

UNESP



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**“JULIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

JOSÉ PAULO GRANDO

**PROJETO ESTRUTURAL E PARAMETRIZAÇÃO DE UMA
COMPORTA SEGMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS.**

**PUBLICAÇÃO
754**

Guaratinguetá – SP

2012

JOSÉ PAULO GRANDO

PROJETO ESTRUTURAL E PARAMETRIZAÇÃO
DE UMA COMPORTA SEGMENTO UTILIZANDO
O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2012

G754p	Grando, José Paulo Projeto Estrutural e Parametrização de uma Comporta Segmento Utilizando o Método dos Elementos Finitos / José Paulo Grando - Guaratinguetá : [s.n.], 2013. 160 f. : il. Bibliografia: f. 96-97 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva 1. Comportas 2. Projeto Estrutural 3. Método dos elementos finitos I. Título CDU 624.014.2(043)
-------	---

JOSÉ PAULO GRANDO

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

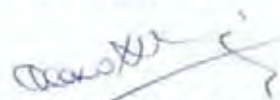


Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador / UNESP-FEG



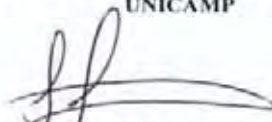
Prof. Dr. CELSO PINTO MORAIS PEREIRA
UNESP-FEG



Prof. Dr. YZUMI TAGUTI
UNESP-FEG



Prof. Dr. CECÍLIA AMELIA DE CARVALHO ZAVAGLIA
UNICAMP



Prof. Dr. LEONARDO KYO KABAYAMA
UNIFEI

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES

JOSÉ PAULO GRANDO

NASCIMENTO	20.03.1952 – TATUÍ / SP
FILIAÇÃO	Paulo Grando Maria Aparecida Soares Grando
1977/1981	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Sorocaba – FACENS
2001/2003	Mestrado em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho UNESP - Guaratinguetá
2009/2012	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

de modo especial à minha esposa *Rosa*, que com a sua força de vontade e uma paciência contida, foi a grande incentivadora para que eu seguisse meu caminho e aos meus filhos *Marlon*, *Marcelo* e *Mélani* pela ajuda e compreensão nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

à minha esposa *Rosa Maria*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivou meus estudos,

ao colega de trabalho Mestre *Pedro Galveias Lopes* que sempre me auxiliou nas dificuldades e colaborou na solução de problemas de programação,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

às secretárias da pós-graduação *Regina, Elisa e Rosiléa* pela dedicação e alegria no atendimento.

“Nós geralmente descobrimos
fazer percebendo aquilo que não devemos
fazer. E provavelmente aquele que nunca
cometeu um erro nunca fez uma descoberta”.

Confúcio

GRANDO, J. P. Projeto Estrutural e Parametrização do projeto de uma comporta segmento utilizando o método dos elementos finitos. Guaratinguetá, 2012. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

Quando os cálculos dos componentes de um projeto de equipamento industrial complexo são realizados de forma analítica em geral demanda muito tempo. No caso específico da comporta segmento, os cálculos analíticos podem tomar mais de uma semana e, após isto, os dados são passados para o projetista o qual leva aproximadamente quatro a cinco semanas para execução dos desenhos apenas de sua estrutura principal. Com a proposta desta tese que consiste no desenvolvimento de um programa em APDL (*ANSYS Parametric Designer Language*) a fim de criar um modelo parametrizado da comporta segmento, as horas de engenharia, gastas com o projeto, serão reduzidas para 1/10 do tempo gasto anteriormente. Além disto, com o modelo parametrizado obtido, será possível realizar a otimização do projeto de forma a obter um equipamento com um mínimo de material e cujas tensões e deformações estejam dentro de limites admissíveis. Definido o modelo ótimo, deverá ser feita uma ligação entre *ANSYS®* e *Mechanical Desktop*. Isto possibilitará a elaboração dos desenhos para fabricação de forma rápida e segura. Para esta pesquisa foi escolhida uma comporta segmento, mas, após o domínio desta tecnologia, a mesma poderá ser aplicada a qualquer equipamento, com enormes vantagens e rapidez.

PALAVRAS-CHAVE: Comporta segmento, projeto estrutural, parametrização, elementos finitos.

GRANDO, J. P. Structural Project and Parameterisation of one radial gate using the finite elements method. Guaratinguetá, 2012. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

When the calculations of components industrial equipment project compound in an analytic way are accomplished, in general demand a long time. In the specific case of the radial gate, the analytic calculations can take more than one week and, after this, the data are passed for the planner, which takes approximately four or five weeks for drawings execution, just of your main structure. With the proposal of this thesis that consists of the development of a program in APDL (*ANSYS Parametric Designer Language*) in order to create a parameterized model of the radial gate, the hours of engineering, worn-out with the project, they will reduced for 1/10 of the time spend previously. Besides, with the model obtained parameterized, it will be possible to accomplish the optimisation of the form project to obtain equipment with a minimum of material and whose tensions and deformations are inside of acceptable limits. Defined the great model, it should be made a connection between ANSYS® and Mechanical Desktop. This will make possible the elaboration of the drawings for production in a fast way and it holds. For this research, it was chosen a radial gate, but, after the domain of this technology, the same can be applied for any equipment with enormous benefits and rapidity.

KEYWORDS: radial gate, structural project, parameterization, finite elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comporta segmento	23
Figura 2 – Vista tridimensional de uma comporta paramétrica em MDT	24
Figura 3 – Comporta segmento de dois braços montada na obra	25
Figura 4 – Fluxograma do programa de cálculo analítico da comporta segmento	29
Figura 5 – Tabuleiro em forma de reticulado estrutural	34
Figura 6 – Distribuição da largura útil do paramento conforme Norma NBR 8883	36
Figura 7 – Coeficiente de redução λ_z conforme Norma NBR 8883	36
Figura 8 – Tipos de seções associadas aos braços.....	38
Figura 9 – Diagrama de corpo livre da viga vertical	39
Figura 10 – Diagrama de corpo livre do pórtico tipo “ π ” para 4 vigas verticais	40
Figura 11 – Diagrama de corpo livre do pórtico tipo “ π ” para 5 ou mais vigas verticais ..	41
Figura 12 – Diagrama de esforços normais no pórtico tipo “ π ”	41
Figura 13 – Diagrama de esforços cortantes no pórtico tipo “ π ”	42
Figura 14 – Diagrama de momentos fletores no pórtico tipo “ π ”	42
Figura 15 – Diagrama de corpo livre do pórtico tipo “A” para a manobra da comporta ...	43
Figura 16 – Diagrama de corpo livre da viga horizontal para as vigas verticais internas ..	47
Figura 17 – Diagrama de corpo livre da viga horizontal para a viga vertical externa	48
Figura 18 – Diagrama de corpo livre da viga vertical na base da comporta	48
Figura 19 – Diagrama de corpo livre da viga vertical no topo da comporta	49
Figura 20 – Tipo de elemento utilizado – <i>BEAM189</i>	58
Figura 21 – Elementos estruturais associados ao paramento	59
Figura 22 – Geometria da comporta mostrando os 08 painéis do paramento	60
Figura 23 – Geometria da comporta mostrando a estrutura principal modelada em <i>BEAM189</i> com as respectivas seções resistentes	60
Figura 24 – Geometria mostrando os diferentes elementos <i>BEAM189</i>	61
Figura 25 – Vinculações do modelo estrutural.....	62
Figura 26 – Vinculações e simetria do modelo estrutural	63
Figura 27 – Carregamento distribuído trapezoidal nas vigas verticais.....	64
Figura 28 – Carregamento distribuído trapezoidal máximo	64
Figura 29 – Elemento do tipo <i>SHELL93</i>	66
Figura 30 – Fluxograma da construção e análise do modelo	68
Figura 31 – Modelamento da estrutura (linhas)	70

Figura 32 – Modelamento da estrutura (constantes reais).....	70
Figura 33 – Vinculação do modelo	72
Figura 34 – Carregamento na chapa de face	73
Figura 35 – Alguns dos principais parâmetros de projeto	74
Figura 36 – Fluxograma do programa de parametrização da comporta	75
Figura 37 – Tela de saída das tensões combinadas (von Mises) do programa de parametrização em ANSYS®	76
Figura 38 – Força normal orientada em OX das coordenadas locais	77
Figura 39 – Orientação das coordenadas locais do elemento <i>BEAM189</i>	78
Figura 40 – Força cortante orientada em OY das coordenadas locais (pórtico tipo “A”) ..	78
Figura 41 – Força cortante orientada em OZ das coordenadas locais (pórtico tipo “ π ”)	79
Figura 42 – Momento fletor orientado em OY das coordenadas locais (pórtico tipo “ π ”).	79
Figura 43 – Momento fletor orientado em OZ das coordenadas locais (pórtico tipo “A”).	80
Figura 44 – Momento torçor orientado em OX das coordenadas locais	81
Figura 45 – Tensão equivalente de von Mises	81
Figura 46 – Deslocamento orientado em OX das coordenadas locais	82
Figura 47 – Deslocamento total da estrutura (USUM $\equiv$ soma das deformações) com os contornos das vigas na posição não deformada	82
Figura 48 – Tensão de von Mises (tensão combinada) – 02 braços	87
Figura 49 – Deslocamento total da estrutura (USUM) – 02 braços	88
Figura 50 – Tensão de von Mises (tensão combinada) – 03 braços	88
Figura 51 – Deslocamento total da estrutura (USUM) – 03 braços	89
Figura 52 – Tensão de von Mises (tensão combinada) – 04 braços	89
Figura 53 – Deslocamento total da estrutura (USUM) – 04 braços	90
Figura 54 - Posição dos braços da comporta	101
Figura 55 – Posição das placas verticais	102
Figura 56 – Reações na soleira devidas ao peso.....	106
Figura 57 – Carregamento na viga vertical1 (VV1)	107
Figura 58 – Seção da viga vertical 1	108
Figura 59 – Orientação das tensões na viga vertical 1	109
Figura 60 – Carregamento na viga vertical 3 (VV3)	109
Figura 61 – Seção da viga vertical 3.....	110
Figura 62 – Orientação das tensões na viga vertical 3	111

Figura 63 – Esquema de carregamento dos pórticos tipo " π "	112
Figura 64 – Seção da viga horizontal superior	113
Figura 65 – Orientação das tensões na viga horizontal superior	115
Figura 66 – Seção da viga horizontal inferior	117
Figura 67 – Orientação das tensões na viga horizontal inferior	118
Figura 68 – Seção transversal dos braços	119
Figura 69 – Seção transversal das longarinas	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Altura das almas das vigas horizontais e viga vertical central	37
Tabela 2 – Comparação dos esforços entre cálculo analítico e ANSYS®.....	84
Tabela 3 – Comparação dos esforços entre cálculo misto considerando o pórtico “A” e ANSYS®.....	86
Tabela 4 – Comparação das tensões máximas entre cálculo misto e ANSYS®	91
Tabela 5 – Tensões admissíveis do Aço Carbono ASTM A 572 / A Gr.60	100
Tabela 6 – Seleção do caso de carga	100
Tabela 7 – Tensões de placa para coluna A.....	103
Tabela 8 – Tensões de placa para coluna B.....	104
Tabela 9 – Tensões de placa para coluna C.....	105
Tabela 10 – Esforços solicitantes internos na viga vertical VV1	108
Tabela 11 – Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga vertical VV1.....	108
Tabela 12 – Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da viga vertical VV1	108
Tabela 13 – Tensão de comparação da seção da viga vertical VV1	109
Tabela 14 – Esforços solicitantes internos na viga vertical VV3	110
Tabela 15 – Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga vertical VV3	111
Tabela 16 – Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da viga vertical VV3.....	111
Tabela 17 – Tensão de comparação da seção da viga vertical VV3	111
Tabela 18 – Esforços cortantes e fletor sobre a viga horizontal superior.....	112
Tabela 19 – Largura colaborante do paramento para a viga horizontal superior	113
Tabela 20 – Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga horizontal superior	114
Tabela 21 – Tensões de flexão e de cisalhamento da viga horizontal superior	114
Tabela 22 – Tensão de comparação da viga horizontal superior	115
Tabela 23 – Esforços cortantes e fletor sobre a viga horizontal inferior	116
Tabela 24 – Largura colaborante do paramento para a viga horizontal inferior	117
Tabela 25 – Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga horizontal inferior .	117
Tabela 26 – Tensões de flexão e de cisalhamento da viga horizontal inferior	118
Tabela 27 – Tensão de comparação da viga horizontal inferior	118
Tabela 28 – Tensões de compressão, flexão e cisalhamento do braço do pórtico superior	119
Tabela 29 – Tensões de compressão, flexão e cisalhamento do braço do pórtico inferior	120
Tabela 30 – Tensão de comparação nos braços	122
Tabela 31 – Cargas nos reforços horizontais (longarinas)	123

