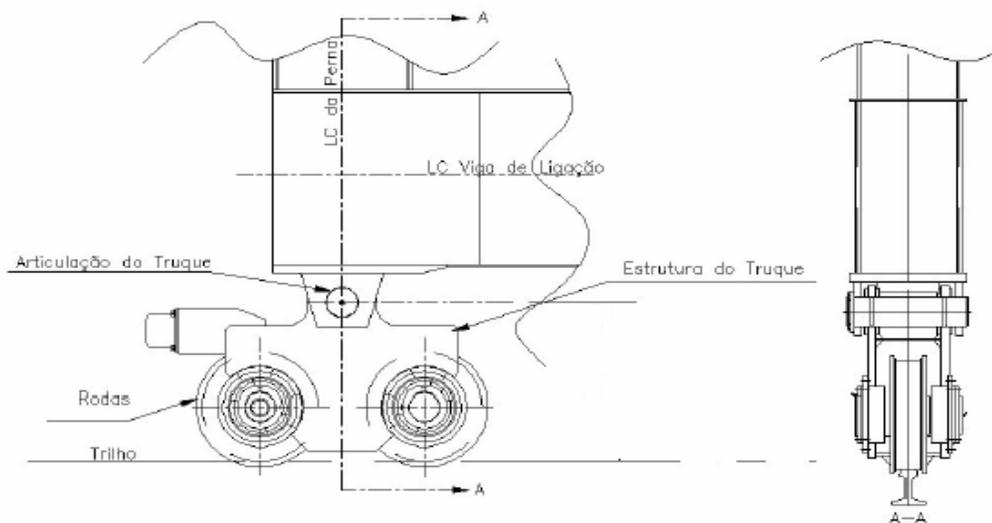


Figura 2.21 – Esquema do truque. (Sobue, 2005)

2.3 Projeto estrutural de pórticos rolantes

2.3.1 Dados gerais de projeto do equipamento

A Tabela 2.1 apresenta os principais dados do equipamento para o seu dimensionamento estrutural analítico:

Carga de serviço	$F_s =$	[kN]
Peso do carro com bloco do gancho e cabo de aço	$P_{cr} =$	[kN]
Peso do bloco do gancho	$F_g =$	[kN]
Peso do cabo de aço	$F_c =$	[kN]
Altura do pórtico	$H =$	[m]
Vento em serviço	$W_s =$	[N/m ²]
Vento fora de serviço	$W_{fs} =$	[N/m ²]
Aceleração do pórtico	$a_{port} =$	[m/s ²]
Aceleração da gravidade	$g =$	[m/s ²]
Vão do pórtico	$L =$	[m]
Vão do carro	$L_{car} =$	[m]
Maior distância entre a linha de centro do gancho até a linha de centro do carro	$L_1 =$	[m]
Aproximação da linha de centro da carga até a linha de centro da perna	$L_2 =$	[m]
Comprimento em balanço a esquerda	$C_{be} =$	[m]
Comprimento em balanço a direita	$C_{bd} =$	[m]
Aproximação no balanço a esquerda	$A_{be} =$	[m]
Aproximação no balanço a direita	$A_{bd} =$	[m]
Aproximação da perna à esquerda	$A_{pe} =$	[m]
Aproximação da perna à direita	$A_{pd} =$	[m]

Nota: As definições dos dados solicitados acima na tabela estão de acordo com a Norma NBR-8400 – mar. 1984 – Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas.

2.3.2 Materiais utilizados e tensões admissíveis

O projeto e dimensionamento dos pórticos rolantes envolvem o conhecimento e conceitos de resistência dos materiais, propriedades dos materiais de construção mecânica, elementos de máquinas, condições de carregamento e normas de construção de equipamentos de elevação de carga.

Os principais materiais aplicados na construção das estruturas das máquinas de levantamento são os aços ASTM A36 e A572 Grau 50. Outros aços podem ser utilizados, devendo atender os requisitos necessários de propriedades mecânicas, soldabilidade, processos de alívio de tensões e outros fatores acordados entre o fabricante e comprador.

As tensões admissíveis para o aço ASTM A36 estão relacionadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Tensões Admissíveis segundo a Norma NBR 8400 – Edição Março 1984 – Tabela 2.

Pórtico	Aço Carbono ASTM A-36					
Flange	Aço Carbono ASTM A-36					
Perfis e chapas	Aço Carbono ASTM A-36					
Material: Pórtico			Aço Carbono ASTM A-36			
Tensão de escoamento	σ_{esc}	2549 [kgf/cm ²]	250,0 [MPa]			
Tensão de ruptura	σ_{rup}	4079 [kgf/cm ²]	400,0 [MPa]			
Tensões admissíveis segundo a			Norma: NBR 8400 Edição Março 1984 Tabela 2			
Elemento Estrutural	Caso I		Caso II		Caso III	
Caso de carga	Serviço Normal sem vento		Serviço Normal com vento		Solicitações Excepcionais	
Unidades	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
tensão de comparação	1700	166,7	1917	188,0	2318	227,3
compressão e compressão na flexão	1700	166,7	1917	188,0	2318	227,3
tração e tração na flexão	1700	166,7	1917	188,0	2318	227,3
tensão de cisalhamento	981	96,2	1107	108,5	1338	131,2
Módulo de Young do aço	E_s 2100000 [kgf/cm ²]		2,06E+05 [MPa]			
Coefficiente de Poisson do aço	μ_a 0,3					
Densidade do material	$\gamma_{aço}$ 7,85E-03 [kgf/cm ³]					

2.3.3 Definições dos Carregamentos

Os carregamentos adotados para o desenvolvimento desta dissertação estão baseados na norma NBR 8400 e estão citados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Tipos de carregamento.	
Casos	Descrição
1	Peso próprio da estrutura e dos seus mecanismos
2	Carga de Serviço
3	Cargas devidas ao vento em serviço na direção Z
4	Cargas devidas ao vento em serviço na direção X
5	Cargas devidas ao vento fora de serviço na direção Z
6	Cargas devidas ao vento fora de serviço na direção X
7	Aceleração do pórtico (forças na direção Z)

Foram consideradas para esta dissertação as seguintes coordenadas direcionais: direção Z, paralela à direção de translação do pórtico (longitudinal do trilho), e direção X, perpendicular à direção de translação do pórtico. Na Figura 2.21, é apresentado este esquema.

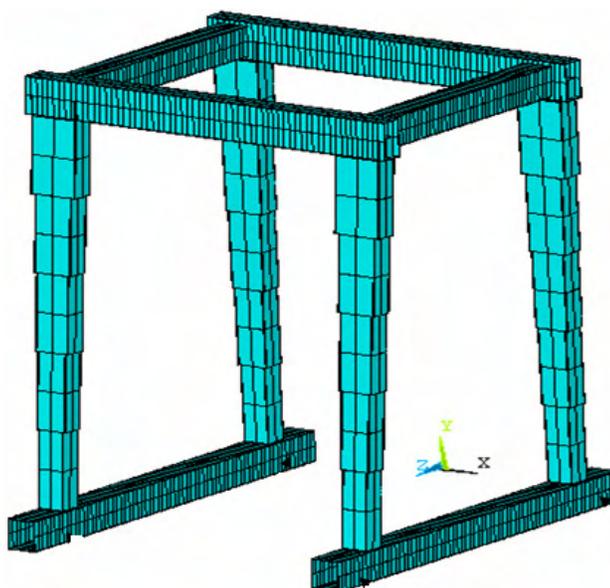


Figura 2.22 – Esquema das direções x, y e z adotadas.

Nesta dissertação foram analisados os resultados obtidos de cada tipo de carregamento atuantes na estrutura independentemente e posteriormente será feita à análise das combinações mais desfavoráveis atuantes na estrutura. Essa combinação será feita de forma de superposição dos efeitos de forma linear e estática.

A seguir serão descritos e apresentados às considerações para cada tipo de caso de carregamento, conforme mostrado no Quadro 2.1.

2.3.3.1 Caso 1 – Peso próprio da estrutura e dos seus mecanismos

A Figura 2.23 mostra o peso próprio da estrutura e seus mecanismos.

↓ ↓	Massa da estrutura da viga principal e viga de ligação superior;
↓ ↓	Massa da estrutura e mecanismos do carro distribuídos em quatro pontos nas vigas principais ;
↓ ↓	Massa do painel elétrica, distribuído em dois pontos em uma viga principal;
↓ ↓	Massa da estrutura das pernas;
↓ ↓	Massa do truque;
↓ ↓	Massa do enrolador de cabos, apoiado em uma perna;

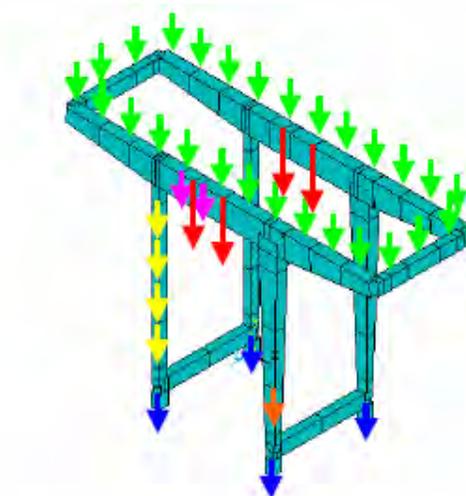


Figura 2.23 – Esquema do peso próprio da estrutura e seus mecanismos.

2.3.3.2 Caso 2 – Carga de Serviço

Segundo a NBR 8400, carga de serviço corresponde carga útil acrescida da carga dos acessórios de içamento (moitão, gancho, caçamba, etc.). Já a carga útil corresponde à carga que é sustentada pelo gancho ou outro elemento de içamento (eletroímã, caçamba, etc.).

2.3.3.2 Caso 3 – Cargas devidas ao vento em serviço na direção Z

Corresponde ao carregamento devido ao vento em serviço na direção de translação do pórtico (longitudinal do trilho).

Segundo a NBR 8400, a ação do vento depende essencialmente da forma do equipamento. Admite-se que o vento possa atuar horizontalmente em todas as direções. Esta ação é traduzida pelos esforços de sobrepressão e de depressão cujos valores são proporcionais à pressão aerodinâmica. A pressão aerodinâmica (Pa) é determinada pela Equação 2.1:

$$Pa = V_w^2 / 1,6 \quad (2.1)$$

Sendo:

Pa = pressão aerodinâmica

V_w = velocidade do vento, em m/s (ver Tabela 7 - Valores da pressão aerodinâmica da NBR 8400)

O esforço devido à ação do vento em uma viga é uma força cujo componente do vento é dado pela Equação 2.2:

$$F_w = C A Pa \quad (2.2)$$

Sendo:

C = coeficiente aerodinâmico que depende da configuração da viga e considera a sobrepressão nas diferentes superfícies (ver Tabela 8 – Valores de coeficiente aerodinâmico da NBR 8400).

A = área projetada da superfície ao vento, em m^2 .

Pa = pressão aerodinâmica em N/m^2 .

A Figura 2.24 mostra o carregamento do vento atuando na estrutura.

	Carga do Vento nas pernas
	Carga do Vento na viga principal
	Carga do Vento na viga principal protegida

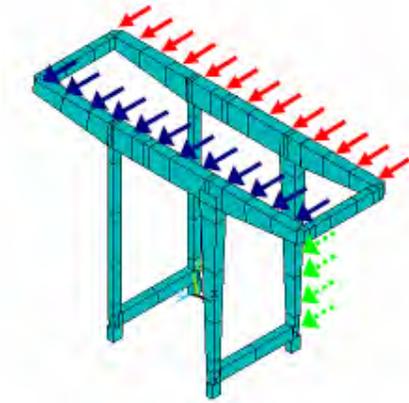


Figura 2.24 – Esquema das cargas devido ao vento na direção Z.

2.3.3.4 Caso 4 – Cargas devidas ao vento em serviço na direção X

Corresponde ao mesmo tipo de carregamento do caso 3, exceto que se apresenta na direção perpendicular à translação do pórtico, na direção X. A Figura 2.25 apresenta este carregamento atuando no pórtico.

	Carga do Vento atuante na viga de fechamento principal
	Carga do Vento atuante na viga de fechamento principal protegida
	Carga do Vento atuante nas pernas
	Carga do Vento atuante nas pernas protegida

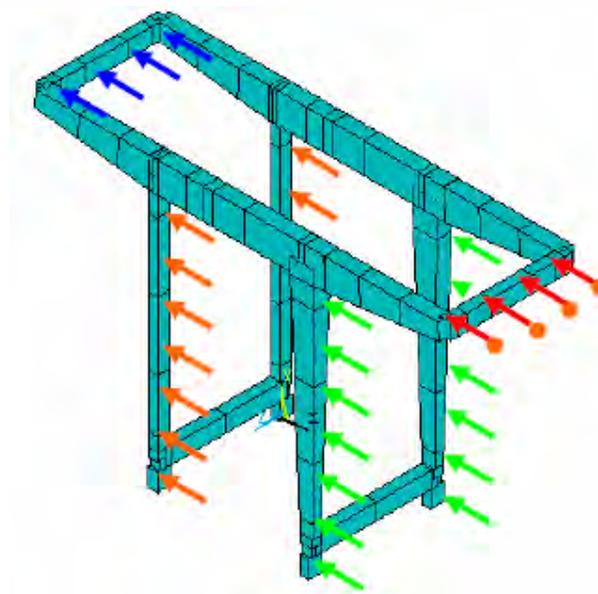


Figura 2.25 – Esquema das cargas devido ao vento na direção X.

2.3.3.5 Caso 5 – Cargas devidas ao vento fora de serviço na direção Z

Corresponde ao mesmo tipo de carregamento do caso 3, exceto os valores do vento a ser considerado para o cálculo do equipamento, que serão os valores fora de serviço.

2.3.3.6 Caso 6 – Cargas devidas ao vento fora de serviço na direção X

Corresponde ao mesmo tipo de carregamento do caso 4, exceto os valores do vento a ser considerado para o cálculo do equipamento, que serão os valores fora de serviço.

2.3.3.7 Caso 7 – Aceleração do pórtico (Forças na direção Z)

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

2.3.4 Combinações de carregamentos

O Quadro 2.2 apresenta segundo a Norma NBR 8400, os três casos de solicitações previstos por norma:

Quadro 2.2 – Casos de solicitações de carregamento	
Caso I	Serviço normal sem vento.
Caso II	Serviço normal com vento limite de serviço.
Caso III	Solicitações excepcionais.

A Tabela 2.3 apresenta as combinações de carregamento.

Carregamentos	1	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	----	----
	3	----	X	----	----	----
	4	----	----	X	----	----
	5	----	----	----	X	----
	6	----	----	----	----	X
	7	X	X	X	----	----
Caso		I	II	II	III	III

Segundo a Norma NBR 8400, para cada caso de solicitação leva-se ainda em conta um coeficiente de majoração (M_x), que depende do grupo no qual está classificado o equipamento, que deve ser aplicado no cálculo das estruturas. Esses fatores estão para o caso de pórtico rolante apresentado na Tabela 2.4.

Carregamentos	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	1,15	1,15	1,15	----	----
	3	----	1,00	----	----	----
	4	----	----	1,00	----	----
	5	----	----	----	1,10	----
	6	----	----	----	----	1,10
	7	2,00	2,00	2,00	----	----
Caso		I	II	II	III	III

Desta maneira temos os casos de combinações de carregamento associados ao coeficiente de majoração (M_x).

2.3.5 Imposição de restrições

Para o cálculo dos pórticos em seus diversos tipos de carregamentos, foram considerados os terminais das pernas em condição de engastado ou rotulado. Na condição de engastado, as pernas do pórtico são soldadas na viga de ligação inferior (cabeceiras) e na condição rotulada as pernas do pórtico são simplesmente apoiada na cabeceira em rótulas de união. No desenvolvimento do programa de cálculo utilizando a Software Excel, é dado esta liberdade de escolha.

2.3.6 Análise de tensões

Segundo a Norma NBR 8400, no item 5.8 – Método de cálculo “Para os três casos de solicitação definidos em 5.6, determinam-se tensões nos diferentes elementos da estrutura e nas junções e verifica-se a existência de um coeficiente de segurança suficiente em relação às tensões críticas, considerando as três seguintes causas de falha possíveis:

- a) Ultrapassagem do limite de escoamento;
- b) Ultrapassagem das cargas críticas de flambagem;
- c) Ultrapassagem do limite de resistência à fadiga “.

e continua,

“...O cálculo das tensões atuantes nos elementos de estrutura é efetuado a partir dos diferentes casos de solicitações previstos em 5.6, aplicando os processos convencionais da resistência dos materiais”.

Nesta dissertação, nosso objetivo é realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos analiticamente através do software Excel e os obtidos através do programa ANSYS.

2.3.7 Análise de flambagem

Para a análise da flambagem atuante na estrutura, em especial nas pernas do pórtico foram adotados os critérios de cálculo de flambagem de placas.

Para esta verificação, a placa é considerada como um retângulo de comprimento $[a]$ e altura $[b]$, suposto livremente apoiado nos quatro lados.

Na Figura 2.26 é apresentado o esquema da placa sujeita a tensão de tração/compressão e cisalhamento.

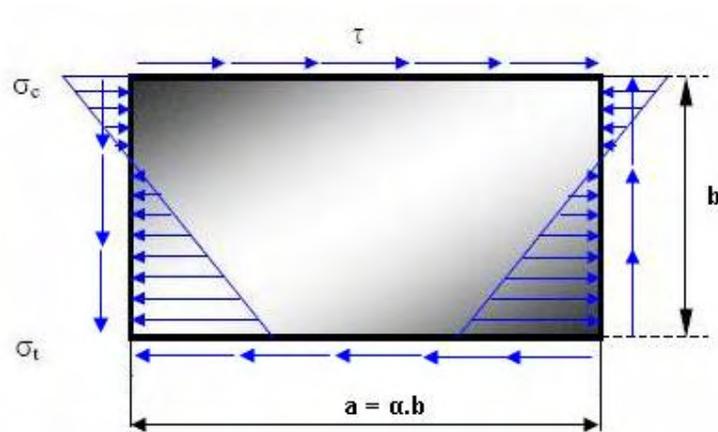


Figura 2.26 – Placa sujeita a tensão de compressão/tração e cisalhamento.

Onde:

σ_c = tensão de compressão atuante na placa;

σ_t = tensão de tração atuante na placa;

τ = tensão de cisalhamento;

a e b = dimensões da placa (comprimento x altura);

α = relação entre o comprimento e a largura.

Nota: Admite-se que a tensão de cisalhamento τ se distribua uniformemente

Na Figura 2.27, é apresentado à região da placa sujeita a flambagem.

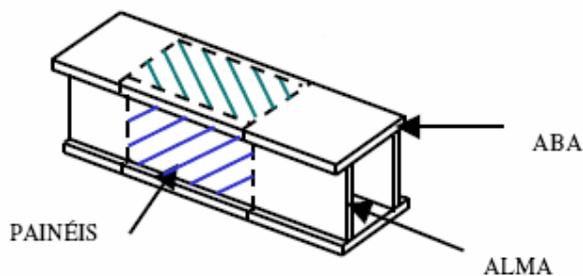


Figura 2.27 – Região da placa (alma) da seção resistente.(Sobue, 2005)

Para a análise das placas nas pernas do pórtico sujeita a flambagem, mostramos a seguir a seqüência de cálculos a serem efetuados.

2.3.7.1 Cálculo da tensão de referência de Euler, σ_E

O cálculo da tensão de referencia de Euler, pode ser calculado pela Equação 2.3.

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot b_i^2 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (2.3)$$

Sendo:

σ_E = tensão de referência de Euler;

E = módulo de elasticidade do aço, ($E = 206000$ MPa);

t = espessura da alma;

b_i = altura do retângulo em estudo;

μ = coeficiente de Poisson ($\mu = 0,3$).

2.3.7.2 Cálculo das tensões ideais de flambagem, σ_{fi} e τ_{fi} ;

Os cálculos das tensões ideais de flambagem podem ser calculados através das Equações 2.4 e 2.5.

$$\sigma_{fi} = k_{\sigma} \sigma_E \quad (2.4)$$

$$\tau_{fi} = k_{\tau} \sigma_E \quad (2.5)$$

Onde:

σ_{fi} = tensão ideal de flambagem de compressão;

τ_{fi} = tensão ideal de flambagem a cisalhamento;

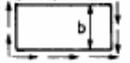
σ_E = tensão de referência de Euler;

k_{σ} e k_{τ} = coeficientes de flambagem dados no Quadro 2.3 – Coeficientes de Flambagem – Norma NBR 8400, em função de solicitação e da relação (α) entre os comprimentos dos lados do retângulo.

$\alpha = a/b$

Quadro 2.3 – Coeficientes de Flambagem – Norma NBR 8400.

Valor dos coeficientes de flambagem K_y e K_z para placas apoiadas sobre as quatro bordas

Nº	Caso	$\alpha = \frac{a}{b}$	K_y ou K_z
1	Compressão simples uniforme 	$\alpha \geq 1$ $\alpha \leq 1$	$K_y = 4$ $K_y = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2$
2	Compressão não-uniforme 	$\alpha \geq 1$ $\alpha \leq 1$	$K_y = \frac{8,4}{\theta + 1,1}$ $K_y = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{2,1}{\theta + 1,1}$
3	Flexão pura: $\theta < -1$ ou Flexão com tração preponderante: $\theta < -1$ 	$\alpha \geq \frac{2}{3}$ $\alpha \leq \frac{2}{3}$	$K_y = 23,9$ $K_y = 15,87 + \frac{1,87}{\alpha^2} + 8,6\alpha^2$
4	Flexão com compressão preponderante: $-1 < \theta < 0$ 		$K_y = (1 + \theta)K' - \theta k' + 10\theta(1 + \theta)$ $K' = \text{valor de } K_y \text{ para } \theta = 0 \text{ do caso nº 2}$ $k' = \text{valor de } K_y \text{ para flexão pura (caso nº 3)}$
5	Cisalhamento puro 	$\alpha \geq 1$ $\alpha \leq 1$	$K_z = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2}$ $K_z = 4 + \frac{5,34}{\alpha^2}$

2.3.7.3 Cálculo da tensão crítica de comparação, σ_{fci}

Com a utilização das Equações (2.6) e (2.7) calcula-se a tensão crítica de comparação (NBR 8400, 1984).

$$\sigma_{fci} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau^2}}{\frac{1 + \psi}{4} \cdot \frac{|\sigma_1|}{\sigma_{fi}} + \sqrt{\left(\frac{3 - \psi}{4} \cdot \frac{|\sigma_1|}{\sigma_{fi}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\sigma_{fi}}\right)^2}} \quad (2.6)$$

$$\Psi = \sigma_2/\sigma_1 \quad (2.7)$$

Onde:

σ_1 = maior tensão de compressão que ocorre no interior do retângulo;

σ_2 = maior tensão de tração que ocorre no interior do retângulo;

τ = maior valor de cisalhamento que ocorre no interior do retângulo;

ψ = relação entre a tensão de tração e compressão;

σ_{fi} = tensão ideal de flambagem de compressão;

τ_{fi} = tensão ideal de flambagem a cisalhamento;

σ_{fici} = tensão crítica de comparação;

2.3.7.4 Cálculo da tensão reduzida de comparação, σ_{rc}

Quando a tensão crítica de comparação (σ_{fici}) resulta maior que o limite de escoamento do aço, tem-se um caso de flambagem inelástica; substitui-se, então, σ_{fici} por uma tensão reduzida de comparação (ou tensão crítica real), σ_{rc} , cujos valores são obtidos multiplicando-se o valor crítico da Equação 2.6 pelo coeficiente ρ indicado na Tabela 47 da NBR 8400/1984, para diferentes valores reduzidos correspondentes (Erbiste, 1987).

Nos casos onde a tensão crítica de comparação (σ_{fici}) for menor que o limite de escoamento, não há redução da tensão crítica de comparação, adotando-se (Erbiste, 1987).

$$\sigma_{rc} = \sigma_{fici} \quad (2.8)$$

2.3.7.5 Cálculo do coeficiente de segurança à flambagem, γ_f ;

A segurança a flambagem da chapa utilizada é calculada pela Equação 2.9 (Erbiste, 1987):

$$\gamma_f = \frac{\sigma_{rc}}{\sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau^2}} \quad (2.9)$$

Não devendo ser menor que os valores mostrados na Tabela 2.5 em função dos tipos de solicitação e dos casos de solicitação;

Tabela 2.5 – Coeficiente de segurança na flambagem localizado. (NBR-8400, 1984)

Tipos de solicitação \ Caso de solicitação		Caso I	Caso II	Caso III
		Flambagem localizada de elementos planos	Painel inteiro ^(A)	$1,71 + 0,180 (\theta - 1)$
Painel parcial ^(B)	$1,50 + 0,075 (\theta - 1)$		$1,35 + 0,050 (\theta - 1)$	$1,25 + 0,025 (\theta - 1)$
Flambagem localizada de elementos curvos		1,70	1,50	1,35

^(A) Considera-se painel inteiro a superfície total da chapa que está sendo verificada, sem levar em conta os enrijecedores.

^(B) Considera-se painel parcial a área de chapa delimitada por enrijecedores.

2.4 Modelo de elementos finitos do equipamento (software ANSYS)

Neste trabalho foram realizadas análises estruturais estáticas de um pórtico rolante de uso corrente na indústria.

A análise da estrutura do pórtico será feita em FEA (Finite Element Analysis) utilizando o programa ANSYS 10.0, aplicando o elemento BEAM189.

O elemento BEAM189 é satisfatório para análise de estruturas com vigas feitas em chapas moderadamente espessas. O elemento é baseado na estrutura em vigas aplicando a teoria de Timoshenko.

Cada seção transversal do elemento possui 9 nós e 4 pontos de integração como mostrado na Figura 189.4 do “Help” interno do ANSYS.

Nas análises os modelos dos pórticos foram desenvolvidos no espaço tridimensional, dentro do regime elástico. Esta situação caracteriza o estado multiaxial de tensões.

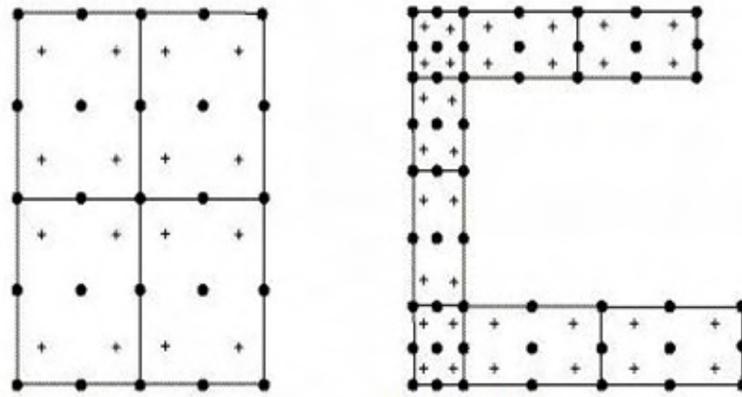


Figura 2.28 – Tipo de elemento utilizado – BEAM189

3 CÁLCULO ANALÍTICO DO EQUIPAMENTO (DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EXCEL)

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da ferramenta computacional com suas planilhas e das rotinas de cálculo de um pórtico rolante, utilizando como plataforma o ambiente Excel.

3.2 Considerações de cálculo

O cálculo analítico do pórtico rolante foi desenvolvido sobre o processo de Cross, por ser um método de boa compreensão e de fácil adaptação ao programa Excel, não necessitando de qualquer técnica especial de resolução, que em outros métodos de cálculo da distribuição de momentos seria necessário.

Como já citado em item anterior, foram analisados os resultados obtidos de cada carregamento atuante na estrutura independentemente e posteriormente foi feito a análise das combinações mais desfavoráveis atuantes na estrutura. Essa combinação é feita através do princípio da superposição que é frequentemente usado para determinar a tensão ou deslocamento em um ponto de um elemento quando estiver sujeito a uma série de carregamentos. Subdividindo o carregamento em componentes, o princípio da superposição afirma que a tensão resultante no ponto pode ser determinada se antes de determinar a tensão causada por cada componente da carga agindo separadamente sobre o elemento. Então, a tensão resultante é determinada pela soma algébrica das contribuições causadas por cada uma das componentes das cargas.

Maiores detalhes da entrada de dados e de limitações da ferramenta serão expostos em notas e observações na própria ferramenta.

3.3 Metodologia

A ferramenta desenvolvida foi dividida em várias planilhas agrupadas em módulos distintos: **entrada de dados** (Figura 3.1 – Esquema de entrada de dados), casos de **carregamentos** (Figura 3.2 – Esquema de carregamentos) e **análise dos resultados** numéricos para diversos tipos de combinações de carregamento (Figura 3.3 – Esquema de análise de resultados). Optou-se por esta divisão devido à possibilidade de se desenvolver as atividades de informações de dados de forma simples e objetiva e com **iteração** (Figura 3.4 – Esquema de iteração), entre eles.

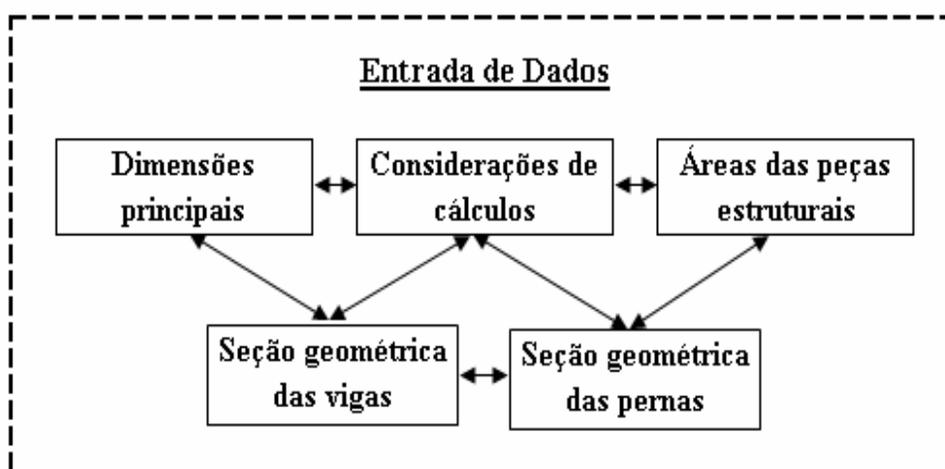


Figura 3.1 – Esquema da entrada de dados.

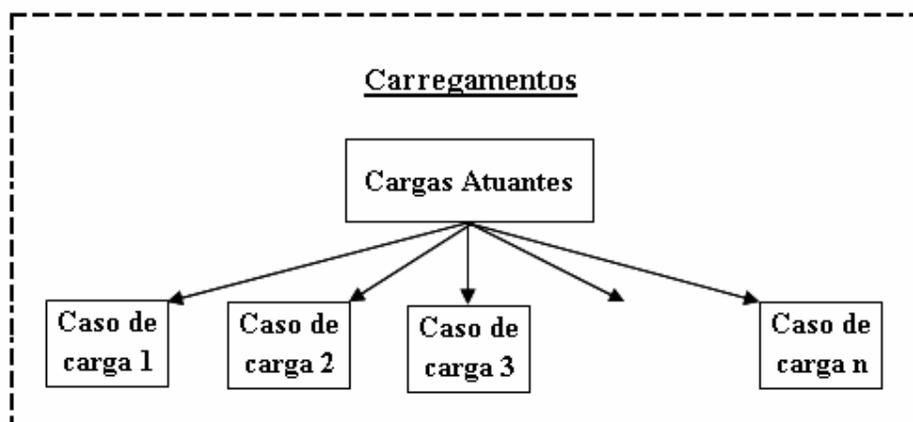


Figura 3.2 – Esquema de carregamentos.



Figura 3.3 – Esquema de análise dos resultados.

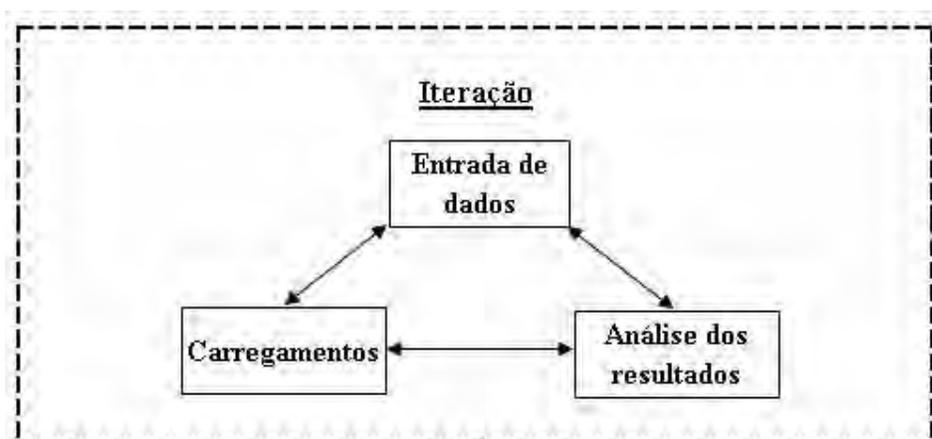


Figura 3.4 – Esquema da interação.

3.3.1 Módulo de entrada de dados

O módulo de entrada aqui denominado consiste de cinco planilhas, onde são digitados os valores dos dados de entrada. Cada planilha tem um formato para o preenchimento dos valores das variáveis ou mesmo alguns espaços já “linkados” com valores tabelados, conforme especificação ou normas.

As planilhas estão assim nomeadas:

3.3.1.1. Planilha “DIMPRINC”

Esta planilha recebe os valores das dimensões principais do pórtico rolante como, por exemplo, altura do pórtico, vão do pórtico, distância entre rodas do carro guincho, comprimento dos balanços, número de seções ao longo das pernas do pórtico, etc.

Nesta planilha também é mostrada ao lado direito um esquema da localização destas variáveis e do lado esquerdo botões predeterminados que levam diretamente as planilhas que se quer ver ou preencher. Na Figura 3.5 estão ilustrados alguns exemplos de variáveis.

Dimensões Principais	
CAPA	Altura do Pórtico [m] H 12,60
NOTAS	Vão do Pórtico [m] L 9,50
DIMPRINC	Distância entre pernas na direção Z [m] Dz 7,00
CONSID	Distância entre rodas do Pórtico [m] Dp 8,20
AREA	Distância longitudinal entre rodas do carro e gancho [m] Drg 0,95
VP	Vão do carro (entre vigas) [m] Lcar 7,00
PERNAS	Distância entre rodas do carro [m] Dc 2,10
CARGAS	Distância entre linha de centro do gancho até a linha de centro do carro [m] L1 1,15
CC	Quantidade de rodas do carro nrc 4
LM	Quantidade de rodas do Pórtico nrp 4
	Aproximação da linha de centro da carga até a linha de centro da perna [m] L2 1,20
	Distância entre a linha de centro do trilho e a linha de centro da viga principal [m] dz 0,194
	Distância entre o topo do trilho e a linha de centro da viga principal [m] dy 0,681
	Comprimento do balanço a esquerda [m] Cbe 5,176
	Comprimento do balanço a direita [m] Cbd 0,375
	Aproximação do balanço a esquerda [m] Abe 0,120
	Aproximação do balanço a direita [m] Abd 0,120
	Aproximação da perna a esquerda [m] Ape 0,120
	Aproximação da perna a direita [m] Apd 0,120
	Número de seções ao longo da perna Ns 8

Figura 3.5 – Esquema da tela da planilha “DIMPRINC”.

3.3.1.2 Planilha “CONSID”

Esta planilha recebe os valores referentes às considerações de cálculos, como cargas atuantes no pórtico rolante, carga de serviço, massa do pórtico estrutural, massa do carro guincho, dos cabos de aço e outros. Também devem ser preenchidos os valores referentes à pressão do vento em serviço, fora de serviço, aceleração do pórtico, o tipo de classificação do equipamento, conforme norma NBR-8400, os coeficientes aerodinâmicos e dinâmicos que serão utilizados nos cálculos, em função também da NBR-8400. Na Figura 3.6 estão ilustrados alguns exemplos desses valores especificados nesta planilha.

	Considerações de Cálculo		Coeficiente aerodinâmico da cabine e diversos Cdiv 1,20	
CAPA	Vento em serviço [kgf/m ²]	Vs 25,49	Coeficiente aerodinâmico do carro Ccar 1,20	
NOTAS	Vento fora de serviço [kgf/m ²]	Vfs 81,58	Coeficiente dinâmico horizontal (CMAA) Sh 7,80	
DIMPRINC	Aceleração do carro [m/s ²]	acar 0,0640	Coeficiente dinâmico vertical Shv 1,15	
CONSID	Aceleração do Pórtico [m/s ²]	aport 0,0780	Coeficiente Mx (grupo de serviço) Mx 1,00	
VP	Aceleração da gravidade [m/s ²]	g 9,80665	Módulo de elasticidade do aço [kgf/cm ²]	E 2.100.000
PERNAS	Fator de ensaio estático [% de Fs]	ft 140	Cargas atuantes	
AREA	Classificação do Equipamento		Carga de Serviço [tf]	Fs 23,45
CARGAS	Norma de projeto	NBR 8400	Peso do Pórtico sem carro (estimado) [tf]	Ppor 20,13
CC	Estado de carga	1	Peso do carro com bloco do gancho e cabo de aço [tf]	Per 10,00
LM	Classe de utilização	A	Peso do bloco do gancho [tf]	Fg 0,65
	Grupo de serviço da estrutura	2	Peso do cabo de aço [tf]	Fc 0,30
	Caso de solicitação	II e III	Peso do trilho do carro - TR-25 [kgf/m]	Ptr 0,31
	Dados Gerais		Terminal da perna esquerda junto ao piso com rótula (S/N)	---
	Coeficiente aerodinâmico da carga	Ceg 1,00	Terminal da perna direita junto ao piso com rótula (S/N)	---
	Coeficiente aerodinâmico viga cabeceira do pórtico	Cvgi 1,50	Material	
	Coeficiente aerodinâmico viga de ligação do pórtico	Cvgs 1,50	ASTMA-36	
	Coeficiente aerodinâmico viga principal do pórtico	Cvgp 1,40		
	Coeficiente aerodinâmico da perna (direção X)	Cpnx 1,60		
	Coeficiente aerodinâmico da perna (direção Z)	Cpnz 1,50		

Figura 3.6 – Esquema da tela da planilha “CONSID”.

3.3.1.3 Planilha “AREA”

Esta planilha recebe os valores referentes a áreas das peças estruturais do pórtico, dimensões de largura das peças contrárias ao sentido do vento, e os coeficientes de redução de área referente a peças estrutural quando uma viga (ou parte de uma viga) é protegida contra o vento pela presença de outra viga. Na Figura 3.7, estão ilustrados alguns exemplos desses valores especificados nesta planilha.

	Áreas expostas ao vento - direção X	Áreas expostas ao vento - direção Z
CAPA	Área do carro [m ²] Acrx 19,60	Área do carro [m ²] Acrz 7,60
NOTAS	Área da carga [m ²] Acgs 17,00	Área da carga [m ²] Acgz 2,30
DIMPRINC	Largura de cada perna [m] Lpnx 0,45	Largura média de cada perna [m] Lpnz 0,816
CONSID	Área de cada perna [m ²] Apnx 5,4113	Área de cada perna [m ²] Apnz 9,81
AREA	Largura da viga de ligação [m] Lvgs 0,613	Largura de cada viga principal [m] Lvgp 1,219
VP	Área da viga de ligação [m ²] Avgs 4,288	Área de cada viga principal [m ²] Avgp 19,38
PERNAS	Largura da viga cabeceira [m] Lvgi 0,569	
CARGAS	Área da viga cabeceira [m ²] Avgi 4,390	
CC		Coefficiente de redução de área
LM		Pernas na direção X ϕpnx 1,00
		Viga de Ligação na direção X ϕvlx 1,00
		Viga Cabeceira na direção X ϕvcx 1,00
		Pernas na direção Z ϕpnz 1,00
		Viga Principal na direção Z ϕvpz 0,90

Figura 3.7 – Esquema da tela da planilha “AREA”.

3.3.1.4 Planilha “VP”

Esta planilha recebe os valores referentes às dimensões das seções geométricas da viga principal, viga de ligação superior e da viga de ligação inferior (cabeceira). Além disso, ela calcula através de fórmulas colocadas as propriedades geométricas da seção como momento de inércia, área, e área resistente à torção. Na Figura 3.8 estão ilustrados alguns exemplos de dimensão das seções.

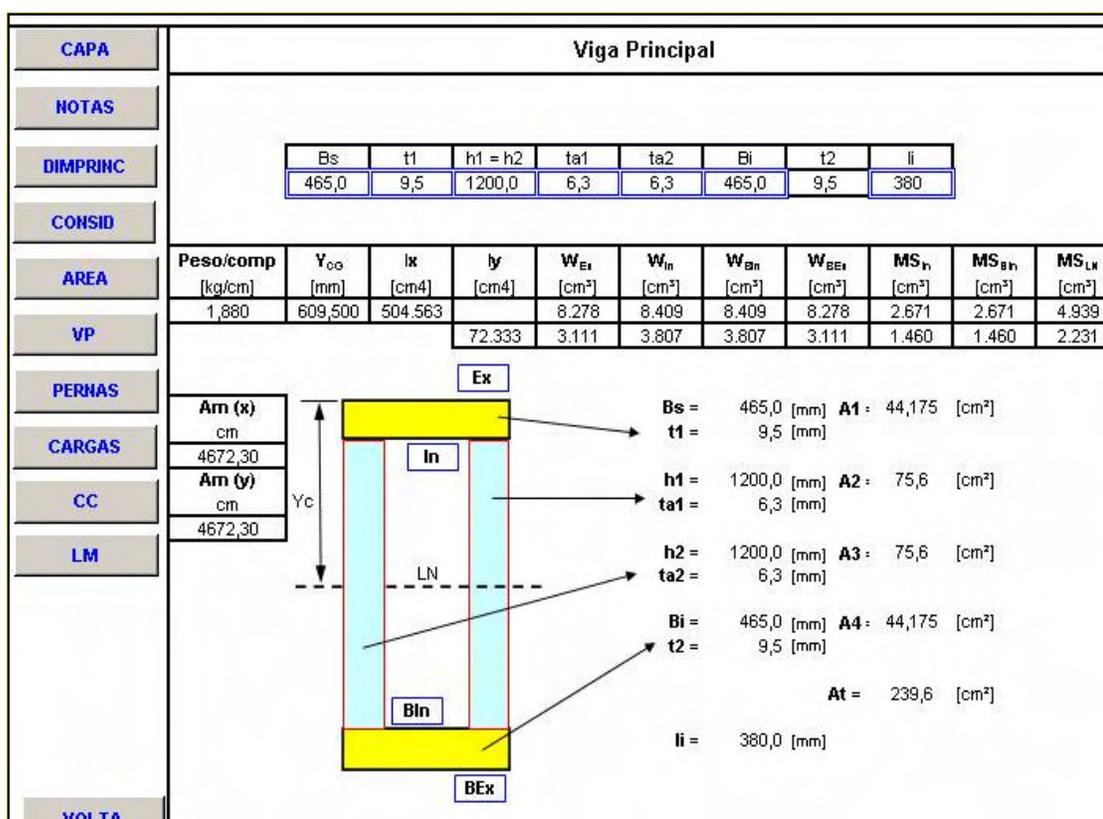


Figura 3.8 – Esquema da tela da planilha “VP”.

3.3.1.5 Planilha “PERNAS”

Esta planilha recebe os valores referentes às dimensões das seções geométricas das pernas. Além disso, ela calcula através de fórmulas implícita as propriedades geométricas da seção como momento de inércia, área, e área resistente à torção. Essa planilha é válida tanto para a perna esquerda como para a direita, apesar de na prática terem o mesmo dimensional. Na Figura 3.9 estão ilustrados alguns exemplos de dimensão das seções.

Perna - Seção 1 - Esquerda do pórtico - Trecho Inferior												
Número de Travamento Interno das Pernas												
8												
	Bs	t1	h1 = h2	ta1	ta2	Bi	t2	li				
	450,0	8,0	400,0	8,0	8,0	450,0	8,0	380,0				
Altura da seção da perna (A11 = A12)	Peso/comp	Y _{co}	I _x	I _y	W _{E1}	W _{In}	W _{B1}	W _{BE1}	MS _h	MS _{Bh}	MS _{Lx}	
inferior	[kg/cm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁴]	[cm ²]							
400,0	1,068	208	38.501		1.851	1.925	1.925	1.851	734	734	1.054	
superior	L.Trecho											
1200,0	cm				36.240	1.611	1.907	1.907	1.611	621	621	1.228

CAPA	Am (x)	cm	1583,04		Bs = 450,0 [mm]	A1 = 36,0 [cm ²]
NOTAS	Am (y)	cm	1583,04		t1 = 8,0 [mm]	
DIMPRINC	Peso do Trecho	[kg]	168,15	h1 = 400,0 [mm]	A2 = 32,0 [cm ²]	
CONSID				ta1 = 8,0 [mm]		
AREA				h2 = 400,0 [mm]	A3 = 32,0 [cm ²]	
VP				ta2 = 8,0 [mm]		
PERNAS				Bi = 450,0 [mm]	A4 = 36,0 [cm ²]	
				t2 = 8,0 [mm]		
					At = 136,0 [cm ²]	
				li = 380,0 [mm]		

Figura 3.9 – Esquema da tela da planilha “PERNAS”.

3.3.2 Módulo carregamentos

O módulo aqui denominado de carregamentos consiste de uma planilha onde são calculados os carregamentos atuantes no pórtico rolante e de dez planilhas auxiliares onde são analisados os carregamentos anteriormente calculados em diversas formas de

posicionamento no pórtico rolante. Seus preenchimentos são automáticos em função dos valores preenchido das células anteriormente no módulo de entrada.

As planilhas estão assim nomeadas:

3.3.2.1 Planilha “CARGAS”

Esta planilha calcula automaticamente em função dos valores de entrada de dados e das fórmulas aplicadas, tendo como base a norma NBR-8400, os esforços atuantes no pórtico rolante para cada condição de carregamento imposta. Na Figura 3.10 estão ilustrados alguns exemplos dos cálculos aplicados.

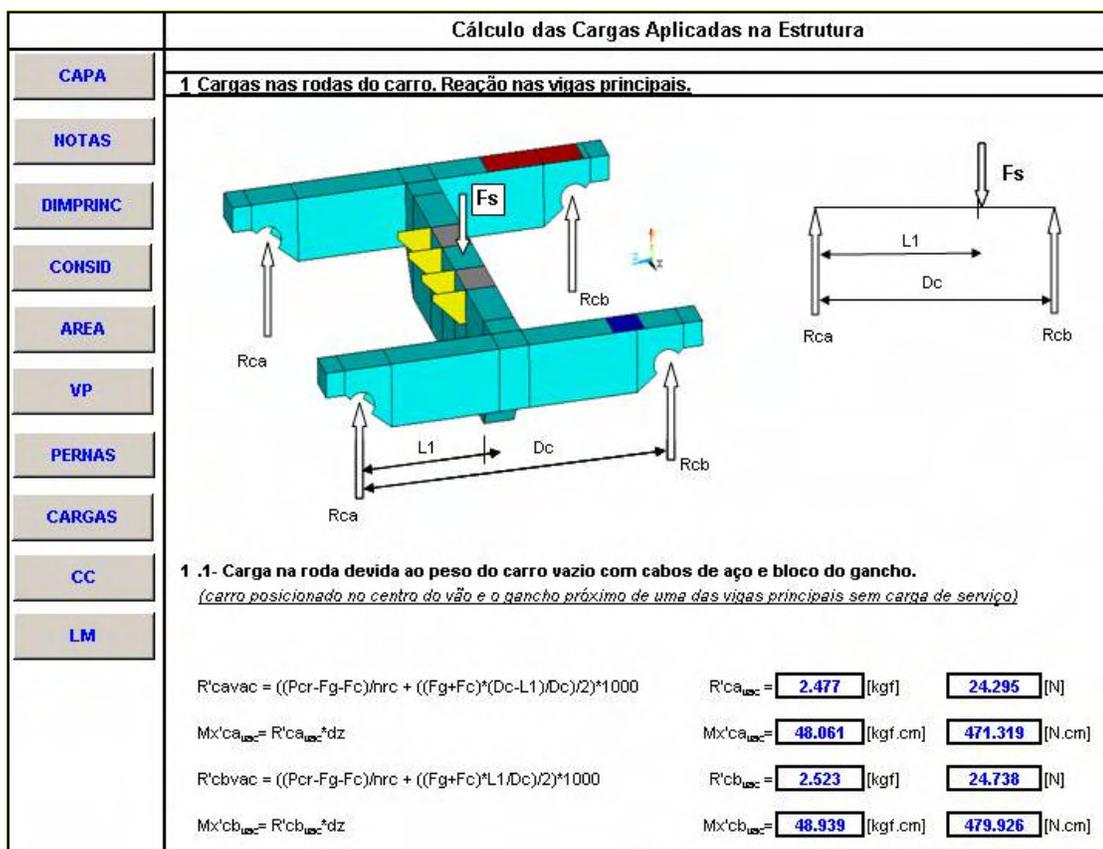


Figura 3.10 – Esquema da tela da planilha “CARGAS”.

3.3.2 Planilha “C1”

Nesta planilha o carregamento atuante é devido ao peso próprio da estrutura. São forças verticais resultante da massa da viga principal, massa das pernas e metade da massa das vigas de ligação superior. No caso da perna foi considerado um valor médio de massa em função da variação de seção existente ao longo da altura do pórtico. A Figura 3.11 mostra as cargas e o seu posicionamento referente este caso.

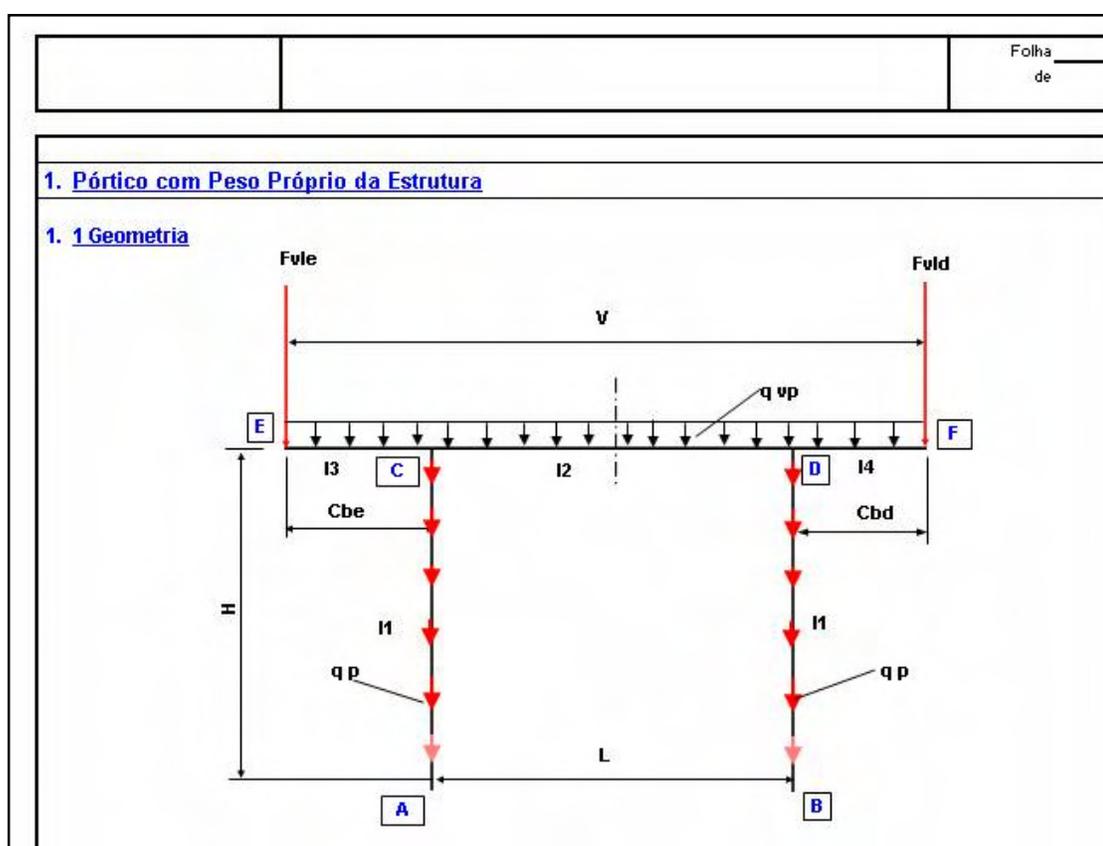


Figura 3.11 – Esquema da tela da planilha “C1”.