Tabela 32 – Largura colaborante do paramento para a longarina A	124
Tabela 33 – Dimensões e propriedades geométricas da seção da longarina A	124
Tabela 34 – Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da longarina A	124
Tabela 35 – Tensão de comparação da seção da longarina A	125
Tabela 36 – Dimensões e propriedades geométricas da seção da longarina B	125
Tabela 37 – Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da longarina B	125
Tabela 38 – Tensão de comparação da seção da longarina B	125
Tabela 39 – Dimensões e propriedades geométricas da seção da longarina C	126
Tabela 40 – Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da longarina C	126
Tabela 41 – Tensão de comparação da seção da longarina C	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
APDL	<i>ANSYS® Parametric Designer Language</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
DV	<i>Variável de Projeto (Design Variable)</i>
mca	<i>metros de coluna d'água</i>
MDT	<i>Mechanical Desktop</i>
MEF	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
NBR	<i>Norma Brasileira Registrada</i>
OBJ	<i>Função Objetiva (Objective Function)</i>
SV	<i>Variável de Estado (State Variable)</i>
USUM	<i>Deslocamento total na estrutura</i>
VHI	<i>Viga Horizontal Inferior</i>
VHS	<i>Viga Horizontal Superior</i>
VV1	<i>Viga Vertical 1 (viga vertical mais externa)</i>
VV2	<i>Viga Vertical 2 (viga vertical apoiada nos braços)</i>
VV3	<i>Viga Vertical 3 (viga vertical interna aos braços)</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Coeficiente para tensão de placa engastada	---
δ	Densidade d'água	[kg/cm ³]
λ	Coeficiente de redução para largura de placa	---
σ	Tensão normal	[MPa]; [kgf/cm ²]
τ	Tensão de cisalhamento	[MPa]; [kgf/cm ²]
ω	Coeficiente de flambagem conforme Norma em função da tensão de escoamento do aço adotado e do índice de esbeltez λ	---
B	Metade da distância entre eixos de duas vigas consecutivas ou o comprimento do balanço	[cm]
c	Distância entre pontos fixos da viga	[cm]
DEM	Distância entre centros dos munhões	[cm]
E	Módulo de elasticidade longitudinal do material	[MPa]; [kgf/cm ²]
El	Elevação	[m]
ECICA	Elevação do cutelo inferior – base da comporta aberta	[m]
ELMUN	Elevação do munhão	[m]
ELSOL	Elevação da soleira (base de apoio da comporta)	[m]
ELTOPO	Elevação do topo da comporta fechada	[m]
f	Flecha ou deflexão ou deslocamento	[cm]
Fac	Força de acionamento pelo cilindro hidráulico	[kN]; [kgf]
FLA	Largura das abas do braço	[cm]
H	Altura da comporta	[cm]
HL	Altura da alma das longarinas	[cm]
hw	Altura da alma	[cm]
i	Raio de giração da seção transversal	[cm]
I	Momento de inércia	[cm ⁴]
k	Coeficiente para tensão de placa	---
L	Comprimento	[cm]
LA	Largura da aba das longarinas	[cm]
LP	Largura das placas	[cm]
Lu	Largura colaborante da chapa do paramento	[cm]
M	Momento fletor	[kN.m]; [kgf.cm]
MS	Momento estático	[cm ³]
NA	Nível d'água	[m]

NP	Número de painéis para transporte e montagem na obra	---
NVT	Número de vigas verticais	---
p	Pressão	[mca]; [MPa]; [kgf/cm ²]
PVHI	Ângulo entre as vigas horizontais	[rad]
qs	Carga na soleira (altura da coluna d'água x largura de influência)	[kN/cm]; [kgf/cm]
R	Raio do paramento	[cm]
RVV1	Reação de apoio na Viga Vertical 1	[kN]; [kgf]
t	Espessura do paramento	[cm]
TE	Tamanho do elemento	[cm]
tw	Espessura da alma	[cm]
V	Esforço cortante	[kN]; [kgf]
Vão	Distância entre as faces dos pilares de concreto	[cm]
Y _{LN}	Distância da linha de referência à Linha Neutra	[cm]
W	Módulo de resistência	[cm ³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Considerações gerais	20
1.2	Objetivos da tese	21
1.3	Conceito e classificação das comportas	21
1.4	Justificativas da tese	26
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	28
2.1	Processo analítico	28
2.1.1	Introdução	28
2.1.2	Cálculo de uma comporta segmento	28
2.1.3	Determinação dos reforços solicitantes internos no pórtico tipo “A”	49
2.1.4	Parametrização da comporta em elemento <i>BEAM189</i>	65
2.2	Processo numérico por elementos finitos	65
2.2.1	Introdução	65
2.2.2	Modelagem paramétrica	66
3	METODOLOGIA	69
3.1	Modelagem paramétrica da comporta segmento no <i>ANSYS®</i> com elementos tipo <i>SHELL93</i>	69
3.1.1	Descrição da análise	69
3.1.2	Programa paramétrico	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
4.1	Resultados do programa paramétrico da comporta segmento modelada com elementos <i>BEAM189</i>	77
4.2	Estudo comparativo entre a estrutura da comporta calculada analiticamente e em <i>ANSYS®</i> com elementos <i>BEAM189</i>	83

4.3	Estudo comparativo entre a estrutura da comporta calculada analiticamente, acrescentando os valores de esforços cortantes e momentos fletores no pórtico tipo “A” obtidos em elementos finitos e os resultados em ANSYS® com elementos <i>BEAM189</i>	85
4.4	Resultados da comporta segmento modelada em ANSYS® com elementos <i>SHELL93</i>	87
4.5	Estudo comparativo entre a estrutura da comporta calculada analiticamente e em ANSYS® com elementos <i>SHELL93</i>	91
4.6	Análise dos resultados da parametrização da comporta segmento	92
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
	REFERÊNCIAS	96
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	97
	GLOSSÁRIO	98
	APÊNDICE A – Cálculo analítico de uma comporta segmento	99
	APÊNDICE B – Programa paramétrico da comporta segmento de dois braços em ANSYS® com elementos <i>BEAM189</i>	127

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra a evolução da utilização desse tipo de comporta nos projetos hidráulicos, propõe os objetivos desta tese referente à necessidade da parametrização do projeto da comporta segmento, bem como apresenta a sua forma e geometria e expõe o estado da arte.

1.1 Considerações gerais

Comportas hidráulicas são dispositivos utilizados para controlar vazões hidráulicas em qualquer conduto livre ou forçado. Sua origem decorreu do avanço tecnológico das ações de irrigação, abastecimento d'água, navegação fluvial e da necessidade de extravasar o volume excedente de água em pequenas barragens artificiais.

“O desenvolvimento das comportas na Holanda seguiu um padrão semelhante ao da China que foram os primeiros a construir canais para escoamento da água de enchentes. Ali, no fim do século XIV, as eclusas eram bastante comuns. O enchimento e o esvaziamento eram feitos por aberturas na comporta que dispunham de dispositivos para seu fechamento. A invenção desse sistema é creditada a Leonardo da Vinci (1452/1519) e é usada ainda hoje em instalações de eclusas de pequeno porte.” (ERBISTE, 1987).

“As primeiras comportas metálicas surgiram por volta de 1850. Até o final do século XIX, ocorreram várias invenções e um grande desenvolvimento dos tipos existentes motivado pela necessidade de construção de comportas cada vez maiores. O primeiro desenho de uma comporta segmento foi feito por Leonardo da Vinci. A mais antiga aplicação conhecida de comporta segmento ocorreu em 1853 no rio Sena, em Paris, onde foram instaladas quatro comportas submetidas à compressão, com 8,75 m de vão e 1 m de altura, construídas pelo engenheiro francês Poirée. De acordo com F. Hartung, por volta de 1870 ocorreu nos EUA uma invenção paralela da comporta segmento. Diversos autores dão o nome do inventor como sendo T. Parker, que teria, entretanto vendido suas idéias a Jeremiah Burnham Tainter. Este, em 1886, patenteou em seu nome. A comporta ali descrita apresentava três braços radiais e construção em madeira. O acionamento era feito por meio de correntes instaladas a montante do paramento. Outra patente de Tainter previa a utilização em eclusas de duas comportas

segmento instaladas em série. As comportas atuavam como portas da eclusa e serviam também para o enchimento e o esvaziamento da câmara. Por volta de 1895 já apareciam nos EUA relatórios a respeito da utilização de comportas segmento no canal Illinois - Mississipi. As comportas segmento foram usadas inicialmente nos EUA para controle de vazão em condutos e utilizadas pela primeira vez em aquedutos de eclusas na construção do New York Barge Canal, em 1905. Outra aplicação bastante antiga deu-se no delta no rio Nilo, em 1860. Foram construídas pelo engenheiro francês Mouguel Bey 132 comportas com 6 m de vão e 5,1 m de altura de represamento, com a característica principal de que os braços trabalhavam a tração. Foram chamadas à época de "comportas cilíndricas com raios submetidos a tração" de acordo com Streiff e eram de ferro fundido sendo operadas por guinchos móveis." (ERBISTE, 1987).

1.2 Objetivos da tese

Um objetivo desta tese é apresentar uma nova forma de abordagem para o cálculo estrutural de uma comporta segmento, que é uma estrutura metálica não seriada, aplicando o método de elementos finitos de forma parametrizada, em face das significativas diferenças nas tensões dos braços entre o cálculo analítico e o cálculo numérico.

Após análise das causas dessas diferenças entre as tensões verificou-se a necessidade de encontrar uma forma de obter os valores de esforços solicitantes internos nos braços no plano vertical (aqui denominado pórtico em "A", pela semelhança com tal letra), cálculo este não disponível na literatura técnica em vista de se tratar de uma estrutura em grelha, mas com elementos curvos. Dessa forma, outro objetivo é a necessidade de obter os momentos fletores e esforços cortantes nesse plano vertical que passa pelos braços através do cálculo numérico em outro tipo de elementos finito.

Em consequência da parametrização, torna possível a aplicação do processo de otimização de maneira a se obter uma estrutura minimizada em massa (menor peso), de menor custo (maior lucro) e melhor funcionamento (maior segurança).

1.3 Conceito e classificação das comportas

Para atingir os objetivos propostos, foi escolhido um equipamento de grande porte e de grande utilidade para o país em função da necessidade premente na obtenção de um bem de consumo raro hoje em dia que é a eletricidade. O equipamento é uma comporta hidráulica para utilização em plantas hidrelétricas, em eclusas (estruturas que visam permitir a navegação através da elevação das embarcações em barragens), em estações de bombeamento, em saneamento e irrigação.

Uma comporta pode ser definida como um dispositivo mecânico utilizado para controlar vazões hidráulicas em qualquer conduto livre ou forçado e de cuja estrutura o conduto independe para sua continuidade física e operacional.

A definição de comporta segmento bem como sua geometria básica é dada pela Norma NBR 7259.

Assim, comporta segmento é uma comporta de rotação com paramento curvo correspondente a um segmento de cilindro com diretriz circular, apresentando braços radiais que transmitem a pressão hidráulica para mancais fixos. O perfil do tabuleiro, conforme mostrado na Figura 1 é um segmento circular.

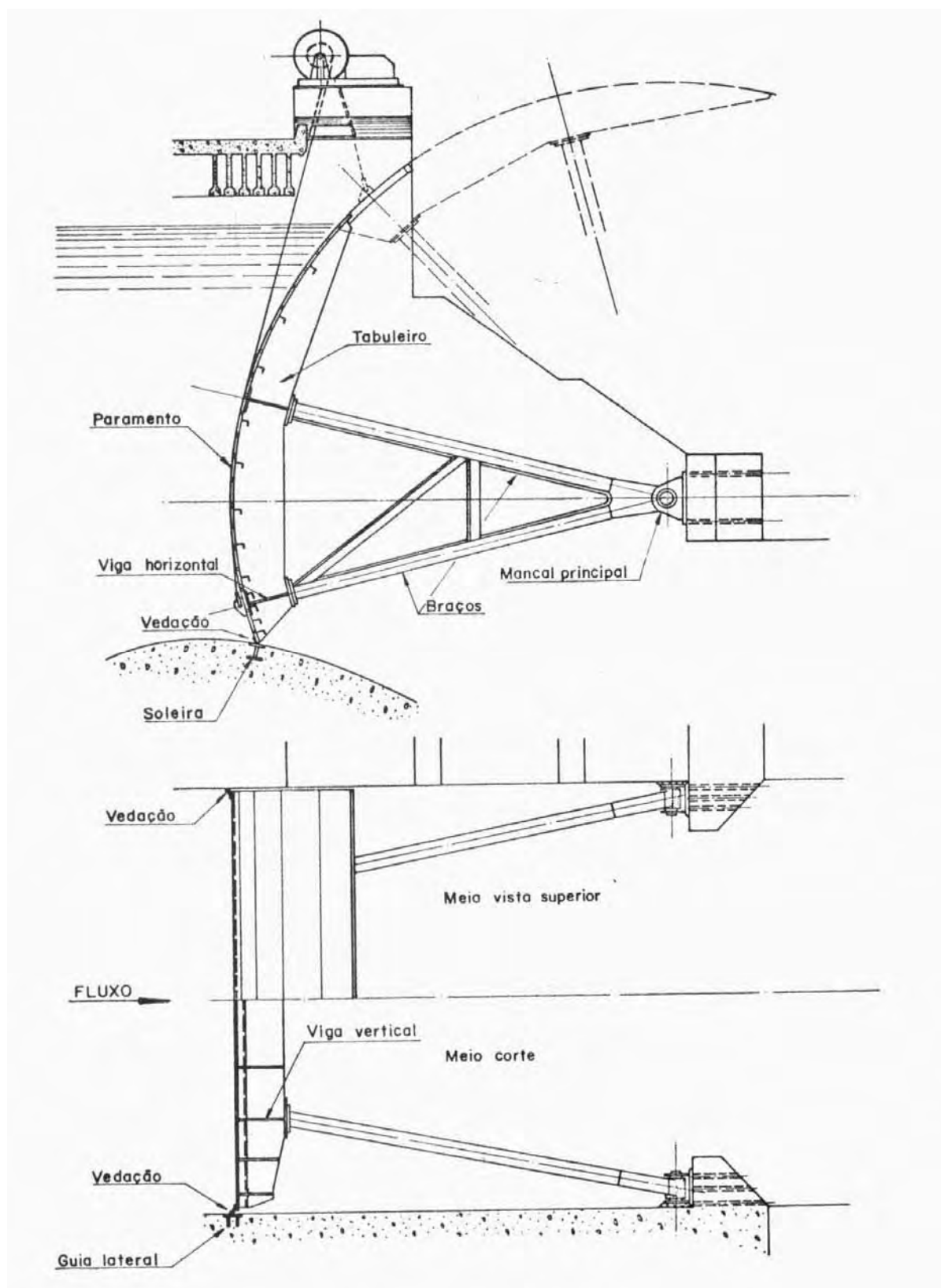


Figura 1 – Comporta segmento.