3.3.2.3 Planilha “C2” e “C2D”

Neste caso o carregamento vertical considerado se refere à carga principal atuante juntamente com a massa do carro guincho do pórtico. O posicionamento destas cargas se encontra na extremidade do balanço a esquerda do pórtico rolante, no caso da planilha C2 e na extremidade do balanço a direita do pórtico rolante, no caso da planilha C2D. As Figuras 3.12, e 3.13, mostram as cargas e os seus posicionamentos referentes estes casos.

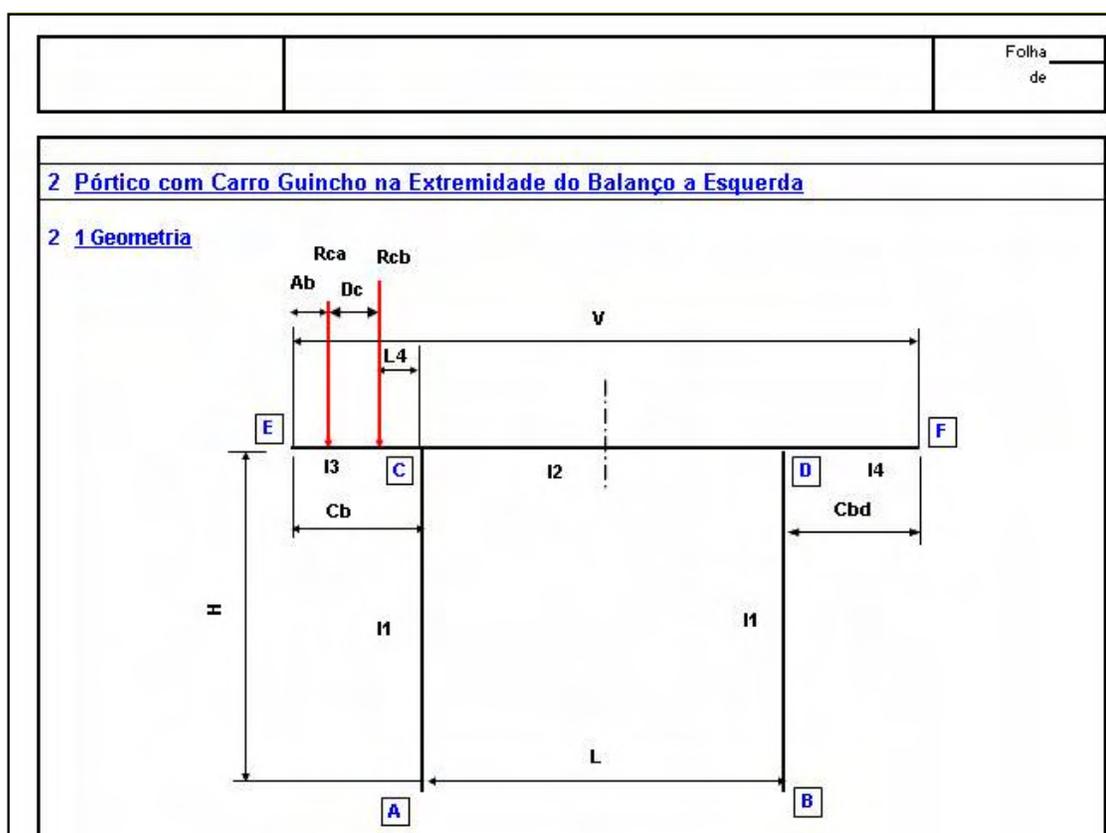


Figura 3.12 – Esquema da tela da planilha “C2”.

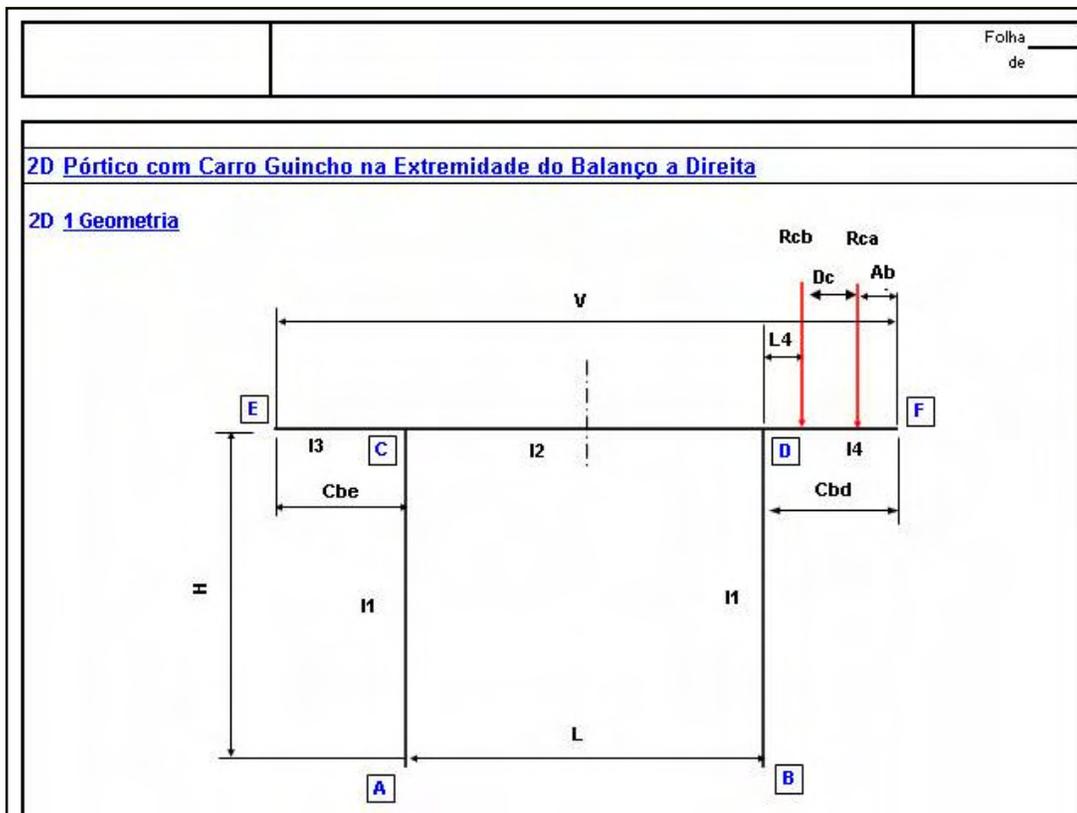


Figura 3.13 – Esquema da tela da planilha “C2D”.

3.3.2.4 Planilha “C3” e “C3D”

Neste caso o carregamento vertical considerado se refere à carga principal atuante juntamente com a massa do carro guincho do pórtico. O posicionamento destas cargas se encontra com uma das rodas em cima da perna do pórtico à esquerda, no caso da planilha C3 e sobre a perna da direita do pórtico no caso da planilha C3D.. As Figuras 3.14 e 3.15 mostram as cargas e os seus posicionamentos referentes estes casos.

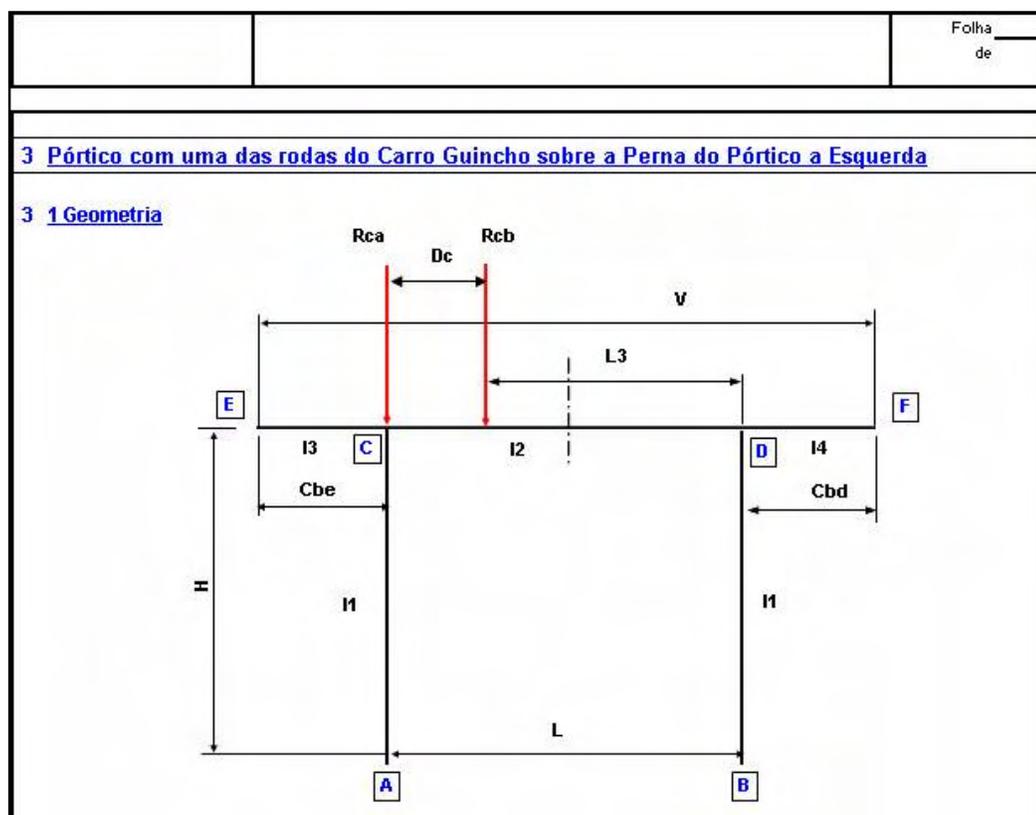


Figura 3.14 – Esquema da tela da planilha “C3”.

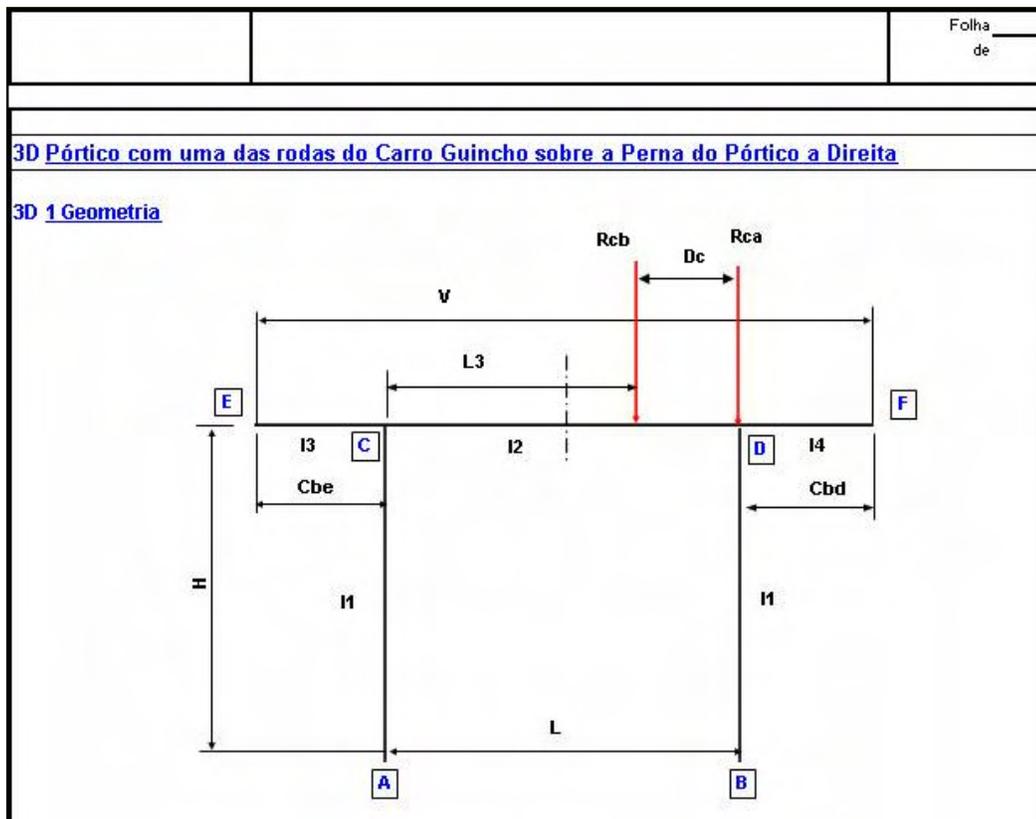


Figura 3.15 – Esquema da tela da planilha “C3D”.

3.3.2.5 Planilha “C4” e “C4D”

Neste caso o carregamento vertical considerado se refere à carga principal atuante juntamente com a massa do carro guincho do pórtico. O posicionamento destas cargas se encontra com uma das rodas próximo da perna do pórtico à esquerda, no caso da planilha C4 e com as rodas próximas da perna do pórtico rolante a direita no caso da planilha C4D. As Figuras 3.16, e Figura 3.17, mostram as cargas e os seus posicionamentos referentes estes casos.

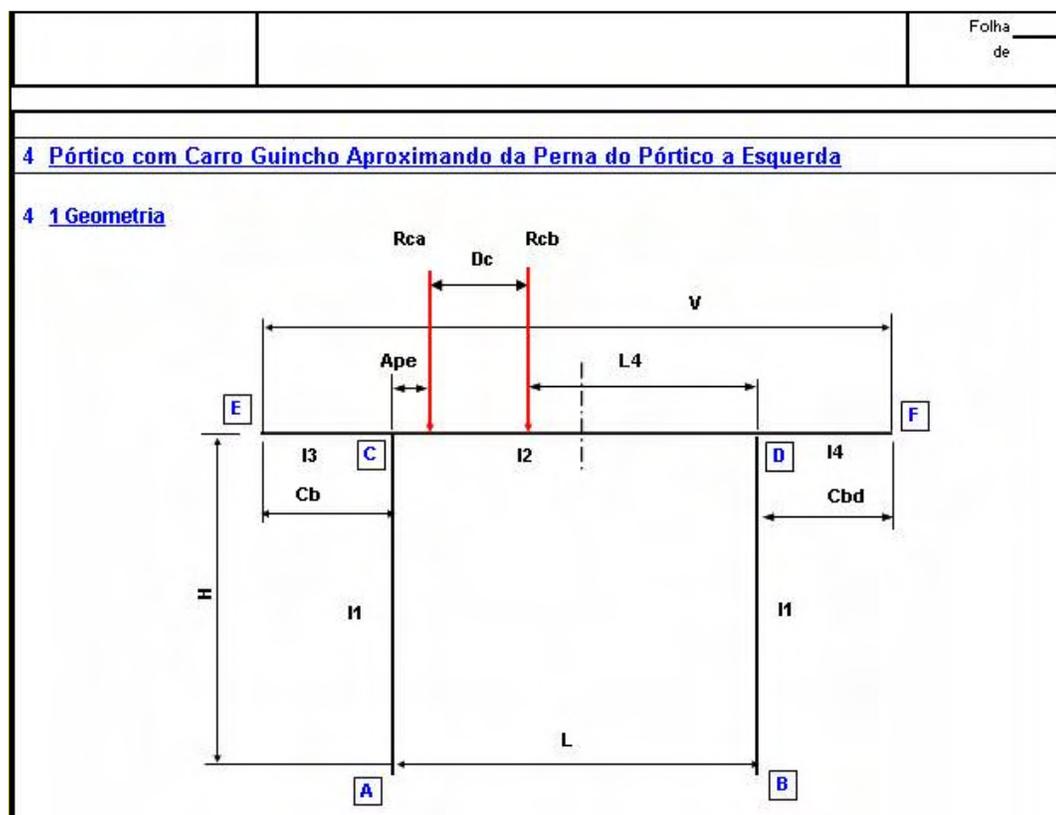


Figura 3.16 – Esquema da tela da planilha “C4”.

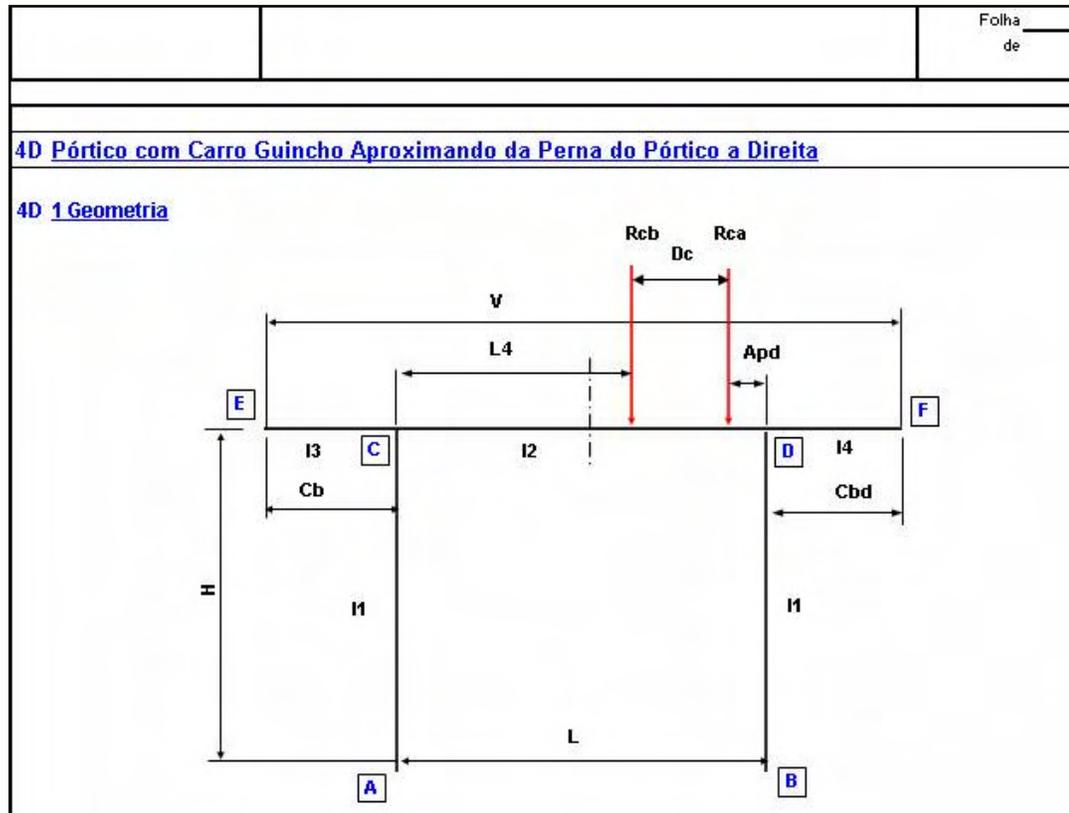


Figura 3.17 – Esquema da tela da planilha “C4D”.

3.3.2.6 Planilha “C5”

Neste caso o carregamento vertical considerado se refere à carga principal atuante juntamente com a massa do carro guincho do pórtico. O posicionamento destas cargas se encontra com o carro guincho do pórtico posicionado no centro do trecho central da viga principal. A Figura 3.18 mostra as cargas e o seu posicionamento referente este caso.

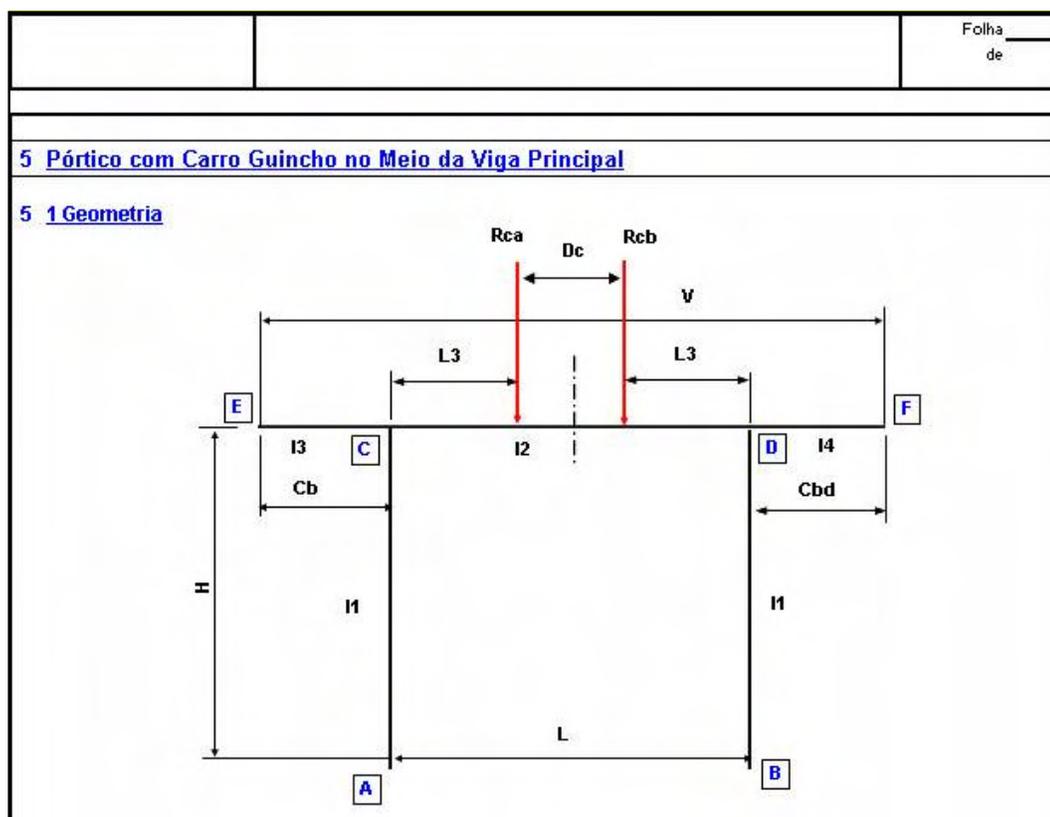


Figura 3.18 – Esquema da tela da planilha “C5”.

3.3.2.7 Planilha “C6”

Neste caso o carregamento atuante é devido ao vento de serviço na direção lateral do pórtico. Os cálculos dos esforços atuantes segundo a norma NBR-8400, foram descritos anteriormente nos item 2.3.3.2 e item 2.3.3.4 desta dissertação referente à direção Z e direção X, respectivamente. Todos os valores necessários para o cálculo das forças de vento Q_s são fornecidos no módulo de entrada de dados. Como exemplo tem as áreas das pernas e as reações das vigas de ligações atuando na viga principal R vvl. A Figura 3.19 mostra as cargas e os seus posicionamentos referentes este caso.

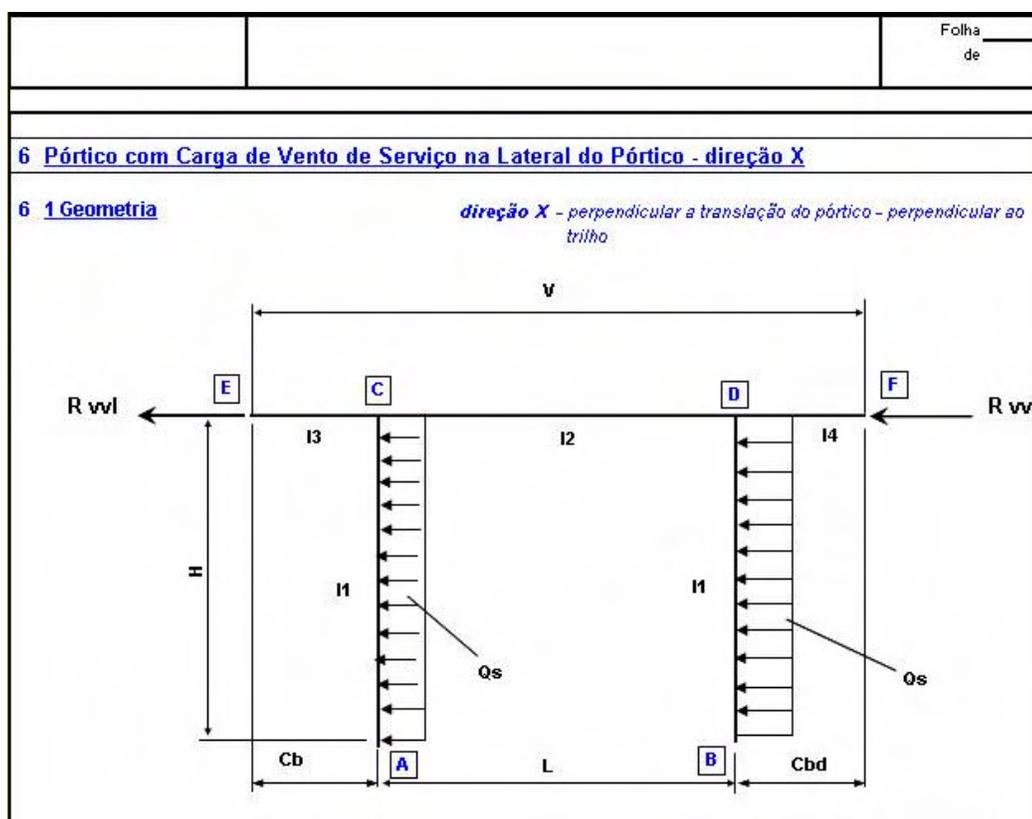


Figura 3.19 – Esquema da tela da planilha “C6”.

3.3.2.8 Planilha “C7”

Esta planilha é levada em contas às mesmas considerações da planilha C6, exceto que a carga atuante do vento se refere ao vento do tipo fora de serviço. A Figura 3.20 mostra as cargas e os seus posicionamentos referentes este caso.

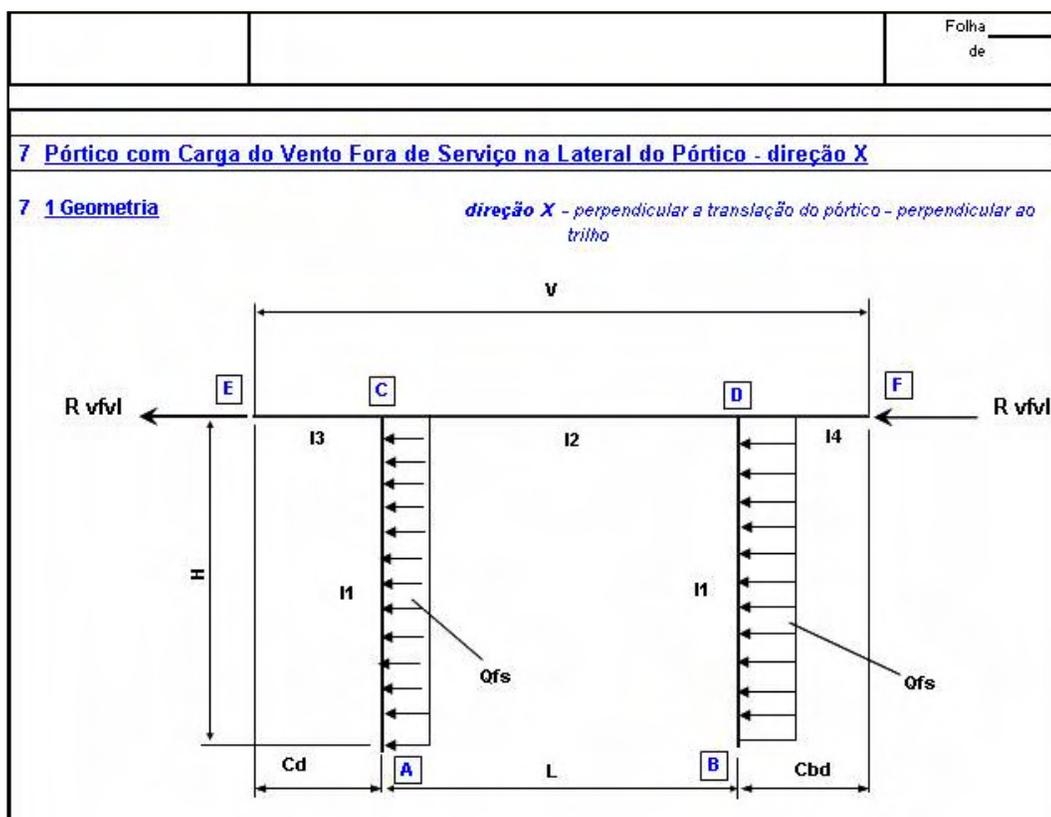


Figura 3.20 – Esquema da tela da planilha “C7”.

3.3.2.9 Planilha “C8”

Neste caso o carregamento atuante é devido ao vento de serviço na direção do vão do pórtico. Os cálculos dos esforços atuantes segundo a norma NBR-8400, foram descritos anteriormente nos item 2.3.3.2 e item 2.3.3.4 desta dissertação referente à direção Z e direção X, respectivamente. Todos os valores necessários para o cálculo das forças de vento Q_s são fornecidos no módulo de entrada de dados. Como exemplo tem as áreas da viga principal e das pernas do pórtico. Neste item é considerado um valor médio de área para as pernas, devido à variação de seção delas. A Figura 3.21, mostra as cargas e o seu posicionamento referente este caso.

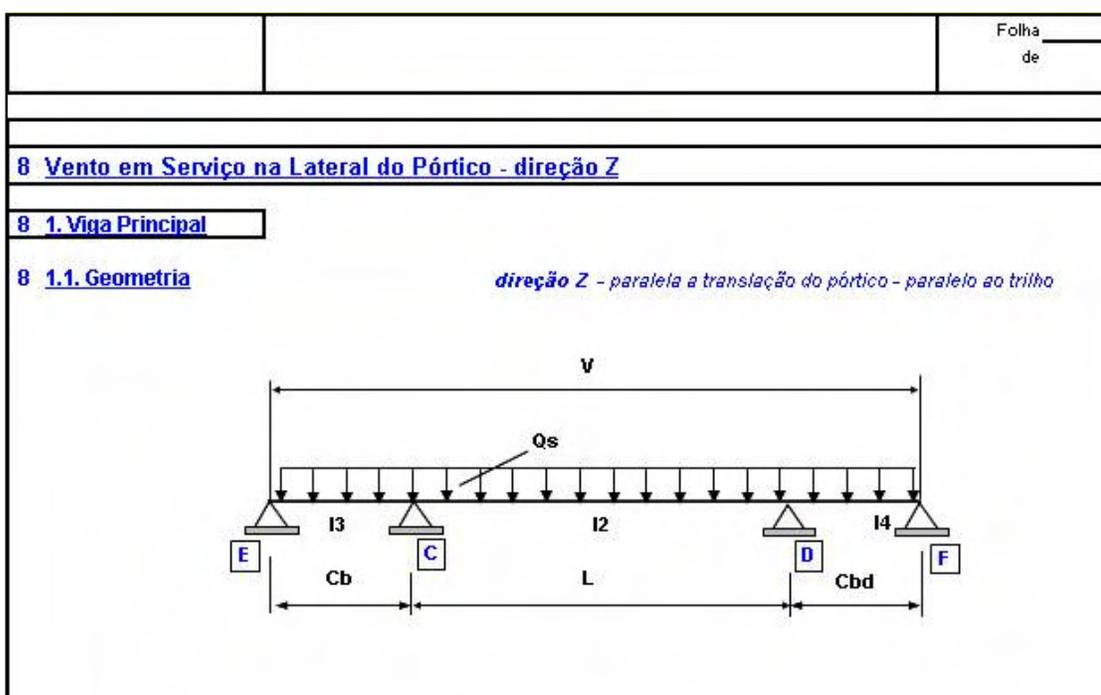


Figura 3.21 – Esquema da tela da planilha “C8”.

3.3.2.10 Planilha “C9”

Esta planilha é levada em contas às mesmas considerações da planilha C8, exceto que a carga atuante do vento se refere ao vento do tipo fora de serviço. A Figura 3.22 mostra as cargas e o posicionamento referente este caso.

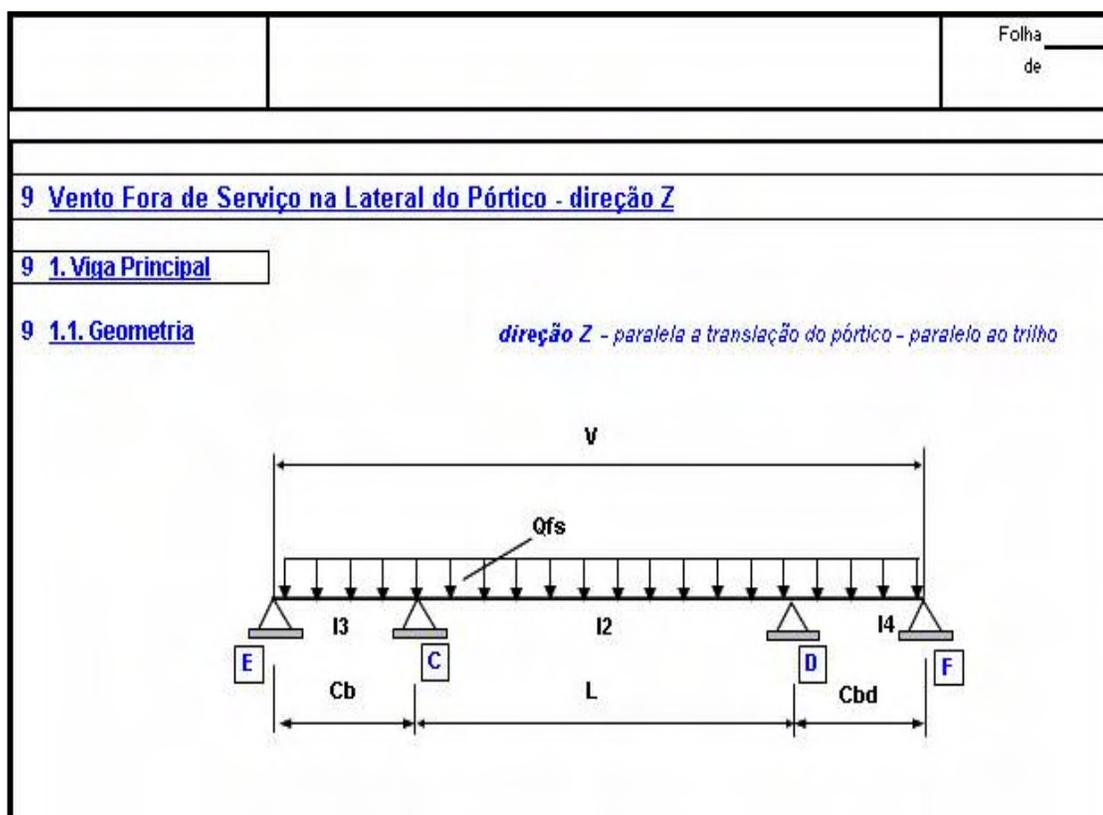


Figura 3.22 – Esquema da tela da planilha “C9”.

3.3.2.11 Planilha “C10”

Esta planilha refere-se às forças estáticas que são equivalentes às forças dinâmicas devido à inércia quando há aceleração do pórtico. Segundo a norma NBR-8400 a ação destas forças sobre a estrutura obtém-se pela aplicação dos procedimentos comuns de cálculo de força a partir das massas da estrutura/componentes e da aceleração lateral do pórtico. A Figura 3.23 mostra as cargas e os seus posicionamentos referentes este caso.

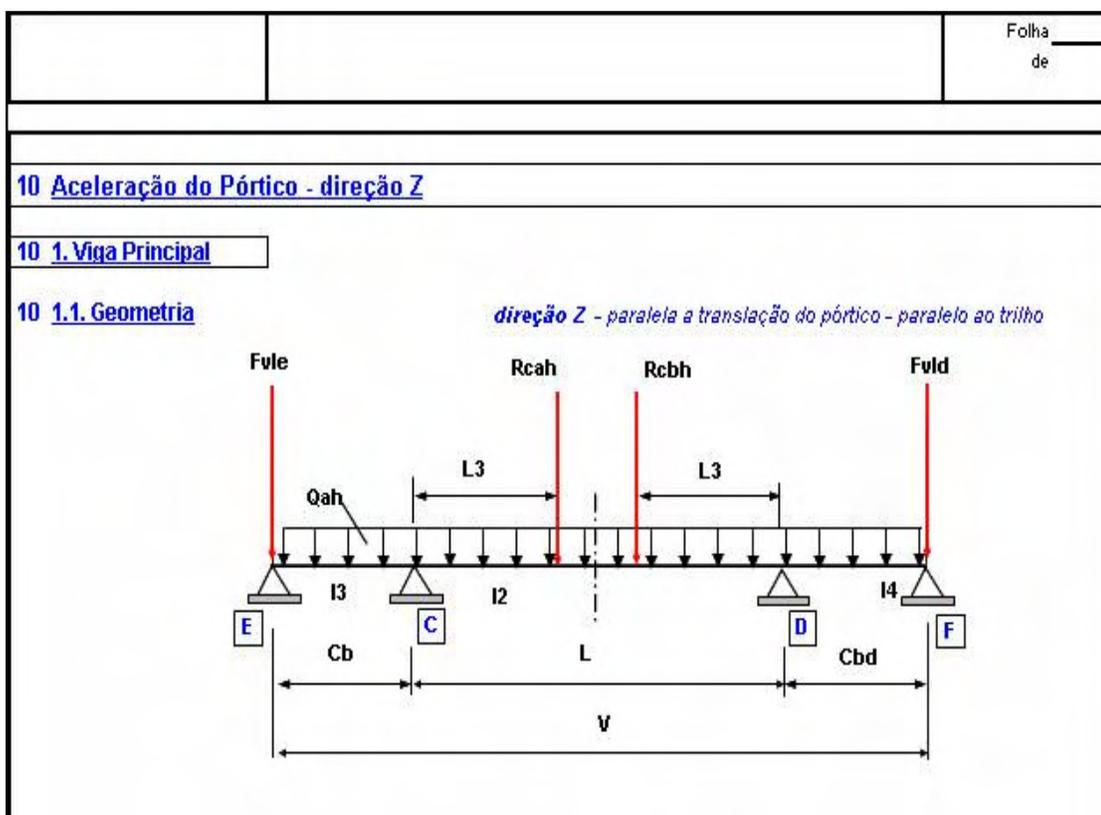


Figura 3.23 – Esquema da tela da planilha “C10”.

3.3.3 Módulo análise dos resultados

O módulo análise dos resultados se faz através da planilha denominada de “CC”, onde através de botões predeterminados de escolha, se determina o tipo de carregamento e o posicionamento da carga ao longo da viga principal que se quer analisar. É mostrado as tensões atuantes na direção x, y e z, conforme solicitado e a combinações entre eles quando aplicável.

As Figuras 3.24, 3.25 e 3.26 ilustram um exemplo de valores obtidos.

Tipos de Carregamentos		Análise de Tensões e Deformações	
CAPA	Peso estrutura / Carga atuante	a) Tensões na direção X	
NOTAS	Peso próprio da estrutura + carga atuante	a.1) Viga principal	
DIMPRINC	Posicionamento do carro na viga principal	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$ 334 [kgf/cm ²] 32,7 [MPa]
CONSID	Ação do Vento	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$ -341 [kgf/cm ²] -33,4 [MPa]
AREA	Movimentação	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$ 82 [kgf/cm ²] 8,1 [MPa]
VP	Carga Estática	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 341 [kgf/cm ²] 33,4 [MPa]
PERNAS		b) Tensões na direção Y	
CARGAS		b.1) Perna Esquerda	
CC		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$ 97 [kgf/cm ²] 9,5 [MPa]
LM		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$ -303 [kgf/cm ²] -29,8 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$ 15 [kgf/cm ²] 1,4 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 303 [kgf/cm ²] 29,8 [MPa]
		b.2) Perna Direita	
		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$ 97 [kgf/cm ²] 9,5 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$ -279 [kgf/cm ²] -27,4 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$ 15 [kgf/cm ²] 1,4 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 279 [kgf/cm ²] 27,4 [MPa]

Figura 3.24 – Esquema da tela da planilha “CC” – direção x e y.

Tipos de Carregamentos		Análise de Tensões e Deformações	
CAPA	Peso estrutura / Carga atuante	a) Tensões Unidirecionais - direção Z	
NOTAS	Peso próprio da estrutura + carga atuante	a.1) Viga principal	
DIMPRINC	Posicionamento do carro na viga principal	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$ 11 [kgf/cm ²] 1,1 [MPa]
CONSID	Ação do Vento	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$ -11 [kgf/cm ²] -1,1 [MPa]
AREA	Movimentação	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$ 15 [kgf/cm ²] 1,5 [MPa]
VP	Carga Estática	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 26 [kgf/cm ²] 2,6 [MPa]
PERNAS		b) Tensões na direção Y	
CARGAS		b.1) Perna Esquerda	
CC		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$ 435 [kgf/cm ²] 42,6 [MPa]
LM		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$ -435 [kgf/cm ²] -42,6 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$ 16 [kgf/cm ²] 1,6 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 435 [kgf/cm ²] 42,6 [MPa]
		b.2) Perna Direita	
		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$ 435 [kgf/cm ²] 42,6 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$ -435 [kgf/cm ²] -42,6 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$ 16 [kgf/cm ²] 1,6 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 435 [kgf/cm ²] 42,6 [MPa]

Figura 3.25 – Esquema da tela da planilha “CC” – direção z e y.

Tipos de Carregamentos		Análise de Tensões e Deformações	
CAPA	Peso estrutura / Carga atuante	<u>a) Tensões Combinadas - direção XZ</u>	
NOTAS	Peso próprio da estrutura + carga atuante	a.1) Viga principal	
DIMPRINC	Posicionamento do carro na viga principal	Tensão máxima	$\sigma_{t\text{máx}}$ 339 [kgf/cm ²] 33,2 [MPa]
CONSID	Ação do Vento	Tensão mínima	$\sigma_{c\text{máx}}$ -346 [kgf/cm ²] -33,9 [MPa]
AREA	Movimentação	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{\text{máx}}$ 82 [kgf/cm ²] 8,1 [MPa]
VP	Carga Estática	Tensão combinada máxima	$\sigma_{\text{omb máx}}$ 346 [kgf/cm ²] 33,9 [MPa]
PERNAS		<u>b) Tensões na direção YZ</u>	
CARGAS		b.1) Perna Esquerda	
CC		Tensão máxima	$\sigma_{t\text{máx}}$ 532 [kgf/cm ²] 52,2 [MPa]
LM		Tensão mínima	$\sigma_{c\text{máx}}$ -738 [kgf/cm ²] -72,4 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{\text{máx}}$ 19 [kgf/cm ²] 1,9 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{\text{omb máx}}$ 738 [kgf/cm ²] 72,4 [MPa]
		b.2) Perna Direita	
		Tensão máxima	$\sigma_{t\text{máx}}$ 532 [kgf/cm ²] 52,1 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{c\text{máx}}$ -714 [kgf/cm ²] -70,0 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{\text{máx}}$ 19 [kgf/cm ²] 1,9 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{\text{omb máx}}$ 714 [kgf/cm ²] 70,0 [MPa]

Figura 3.26 – Esquema da tela da planilha “CC” – combinadas.

3.3.4 Planilha “Flamb” – Flambagem nas vigas

Nesta planilha é mostrado os resultados referente à flambagem nas vigas e pernas do pórtico. A Figura 3.27, ilustra este caso.

FLAMBAGEM DOS PAINÉIS DAS VIGAS			
1 - Verificação da flambagem - Viga Principal - Alma			
1 . 1- Propriedades do material da placa			
Material: Viga Principal - Alma			
Aço Carbono ASTM A-36			
Tensão de escoamento	σ_{esc}	<input type="text" value="2549"/>	[kgf/cm ²] <input type="text" value="250,0"/> [MPa]
Limite proporcional	σ_p	<input type="text" value="1931"/>	[kgf/cm ²] <input type="text" value="189,4"/> [MPa]
1 . 2- Dimensões da placa			
Comprimento da placa	a	<input type="text" value="150"/>	[cm] <input type="text" value="1500,00"/> [mm]
Largura da placa	b	<input type="text" value="100"/>	[cm] <input type="text" value="1000,00"/> [mm]
Espessura da placa	t	<input type="text" value="1,25"/>	[cm] <input type="text" value="12,50"/> [mm]
1 . 3- Tensão máxima na Viga Principal - Alma			
Tensão máxima de compressão	σ	<input type="text" value="-1132"/>	[kgf/cm ²] <input type="text" value="-111,0"/> [MPa]
Tensão máxima de cisalhamento	τ	<input type="text" value="347"/>	[kgf/cm ²] <input type="text" value="34,0"/> [MPa]
1 . 4- Coeficiente α	$\alpha = a/b$	<input type="text" value="1,50"/>	
1 . 5- Coeficiente ψ	ψ	<input type="text" value="-1,2252"/>	
1 . 6- Tensão de flambagem localizada de Euler			
Módulo de Young do aço	E	<input type="text" value="2101000"/>	[kgf/cm ²] <input type="text" value="206037,7"/> [MPa]
Coeficiente de Poisson	μ	<input type="text" value="0,3"/>	
Tensão de Euler $\sigma_e = \{\pi^2 E / [12 * (1 - \mu^2)]\} * (t/b)^2$	σ_e	<input type="text" value="297"/>	[kgf/cm ²] <input type="text" value="29,1"/> [MPa]
1 . 7- Coeficientes de flambagem			
Fator de compressão	$K\sigma$	<input type="text" value="23,90"/>	
Fator de cisalhamento	$K\tau$	<input type="text" value="7,12"/>	

Figura 3.27 – Esquema da tela da planilha “Flamb”.

3.3.5 Planilha “LM” - Lista de massa estimada estrutural.

Na planilha “LM” é mostrado uma lista de massa estimado da parte estrutural do pórtico rolante. As células desta lista estão “linkados” com as informações recebidas no módulo de entrada e obtidas nos cálculos. Algumas células deverão ser preenchidas manualmente conforme experiência do usuário. Na Figura 3.28, é ilustrado esta lista de massa.

PÓRTICO ROLANTE 200 kN										
ESTRUTURA										
REF	QTD	DENOMINAÇÃO DO COMPONENTE	TEXTO DO ITEM				MASSA LIQ. MASSA BRUT. RE			
		DENOMINAÇÃO	dim 1 (mm)	dim 2 (mm)	dim 3 (mm)	dim 4	NORMA / ET	MATERIAL	UNID. [kg]	UNID. [kg]
001	04	Viga principal - alma	6,3	x 1200,0	x 15051,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	3572,9	4001,6
002	02	Viga principal - aba superior	9,5	x 465,0	x 15051,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	1043,9	1169,1
003	02	Viga principal - aba inferior central	9,5	x 465,0	x 10084,2	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	699,4	783,3
004	04	Viga principal - aba inferior lateral	25,0	x 575,0	x 2483,4	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	1121,0	1255,5
005	02	Viga principal - chapa	63,0	x 63,0	x 14351,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	894,3	1001,6
006	24	Viga principal - diafragma	6,3	x 405,0	x 1079,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	518,7	580,9
007	08	Viga principal - alma viga lateral	6,3	x 942,9	x 942,9	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	351,7	393,9
008	08	Viga principal - aba viga lateral	9,5	x 942,9	x 942,9	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	530,4	594,0
009	04	Viga principal - diafragma viga lateral	6,3	x 455,0	x 942,9	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	84,9	95,0
010	04	Viga principal - flange viga lateral	25,0	x 645,0	x 1132,9	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	573,6	642,4
100	04	Viga de ligação - alma	6,3	x 600,0	x 5560,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	659,9	739,1
101	04	Viga de ligação - aba	6,3	x 350,0	x 5560,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	385,0	431,2
102	08	Viga de ligação - diafragma	6,3	x 290,0	x 580,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	66,6	74,5
103	04	Viga de ligação - flange	25,0	x 480,0	x 790,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	297,7	333,4
200	08	Perna - alma trapezoidal	8,0	x 800,0	x 7255,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	2915,9	3265,8
201	08	Perna - aba	8,0	x 450,0	x 7255,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	1640,2	1837,0
202	32	Perna - diafragma	8,0	x 390,0	x 785,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	615,2	689,1
203	04	Perna - flange superior	25,0	x 520,0	x 1390,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	567,4	635,5
204	04	Perna - flange inferior	25,0	x 520,0	x 590,0	-	-	Aço Carbono ASTM A-36	240,8	269,7

Figura 3.28 – Esquema da tela da planilha “LM”.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo é mostrada a comparação dos resultados obtidos analiticamente através do Excel e as telas geradas pelo software ANSYS.

Foi analisado em ambos um caso de cálculo de um pórtico existente, já em operação, para que os dados utilizados fossem os mais reais possíveis.

As principais características deste equipamento são:

- Altura do pórtico rolante.....	12,60 m
- Vão do pórtico rolante	9,50 m
- Distância entre as pernas na direção Z.....	7,00 m
- Distância entre as rodas do pórtico rolante.....	8,20 m
- Vão do carro (entre vigas)	7,00 m
- Distância entre rodas do carro guincho	2,10 m
- Número de rodas do carro.....	4
- Número de rodas do pórtico rolante.....	4
- Aproximação da linha de centro da carga até a linha de centro das pernas do pórtico	1,20 m
- Comprimento do balanço a esquerda do pórtico	5,176 m
- Comprimento do balanço a direita do pórtico	0,375 m
- Aproximação do balanço a esquerda pelo carro guincho.....	0,12 m
- Aproximação da perna à esquerda pelo carro guincho	0,12 m
- Número de seções divididas das pernas do pórtico	8
- Aceleração do pórtico.....	0,0780 m/s ²
- Aceleração da gravidade.....	9,80665 m/s ²
- Carga de serviço.....	23,45 tf
- Massa do carro guincho + bloco e cabo de aço	10,00 tf
- Norma de projeto.....	NBR 8400
- Estado de carga	1
- Classe de utilização	A
- Grupo de serviço da estrutura	2
- Caso de solicitação	II e III

- Área do carro exposta ao vento – direção x 19,60 m²
- Área do carro exposta ao vento – direção z..... 7,60 m²
- Área da carga exposta ao vento – direção x 17,00 m²
- Área da carga exposta ao vento – direção z..... 2,30 m²

Demais coeficientes e dados necessários deverão ser utilizados os de norma.

Foram divididos em itens em diversos tipos de carregamentos combinados e realizado a comparação dos resultados obtidos entre o ANSYS e o Excel.

4.1 Carregamento combinado 1

- Peso próprio da estrutura;
- Carro guincho na extremidade do balanço a esquerda;
- Carga de serviço.