Na Figura 2 é mostrada uma comporta segmentada desenhada em *Autocad/Mechanical Desktop* com a indicação dos seus elementos estruturais mais importantes.

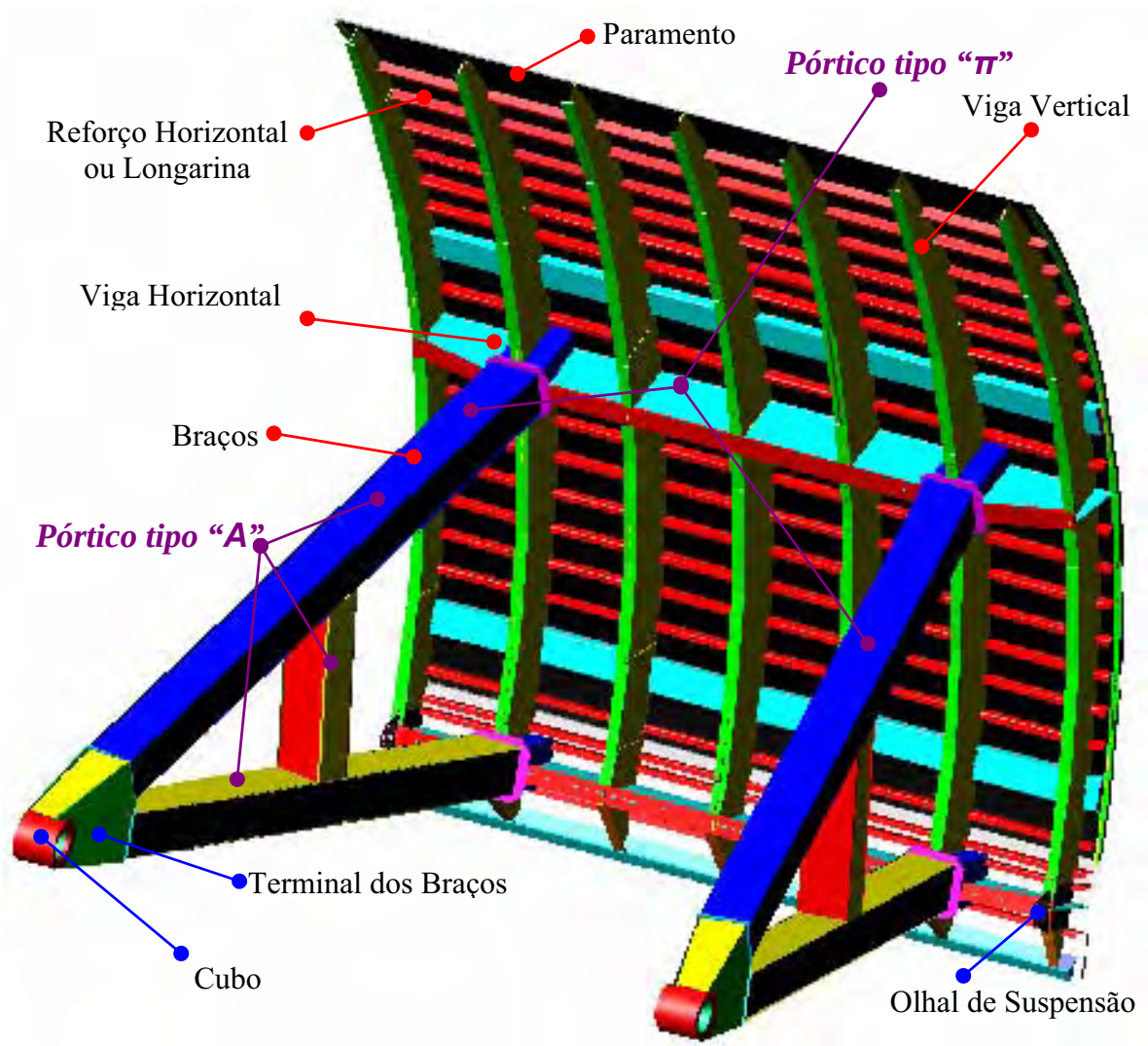


Figura 2 – Vista tridimensional de uma comporta paramétrica em MDT.

Na Figura 3 apresenta-se a comporta segmento de superfície de UHE ITAPEBI com vão livre de 17,4 [m], altura de 21,7 [m] e raio de 20,0 [m] em fase final de montagem na obra onde se pode relacionar o desenho de projeto com a estrutura final.



Figura 3 – Comporta segmento de dois braços montada na obra.

1.4 Justificativas da tese

Levando em consideração o fato de que nas referências bibliográficas está listada o que há de mais recente e de maior importância sobre o assunto, pode-se afirmar que há muito tempo não se disserta sobre comportas. A motivação principal se deve ao fato de que há poucos fabricantes e pouco interesse a nível universitário sobre o assunto pela sua alta especificidade. Dessa forma, o estado da arte é praticamente o mesmo há mais de três décadas.

A pouca evolução que tem ocorrido nessa área, a nível mundial, se refere ao estudo de casos, especialmente acidentes e ao efeito da aceleração da corrosão devida à alta tensão aliada à alteração da qualidade da água (poluição).

Em decorrência da falta de ferramental de cálculo analítico para a resolução de grelhas curvas que é o caso específico da estrutura reticulada da comporta segmento e de testes mal sucedidos quando se aplicam os mais avançados processos de cálculo de grelhas planas, está sendo proposta uma simbiose entre o cálculo analítico com o cálculo numérico para obtenção dos esforços solicitantes internos para o pórtico tipo “A” decorrentes do carregamento sobre a comporta. Dessa forma, será demonstrada que a aplicação dos valores de momento fletor e esforço cortante obtidos na parametrização em ANSYS® com elementos tipo *BEAM189* no cálculo analítico, obtém-se valores de tensões no braços compatíveis com o que se obtém com a solução da comporta em ANSYS® com elementos tipo *SHELL93*. Portanto, esta tese visa inicialmente alertar os engenheiros calculistas sobre os projetos de comporta segmento atualmente em execução sobre a falta de eficácia e confiabilidade nos cálculos analíticos de amplo conhecimento e uso no meio técnico dos equipamentos hidromecânicos.

Alternativas de cálculo através do uso de elementos finitos em casca ou sólido podem ser alternativas válidas, mas a falta de sua parametrização leva a dispêndio precioso de tempo. Além disso, essa ferramenta deveria ser usada para validação do cálculo analítico e para se verificar os pontos de concentração na estrutura que não são obtidos de forma confiável em outros métodos de cálculo, por terem uma solução aproximada do problema.

Dessa forma, sugere-se que os processos de cálculo analítico de comportas segmento já consagrados no meio dos equipamentos hidromecânicos sejam revistos, implementados, modificados ou, como é proposto nesta tese, passe a ser um cálculo misto, visto incorporar valores advindos do cálculo numérico. É certo que estão sendo desenvolvidos projetos com

segurança inferior ao requisitado nas Normas e essa pode ser a razão de alguns acidentes ou necessidade de reforços que foram detectados em algumas obras, não só no Brasil como no mundo.

1.5 Estrutura da tese

A seguir são apresentados os resumos dos 6 capítulos que são discutidos com maiores detalhes.

O capítulo 1 faz a introdução desta tese, propondo os objetivos referentes à necessidade da parametrização de projetos, mostra a evolução da utilização de uma comporta segmento nos projeto hidráulicos bem como a sua forma e geometria e mostra o estado da arte.

O capítulo 2 realiza o cálculo analítico estrutural de uma comporta segmento e serve para demonstrar que a parametrização da estrutura em ANSYS® alcança resultados aceitáveis. Entretanto, a detecção dos possíveis pontos de concentração de tensões só pode ser obtida de forma mais precisa pelo cálculo numérico. Ademais, define a parametrização dentro do ambiente do programa ANSYS® através de uma linguagem especial chamada APDL que é derivada da linguagem Fortran com adições de comandos especiais próprias para a elaboração de modelos matemáticos em elementos finitos.

O capítulo 3 introduz a parametrização de uma comporta segmento com o programa paramétrico. Neste caso, como podemos ter comportas segmento de superfície ou vertedouro onde, no Brasil é praxe a utilização de dois pares de braços e de fundo de grande porte que podem possuir três ou quatro pares de braços, desenvolvemos os paramétricos para os três casos principais.

O capítulo 4 mostra os resultados apresentados pelos programas de parametrização da comporta segmento através de figuras, gráficos e tabelas comparativas.

O capítulo 5 mostra as conclusões da tese ora desenvolvida e propõe sugestões para novos trabalhos. Tais trabalhos têm que ter em vista a necessidade cada vez mais premente de se obter respostas mais rápidas e precisas da engenharia a fim de reduzir o ciclo e o custo do projeto e da fabricação para que a indústria nacional se torne mais competitiva.

CAPÍTULO 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Processo analítico

2.1.1 Introdução

O cálculo analítico de uma comporta tem a finalidade de validar o cálculo numérico em elementos finitos e verificar a precisão da parametrização em ANSYS®.

Toda a metodologia aplicada no cálculo estrutural é de ampla utilização pelos fabricantes dos equipamentos e é apoiada pelas constantes verificações realizadas pelos compradores e seus consultores contratados para validação de toda a documentação enviada para aprovação. É apoiada, ainda, por diversas normas de cálculo e fabricação, além de uma relativamente vasta bibliografia tanto de cálculo estrutural geral, como específica. Dentre a bibliografia específica deve-se ressaltar o livro **Comportas Hidráulicas**, 1987, do autor **Paulo C. F. Erbiste**, professor da UERJ e consultor das mais renomadas companhias de geração do ramo energético.