Tipos de Carregamentos		Análise de Tensões e Deformações			
Peso estrutura / Carga atuante		<i>a) Tensões na direção X</i>			
Peso próprio da estrutura + carga atuante		a.1) Viga principal			
Posicionamento do carro na viga principal		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	934 [kgf/cm ²]	91,6 [MPa]
Carro na extremidade do balanço a esquerda		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-934 [kgf/cm ²]	-91,6 [MPa]
Ação do Vento		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	155 [kgf/cm ²]	15,2 [MPa]
Movimentação		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	934 [kgf/cm ²]	91,6 [MPa]
Estacionado		<i>b) Tensões na direção Y</i>			
Carga Estática		b.1) Perna Esquerda			
		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	93 [kgf/cm ²]	9,1 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-491 [kgf/cm ²]	-48,2 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	27 [kgf/cm ²]	2,6 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	491 [kgf/cm ²]	48,2 [MPa]
		b.2) Perna Direita			
		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	481 [kgf/cm ²]	47,2 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-418 [kgf/cm ²]	-41,0 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	27 [kgf/cm ²]	2,6 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	481 [kgf/cm ²]	47,2 [MPa]

Figura 4.1 - Carregamento Combinado 1 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

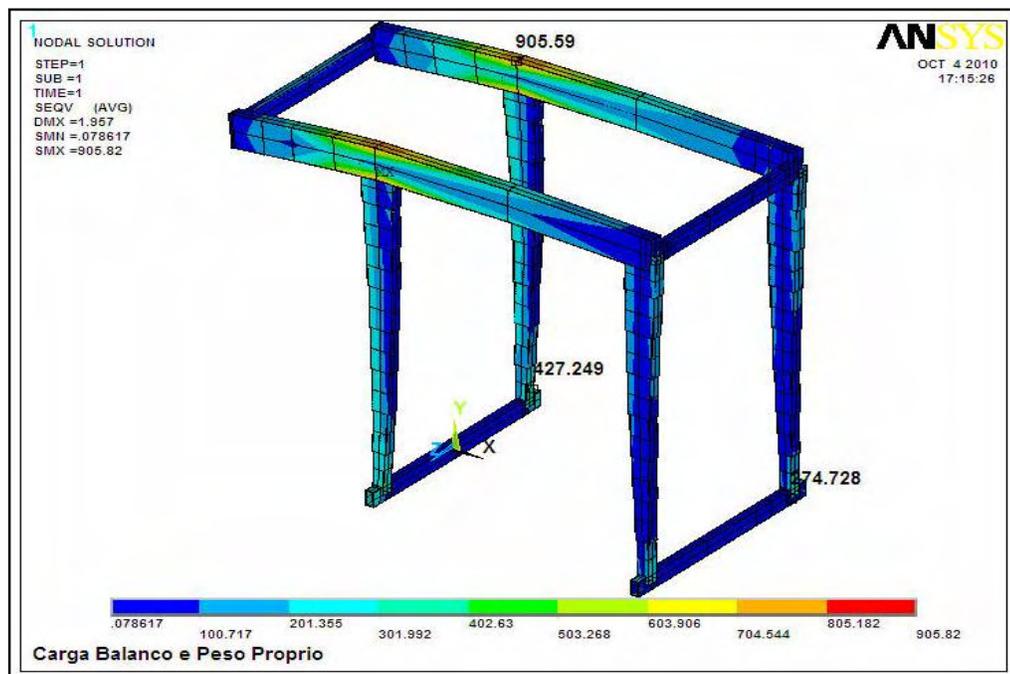


Figura 4.2 - Carregamento Combinado 1 – Cálculo ANSYS - Tensão

4.2 Carregamento combinado 2

- Peso próprio da estrutura;
- Carro guincho no centro da viga principal;
- Carga de serviço.

Tipos de Carregamentos	Análise de Tensões e Deformações
Peso estrutura / Carga atuante	<p>a) Tensões na direção X</p> <p>a.1) Viga principal</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 334 [kgf/cm²] 32,7 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -341 [kgf/cm²] -33,4 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 82 [kgf/cm²] 8,1 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 341 [kgf/cm²] 33,4 [MPa]</p> <p>b) Tensões na direção Y</p> <p>b.1) Perna Esquerda</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 97 [kgf/cm²] 9,5 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -303 [kgf/cm²] -29,8 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 16 [kgf/cm²] 1,4 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 303 [kgf/cm²] 29,8 [MPa]</p> <p>b.2) Perna Direita</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 97 [kgf/cm²] 9,5 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -279 [kgf/cm²] -27,4 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 16 [kgf/cm²] 1,4 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 279 [kgf/cm²] 27,4 [MPa]</p>
Peso próprio da estrutura + carga atuante	
Posicionamento do carro na viga principal	
Carro no centro do trecho central da viga principal	
Ação do Vento	
Movimentação	
Estacionado	
Carga Estática	

Figura 4.3 - Carregamento Combinado 2 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

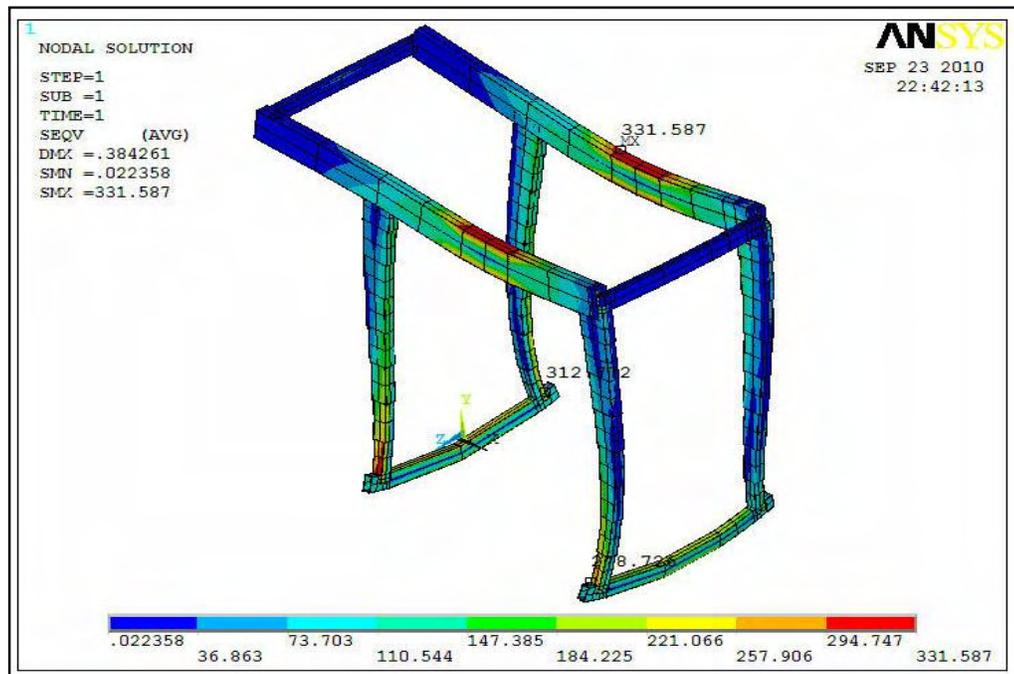


Figura 4.4 - Carregamento Combinado 2 – Cálculo ANSYS - Tensão

4.3 Carregamento combinado 3

a) Peso próprio da estrutura;

Tipos de Carregamentos	Análise de Tensões e Deformações																																																
Peso estrutura / Carga atuante Peso próprio da estrutura + carga atuante Posicionamento do carro na viga principal Ação do Vento Movimentação Estacionado Carga Estática	<p>a) Tensões na direção X</p> <p>a.1) Viga principal</p> <table> <tr> <td>Tensão máxima</td> <td>$\sigma_{tm\acute{a}x}$</td> <td>56 [kgf/cm²]</td> <td>5,5 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão mínima</td> <td>$\sigma_{cm\acute{a}x}$</td> <td>-56 [kgf/cm²]</td> <td>-5,5 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão de cisalhamento máxima</td> <td>$\tau_{m\acute{a}x}$</td> <td>12 [kgf/cm²]</td> <td>1,1 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão combinada máxima</td> <td>$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$</td> <td>56 [kgf/cm²]</td> <td>5,5 [MPa]</td> </tr> </table> <p>b) Tensões na direção Y</p> <p>b.1) Perna Esquerda</p> <table> <tr> <td>Tensão máxima</td> <td>$\sigma_{tm\acute{a}x}$</td> <td>0 [kgf/cm²]</td> <td>0,0 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão mínima</td> <td>$\sigma_{cm\acute{a}x}$</td> <td>-38 [kgf/cm²]</td> <td>-3,7 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão de cisalhamento máxima</td> <td>$\tau_{m\acute{a}x}$</td> <td>1 [kgf/cm²]</td> <td>0,1 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão combinada máxima</td> <td>$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$</td> <td>38 [kgf/cm²]</td> <td>3,7 [MPa]</td> </tr> </table> <p>b.2) Perna Direita</p> <table> <tr> <td>Tensão máxima</td> <td>$\sigma_{tm\acute{a}x}$</td> <td>0 [kgf/cm²]</td> <td>0,0 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão mínima</td> <td>$\sigma_{cm\acute{a}x}$</td> <td>-34 [kgf/cm²]</td> <td>-3,4 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão de cisalhamento máxima</td> <td>$\tau_{m\acute{a}x}$</td> <td>1 [kgf/cm²]</td> <td>0,1 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão combinada máxima</td> <td>$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$</td> <td>34 [kgf/cm²]</td> <td>3,4 [MPa]</td> </tr> </table>	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	56 [kgf/cm ²]	5,5 [MPa]	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-56 [kgf/cm ²]	-5,5 [MPa]	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	12 [kgf/cm ²]	1,1 [MPa]	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	56 [kgf/cm ²]	5,5 [MPa]	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	0 [kgf/cm ²]	0,0 [MPa]	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-38 [kgf/cm ²]	-3,7 [MPa]	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	1 [kgf/cm ²]	0,1 [MPa]	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	38 [kgf/cm ²]	3,7 [MPa]	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	0 [kgf/cm ²]	0,0 [MPa]	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-34 [kgf/cm ²]	-3,4 [MPa]	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	1 [kgf/cm ²]	0,1 [MPa]	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	34 [kgf/cm ²]	3,4 [MPa]
Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	56 [kgf/cm ²]	5,5 [MPa]																																														
Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-56 [kgf/cm ²]	-5,5 [MPa]																																														
Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	12 [kgf/cm ²]	1,1 [MPa]																																														
Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	56 [kgf/cm ²]	5,5 [MPa]																																														
Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	0 [kgf/cm ²]	0,0 [MPa]																																														
Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-38 [kgf/cm ²]	-3,7 [MPa]																																														
Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	1 [kgf/cm ²]	0,1 [MPa]																																														
Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	38 [kgf/cm ²]	3,7 [MPa]																																														
Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	0 [kgf/cm ²]	0,0 [MPa]																																														
Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-34 [kgf/cm ²]	-3,4 [MPa]																																														
Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	1 [kgf/cm ²]	0,1 [MPa]																																														
Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	34 [kgf/cm ²]	3,4 [MPa]																																														

Figura 4.5 - Carregamento Combinado 3 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

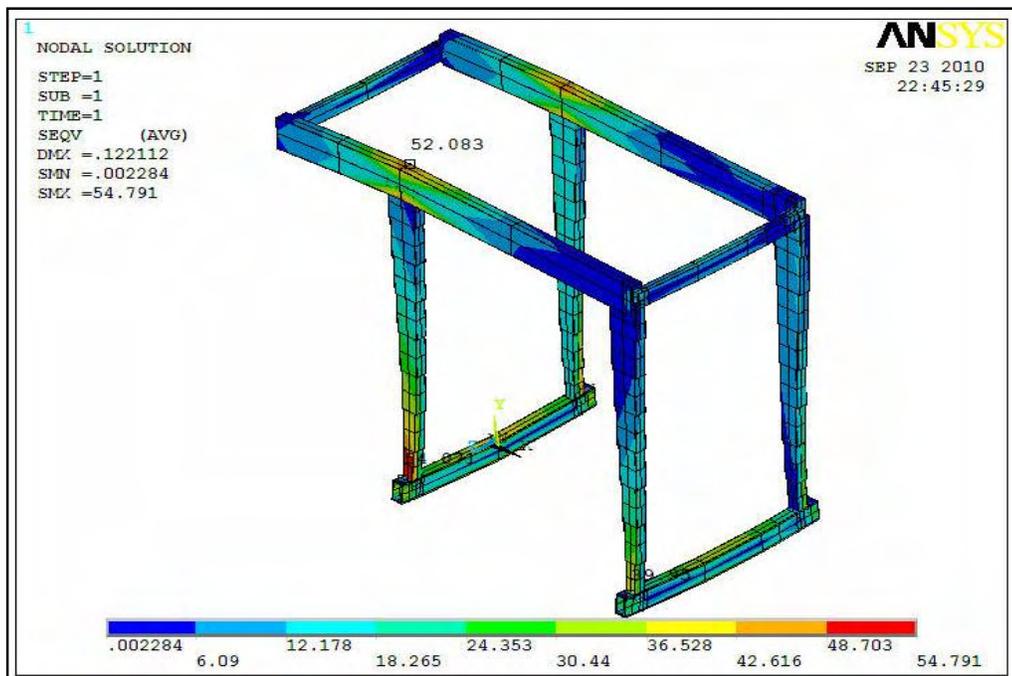


Figura 4.6 - Carregamento Combinado 3 – Cálculo ANSYS - Tensão

4.4 Carregamento combinado 4

- a) Peso próprio da estrutura;
- b) Carro guincho no centro da viga principal;
- c) Carga de ensaio.

Tipos de Carregamentos		Análise de Tensões e Deformações			
Peso estrutura / Carga atuante Peso próprio da estrutura + carga atuante		a) Tensões na direção X			
Posicionamento do carro na viga principal Carro no centro do trecho central da viga principal		a.1) Viga principal			
Ação do Vento		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	385 [kgf/cm ²]	37,8 [MPa]
Movimentação Estacionado		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-394 [kgf/cm ²]	-38,6 [MPa]
Carga Estática Carga Estática		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	93 [kgf/cm ²]	9,2 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	394 [kgf/cm ²]	38,6 [MPa]
		b) Tensões na direção Y			
		b.1) Perna Esquerda			
		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	119 [kgf/cm ²]	11,6 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-346 [kgf/cm ²]	-33,9 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	17 [kgf/cm ²]	1,7 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	346 [kgf/cm ²]	33,9 [MPa]
		b.2) Perna Direita			
		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	118 [kgf/cm ²]	11,6 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-322 [kgf/cm ²]	-31,6 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	17 [kgf/cm ²]	1,7 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	322 [kgf/cm ²]	31,6 [MPa]

Figura 4.7 - Carregamento Combinado 4 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

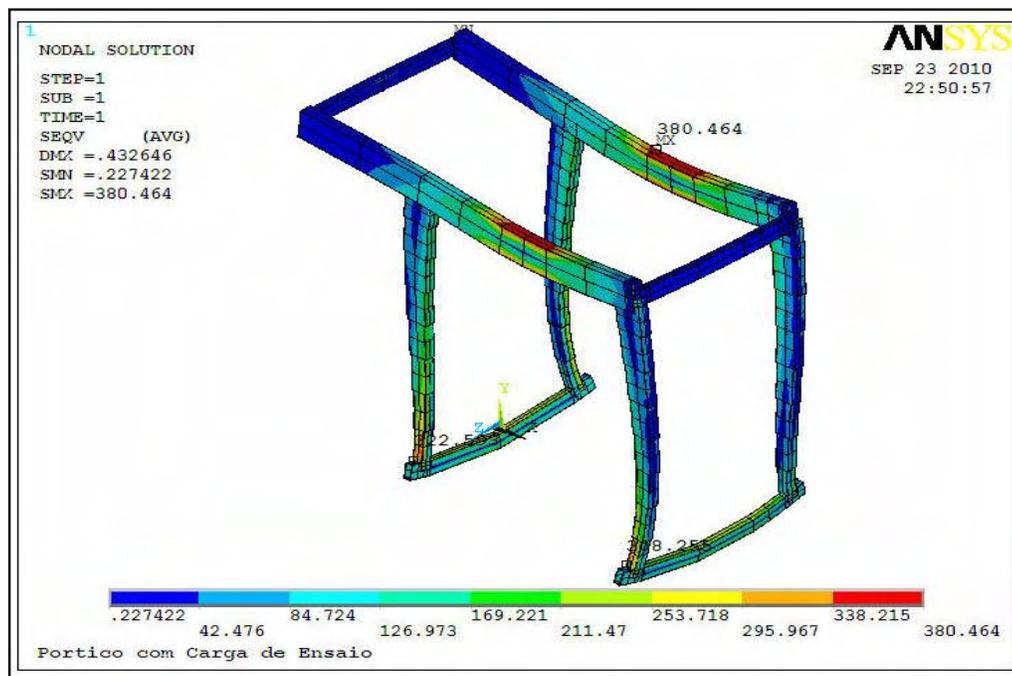


Figura 4.8 - Carregamento Combinado 4 – Cálculo ANSYS - Tensão

4.5 Carregamento combinado 5

- Peso próprio da estrutura;
- Carro guincho no centro da viga principal;
- Vento de serviço na direção x.

Tipos de Carregamentos	Análise de Tensões e Deformações																																																
Peso estrutura / Carga atuante Peso próprio da estrutura + carga atuante Posicionamento do carro na viga principal Carro no centro do trecho central da viga principal Ação do Vento Vento em serviço na direção X Movimentação Estacionado Carga Estática	<p>a) Tensões na direção X</p> <p>a.1) Viga principal</p> <table> <tr> <td>Tensão máxima</td> <td>$\sigma_{tm\acute{a}x}$</td> <td>336 [kgf/cm²]</td> <td>32,9 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão mínima</td> <td>$\sigma_{cm\acute{a}x}$</td> <td>-343 [kgf/cm²]</td> <td>-33,6 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão de cisalhamento máxima</td> <td>$\tau_{m\acute{a}x}$</td> <td>84 [kgf/cm²]</td> <td>8,2 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão combinada máxima</td> <td>$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$</td> <td>343 [kgf/cm²]</td> <td>33,6 [MPa]</td> </tr> </table> <p>b) Tensões na direção Y</p> <p>b.1) Perna Esquerda</p> <table> <tr> <td>Tensão máxima</td> <td>$\sigma_{tm\acute{a}x}$</td> <td>178 [kgf/cm²]</td> <td>17,4 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão mínima</td> <td>$\sigma_{cm\acute{a}x}$</td> <td>-389 [kgf/cm²]</td> <td>-38,1 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão de cisalhamento máxima</td> <td>$\tau_{m\acute{a}x}$</td> <td>20 [kgf/cm²]</td> <td>2,0 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão combinada máxima</td> <td>$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$</td> <td>389 [kgf/cm²]</td> <td>38,1 [MPa]</td> </tr> </table> <p>b.2) Perna Direita</p> <table> <tr> <td>Tensão máxima</td> <td>$\sigma_{tm\acute{a}x}$</td> <td>48 [kgf/cm²]</td> <td>4,7 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão mínima</td> <td>$\sigma_{cm\acute{a}x}$</td> <td>-195 [kgf/cm²]</td> <td>-19,1 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão de cisalhamento máxima</td> <td>$\tau_{m\acute{a}x}$</td> <td>10 [kgf/cm²]</td> <td>0,9 [MPa]</td> </tr> <tr> <td>Tensão combinada máxima</td> <td>$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$</td> <td>195 [kgf/cm²]</td> <td>19,1 [MPa]</td> </tr> </table>	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	336 [kgf/cm ²]	32,9 [MPa]	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-343 [kgf/cm ²]	-33,6 [MPa]	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	84 [kgf/cm ²]	8,2 [MPa]	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	343 [kgf/cm ²]	33,6 [MPa]	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	178 [kgf/cm ²]	17,4 [MPa]	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-389 [kgf/cm ²]	-38,1 [MPa]	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	20 [kgf/cm ²]	2,0 [MPa]	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	389 [kgf/cm ²]	38,1 [MPa]	Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	48 [kgf/cm ²]	4,7 [MPa]	Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-195 [kgf/cm ²]	-19,1 [MPa]	Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	10 [kgf/cm ²]	0,9 [MPa]	Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	195 [kgf/cm ²]	19,1 [MPa]
Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	336 [kgf/cm ²]	32,9 [MPa]																																														
Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-343 [kgf/cm ²]	-33,6 [MPa]																																														
Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	84 [kgf/cm ²]	8,2 [MPa]																																														
Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	343 [kgf/cm ²]	33,6 [MPa]																																														
Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	178 [kgf/cm ²]	17,4 [MPa]																																														
Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-389 [kgf/cm ²]	-38,1 [MPa]																																														
Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	20 [kgf/cm ²]	2,0 [MPa]																																														
Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	389 [kgf/cm ²]	38,1 [MPa]																																														
Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	48 [kgf/cm ²]	4,7 [MPa]																																														
Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-195 [kgf/cm ²]	-19,1 [MPa]																																														
Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	10 [kgf/cm ²]	0,9 [MPa]																																														
Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	195 [kgf/cm ²]	19,1 [MPa]																																														

Figura 4.9 - Carregamento Combinado 5 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

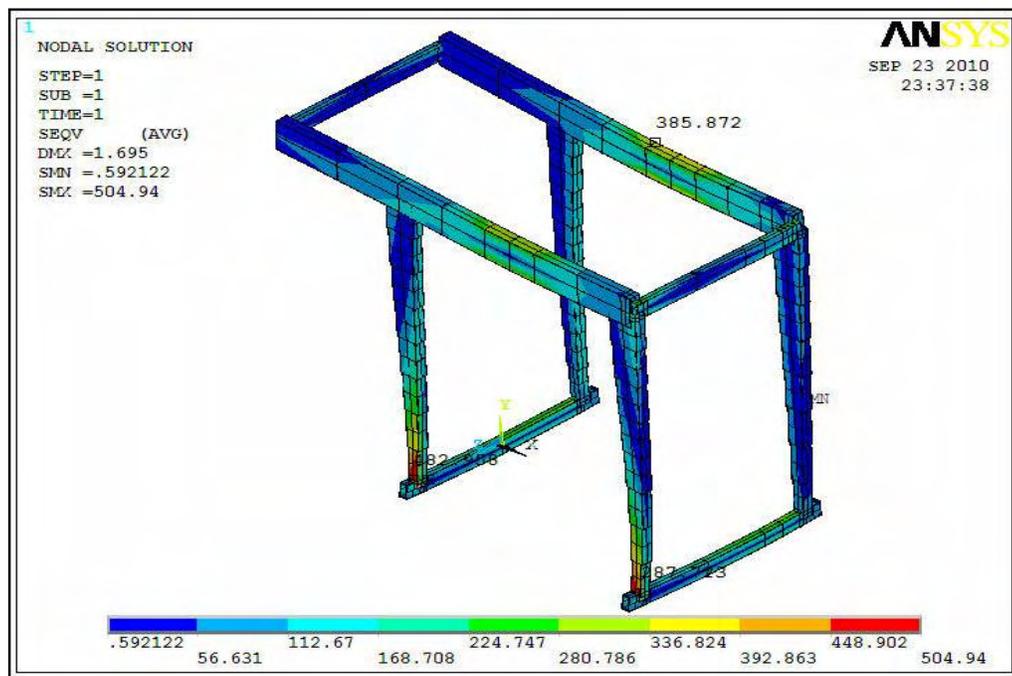


Figura 4.10 - Carregamento Combinado 5 – Cálculo ANSYS - Tensão

4.6 Carregamento combinado 6

- a) Peso próprio da estrutura;
- b) Carro guincho na extremidade do balanço a esquerda;
- c) Vento de serviço na direção x.

Tipos de Carregamentos		Análise de Tensões e Deformações			
Peso estrutura / Carga atuante		a) Tensões na direção X			
Peso próprio da estrutura + carga atuante		a.1) Viga principal			
Posicionamento do carro na viga principal		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	934 [kgf/cm ²]	91,6 [MPa]
Carro na extremidade do balanço a esquerda		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-934 [kgf/cm ²]	-91,6 [MPa]
Ação do Vento		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	155 [kgf/cm ²]	15,2 [MPa]
Vento em serviço na direção X		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	934 [kgf/cm ²]	91,6 [MPa]
Movimentação		b) Tensões na direção Y			
Estacionado		b.1) Perna Esquerda			
Carga Estática		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	93 [kgf/cm ²]	9,1 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-491 [kgf/cm ²]	-48,2 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	27 [kgf/cm ²]	2,6 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	491 [kgf/cm ²]	48,2 [MPa]
		b.2) Perna Direita			
		Tensão máxima	$\sigma_{tm\acute{a}x}$	481 [kgf/cm ²]	47,2 [MPa]
		Tensão mínima	$\sigma_{cm\acute{a}x}$	-418 [kgf/cm ²]	-41,0 [MPa]
		Tensão de cisalhamento máxima	$\tau_{m\acute{a}x}$	27 [kgf/cm ²]	2,6 [MPa]
		Tensão combinada máxima	$\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$	481 [kgf/cm ²]	47,2 [MPa]

Figura 4.11 - Carregamento Combinado 6 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

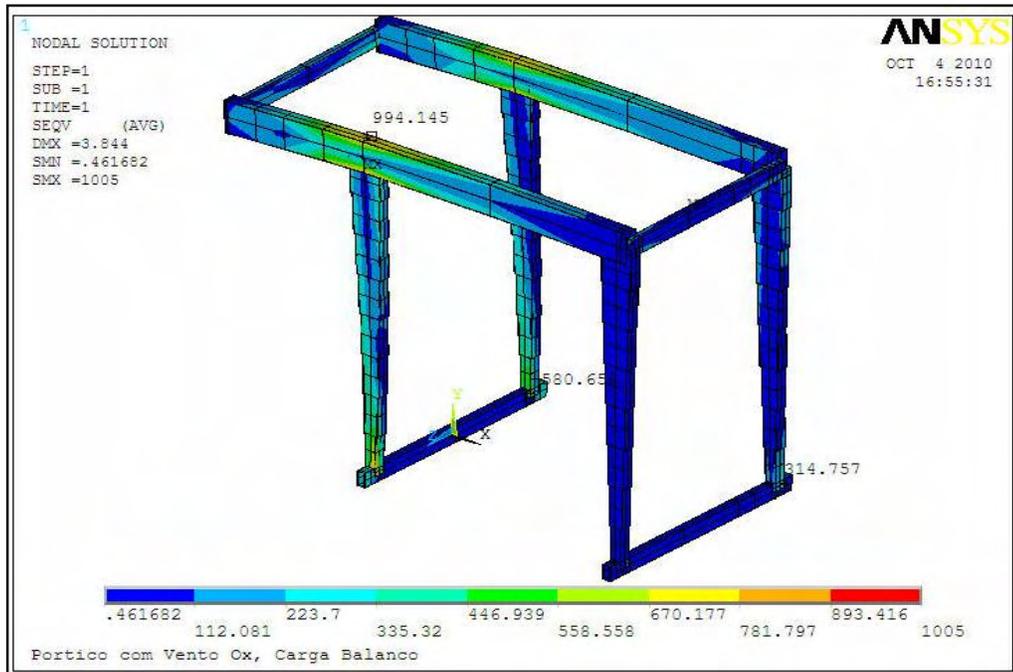


Figura 4.12 - Carregamento Combinado 6 – Cálculo ANSYS - Tensão

4.7 Carregamento combinado 7

- Peso próprio da estrutura;
- Carro guincho na extremidade do balanço a esquerda;
- Vento de serviço na direção z.