2.1.2 Cálculo de uma comporta segmento

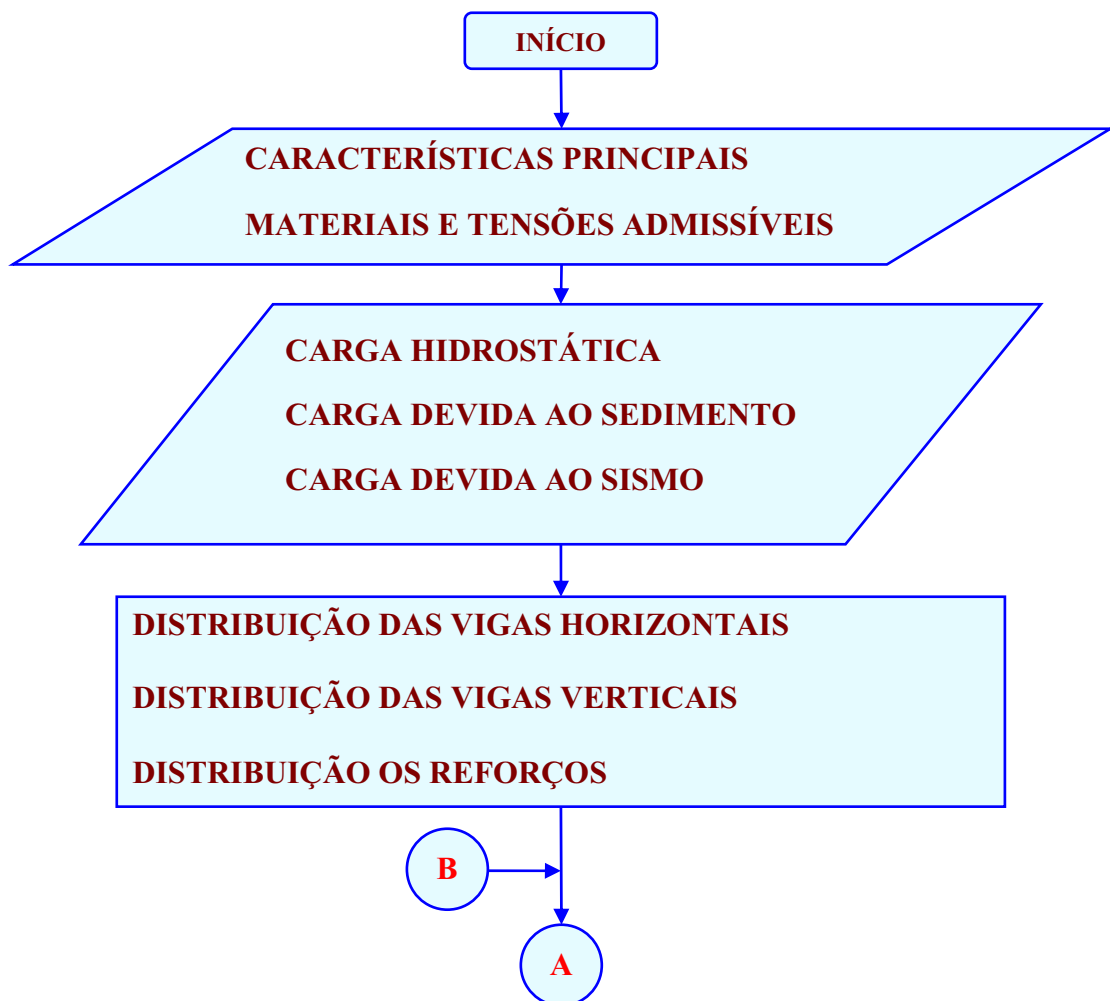
Inicialmente são fornecidas pelo cliente, as características principais onde a comporta deve ser instalada. Dentre essas características destacam-se: níveis d'água, elevação da base da comporta (soleira), vão livre, altura livre, nível das articulações e, quando aplicável, se há carregamento devido sedimentos ou sobre-carregamento devido abalo sísmico.

São acrescentadas algumas características necessárias ao desenvolvimento do cálculo como: o número adotado de braços, vigas horizontais, vigas verticais, reforços que formam um reticulado o qual fornece a resistência ao paramento que recebe toda a carga d'água, altura vedada (para comportas de fundo), a largura entre apoios formados pelas articulações

(também chamadas de mancais ou munhões) as quais descarregam o carregamento para uma viga protendida (ou metálica) e desta para as paredes de concreto da barragem.

A seguir são escolhidos os materiais usados na fabricação e calculadas as tensões admissíveis (limites máximos) para cada tipo de solicitação.

A partir desses dados iniciais e materiais adotados inicia-se o cálculo estrutural analítico que pode ser descrito em forma de diagrama como da Figura 4, bem como observado através do exemplo numérico no APÊNDICE A.



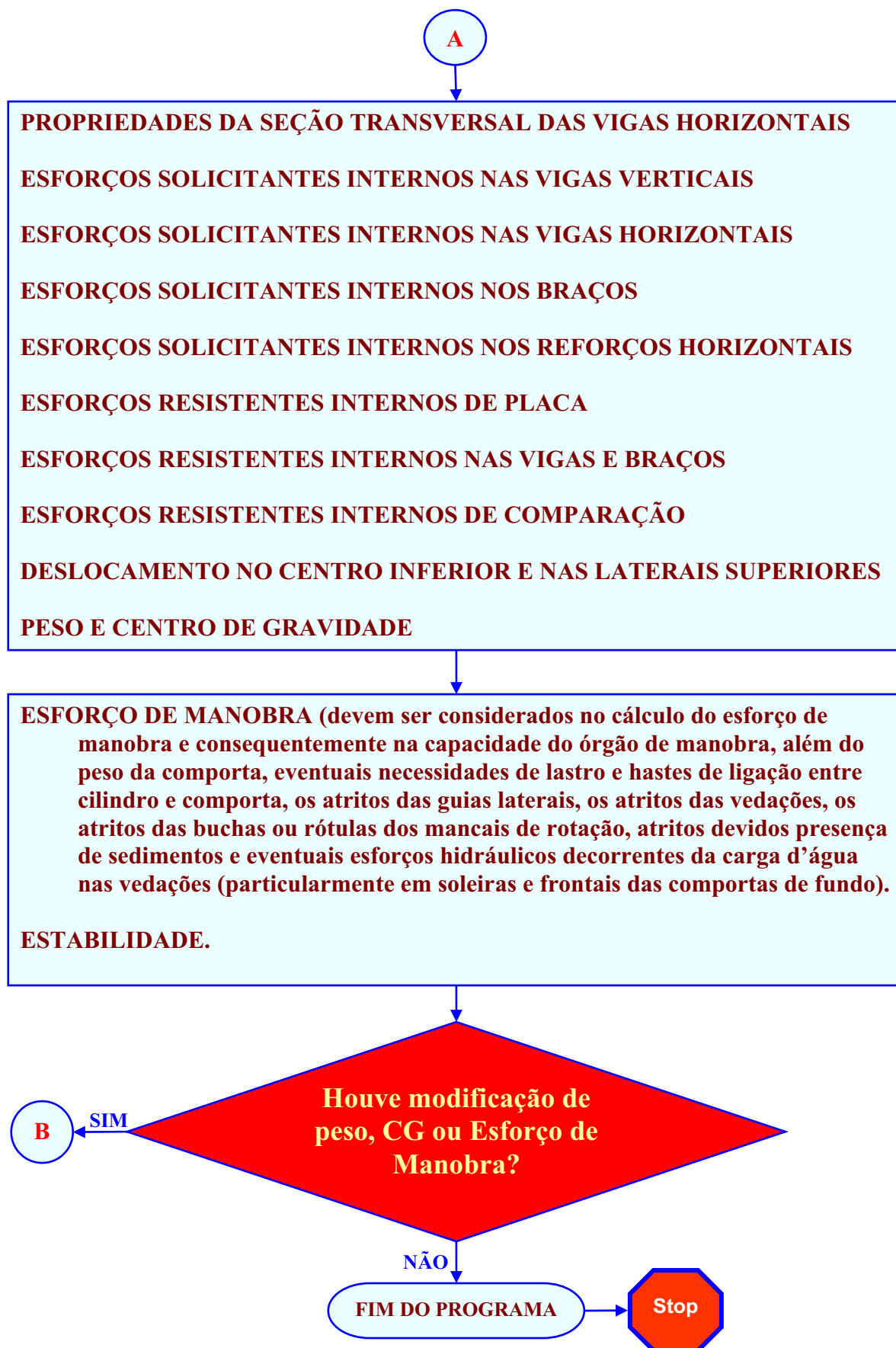


Figura 4 – Fluxograma do programa de cálculo analítico da comporta segmento.

2.1.2.1 Distribuição das vigas horizontais

No caso de comportas de superfície com dois pares de braços se busca o carregamento equilibrado entre a viga horizontal superior e viga inferior. Tendo em vista que normalmente o cilindro hidráulico atua nas proximidades da viga horizontal inferior e quando este fica sem carga, o peso da comporta é repassada da base da comporta para a soleira, sugere-se a seguinte distribuição angular inicial das vigas horizontais:

- da soleira até a viga horizontal inferior: entre 7% a 10% do ângulo total em carga;
- da viga horizontal inferior até a viga horizontal superior: entre 46% a 48% do ângulo total em carga.

Para comportas de fundo com três pares de braços se busca uma deflexão do topo da comporta, mais precisamente a região de vedação superior, de menor valor possível e o mais próximo da pré-compressão dessa vedação, é sugerida a seguinte distribuição angular inicial das vigas horizontais:

- da soleira até a viga horizontal inferior: entre 10% a 11% do ângulo total em carga;
- da viga horizontal inferior até a viga horizontal intermediária: 36,3% do ângulo total em carga.
- da viga horizontal intermediária até a viga horizontal superior: 36,5% do ângulo total em carga.

Para comportas de fundo com quatro pares de braços é similar à comporta de fundo de três braços e, portanto, indica-se a seguinte distribuição angular inicial das vigas horizontais:

- da soleira até a viga horizontal inferior: entre 8% do ângulo total em carga;
- da viga horizontal inferior até a viga horizontal intermediária inferior: 26,3% do ângulo total em carga.
- da viga horizontal intermediária inferior até a viga horizontal intermediária superior: 26,8% do ângulo total em carga
- da viga horizontal intermediária superior até a viga horizontal superior: 27,3% do ângulo total em carga.

2.1.2.2 Distribuição das vigas verticais

Tendo em vista que o cilindro hidráulico normalmente atua na intersecção da viga horizontal inferior com a viga vertical externa (VV1), esta não pode estar muito distante do pilar lateral de concreto para que o balanço do cilindro não seja excessivo. Assim, deve-se afastar a viga vertical externa da metade do diâmetro do cilindro mais uma folga deste para a parede de concreto. Recomendamos que a dimensão da placa externa lateral da comporta denominada de coluna “A” seja de 700 [mm] para quando o cilindro hidráulico tem capacidade de carga entre 0,9 e 1,2 [MN].

As vigas internas a partir da segunda viga vertical, aqui denominadas de VV3, devem ser espaçadas igualmente.

A viga vertical mais próxima da viga vertical externa, aqui denominada de VV2 deve ter um espaçamento tal que o momento fletor máximo da viga horizontal superior, que ocorre no seu centro e da viga horizontal inferior, que ocorre no apoio dos braços em face da presença do cilindro hidráulico, estejam muito próximos. Outra importante razão para que a viga de apoio dos braços (VV2) deva estar mais próxima da viga externa do que da interna é para que o ângulo que o braço faz com o plano do pórtico “ π ” não seja muito acentuado. Para comportas cujo vão e altura tenham valores relativamente próximos, é comum que a placa da coluna “B” (placa entre vigas verticais VV1 e VV2) seja entre 35% e 40% menor na largura que a coluna “C” (placa entre vigas verticais VV2 e VV3).

2.1.2.3 Distribuição dos reforços horizontais

Em verdade, são os reforços horizontais, também normalmente chamados de longarinas, juntamente com as vigas verticais que dividem o paramento em placas. Como estas apresentam tensões importantes no plano do paramento que devem ser somadas unidirecionalmente às tensões das vigas horizontais, vigas verticais e reforços e posteriormente combinadas no seu plano, deve-se posicionar os reforços de forma a que as tensões de placa tenham no máximo valor de 75% da tensão admissível para o paramento.

Para diminuir o número de reforços se recomenda a elaboração de uma rotina que minimize o seu número e maximize a tensão de placa até o máximo recomendado acima.

Observe-se que as tensões das vigas horizontais devem ser combinadas apenas com as placas que participam de sua largura colaborante conforme Norma. Dessa forma recomenda-se que essas placas mais próximas das vigas horizontais tenham tensões máximas 20% menores que as demais.

Após a distribuição de todos os elementos estruturais, obtém-se a estrutura frontal da comporta denominada de tabuleiro de acordo com o esquema da Figura 5. É conveniente indicar que todos os valores numéricos dessa figura são definidos em milímetros.