Tipos de Carregamentos	Análise de Tensões e Deformações
Peso estrutura / Carga atuante	<p>a) Tensões Combinadas - direção XZ</p> <p>a.1) Viga principal</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 942 [kgf/cm²] 92,4 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -942 [kgf/cm²] -92,4 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 155 [kgf/cm²] 15,2 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 942 [kgf/cm²] 92,4 [MPa]</p> <p>b) Tensões na direção YZ</p> <p>b.1) Perna Esquerda</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 474 [kgf/cm²] 46,5 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -926 [kgf/cm²] -90,8 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 28 [kgf/cm²] 2,8 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 926 [kgf/cm²] 90,8 [MPa]</p> <p>b.2) Perna Direita</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 916 [kgf/cm²] 89,8 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -852 [kgf/cm²] -83,6 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 28 [kgf/cm²] 2,8 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 916 [kgf/cm²] 89,8 [MPa]</p>
Peso próprio da estrutura + carga atuante	
Posicionamento do carro na viga principal	
Carro na extremidade do balanço a esquerda	
Ação do Vento	
Vento em serviço na direção Z	
Movimentação	
Estacionado	
Carga Estática	

Figura 4.13 - Carregamento Combinado 7 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

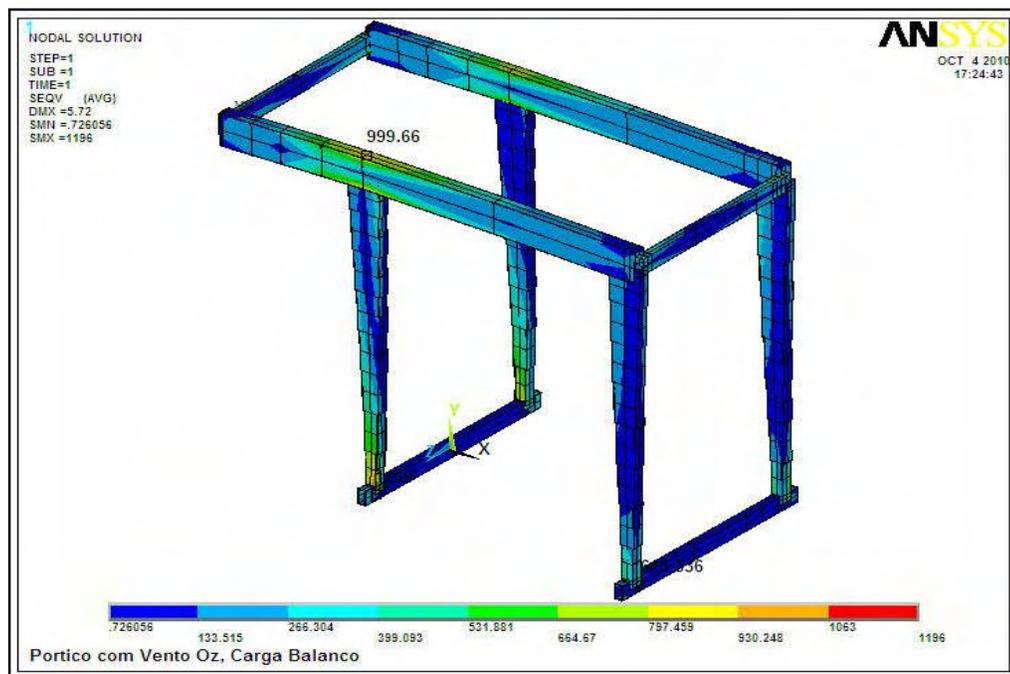


Figura 4.14 - Carregamento Combinado 7 – Cálculo ANSYS - Tensão

4.8 Carregamento combinado 8

- a) Peso próprio da estrutura;
- b) Carro guincho no centro da viga principal;
- c) Vento de serviço na direção z.

Tipos de Carregamentos	Análise de Tensões e Deformações
<p>Peso estrutura / Carga atuante</p> <p>Peso próprio da estrutura + carga atuante</p> <p>Posicionamento do carro na viga principal</p> <p>Carro no centro do trecho central da viga principal</p> <p>Ação do Vento</p> <p>Vento em serviço na direção Z</p> <p>Movimentação</p> <p>Estacionado</p> <p>Carga Estática</p>	<p>a) Tensões Combinadas - direção XZ</p> <p>a.1) Viga principal</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 339 [kgf/cm²] 33,2 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -346 [kgf/cm²] -33,9 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 82 [kgf/cm²] 8,1 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 346 [kgf/cm²] 33,9 [MPa]</p> <p>b) Tensões na direção YZ</p> <p>b.1) Perna Esquerda</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 532 [kgf/cm²] 52,2 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -738 [kgf/cm²] -72,4 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 19 [kgf/cm²] 1,9 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 738 [kgf/cm²] 72,4 [MPa]</p> <p>b.2) Perna Direita</p> <p>Tensão máxima $\sigma_{tm\acute{a}x}$ 532 [kgf/cm²] 52,1 [MPa]</p> <p>Tensão mínima $\sigma_{cm\acute{a}x}$ -714 [kgf/cm²] -70,0 [MPa]</p> <p>Tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ 19 [kgf/cm²] 1,9 [MPa]</p> <p>Tensão combinada máxima $\sigma_{comb\ m\acute{a}x}$ 714 [kgf/cm²] 70,0 [MPa]</p>

Figura 4.15 - Carregamento Combinado 8 – Cálculo Analítico Excel - Tensão

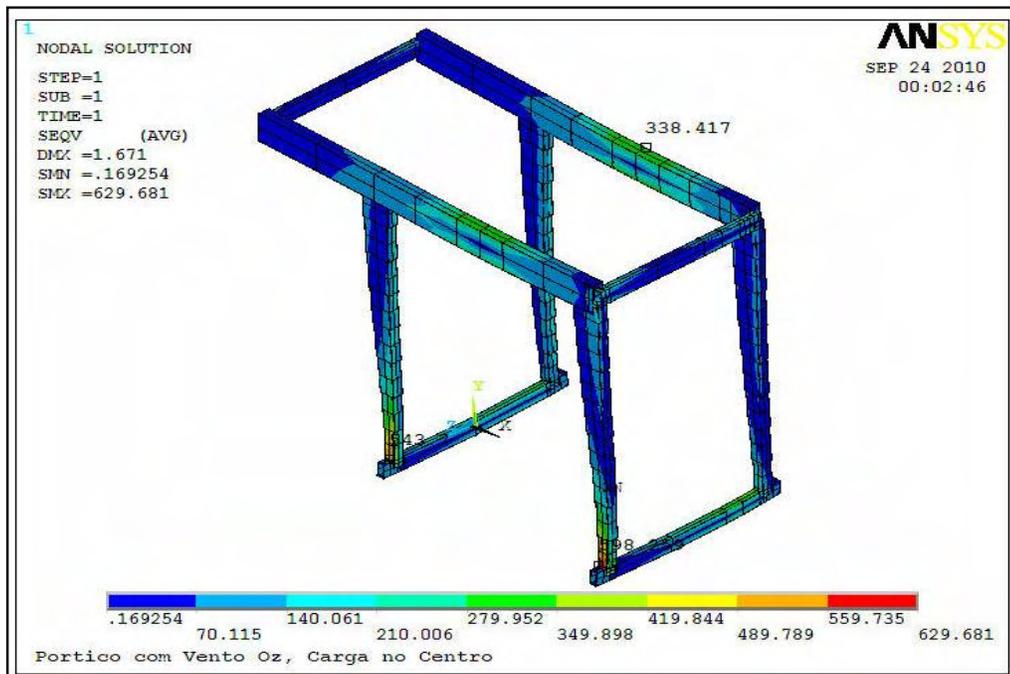


Figura 4.16 - Carregamento Combinado 8 – Cálculo ANSYS - Tensão

Tabela 4.1 – Comparação entre Excel e ANSYS

Carregamento 1		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio Balanço a esquerda + carga	VP	934	Início do balanço a esquerda junto a perna	905	Início do balanço a esquerda junto a perna	3,20	-----	-----
	PE	491	Inferior	427	Inferior	-----	14,99	-----
	PD	481	Inferior	275	Inferior	-----	-----	74,91
Carregamento 2		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio Centro da viga + carga de serviço	VP	341	Centro para direita	331	Centro para direita	3,02	-----	-----
	PE	303	Inferior	312	Inferior	-----	-2,88	-----
	PD	279	Inferior	278	Inferior	-----	-----	0,36
Carregamento 3		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio	VP	56	Início do balanço a esquerda junto a perna	52	Início do balanço a esquerda junto a perna	7,69	-----	-----
	PE	38	Inferior	54	Inferior	-----	-29,63	-----
	PD	38	Inferior	39	Inferior	-----	-----	-2,56
Carregamento 4		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio Centro da viga + carga de ensaio	VP	394	Centro para direita	380	Centro para direita	3,68	-----	-----
	PE	346	Inferior	322	Inferior	-----	7,45	-----
	PD	322	Inferior	308	Inferior	-----	-----	4,55

Carregamento 5		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio	VP	343	Centro para direita	385	Centro para direita	-10,91	-----	-----
Centro da viga + carga de serviço	PE	389	Inferior	482	Inferior	-----	-19,29	-----
Vento direção X	PD	195	Inferior	287	Inferior	-----	-----	-32,06

Carregamento 6		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio	VP	934	Início do balanço a esquerda junto a perna	994	Início do balanço a esquerda junto a perna	-6,04	-----	-----
Balanço a esquerda + carga	PE	491	Inferior	580	Inferior	-----	-15,34	-----
Vento direção X	PD	481	Inferior	314	Inferior	-----	-----	53,18

Carregamento 7		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio	VP	942	Início do balanço a esquerda junto a perna	999	Início do balanço a esquerda junto a perna	-5,71	-----	-----
Balanço a esquerda + carga	PE	926	Inferior	1169	Inferior	-----	-20,79	-----
Vento direção Z	PD	916	Inferior	645	Inferior	-----	-----	42,02

Carregamento 8		Excel		ANSYS		Excel / ANSYS (%)		
		Valor	Posição	Valor	Posição	VP	PE	PD
Peso próprio	VP	346	Centro para direita	338	Centro para direita	2,37	-----	-----
Centro da viga + carga de serviço	PE	738	Inferior	543	Inferior	-----	35,91	-----
Vento direção Z	PD	714	Inferior	598	Inferior	-----	-----	19,40

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A ferramenta computacional desenvolvida através das rotinas de cálculo implementadas em Excel pode ser utilizada como um pré-processador que assegura uma melhor qualidade do modelo de elementos finitos, pois há um maior controle na entrada dos diversos dados.

Erros que são frequentemente cometidos por usuários pouco experientes no ambiente do ANSY, tais como aplicação de vários carregamentos, várias propriedades físicas e condição de contorno estão bem controladas e minimizadas quando da utilização da ferramenta computacional desenvolvida.

O uso da ferramenta computacional permite que o usuário execute o cálculo estrutural aproximado de um pórtico rolante típico sem conhecer um programa de elementos finitos comercial como o ANSYS. Esta etapa caracteriza um *anteprojeto de um pórtico rolante*.

Conforme resultados apresentados na tabela 4.1 – Comparação Excel e ANSYS, concluímos:

- As maiores diferenças de valores entre o Excel e o ANSYS, se mostram principalmente nas pernas, visto que o desenvolvimento de cálculo analítico feito pelo Excel não leva em consideração as deformações sofridas pela viga de ligação inferior, a cabeceira, enquanto que o ANSYS, por sua estrutura espacial, considera;
- O ANSYS assume na consideração de cálculo, a geometria real das pernas com a concordância das diversas dimensões das seções da perna analisada, enquanto que no Excel são apenas analisadas as seções informadas as planilhas;
- No desenvolvimento processo de Cross utilizando do Excel, a inércia da perna utilizada é um valor médio das seções, enquanto no ANSYS, é considerada a inércia variável, conforme as seções das pernas;
- Devido à pequena rigidez da seção inferior da perna, em relação à viga de ligação inferior (cabeceira), um adicional componente de tensão decorrente do peso próprio desta cabeceira, é incorporada a perna.

Obs.: Os cálculos analíticos bem como o modelo numérico são aproximados. Só por este fato introduzem erros nos modelos.

Como propostas para trabalhos futuros sugerem:

- Um aperfeiçoamento nos cálculos das seções das pernas do pórtico com o objetivo da redução da diferença existente entre o Excel e ANSYS;
- Introdução de novos casos de carregamento, novas combinações de carregamento, obtendo com isso uma melhora dos casos já considerados;
- Implementar na ferramenta computacional a presença do efeito de sismo, conforme normas específicas;
- Integração da ferramenta computacional com programa de elementos finitos ANSYS, com o objetivo de desenvolver programa paramétrico do modelo estrutural do pórtico rolante a ser analisado;
- Implementar na ferramenta computacional desenvolvida uma rotina de cálculo do dimensionamento e especificação dos componentes mecânicos a serem incorporados (tambor, cabo de aço, freios, acoplamentos, etc.);
- Implementar rotinas para o levantamento de custos na fabricação e de materiais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 8400 – mar 1984 – Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas;
- PFEIL, W. **Estruturas de Aço**, 3ª edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1982, 584 págs.
- ERBISTE, Paulo C. F; **Comportas Hidráulicas**, 1ª edição, Rio de Janeiro: Editora Campus/Eletróbrás, 1987, 358 págs.
- 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.
- Junior, J.F.S., **Método de Cross**, 1ª edição, Rio de Janeiro: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1979, 332 págs.
- Hibbeler, R.C. , **Resistência dos Materiais** – 7ª edição – São Paulo: Editora Pearson do Brasil Ltda, 2009, 642 págs.
- Rovere, H.L.L., **Apostila ECV5220 - Análise Estrutural II** cap. 4 Disponível em https://www.ecv.ufsc.br/secdepto/graduacao/ECV5220_LaRovere.pdf Acesso em set/2009.
- Beer, F.P e Johnston Jr, E.R., **Resistência dos Materiais**. 2ª edição – São Paulo: Editora McGraw-Hill.
- Tamasauskas, 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.

APÊNDICE A

A.1 Processo de Cross

“O Processo de Cross ou da Distribuição de Momentos consiste em obter os esforços nas barras por equilíbrio de nó, distribuindo o momento total no nó (incluindo o aplicado mais os de engastamento perfeito das barras que concorrem no nó) de acordo com a rigidez das barras.

Este processo foi proposto por Hardy Cross, em 1932, no artigo intitulado *Analysis of continuous Frames by Distributing Fixed End Moment*, publicado no *Proceedings of American Society of Civil Engineers (Transactions)*. Concebidos principalmente para o cálculo de sistemas de nós fixos cujos nós estão, submetidos unicamente a rotações, o processo foi generalizado para os sistemas de nós deslocáveis, ou seja, que podem sofrer translações” (Rovere, 2009).

A.1.1 Princípios do Processo de Cross

“O processo desenvolvido por Cross é inspirado em um processo matemático de resolução por aproximações sucessivas dos sistemas lineares”. Supõe-se, inicialmente, que os nós da estrutura estão bloqueados e não podem sofrer nenhuma rotação. Depois da aplicação das cargas, os nós são liberados sucessivamente, os quais sofrem rotação. Em seguida, o nó liberado é bloqueado antes de passar ao nó seguinte. Estas operações são repetidas até que a liberação dos nós não provoque mais rotações. Isto significa que o estado de equilíbrio foi atingido.

Segundo Cross, a idéia principal do processo de resolução de estruturas hiperestáticas resume-se em simples operações aritméticas, o que não é inteiramente verdadeiro. O processo de Cross, para vigas de seção constante, depende da solução de três problemas:

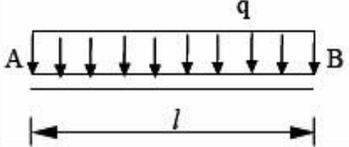
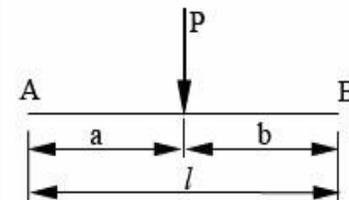
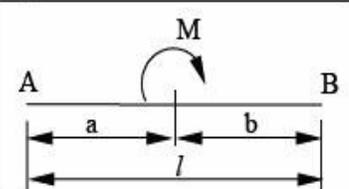
- a) A determinação dos momentos de engastamento perfeito;
- b) Rigidez de cada viga;
- c) Fator de distribuição de carga de cada membro da estrutura em consideração.

Sobre o método de distribuição de momentos, Cross escreveu que deveria ser imaginado que todos os nós da estrutura não pudessem girar e que os momentos de engastamento perfeito nas extremidades das barras fossem calculados para esta condição. Para cada nó da estrutura, distribuem-se os momentos de engastamento perfeito desequilibrados entre os membros conectados na proporção de cada rigidez. Multiplica-se o momento distribuído para cada membro para o nó pelo fator de distribuição de carga. Distribui-se somente o valor da carga recebida. Repete-se este processo até que os momentos transportados sejam tão pequenos que possam ser abandonados. Somam-se todos os momentos das extremidades das barras de cada membro a fim de obter o momento verdadeiro. Para uma estrutura com um único nó a solução é exata, mas para mais de um nó, a solução é aproximada, definida por um processo iterativo” (Rovere, 2009).

A.1.2 Momentos de Engastamento Perfeito

Os momentos de engastamento perfeitos já são conhecidos e tabelados. A Tabela A.1 apresenta alguns casos de momentos de engastamento em função do carregamento e do tipo de vinculação das barras em relação aos nós.

Tabela A.1 - Momentos de engastamento perfeito.

	A  B 	A  B 
	$M_A = +\frac{ql^2}{12}$ $M_B = -\frac{ql^2}{12}$	$M_A = +\frac{ql^2}{8}$
	$M_A = +\frac{Pab^2}{l^2}$ $M_B = -\frac{Pa^2b}{l^2}$	$M_A = +\frac{Pab}{2l^2}(l+b)$
	$M_A = -M\frac{b}{l}\left(2 - \frac{3b}{l}\right)$ $M_B = -M\frac{a}{l}\left(2 - \frac{3a}{l}\right)$	$M_A = +\frac{M}{2}\left(\frac{3b^2}{l^2} - 1\right)$

A.1.3 Rigidez das barras e coeficiente de transmissão de momentos

A rigidez de uma barra (k) em nó é o valor do momento aplicado nesse nó capaz de provocar um giro unitário neste nó.

A.1.3.1 Barra bi-engastada

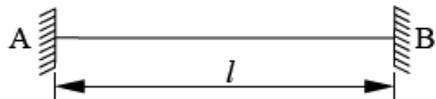


Figura A.1 - Viga bi-engastada



Figura A.2 - Momentos devidos ao giro unitário em A.

“A rigidez da barra bi-engastada da Figura A.1 é dado pela equação 3.16.

$$k = \frac{4EI}{l} \quad (\text{A.1})$$

O qual equivale ao momento que surge no nó A devido ao giro unitário desse mesmo nó.

O giro unitário do nó A produz o aparecimento de um momento no nó B de mesmo sentido de rotação em A , mostrada na Figura A.2. Desta forma, o coeficiente de transmissão de um momento de um nó para outro nó engastado, supondo a barra com inércia constante, é definido como sendo a relação da Equação A.2.

$$t_{AB} = \frac{M_B}{M_A} = \frac{1}{2} \quad (\text{A.2})$$

Sendo M_B e M_A os momentos nas extremidades B e A da barra, devido ao giro unitário na extremidade A ” (Rovere, 2009).

A.1.3.2 Viga engastada rotulada

Para o caso de viga engastada rotulada, temos o seguinte esquema:



Figura A.3 – Viga engastada rotulada.

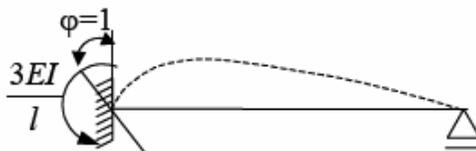
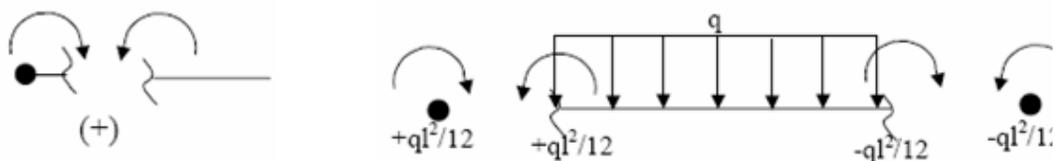


Figura A.4 - Momento devido ao giro unitário em A .

A.1.4 Convenção de Sinais

“Será utilizada a convenção de Grinter. Nó cálculo de equilíbrio dos nós será considerado positivo o momento que atua no nó no sentido horário (mantendo a convenção de esforço positivo na extremidade da barra no sentido anti-horário). Na Figura A.5, é mostrada esta convenção” (Junior, 1979).



a) No nó e na barra.

b) Momentos de engastamento perfeito.

Figura A.5 – Convenção de momentos positivos.

A.1.5 Coeficientes de distribuição

“Seja o pórtico plano indeslocável apresentado na Figura A.6. O único grau de liberdade da estrutura é a rotação (φ) do nó A.

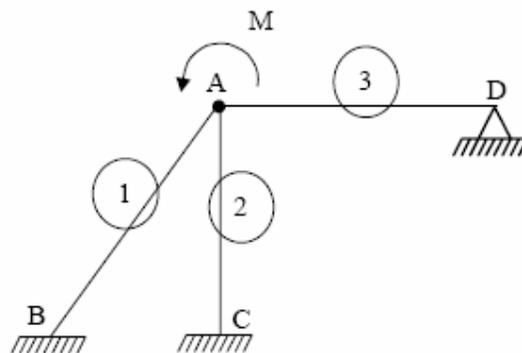


Figura A.6 – Pórtico plano indeslocável.

Devido à atuação do binário M , ver na Figura A.7 a, as barras irão se deformar e os esforços internos na extremidade das mesmas serão proporcional à rigidez das mesmas e à rotação sofrida pelo nó A, conforme apresentada na Figura A.8 b” (Rovere, 2009).

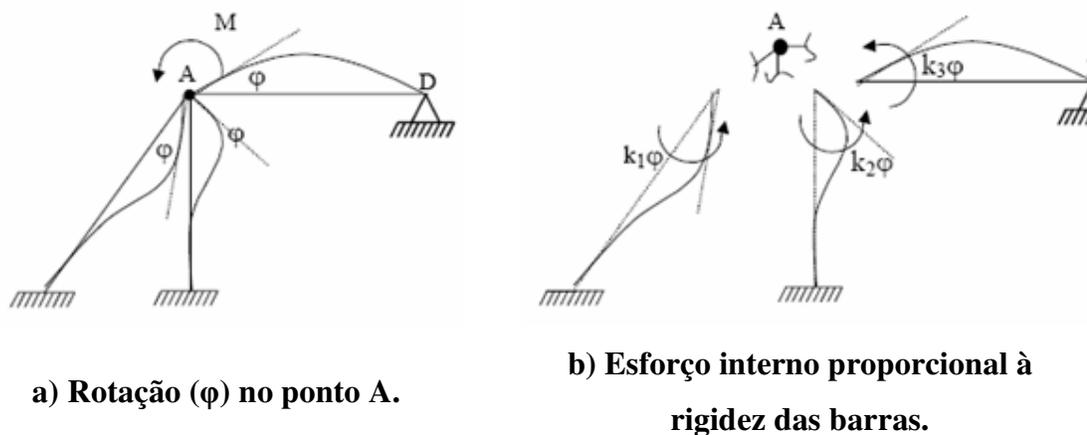


Figura A.7 – Pórtico sob ação de um binário M .

No nó, estes momentos atuam com o sentido inverso, pois representam os esforços das barras sobre o nó, conforme Figura A.8.

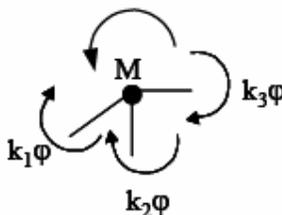


Figura A.8 – Momentos atuando no nó A.