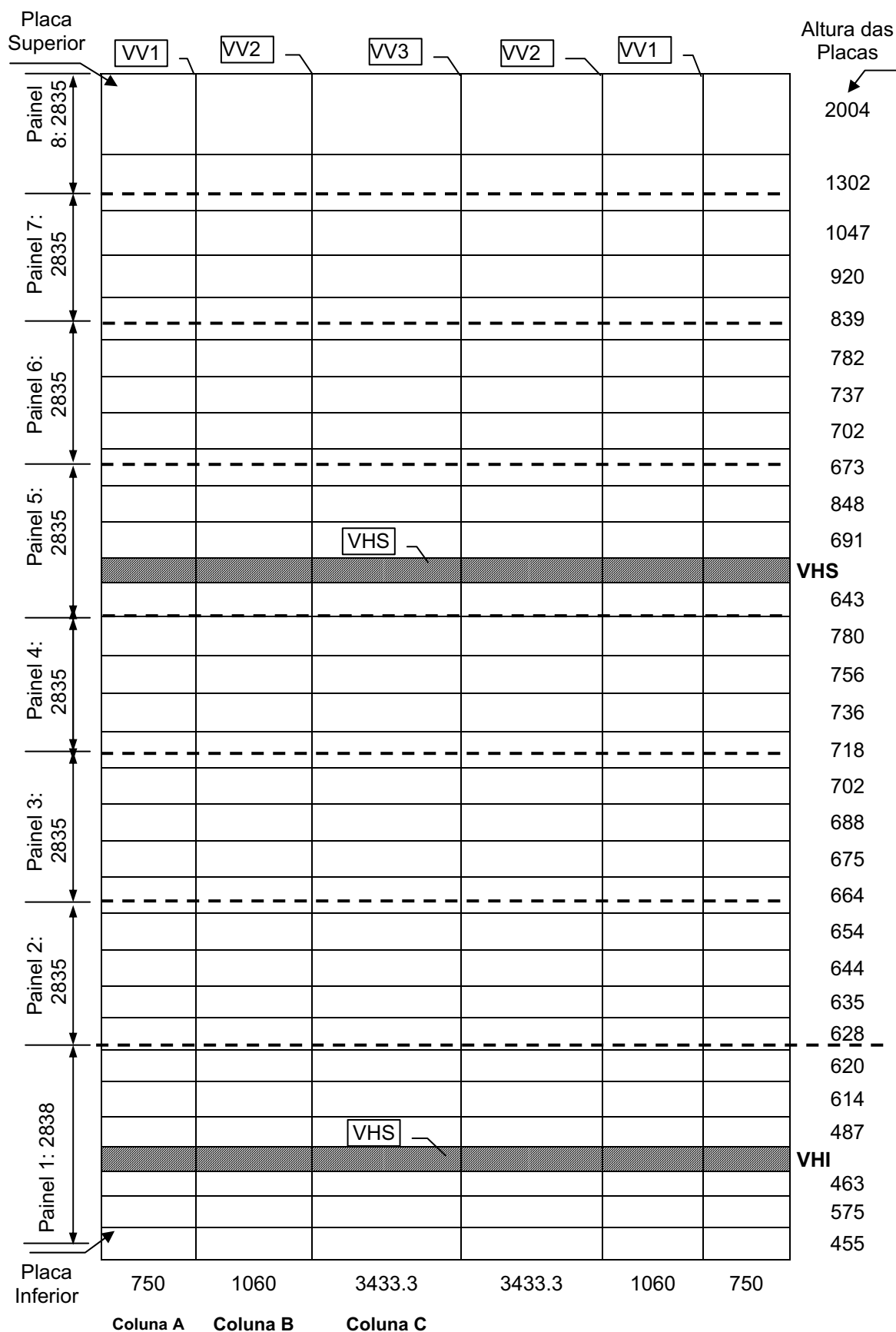


Figura 5 – Tabuleiro em forma de reticulado estrutural

2.1.2.3 Características geométricas das seções transversais

2.1.2.3.1 Vigas verticais, horizontais e reforços

O cálculo da largura colaborante da chapa de face deve ser feito conforme a Norma adotada a qual fornece um coeficiente menor que 1 diminuindo a meia largura da placa entre duas vigas conforme Figura 6. Para este processo, deve-se obter o coeficiente redutor de acordo com a Figura 7.

$$L_u = 2 \cdot B \cdot \lambda \quad (1)$$

sendo: $L_u \equiv$ largura colaborante de chapas;

$B \equiv$ Metade da distância entre eixos de duas vigas consecutivas ou o comprimento do balanço;

$\lambda \equiv$ Coeficiente de redução.

Notar que para chapas curvas como o paramento existe uma outra restrição da largura colaborante (L_u) que não deve ultrapassar a:

$$L_u = 1,56 \cdot \sqrt{R \cdot t} \quad (2)$$

sendo: $L_u \equiv$ largura colaborante do paramento na viga;

$R \equiv$ raio externo do paramento;

$t \equiv$ espessura da chapa do paramento.

O próximo passo é adotar uma seção para a viga vertical lateral (VV1) outra para a viga vertical central (VV2) e outra para a viga horizontal. Por motivos estruturais e de flecha, quanto maior a coluna d'água, maior a seção das vigas. Assim, em princípio recomenda-se para a altura das almas os valores da Tabela 1.

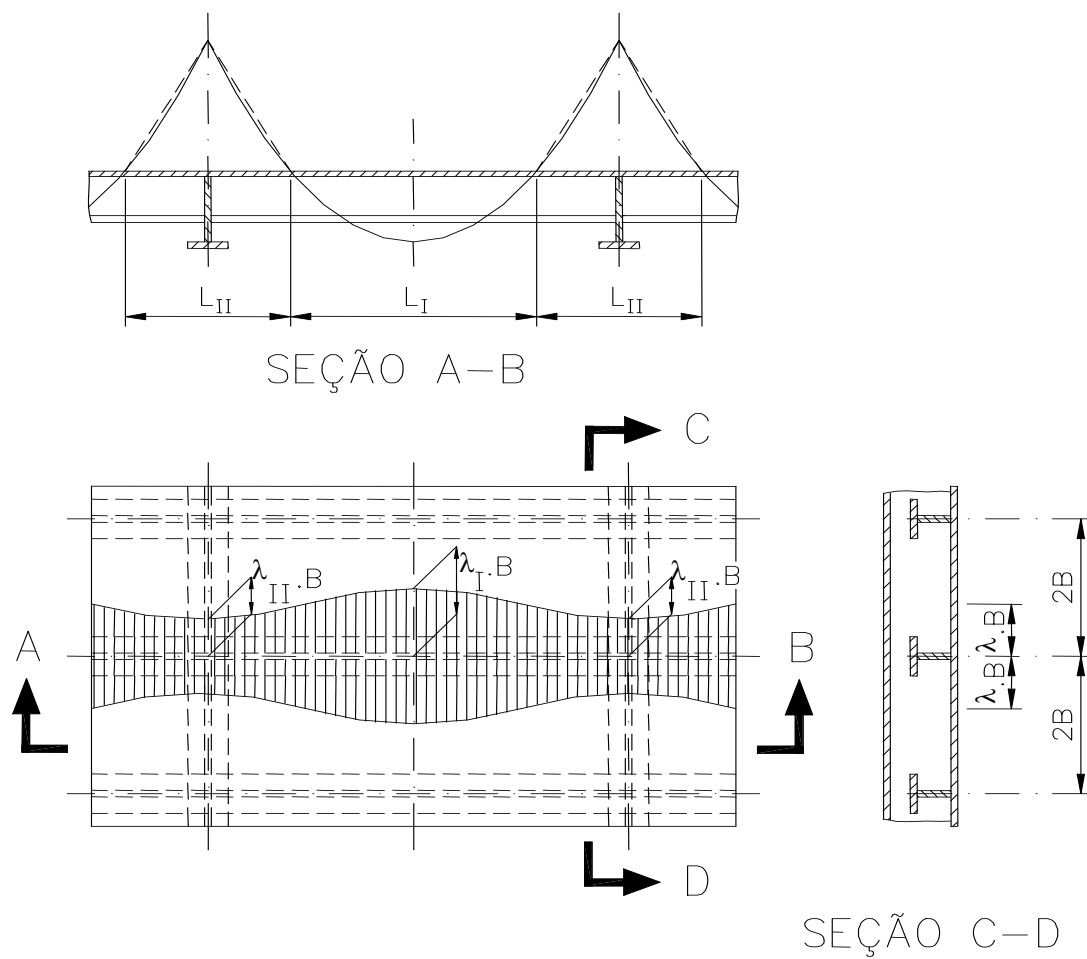


Figura 6 – Distribuição da largura útil do paramento conforme Norma NBR 8883.

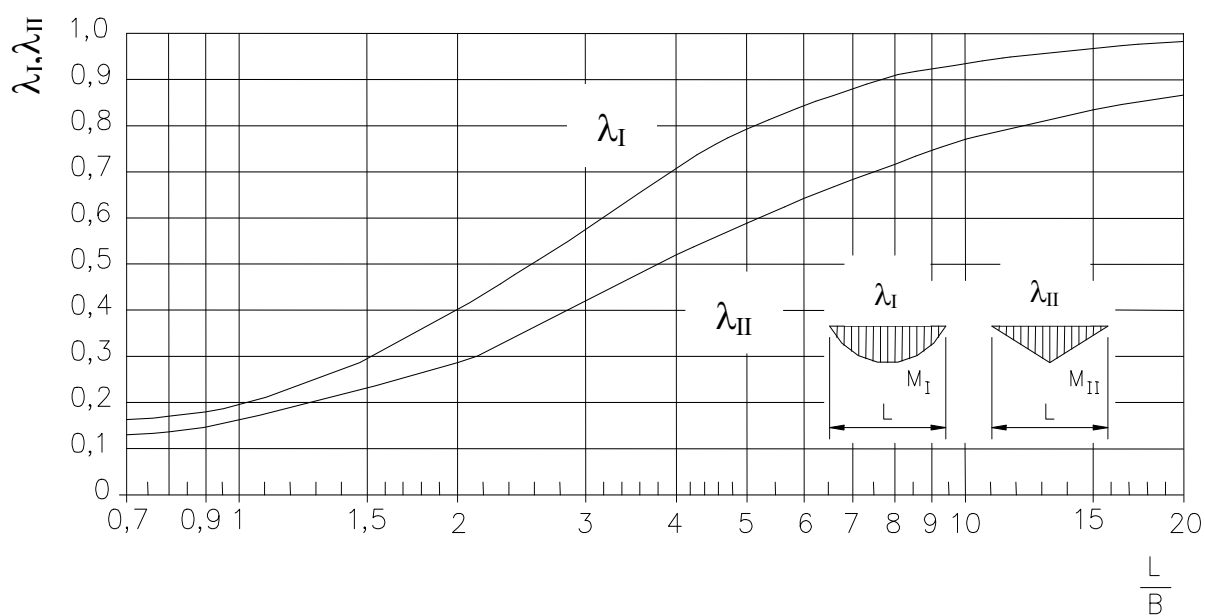


Figura 7 – Coeficiente de redução λ conforme Norma NBR 8883.

Tabela 1 – Altura das almas das vigas horizontais e viga vertical central.

Coluna d'água na soleira	altura da alma
até 5 [m.c.a.]	1/12 L
10 [m.c.a.]	1/10 L
15 [m.c.a.]	1/9 L
23 [m.c.a.]	1/8 L
35 [m.c.a.]	1/7 L

sendo: $L \equiv$ vão de apoio da viga horizontal (distância entre braços).

Para a largura das abas recomenda-se que tenha aproximadamente 1/5 da altura da alma.

Para a espessura da alma, quando esta tem uma parte da seção em compressão, a Norma DIN 4114 afirma que se a espessura da alma é igual ou maior que altura da alma dividida por 45, pode ser considerada estável. Assim,

$$hw / tw \leq 45 \quad (3)$$

sendo: $hw \equiv$ altura da alma da viga;

$tw \equiv$ espessura da alma da viga.

Para a espessura das abas a Norma DIN 4114 afirma que a relação desigualdade da equação (4) for atendida, não ocorrerá flambagem lateral da viga.

$$i > c/40 \quad (4)$$

sendo: $i \equiv$ raio de giração da seção formada pela aba e 1/5 da altura da alma;

$c \equiv$ distância entre pontos fixos da viga.

Para se obter essa relação, recomendamos em princípio adotar uma espessura de chapa padrão superior à espessura da alma.

Após esses procedimentos deve-se calcular o baricentro, a inércia, os módulos de resistência para os diversos pontos de variação da seção, bem como os momentos estáticos para esses mesmos pontos.

2.1.2.3.2 Braços

Em relação aos braços, pode ser adotada a geometria da seção transversal em caixão (quando a comporta tem grandes cargas ou grandes dimensões, normalmente altura ou largura maior que doze metros), tipo “I” (quando a sua dimensão e carga hidráulica são médias) e tipo tubular (para comportas de pequeno porte, normalmente altura e largura inferior a seis metros), conforme Figura 8. Neste caso, deve-se calcular as características geométricas da seção do braço adotado, sem recorrer ao cálculo de largura útil.

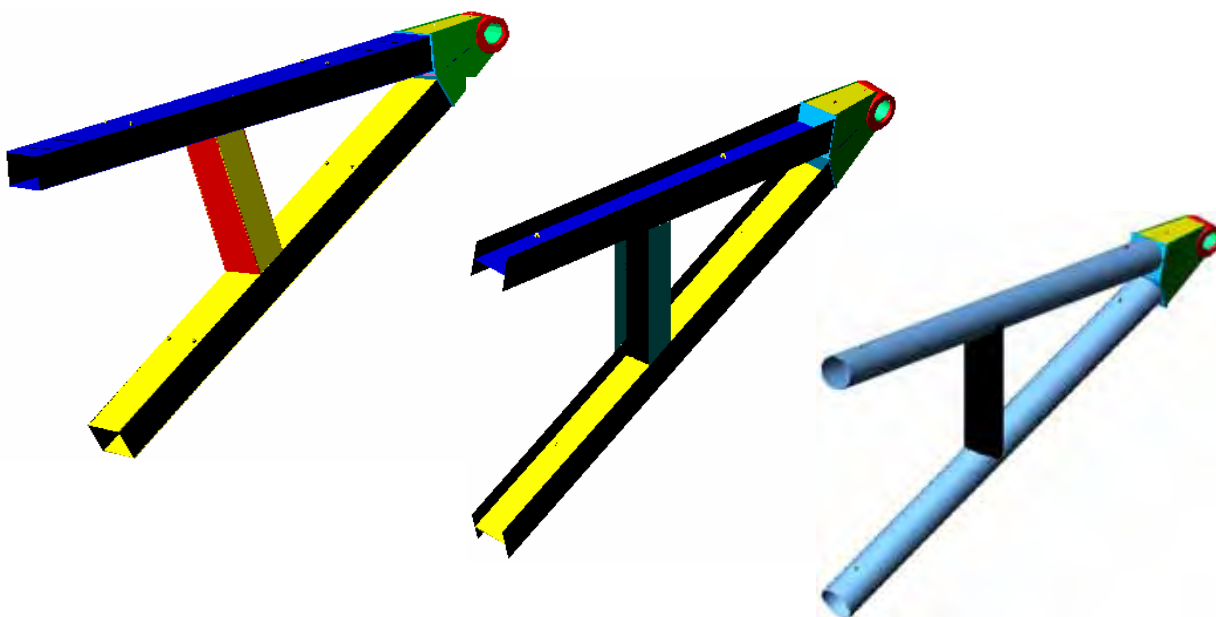


Figura 8 – Tipos de seções associadas aos braços.