Para que haja equilíbrio deve-se ter $\Sigma M_A = 0$

$$k_1 \varphi + k_2 \varphi + k_3 \varphi - M = 0$$

ou

(A.3)

$$(k_1 + k_2 + k_3) \varphi = M$$

$$\Sigma k_i = M$$
(A.4)

Como M e k_i são conhecidos, logo se obtém o valor da rotação φ em A.

$$\varphi = M / \Sigma k_i$$
(A.5)

Os momentos nas extremidades dos elementos são determinados pelas equações:

$$M_1 = k_1\varphi = k_1 \frac{M}{\sum k_i} \quad (\text{A.6})$$

$$M_2 = k_2\varphi = k_2 \frac{M}{\sum k_i} \quad (\text{A.7})$$

$$M_3 = k_3\varphi = k_3 \frac{M}{\sum k_i} \quad (\text{A.8})$$

Conclui-se que um binário aplicado no nó irá se distribuir pelas barras que concorrem neste nó proporcionalmente à rigidez de cada uma das barras deste nó.

Chama-se de coeficiente de distribuição (β_i), da barra i , a relação;

$$\beta_i = \frac{k_i}{\sum k_i} \quad (\text{A.9})$$

Portanto

$$M_i = \beta_i M \quad (\text{A.10})$$

Com isso temos os conceitos necessários para a utilização do processo de Cross. No caso de existirem cargas atuando ao longo das barras, os esforços de engastamento perfeito devem ser levados em conta no equilíbrio dos nós.

A.2 Processo de Cross para estruturas indeslocáveis

A.2.1 Processo de Cross para um nó apenas (um grau de liberdade rotação)

“O processo de Cross é baseado no Método dos Deslocamentos. Consiste em obter os esforços nas barras fazendo-se equilíbrio de esforços (momentos) em torno dos nós: o momento atuante no nó (momento aplicado diretamente no nó + momento de engastamento perfeito, devido a cargas nas barras) é distribuído pelas barras que concorrem no nó de acordo com a rigidez das barras.

Fixando-se os nós, calculam os momentos de engastamento perfeito devido às cargas nos elementos (transferidos para os nós utilizando-se a convenção de sinal de Grinter) e somam-se aos momentos aplicados nos nós. Depois se calculam a rigidez das barras (k_i), coeficientes de distribuição (β_i) e coeficientes de transmissão (t_i). Em seguida distribui-se o momento total no nó pelas barras usando-se os coeficientes de distribuição de forma a obter equilíbrio do nó ($\Sigma M=0$) Os momentos obtidos nas barras ligadas ao nó devem ser transmitidos para a outra extremidade de acordo com seu coeficiente de transmissão. Finalmente, traça-se o diagrama de momentos fletores” (Rovere, 2009).

A.2.2 Processo de Cross para dois ou mais nós

“O processo de cross para dois ou mais nós se inicia pelo nó mais desequilibrado e os momentos que surgem devido à rotação do nó são somados para equilibrar este nó. Estes momentos são transmitidos aos nós adjacentes pelos coeficientes de transmissão. Passa-se para o próximo nó desequilibrado e assim sucessivamente até chegar a um valor desprezível de momento a ser transmitido. Trata-se de um processo interativo” (Rovere, 2009).

A.2.3 Exemplo da aplicação do Processo de Cross em Pórtico Rolante Indeslocável

Pórticos rolantes indeslocáveis são aqueles que o posicionamento das cargas externas não acarreta o aparecimento de momentos extras que vão dar origem a instabilidade da estrutura.

A.2.3.1 Pórtico rolante com cargas concentradas no meio da viga principal

A.2.3.1.1 Geometria

Pórtico rolante com seção geométrica e carregamento externo simétrico, conforme apresentado na Figura A.9.

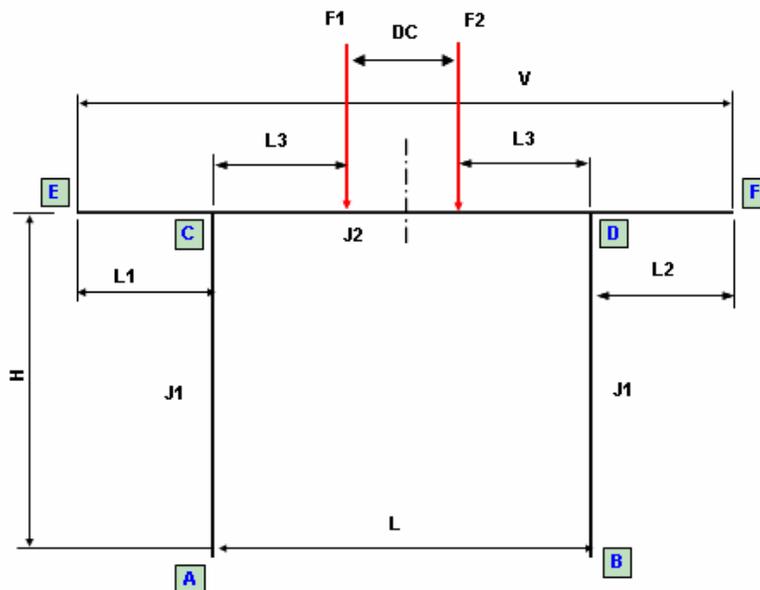


Figura A.9 – Geometria pórtico indeslocável.

A.2.3.1.2 Características principais e carregamento atuante

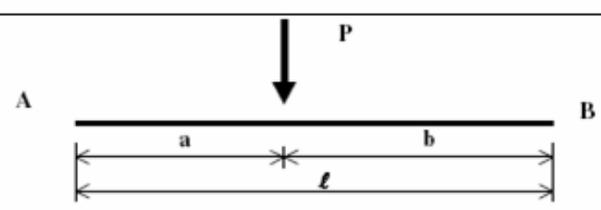
Comprimento Total da Viga Principal	V =	1.200 [cm]
Vão do Pórtico	L =	600 [cm]
Distância das pernas a carga F_1 e F_2	L3 =	195 [cm]
Distância entre a extremidade da Viga Principal e ponto de fixação da perna esquerda na Viga Principal (Balanço a esquerda)	L1 =	300 [cm]
Distância entre a extremidade da Viga Principal e ponto de fixação da perna direita na Viga Principal (Balanço a direita)	L2 =	300 [cm]
Altura do Pórtico	H =	500 [cm]
Momento de inércia das Pernas	J1 =	1 [cm ⁴]
Momento de inércia da Viga Principal	J2 =	1 [cm ⁴]
Distância entre as forças F_1 e F_2	DC =	210 [cm]
Terminal da Perna junto ao piso com rótula (S/N)		N
Carga aplicada	$F_1 =$	5.000 [kgf]
Carga aplicada	$F_2 =$	5.000 [kgf]

Obs.: O valor de J1 e J2 igual a uma unidade, se refere apenas ao exemplo da teoria apresentada.

A.2.3.1.3 Momentos para engastamento perfeito

Viga principal trecho CD.

Utilizando a Tabela A.1 – Momentos de engastamento perfeito, para as cargas F_1 e F_2 , temos:

Caso de Carregamento	Condições de Contorno
	
	$M_A = +\frac{Pab^2}{\ell^2}$ $M_B = -\frac{Pa^2b}{\ell^2}$

Momento de engastamento perfeito - trecho central
Viga Principal - Lado esquerdo $M_{CD} = 658.125$ [kgf.cm]

Momento de engastamento perfeito - trecho central
Viga Principal - Lado direito $M_{DC} = -658.125$ [kgf.cm]

Para os demais trechos do pórtico rolante devido à ausência de cargas externas, o valor do momento de engastamento perfeito é considerado zero.

Momento no balanço esquerda $M_{CE} = 0$ [kgf.cm]

Momento no balanço direita $M_{DF} = 0$ [kgf.cm]

Momento na perna esquerda - lado inferior $M_{AC} = 0$ [kgf.cm]

Momento na perna esquerda - lado superior $M_{CA} = 0$ [kgf.cm]

Momento na perna direita - lado inferior $M_{BD} = 0$ [kgf.cm]

Momento na perna direita - lado superior $M_{DB} = 0$ [kgf.cm]

A.2.3.1.4 Cálculo dos coeficientes de distribuição para cálculo de momentos

$$K \cdot \frac{J1}{H} = \beta_{CA} = \beta_{DB}$$

$$K \cdot \frac{J2}{L} = \beta_{CD} = \beta_{DC}$$

Legenda:

- 0,0000 coeficientes de distribuição dos momentos
- 658.125 valor inicial dos momentos nos nós de engastamento perfeito
- 464.559 valor final dos momentos nos nós após o processo de cross

Após efetuar o processo de Cross no pórtico, as reações nos apoios e o momento nos demais pontos das vigas poderão ser obtidos a partir das equações fundamentais de equilíbrio da estática.

Para os sinais dos momentos nas barras do pórtico deverá ser analisado o sinal utilizado na convenção de Grinter, isto é considerando positivo o momento que atua no nó no sentido horário e mantendo a convenção de esforço positivo na extremidade da barra no sentido anti-horário, conforme Figura A.8.

A partir dos valores das reações é possível determinar o ponto de momento máximo e os valores dos esforços cortantes da viga, conforme é apresentada na Figura A.10.

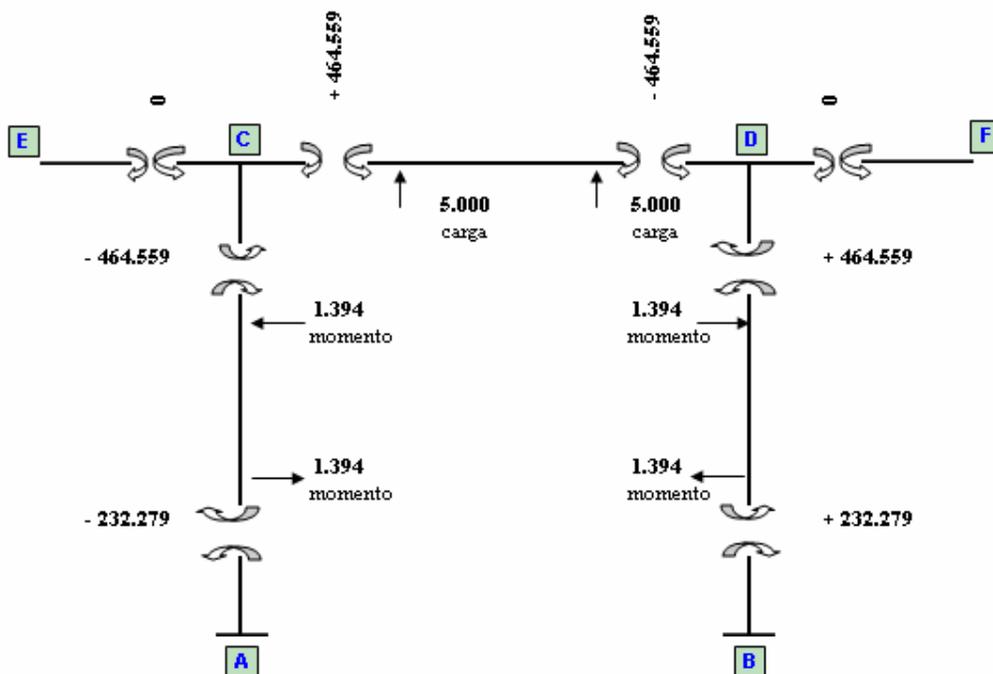


Figura A.10 - Esquema das reações devido às cargas externas e os momentos internos.

Conforme apresentado na Figura A.10, tem os seguintes valores de momentos fletores, apresentado abaixo:

Momento no centro da viga principal	$M_{cent} =$	510.441 [kgf.cm]
Momento no engastamento da viga em balanço a esquerda	$M_{CE} =$	0 [kgf.cm]
Momento no engastamento da viga em balanço a direita	$M_{DF} =$	0 [kgf.cm]
Momento na perna esquerda junto a viga principal	$M_{CA} =$	-464.559 [kgf.cm]
Momento na perna direita junto a viga principal	$M_{DB} =$	464.559 [kgf.cm]
Momento na viga principal junto da perna esquerda	$M_{CD} =$	-464.559 [kgf.cm]
Momento na viga principal junto a perna direita	$M_{DC} =$	-464.559 [kgf.cm]
Momento no ponto A da perna esquerda	$M_{AC} =$	232.279 [kgf.cm]
Momento no ponto B da perna direita	$M_{BD} =$	-232.279 [kgf.cm]

Os valores de esforços cortantes:

Esforço cortante no centro da viga principal	$V_{cent} =$	0 [kgf]
Esforço Cortante no engastamento da viga em balanço a esquerda	$V_{CE} =$	0 [kgf]
Esforço Cortante no engastamento da viga em balanço a direita	$V_{DF} =$	0 [kgf]
Esforço Cortante na perna esquerda junto a viga principal	$V_{CA} =$	-1.394 [kgf]
Esforço Cortante na perna direita junto a viga principal	$V_{DB} =$	1.394 [kgf]
Esforço Cortante na viga principal junto a perna esquerda	$V_{CD} =$	5.000 [kgf]
Esforço Cortante na viga principal junto a perna direita	$V_{DC} =$	-5.000 [kgf]
Esforço Cortante no ponto A da perna esquerda	$V_{AC} =$	-1.394 [kgf]
Esforço Cortante no ponto B da perna direita	$V_{BD} =$	1.394 [kgf]

Resultado na reação dos apoios A e B do pórtico de:

Reação em x	$R_{Ax} = 1.394$ [kgf]
Pórtico Indeslocável	
	$R_{Bx} = -1.394$ [kgf]
Reação em y	$R_{Ay} = 5.000$ [kgf]
	$R_{By} = 5.000$ [kgf]

Assim a reações dos apoios e o carregamento resulta, conforme apresentado na Figura A.11.

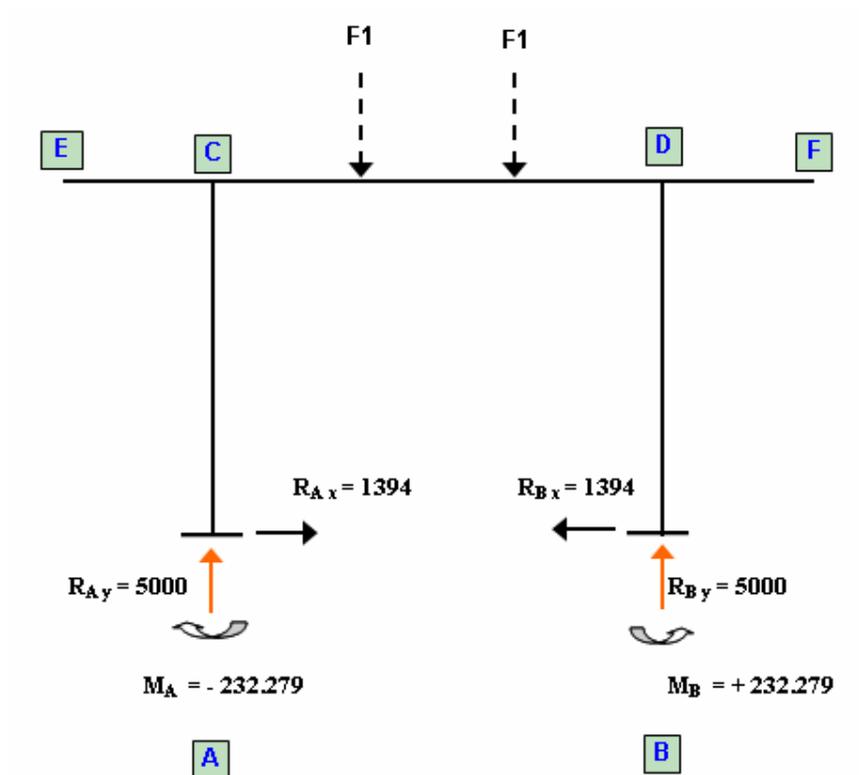
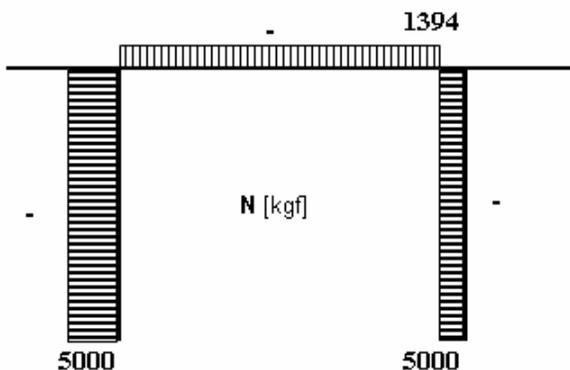


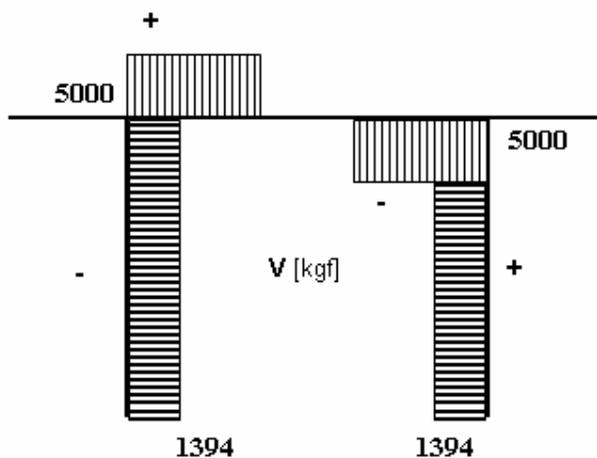
Figura A.11 – Cargas externas e reações finais.

A.2.3.1.6 Diagrama de Esforço Normal, Esforço Cortante e Momento Fletor.

A seguir são apresentados os seguintes diagramas: Figura A.12 – Diagrama de esforço normal, Figura A.13 – Diagrama de esforço cortante, e na Figura A.14 – Diagrama de momento fletor.



**Figura A.12 – Diagrama de esforço normal
– pórtico indeslocável.**



**Figura A.13 – Diagrama de esforço cortante –
pórtico indeslocável.**

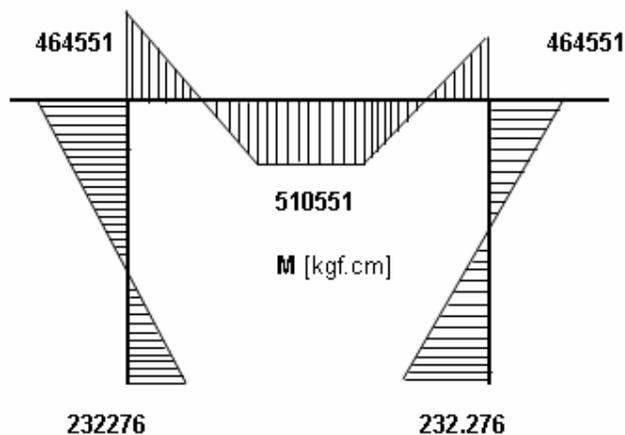


Figura A.14 – Diagrama de momento fletor – pórtico indeslocável.

A.3 Processo de Cross para estruturas deslocáveis

A.3.1 Processo de Cross para um ou mais nós

“Vamos considerar neste material apenas pórtico plano, como serão abordados os pórticos rolantes. Nesta rápida revisão o esforço axial será desprezado. As deslocabilidades tratam-se apenas de translações no processo de Cross. Estas deslocabilidades devem ser impedidas através de apoios do 1º gênero, surgindo reações de apoio, conforme apresentada na Figura A.15.

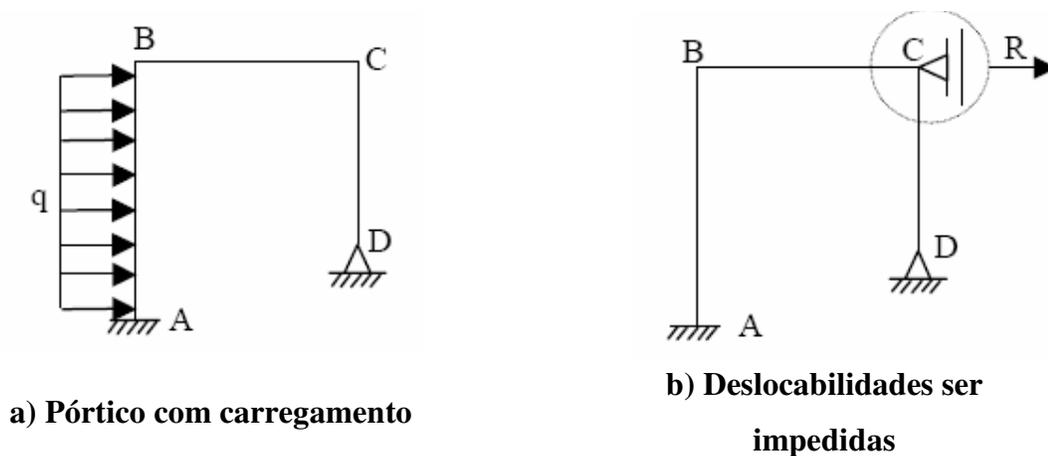


Figura A.15 – Pórtico plano.

Aplica-se em seguida o método dos deslocamentos considerando superposição de efeitos. Fixa-se a estrutura e calcula-se a reação de apoio devido ao carregamento R_{10} e o diagrama de momento fletores M_{10} usando o processo de cross, conforme Figura A.16.

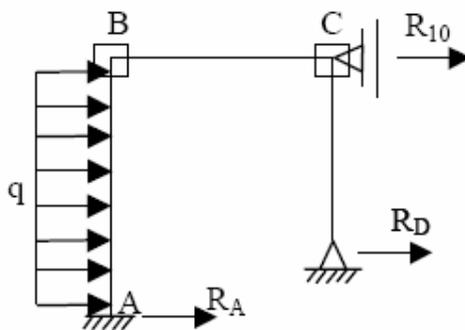


Figura A.16 – Pórtico plano com deslocamento restringido.

A seguir é feita a seqüência de cálculos para determinar o valor de R_{10} .

$$\begin{aligned} \text{Cross} &\rightarrow M_{BA}, M_{CD} \\ M_{BA} &= R_A \cdot l_{AB} - \frac{ql_{AB}^2}{2} + M_{AB} \\ R_A &= \frac{M_{BA} - M_{AB} + \frac{ql_{AB}^2}{2}}{l_{AB}} \\ M_{CD} &= R_D \cdot l_{CD} \\ R_D &= \frac{M_{CD}}{l_{CD}} \\ \Sigma F_X = 0 &\rightarrow R_{10} = \dots \end{aligned}$$

Após impõe-se a deslocabilidade Δ_l na direção restringida, conforme Figura A.17 e obtém-se, por Cross, M_l e R_l . “Devem-se utilizar tabelas para obtenção de momentos para engastamento perfeitos nas barras devido a recalques impostos” (Rovere, 2009).

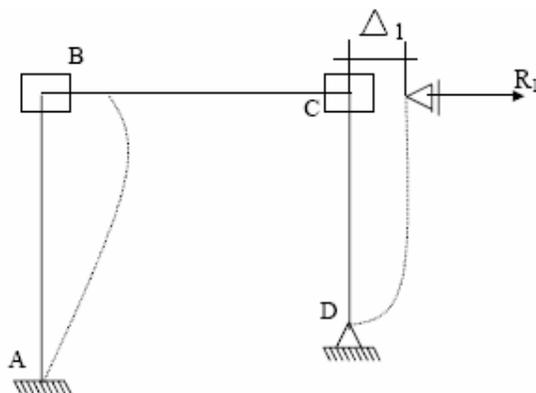


Figura A.17 – Pórtico plano com deslocamento imposto.

Como Δ_1 não é conhecido, impõe-se uma deslocabilidade unitária e calculam-se os momentos M_1 e R_{11} nas barras usando Cross. A reação final será M_1 , Δ_1 e R_{11} . Δ_1 . Faz-se em seguida o equilíbrio de forças horizontais no nó C, usando superposição de efeitos.

$$R_{10} + R_{11} \cdot \Delta_1 = 0$$

$$\Delta_1 = -\frac{R_{10}}{R_{11}}$$

Sendo R_{10} é a parcela de reação devido ao carregamento externo e R_{11} é a parcela de reação devido à deslocabilidade.

Os momentos finais no pórtico são encontrados por superposição de efeitos:

$$M = M_0 + M_1 \cdot \Delta_1$$

A.3.2 Exemplo da aplicação do Processo em Pórtico Rolante Deslocável

Pórtico rolante deslocáveis são aqueles que devido ao posicionamento das cargas externas acarreta o aparecimento de momentos extras que vão dar origem a instabilidade da estrutura.

A.3.2.1 Pórtico rolante com carga concentrada sobre a perna do Pórtico

A.3.2.1.1 Geometria

Pórtico rolante com seção geométrica simétrica e carregamento externo não simétrico, apresentado na Figura A.18.

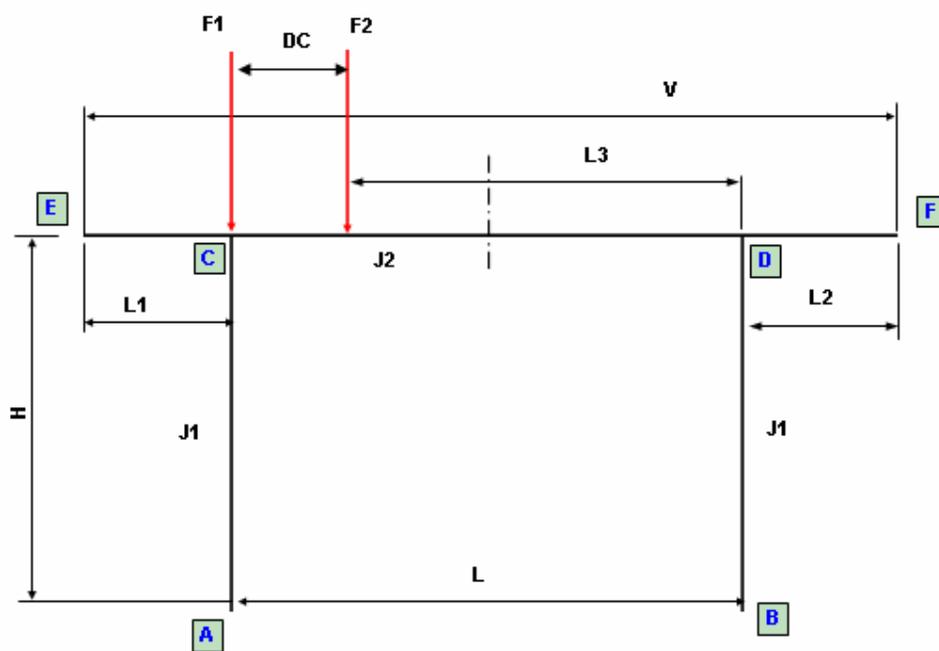


Figura A.18 – Geometria pórtico deslocável.