2.1.2.4 Esforços solicitantes internos nas vigas verticais

No caso das vigas verticais deve-se fazer uma distinção em relação às comportas com dois braços, que normalmente são adotadas para as de superfície e as de três e quatro braços que normalmente são adotadas para os descarregadores de fundo. Tendo em vista que no primeiro caso como existem apenas dois apoios, o elemento estrutural é isostático enquanto no segundo caso é hiperestático e deve ser resolvido por método de cálculo correspondente.

No caso mais comum de comportas de superfície com dois braços (na verdade são dois pares horizontais de braços), sabendo-se que a carga hidrostática é triangular, lineariza-se o comprimento curvo da chapa de paramento e aplica as equações de (5) a (13) para se

encontrar os esforços solicitantes internos sobre o diagrama de corpo livre da Figura 9. No caso da viga vertical externa possuir o cilindro hidráulico deve considerar o momento fletor produzido pelo esforço de manobra e pelo braço que vai do ponto de atuação do cilindro até o baricentro da seção transversal da viga correspondente.

Como sugestão, deve-se calcular os esforços solicitantes internos em cada posição dos reforços horizontais. Tendo em vista que a viga externa é a menos carregada de todas, recomenda-se o cálculo de pelo menos a viga externa (VV1) e uma viga interna entre braços (VV3) por ser a mais carregada. A viga vertical de apoio dos braços (VV2), embora tenha um menor carregamento que a viga interna, deve ter sua seção transversal, no mínimo, igual a da interna.

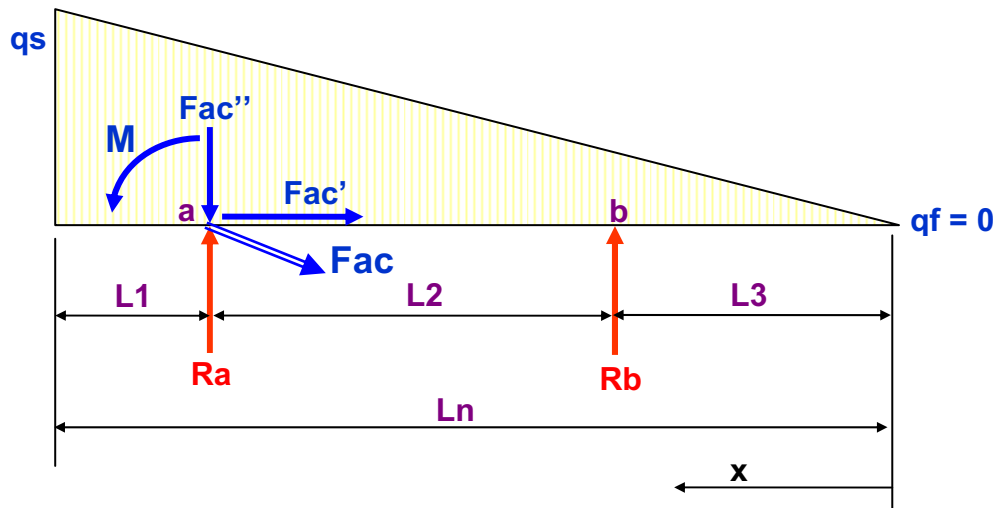


Figura 9 – Diagrama de corpo livre da viga vertical.

$$q(x) = q_s / L_n \quad (5)$$

sendo: $q_s \equiv$ carga na soleira (altura da coluna d'água x largura de influência)

$$R_a = (q_s \cdot L_n / 2 - R_b) \quad (6)$$

$$R_b = [q_s \cdot (L_n / 2) \cdot (L_n / 3 - L_1) - M] / L_2 \quad (7)$$

Equações para o esforço cortante:

$$[0] < x < [L_3]: V(x) = q(x) \cdot x / 2 \quad (8)$$

$$[L_3] < x < [L_2 + L_3]: V(x) = q(x) \cdot x / 2 - R_b \quad (9)$$

$$[L_3 + L_2] < x < [L_1 + L_2 + L_3]: V(x) = q(x) \cdot x / 2 - R_b - R_a \quad (10)$$

Equações para o momento fletor:

$$[0] < x < [L_3]: M(x) = q(x) \cdot x^2 / 6 \quad (11)$$

$$[L_3] < x < [L_2 + L_3]: M(x) = q(x) \cdot x^2 / 6 - R_b \cdot (x - L_3) \quad (12)$$

$$[L_3 + L_2] < x < [L_1 + L_2 + L_3]: M(x) = q(x) \cdot x^2 / 6 - R_b \cdot (x - L_3) - R_a \cdot (x - L_2 - L_3) - M \quad (13)$$

2.1.2.5 Esforços solicitantes internos nas vigas horizontais

No caso das vigas horizontais há de fazer uma distinção em relação às comportas com quatro e mais de quatro vigas verticais. No primeiro caso, recomenda-se aplicar as reações das vigas verticais nas respectivas vigas horizontais como carregamento distribuído. Nos demais casos podem-se aplicar as reações das vigas verticais como carregamentos concentrados.

Em termos estruturais, nota-se que as vigas horizontais formam com os respectivos braços nos quais as vigas se apóiam, uma estrutura aporticada em forma de “ π ”. Dessa forma, deve-se calcular o pórtico tipo “ π ” com o carregamento conforme visto no parágrafo anterior e procurando encontrar os esforços cortantes, os esforços normais e os momentos fletores máximos. Como a largura colaborante é função do comprimento da viga entre momentos nulos, os seus pontos devem ser encontrados com precisão.

Assim, podemos obter os esforços solicitantes internos, resolvendo o pórtico seja da Figura 10 ou Figura 11, lembrando que os pontos “A” e “B”, por questão de segurança devem ser considerados fixos para quando no munhão for utilizada bucha auto-lubrificante de bronze

▨ e articulados quando for utilizada rótula ▢.

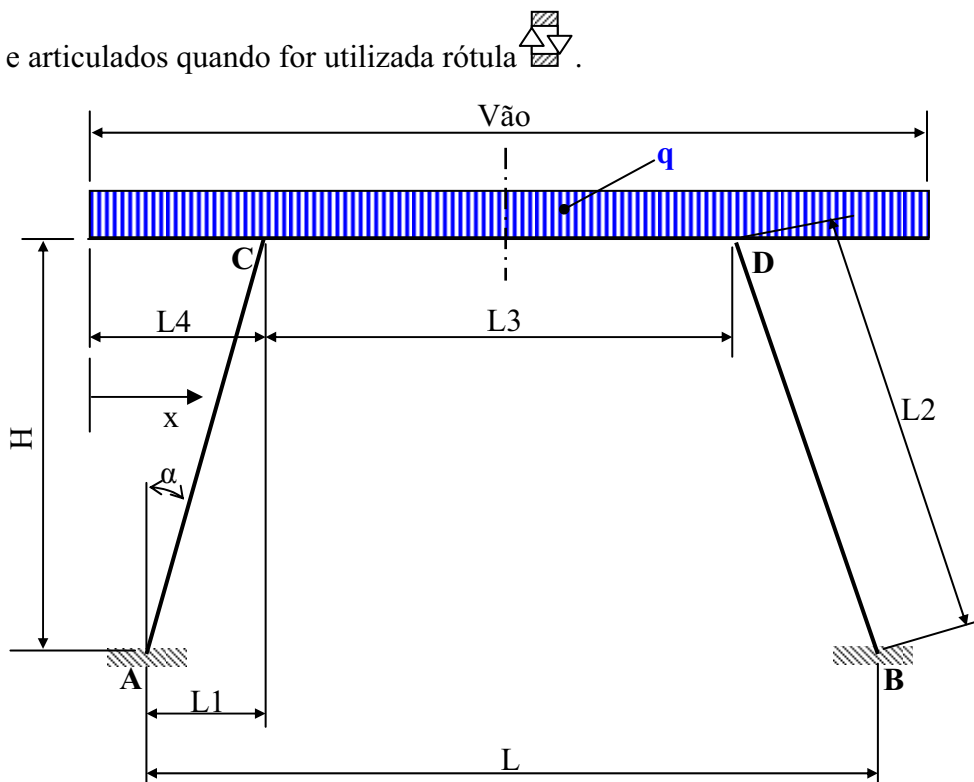


Figura 10 – Diagrama de corpo livre do pórtico tipo “ π ” para 4 vigas verticais.

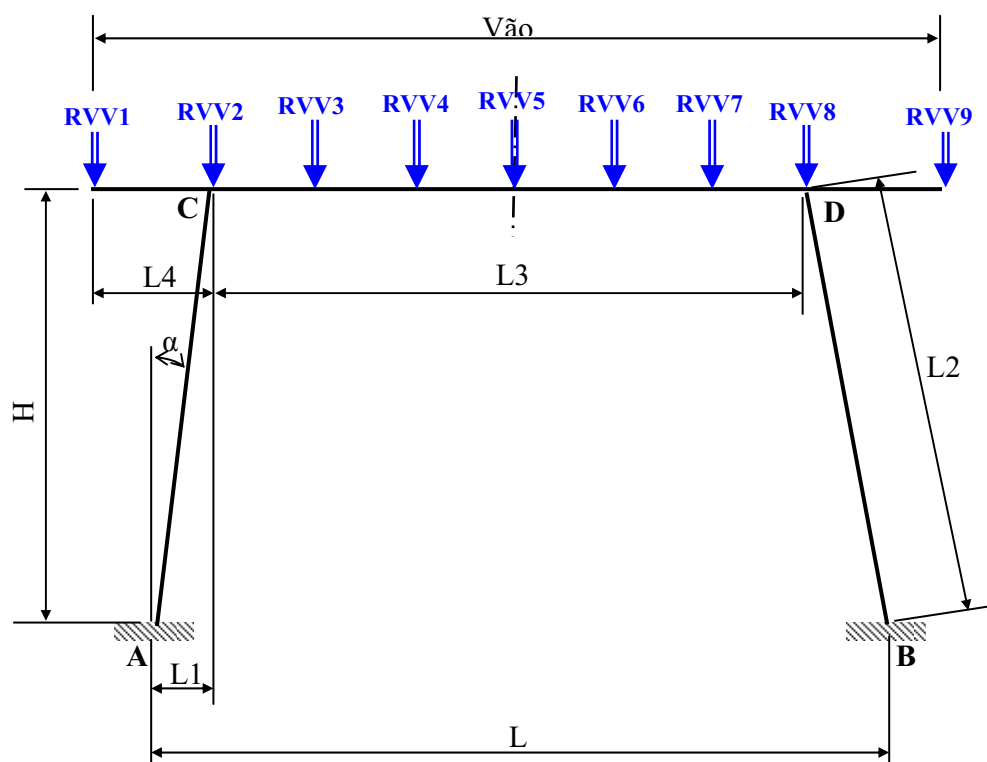


Figura 11 – Diagrama de corpo livre do pórtico tipo “π” para 5 ou mais vigas verticais.

Para uma comporta com 6 vigas verticais, os seguintes diagramas de esforços solicitantes internos podem ser observados pelas Figuras de 12 a 14.

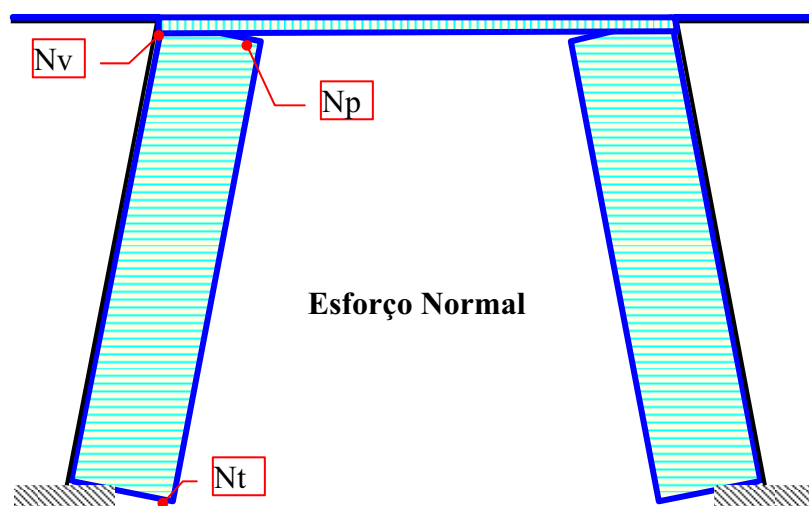


Figura 12 – Diagrama de esforços normais no pórtico tipo “π”.

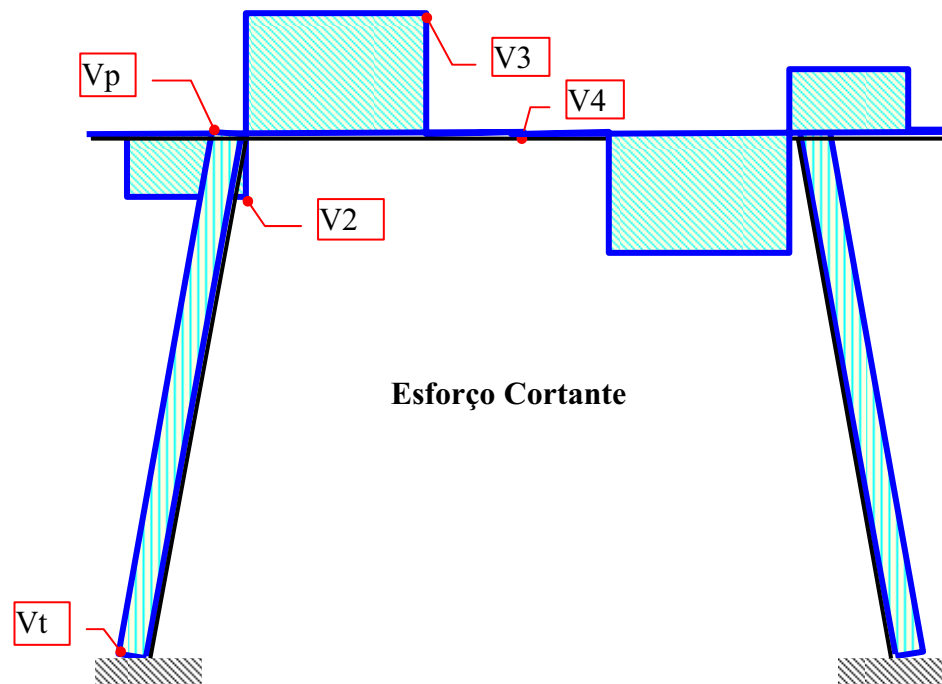


Figura 13 – Diagrama de esforços cortantes no pórtico tipo "π".

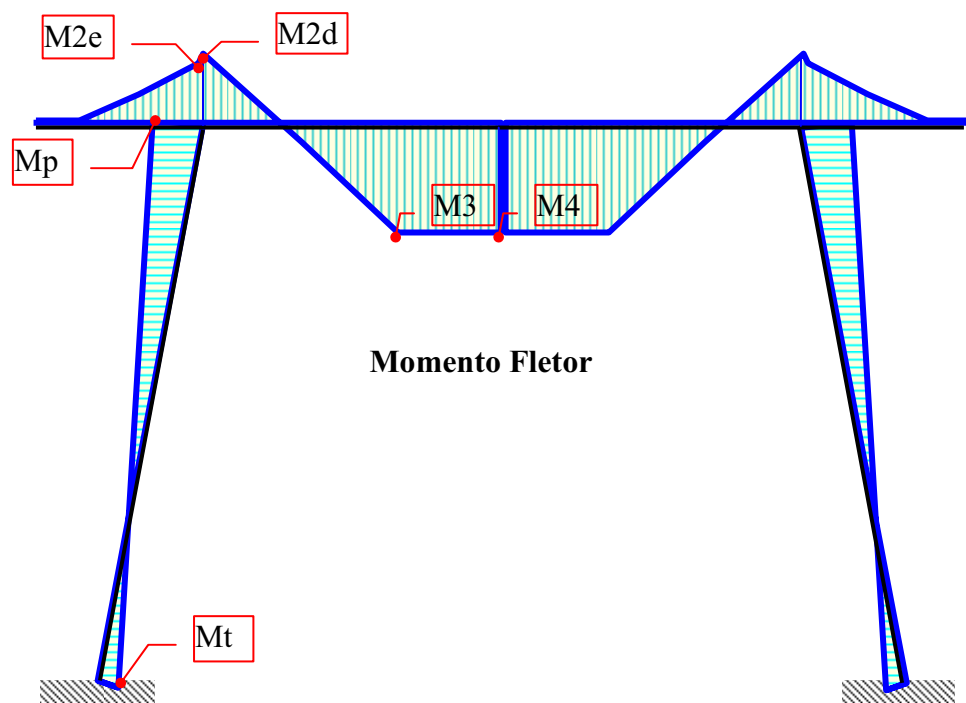


Figura 14 – Diagrama de momentos fletores no pórtico tipo "π".

2.1.2.6 Esforços solicitantes internos nos braços

Resolvendo o pórtico tipo “ π ” já se obtém uma importante parcela dos esforços solicitantes internos nos braços que como se observa, está submetido a uma flexo-compressão. Outra parcela, quando se calcula a comporta no início do seu levantamento pelo órgão de manobra, se refere ao momento produzido pelo atrito no mancal do munhão. Pode-se obter os esforços solicitantes internos no plano vertical devido a esse atrito, resolvendo o pórtico da Figura 15.

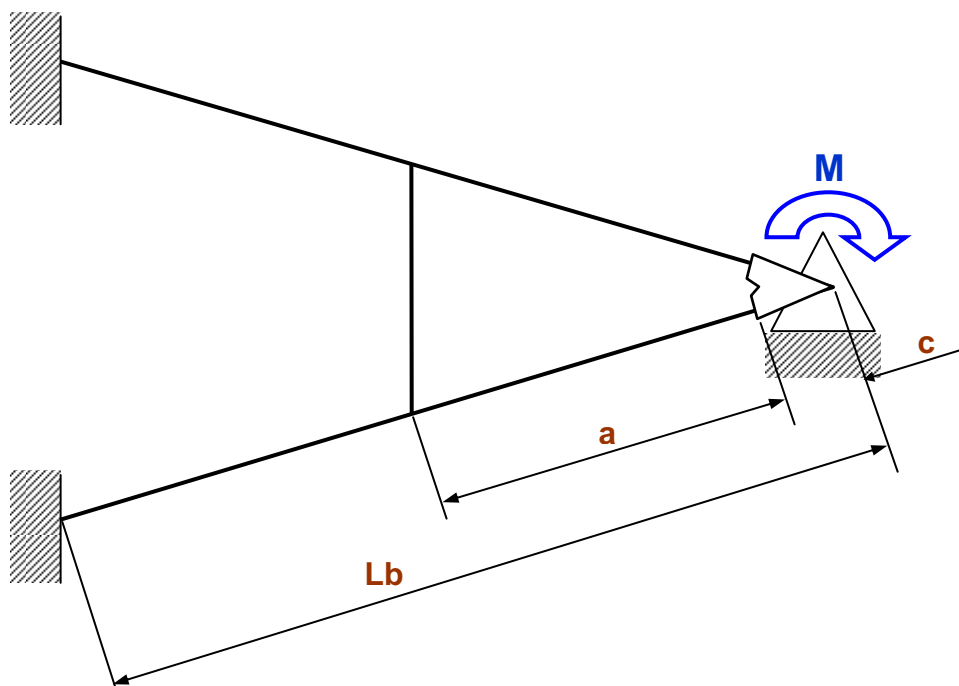


Figura 15 – Diagrama de corpo livre do pórtico tipo “A” para a manobra da comporta.

Entretanto, foi observado que quando se efetuava a verificação por elementos finitos executada de forma não parametrizada e com dispêndio de um tempo precioso, nunca menor que três dias, se observava uma diferença significativa das tensões obtidas pelo método analítico aqui exposto e o cálculo numérico.

Quando se supôs que a diferença poderia estar nos esforços surgidos, não mais no plano horizontal do pórtico tipo “ π ”, mas no plano vertical do pórtico que denominamos de tipo “A”, foram tentados vários processos analíticos para determinar tais esforços tendo em vista não ter na literatura existente nenhum cálculo similar. Ao combinar tais resultados com os já obtidos no cálculo do pórtico horizontal raramente se obteve convergência nos diversos casos

estudados. Quanto maior a comporta na altura em relação à largura, menor a convergência obtida.

A partir desta dificuldade, resolveu-se prevenir desta incerteza com uma margem de segurança de 30 a 40 [MPa] entre a tensão combinada máxima nos braços e a tensão admissível adotada.

Procurando uma solução definitiva, foi tentado o processo numérico utilizando o elemento *BEAM189* do *ANSYS®*, obtendo assim os esforços solicitantes que puderam ser adicionados ao cálculo analítico, obtendo uma convergência satisfatória. Esse processo pode ser visto no item 2.1.3.

2.1.2.7 Esforços solicitantes internos nos reforços horizontais

Podem-se considerar os reforços apoiados nas vigas verticais e neste caso os esforços solicitantes devem ser calculados como uma viga com múltiplos apoios e em contrapartida, gera os diagramas de esforço cortante e momento fletor de viga contínua sobre múltiplos apoios ou, com menor precisão, engastados nas vigas verticais. Em consequência de se ter os reforços posicionados de forma a dividir horizontalmente o paramento em placas de mesma tensão, recomenda-se calcular um reforço abaixo da viga horizontal inferior, um reforço entre vigas horizontais e um reforço acima da viga horizontal superior, tomando sempre o de maior carregamento. Este processo é possível tendo em vista que as divisões da chapa de face em placas com tensões muito próximas tendem a carregar os reforços horizontais acima referidos também com carga relativamente próximas.

2.1.2.8 Esforços resistentes internos de placa

Todo o reticulado formado por vigas horizontais, vigas verticais e reforços, divide o paramento em placas menores que, ao receber o carregamento produzido pela carga hidráulica, pelo sedimento e pelo sismo, geram tensões que devem ser adicionadas às oriundas da flexão das vigas.

Segundo as diversas Normas de cálculo de comportas tais como NBR 8883-2008 ou DIN 19704-1998, as tensões de placa em diversos pontos e orientações podem ser obtidas utilizando a equação (14).

$$\sigma = (k/100) \cdot p \cdot a^2 / t^2 \quad (14)$$

sendo: $\sigma \equiv$ tensão de placa;

$k \equiv$ coeficiente de norma;

$p \equiv$ pressão hidrostática no centro da placa;

$a \equiv$ menor dimensão da placa;

$t \equiv$ espessura da placa.

2.1.2.9 Esforços resistentes internos nas vigas e braços

Tendo em vista a geometria da estrutura e a orientação dos carregamentos verifica-se que tanto as vigas horizontais, as vigas verticais e os reforços têm apenas os esforços solicitantes de flexão simples e cortante. Dessa forma, os esforços resistentes podem ser calculados facilmente através das equações $\sigma_f = M_f / W$ e $\tau = V.M_s / b.I$.

No caso dos braços, além da flexão no plano do pórtico tipo “ π ” e no plano vertical do pórtico tipo “A”, gerando assim os momentos fletores e esforços cortantes em planos perpendiculares, existe o esforço de compressão. O esforço resistente pode ser calculado pela equação $\sigma_c = N / A$.

2.1.2.10 Esforços resistentes internos combinados

Algumas Normas de cálculo de comporta recomendam que se execute inicialmente a verificação das tensões unidirecionais. Assim, para as vigas e reforços que além da aba e da alma são formados pela largura colaborante do paramento, devem ter as suas tensões normais, somadas unidirecionalmente às tensões de placa correspondentes. Para os braços, devem-se somar além da tensão normal devida à compressão, as tensões normais devidas à flexão tanto no plano horizontal (pórtico tipo “ π ”) quanto vertical (pórtico tipo “A”) nos pontos onde a soma é algébrica, isto é onde os sentidos das tensões são os mesmos.

As tensões combinadas (tensões de von Mises) devem ser calculadas conforme a equação (15) e comparadas com as tensões admissíveis. No caso de comportas a simplificação da equação de tensões combinadas se deve pelo fato de termos um estado plano de tensões.

$$\sigma_{\text{comp}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (15)$$

sendo: $\sigma_{\text{comp}} \equiv$ tensão de comparação;

$\sigma_x \equiv$ soma das tensões no eixo x;

$\sigma_y \equiv$ soma das tensões no eixo y;

$\tau_{xy} \equiv$ soma das tensões de cisalhamento no plano xy.

No caso dos braços, além da verificação das tensões combinadas, deve ser verificada a estabilidade tendo em vista estarem submetidos aos esforços de flexo-compressão. Utilizando a Norma DIN 4114, a estabilidade pode ser verificada pela equação (16).

$$\sigma_{\text{cadm}} \geq \omega \frac{N}{A} + 0,9 \cdot \frac{M_f}{W} \quad (16)$$

sendo: $\sigma_{\text{cadm}} \equiv$ tensão admissível a compressão;

$\omega \equiv$ coeficiente de flambagem conforme Norma em função da tensão de escoamento do aço adotado e do índice de esbeltez λ ;

$N \equiv$ Esforço de Normal de compressão;

$A \equiv$ Área da seção transversal;

$M_f \equiv$ Momento fletor;

$W \equiv$ Módulo de resistência da seção transversal no ponto de estudo.

O índice de esbeltez λ pode ser calculado pela equação $\lambda = l_f / i$.