A.3.2.1.2 Características principais e carregamento atuante

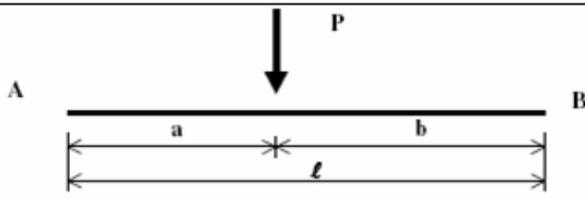
Comprimento Total da Viga Principal	V =	1.200 [cm]
Vão do Pórtico	L =	600 [cm]
Distância da carga F_2 a perna direita	L3 =	390 [cm]
Distância entre a extremidade da Viga Principal e ponto de fixação da perna esquerda na Viga Principal (Balanço a esquerda)	L1 =	300 [cm]
Distância entre a extremidade da Viga Principal e ponto de fixação da perna direita na Viga Principal (Balanço a direita)	L2 =	300 [cm]
Altura do Pórtico	H =	500 [cm]
Momento de inércia das Pernas	J1 =	1 [cm ⁴]
Momento de inércia da Viga Principal	J2 =	1 [cm ⁴]
Distância entre as forças F_1 e F_2	DC =	210 [cm]
Terminal da Perna junto ao piso com rótula (S/N)		N
Carga aplicada	$F_1 =$	5.000 [kgf]
Carga aplicada	$F_2 =$	5.000 [kgf]

Obs.: O valor de J1 e J2 igual a uma unidade, se refere apenas ao exemplo da teoria apresentada.

A.3.2.1.3 Momentos para engastamento perfeito

Viga principal trecho *CD*.

Utilizando a Tabela 3.1 – Momentos de engastamento perfeito para as cargas F_1 e F_2 , temos:

Caso de Carregamento	Condições de Contorno
	
	$M_A = + \frac{Pab^2}{\ell^2}$ $M_B = - \frac{Pa^2b}{\ell^2}$

Para os demais trechos do pórtico rolante devido à ausência de cargas externas, o valor do momento de engastamento perfeito é considerado zero.

Momento no balanço esquerda	$M_{CE} =$	0 [kgf.cm]
Momento no balanço direita	$M_{DF} =$	0 [kgf.cm]
Momento na perna esquerda - lado inferior	$M_{AC} =$	0 [kgf.cm]
Momento na perna esquerda - lado superior	$M_{CA} =$	0 [kgf.cm]
Momento na perna direita - lado inferior	$M_{BD} =$	0 [kgf.cm]
Momento na perna direita - lado superior	$M_{DB} =$	0 [kgf.cm]

A.3.2.1.4 Cálculo dos coeficientes de distribuição para o cálculo de momentos

$$K \cdot \frac{J1}{H} = \beta_{CA} = \beta_{DB} \qquad K \cdot \frac{J2}{L} = \beta_{CD} = \beta_{DC}$$

Para A e B engastado $K = 4$, para A e B rotulado $K = 3$

	<u>Nó C</u>		<u>Nó D</u>
β_{CA}	0,008	β_{DB}	0,008
β_{CD}	0,007	β_{DC}	0,007
$\beta_{CA} + \beta_{CD}$	0,015	$\beta_{DB} + \beta_{DC}$	0,015
coef $_{CA}$	0,5455	coef $_{DB}$	0,5455
coef $_{CD}$	0,4545	coef $_{DC}$	0,4545

A partir dos valores das reações é possível determinar o ponto de momento máximo e os valores dos esforços cortantes da viga, conforme é apresentada na Figura A.19.

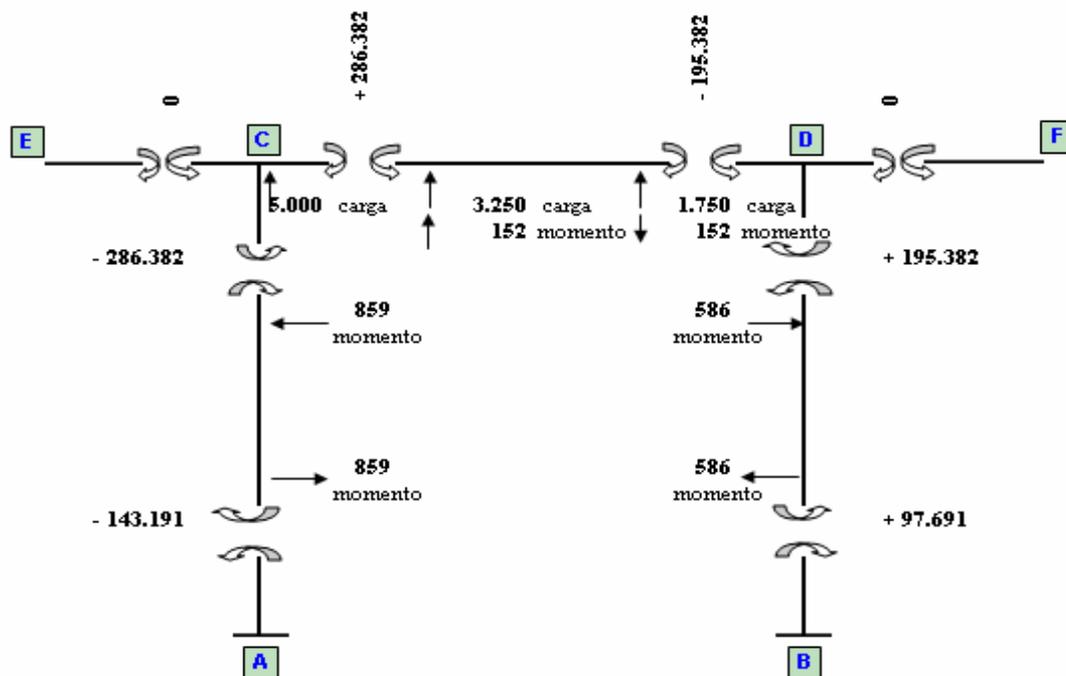


Figura A.19 – Esquema de reações devido às cargas externas e os momentos internos

Conforme a Figura A.19, temos os seguintes valores de reação nos apoios A e B.

Reação em x	$R_{Ax} =$	859 [kgf]
	$R_{Bx} =$	-586 [kgf]
	Pórtico Deslocável	
Reação em y	$R_{Ay} =$	8402 [kgf]
	$R_{By} =$	1598 [kgf]

Fazendo o somatório de forças na direção x, temos:

$$859 - 586 + R = 0$$

$$R = -273 \text{ kgf}$$

Os valores estão representados na Figura A.20 – Cargas externas e reações parciais.

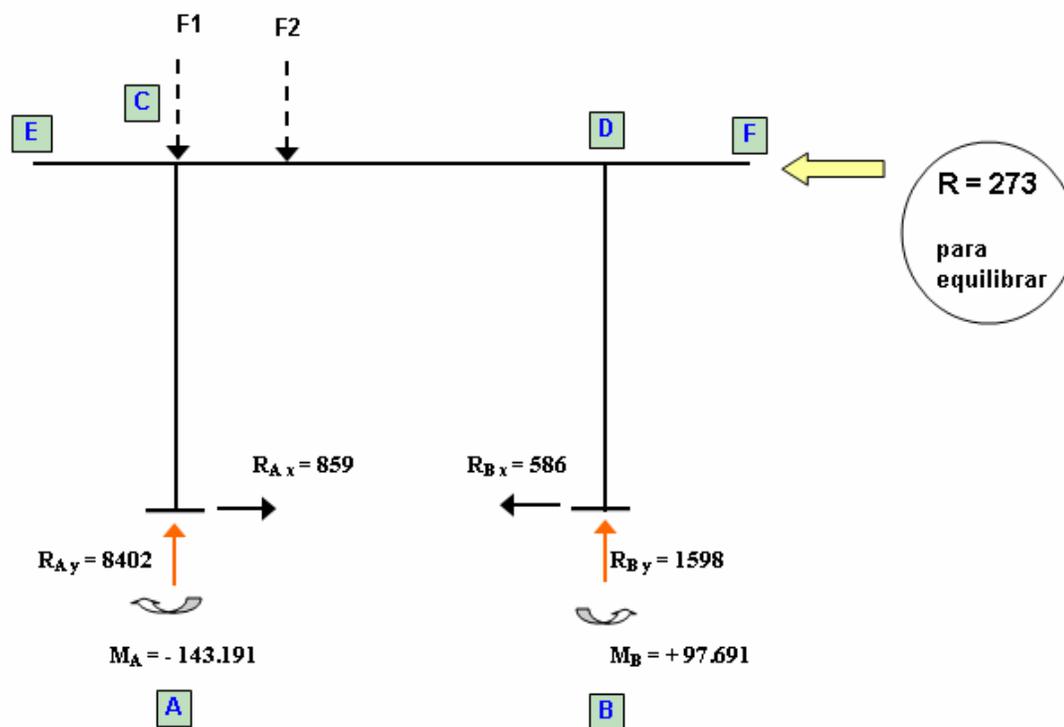


Figura A.20 – Cargas externas e reações parciais.

A.3.2.1.6 Cálculo dos esforços devido aos deslocamentos

A seguir a Figura A.21, apresenta o pórtico com a aplicação da carga R' de valor igual a R. (consideração para a análise).



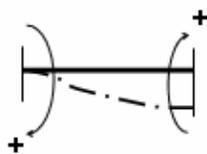
Figura A.21 – Deslocamento pórtico

Momentos de engastamento perfeito.

Barra AC

Obs.: como não se conhece δ , admitiremos:

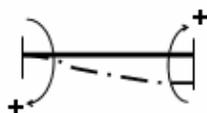
$$E.I.\delta = \boxed{10.000.000} \text{ [kgf.cm}^3\text{]}$$



$$M_A = M_C = 6.E.I.\delta / H^2$$

$$M_A = M_C = 240,0 \text{ [kgf.cm]}$$

Barra BD



$$M_B = M_D = 6.E.I.\delta / H^2$$

$$M_B = M_D = 240,0 \text{ [kgf.cm]}$$

Coefficiente de distribuição dos momentos.

São os mesmos utilizados anteriormente, assim:

A partir dos valores das reações é possível determinar o ponto de momento máximo e os valores dos esforços cortantes da viga, conforme é apresentada na Figura A.22.

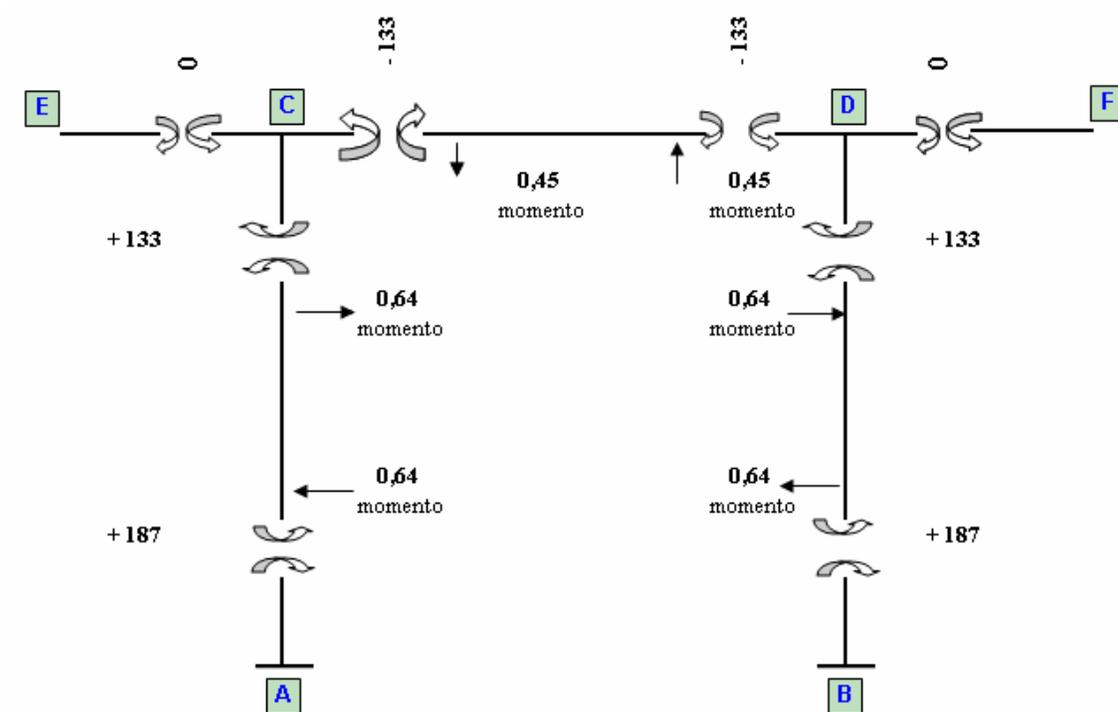


Figura A.22 – Reações devido ao deslocamento.

Conforme a Figura A.22, temos os seguintes resultantes nos de reação nos apoios *A* e *B* do pórtico:

Reação em <i>x</i>	$R_{A_x} =$	-0,64 [kgf]
	$R_{B_x} =$	-0,64 [kgf]
Reação em <i>y</i>	$R_{A_y} =$	-0,45 [kgf]
	$R_{B_y} =$	0,45 [kgf]

Fazendo o somatório de forças na direção *x*, temos:

$$-0,64 - 0,64 + R' = 0$$

$$R' = 1,28 \text{ kgf}$$

Os valores estão representados na Figura A.23 – Cargas externas e reações.

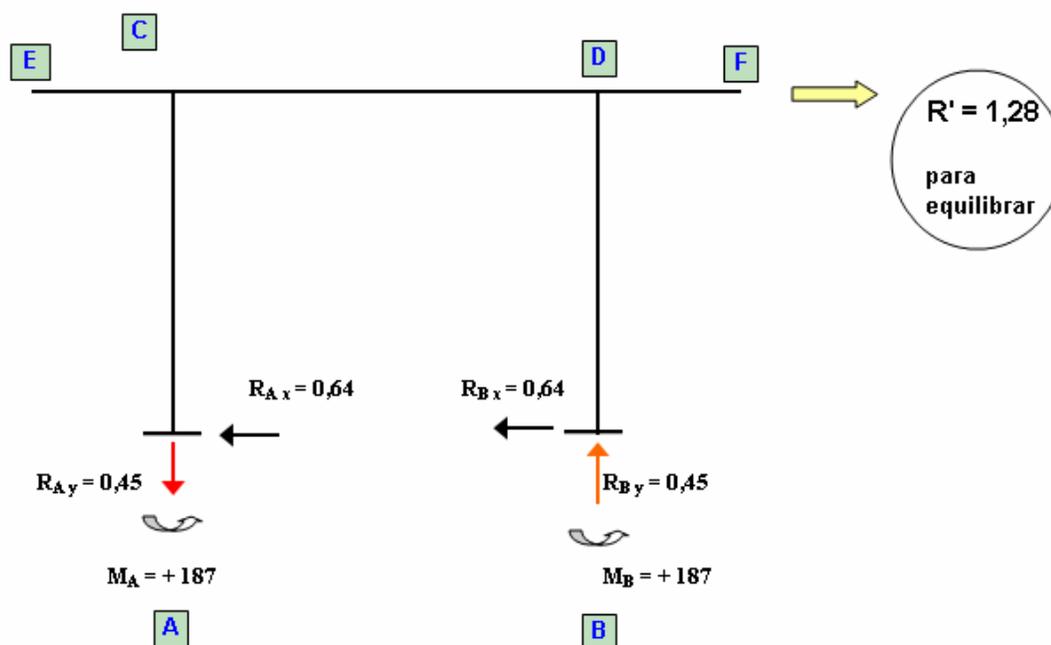


Figura A.23 – Reações e carga para equilibrar a estrutura.

A.3.2.1.7 Cálculo da equação de equilíbrio

O valor de Δ_1 é dado por:

$$\vec{R} + \Delta_1 \vec{R}' = 0 \implies -273 + \Delta_1 1,28 = 0 \implies \Delta_1 = 213,28 \quad e$$

$$M_A = M_{oA} + \Delta_1 M_A' \quad M_A = -103.307 \text{ [kgf.cm]}$$

$$M_B = M_{oB} + \Delta_1 M_B' \quad M_B = 137.575 \text{ [kgf.cm]}$$

$$M_C = M_{oC} + \Delta_1 M_C' \quad M_C = -258.016 \text{ [kgf.cm]}$$

$$M_D = M_{oD} + \Delta_1 M_D' \quad M_D = -223.748 \text{ [kgf.cm]}$$

A.3.2.1.8 Esforços solicitantes internos

A Figura A.24 apresenta os esforços solicitantes internos finais com a superposição de efeitos.

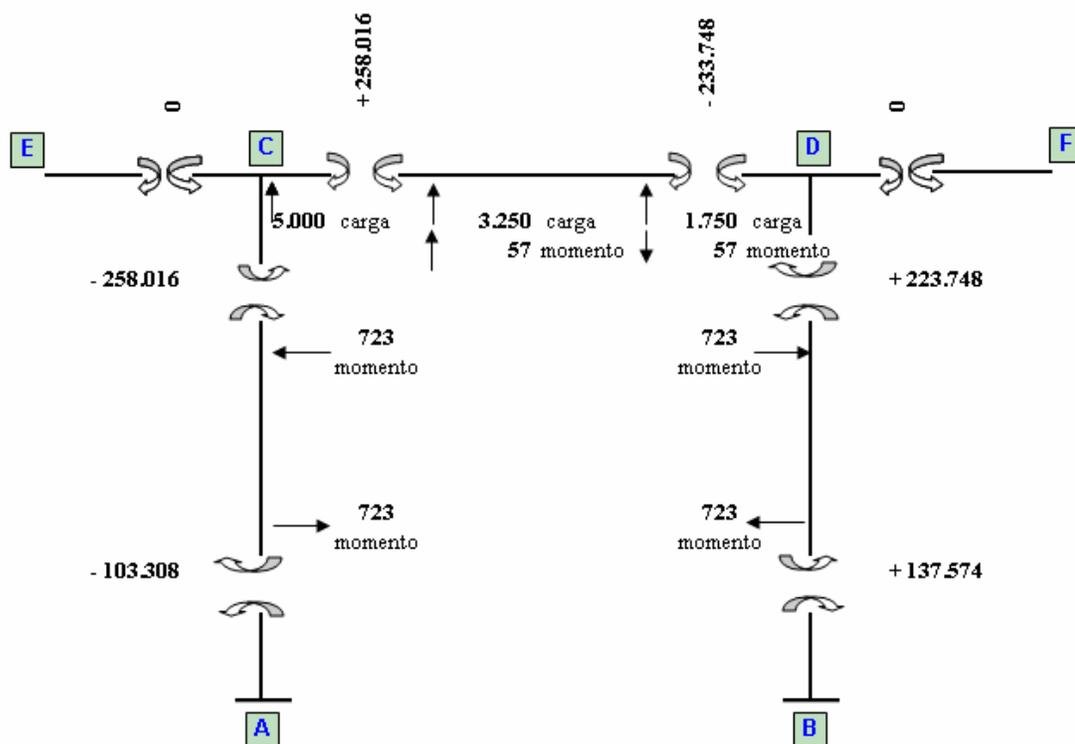


Figura A.24 – Esquema de reações devido às cargas externas e os momentos internos.

Assim a reações dos apoios e o carregamento resulta, conforme apresentado na Figura A.25.

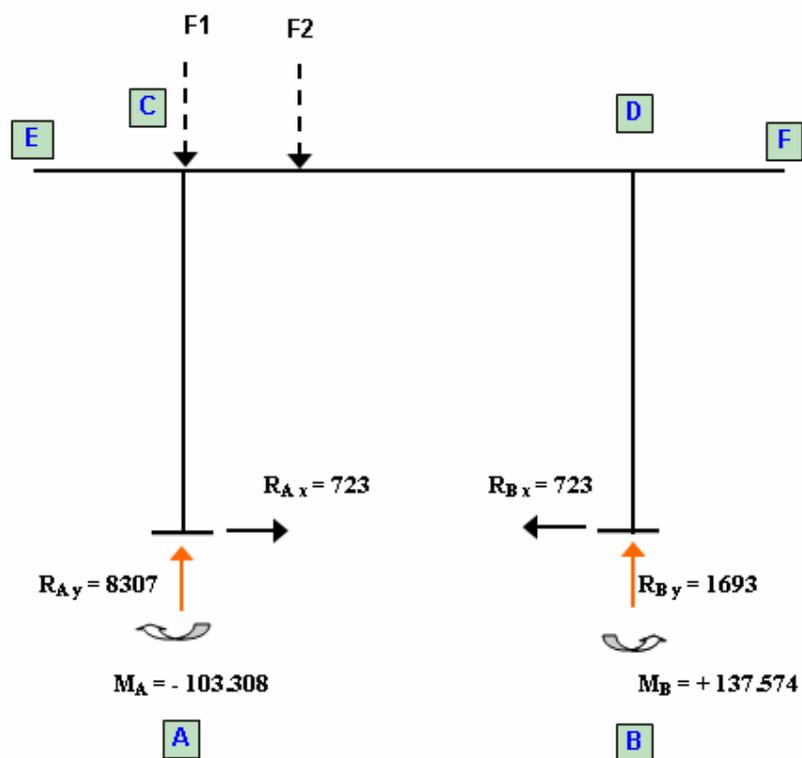


Figura A.25 – Cargas externas e reações finais.

Resultado na reação dos apoios A e B do pórtico de:

Reação em x	$R_{Ax} =$	723 [kgf]
	$R_{Bx} =$	-723 [kgf]
Reação em y	$R_{Ay} =$	8.307 [kgf]
	$R_{By} =$	1.693 [kgf]

A.3.2.1.9 Diagrama de Esforço Normal, Esforço Cortante e Momento Fletor.

A seguir são apresentadas as seguintes figuras: Figura A.26 – Diagrama de esforço normal, Figura A.27 – Diagrama de esforço cortante, e na Figura A.28 – Diagrama de momento fletor.

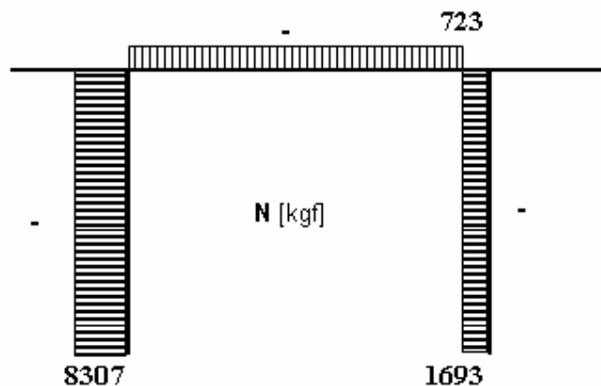


Figura A.26 – Diagrama de esforço normal – pórtico deslocável.

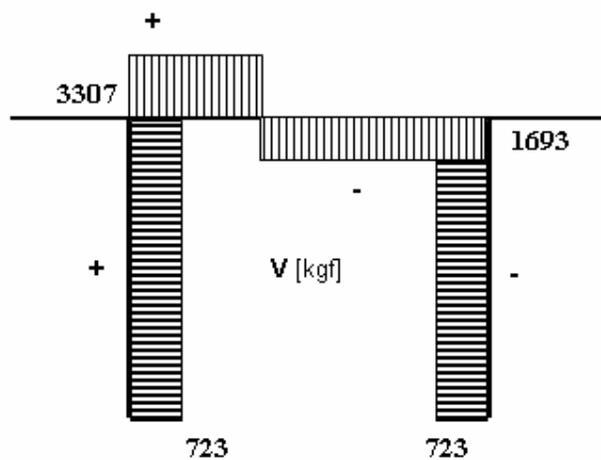


Figura A.27 – Diagrama de esforço cortante – pórtico deslocável.

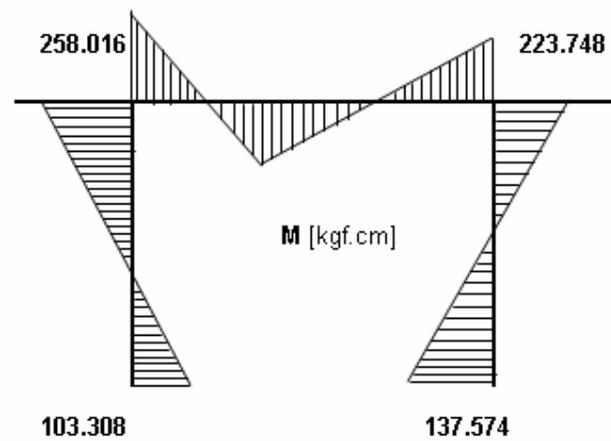


Figura A.28 – Diagrama de momento fletor – pórtico deslocável.

Com os valores analíticos obtidos pelo processo de Cross, e com os diagramas de esforços internos juntamente com as características geométrica de cada seção da estrutura do pórtico rolante (viga principal, balanços e pernas), obter as tensões de flexão, tração, cisalhamento e flambagem, em cada ponto analisado.