O comprimento de flambagem (l_f) no plano do pórtico tipo “ π ” é correspondente à distância da linha de centro do munhão até a linha neutra da viga horizontal. Para o pórtico do plano vertical tipo “A”, recomenda-se ao menos um travamento intermediário e portanto vale a metade do comprimento total.

Para efeito de agilidade no cálculo podem ser utilizadas as equações de (17) a (21) para determinar o coeficiente de flambagem ω , embora se recomende, em algum instante a consulta das tabelas da Norma DIN 4114.

$$0 < \lambda \leq 20: \omega = 1 \quad (17)$$

$$20 < \lambda < 25 \text{ e } \sigma_{\text{esc}} < 3\,000 : \omega = 1,04 \quad (18)$$

$$20 < \lambda < 25 \text{ e } \sigma_{\text{esc}} \geq 3\,000 : \omega = 1,06 \quad (19)$$

$$25 \leq \lambda \leq 114: \omega = (3,348 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda^5 - 2,6274 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^4 + 7,5307 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^3 - 7,49 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^2 + 0,0365 \cdot \lambda + 0,489) \cdot (((\sigma_{\text{esc}}/2400)^{((\lambda)/(115-0)) - 0,6})^6 + 1) \quad (20)$$

$$\lambda > 114: \omega = (3,348 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda^5 - 2,6274 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^4 + 7,5307 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^3 - 7,49 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^2 + 0.0365 \cdot \lambda + 0.489) \cdot (\sigma_{esc}/2400) \quad (21)$$

sendo: $\sigma_{esc} \equiv$ tensão de escoamento do aço adotado.

2.1.2.11 Deslocamento no centro inferior e nas laterais superiores da comporta

Inicialmente deve-se verificar o encurtamento do braço em função da compressão média produzida pela carga hidrostática através da equação (22)

$$\Delta b = \sigma_c \cdot L_t / E_s \quad (22)$$

sendo: $\Delta b \equiv$ encurtamento do braço;

$\sigma_c \equiv$ tensão média de compressão no braço;

$L_t \equiv$ comprimento do braço;

$E_s \equiv$ módulo de Young do material do braço.

Em seguida, calcular a flecha na viga horizontal produzida pelas vigas verticais internas (VV3) utilizando a equação (23), tendo em vista o diagrama de corpo livre da viga horizontal da Figura 16.

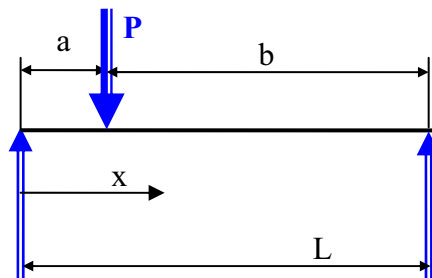


Figura 16 – Diagrama de corpo livre da viga horizontal para as vigas verticais internas.

$$\Delta_{VV3} = \frac{P \cdot a \cdot (L - x)}{6 \cdot E_s \cdot I \cdot L} (2 \cdot L \cdot x - x^2 - a^2) \quad (23)$$

sendo: $\Delta_{VV3} \equiv$ deslocamento produzido pelas vigas verticais internas (VV3);

$P \equiv$ carga da viga vertical interna (VV3);

$L \equiv$ vão interno do pórtico;

$a \equiv$ distância da carga ao apoio, neste caso o braço;

$E_s \equiv$ módulo de Young do material do viga horizontal;

$I \equiv$ Momento de Inércia da seção transversal da viga horizontal.

A seguir, calcular a flecha na viga horizontal produzida pela viga vertical externa (VV1) utilizando a equação (24), tendo em vista o diagrama de corpo livre da viga horizontal da Figura 17.

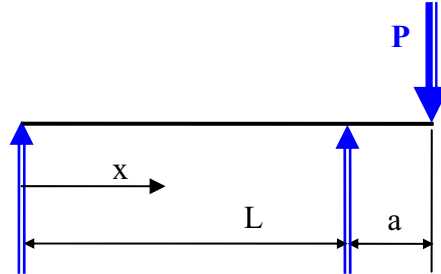


Figura 17 – Diagrama de corpo livre da viga horizontal para a viga vertical externa.

$$\Delta_{VV1} = -\frac{P.a.x}{6.Es.I.L}(L^2 - x^2) \quad (24)$$

sendo: $\Delta_{VV1} \equiv$ deslocamento produzido pela viga vertical externa (VV1);

$P \equiv$ Carga da viga vertical externa (VV1);

$L \equiv$ Vão interno do pórtico;

$a \equiv$ comprimento do balanço;

$Es \equiv$ módulo de Young do material do viga horizontal;

$I \equiv$ Momento de Inércia da seção transversal da viga horizontal.

Para o deslocamento central na base da comporta, onde a vedação apóia na soleira, poderíamos aceitar como igual ao deslocamento no centro da viga vertical interna pois o balanço inferior da viga vertical é muito pequeno. Entretanto, caso se necessite de um resultado numérico mais preciso, pode-se somar a flecha da viga vertical obtida através da formula (25), sabendo-se que o diagrama de corpo livre está de acordo com a Figura 18.

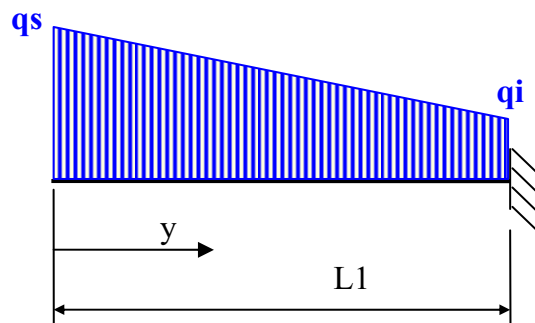


Figura 18 – Diagrama de corpo livre da viga vertical na base da comporta.

$$\Delta_{bi} = \left(qs + \frac{qi}{2} \right) \frac{L_1^4}{12.Es.I} \quad (25)$$

sendo: $\Delta_{bi} \equiv$ deslocamento no balanço inferior da viga vertical interna (VV3);

$q_s \equiv$ carga na parte inferior da viga vertical interna (VV3);

$q_i \equiv$ carga na região que a viga vertical encontra a viga horizontal inferior;

$L_1 \equiv$ comprimento do balanço inferior;

$E_s \equiv$ módulo de Young do material da viga vertical;

$I \equiv$ momento de inércia da seção transversal da viga vertical interna.

Para encontrar o deslocamento total no centro inferior da comporta, basta somar vetorialmente todas as deformações calculadas, ou seja:

$$\Delta_{total} = \Delta b + \sum \Delta_{vv3} + \Delta_{vv1} + \Delta_{bi} \quad (26)$$

Para o deslocamento lateral no topo da comporta, onde a vedação apóia no pilar lateral, deve-se calcular a flecha da viga vertical externa obtida através da formula (27), sabendo-se que o diagrama de corpo livre está de acordo com a Figura 19.

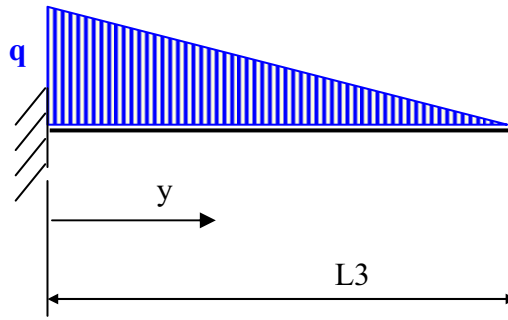


Figura 19 – Diagrama de corpo livre da viga vertical no topo da comporta.

$$\Delta_{bs} = \frac{q \cdot L_3^4}{24 \cdot E_s \cdot I} \quad (27)$$

sendo: $\Delta_{bs} \equiv$ deslocamento no balanço superior da viga vertical externa (VV1);

$q \equiv$ carga na região que a viga vertical encontra a viga horizontal superior;

$L_3 \equiv$ comprimento do balanço superior;

$E_s \equiv$ módulo de Young do material da viga vertical;

$I \equiv$ momento de inércia da seção transversal da viga vertical externa.

Para encontrar o deslocamento total no centro inferior da comporta, basta somar vetorialmente todas as deformações calculadas correspondentes, ou seja:

$$\Delta_{total} = \Delta b + \Delta_{vv1} + \Delta_{bs} \quad (28)$$

2.1.3 Determinação dos esforços solicitantes internos no pórtico tipo “A”

Após consulta na escassa literatura existente de comportas segmento bem como aplicando diferentes processos de cálculo estrutural existentes testados, não foi possível executar um cálculo eficaz e confiável que encontrasse os esforços solicitantes internos no pórtico aqui denominado tipo “A”. Na prática, normalmente se previne dos efeitos produzidos pelos esforços solicitantes internos com uma margem de segurança de 30 a 40 [MPa] entre a tensão combinada máxima nos braços e a tensão admissível adotada.

Tendo em vista essa discrepância entre cálculo analítico e a verificação da estrutura através do método em elementos finitos, foi desenvolvido um programa paramétrico em elementos finitos, utilizando elementos tipo *BEAM189*, associado ao cálculo analítico para obter os esforços gerados nos braços no plano vertical.

2.1.3.1 Parâmetros

Os parâmetros necessários para gerar o modelo com elementos tipo *BEAM189* e rodar em elementos finitos *ANSYS®*, são:

A - Idioma para impressão na tela;

B - Carga d'água de cálculo, levando em consideração a existência ou não de sedimentos e de possibilidade de sismo;

C - Dados geométricos que dependem do sistema hidrológico da bacia hidrográfica onde a barragem for construída, da vazão máxima do rio, do nível máximo do lago, bem como das obras civis a serem efetuadas;

D - Dados de projeto que dependem do material, do número de painéis em que o tabuleiro será dividido (dependentes do transporte e dos equipamentos de montagem na obra e das larguras de chapa de aço), do número de vigas horizontais, do número de vigas verticais, bem como do número de reforços de placa (estes dependentes da espessura e do material usado no paramento);

E - Características geométricas das seções dos diversos elementos estruturais tais como tipo de perfis, espessuras das almas e abas das vigas, bem como da altura das almas e das larguras das abas;

F - Posicionamento de toda a grelha estrutural do paramento e conseqüentemente da distribuição de momentos tanto nas vigas horizontais como verticais, pois a largura útil da chapa de paramento participante da seção composta solicitada à flexão depende dessa distribuição conforme Norma NBR 8883.

Todos os parâmetros descritos nos índices de A a F tais como carga, geometria da comporta segmento e as características geométricas obtidas do cálculo analítico para entrada de dados em *ANSYS®* estão relacionadas a seguir:

!*** IDIOMA PARA IMPRESSAO ***		
PORTUGUÊS		
! *** CARGA D'ÁGUA DE CÁLCULO ***		
Coluna d'água máxima de cálculo	18,50	[m.c.a.]
! *** NÚMERO DE PAINÉIS ***		
Número de painéis	8	
! *** ALTURA DOS PAINEIS ***		
Vetor do comprimento dos painéis	9	
Altura do painel 1 (Inferior)	2838,3	[mm]
Altura do painel 2	2835	[mm]
Altura do painel 3	2835	[mm]
Altura do painel 4	2835	[mm]
Altura do painel 5	2835	[mm]
Altura do painel 6	2835	[mm]
Altura do painel 7	2835	[mm]
Altura do painel 8 (Superior)	2835	[mm]
-	0	[mm]
! *** LARGURA DAS PLACAS ***		
Número de vigas verticais	6	-
Número de placas C	1	-
Número par de vigas verticais	0	S
Largura da placa A	750	[mm]
Largura da placa B	2100,0	[mm]
Largura da placa C	3433,3	[mm]
! *** POSIÇÃO DAS VIGAS HORIZONTAIS ***		
Ângulo da viga superior a partir do topo	31,80306	[grau]
Ângulo entre as vigas horizontais	32,1	[grau]
O painel que se localiza a viga horizontal superior	5	-
O painel que se localiza a viga horizontal inferior	1	-
! *** PARÂMETROS DO BRAÇO ***		
Subtipo da Seção do Braço	2	C - caixão
Distância da trava do braço em relação ao terminal	7531,5	[mm]

TERMINAL	
Diâmetro interno da bucha	600,0 [mm]

! *** CARGA DÁGUA NA VIGA VERTICAL 1 ***	
Vetor das cargas na viga vertical 1	9
Carga na posição 1 (topo)	0,0 [N/mm]
Carga na posição 2	31,7 [N/mm]
Carga na posição 3	76,4 [N/mm]
Carga na posição 4	120,2 [N/mm]
Carga na posição da VHS	147,9 [N/mm]
Carga na posição 5	163,1 [N/mm]
Carga na posição 6	206,5 [N/mm]
Carga na posição 7	246,4 [N/mm]
Carga na posição 8	283,8 [N/mm]
Carga na posição da VHI	304,6 [N/mm]
Carga na posição 9 (base)	326,6 [N/mm]
-	-

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA VERTICAL 1 ***	
Vetor das larguras úteis da viga vertical 1	9
Largura útil na posição 1 (topo)	662,8 [mm]
Largura útil na posição 2	662,8 [mm]
Largura útil na posição 3	662,8 [mm]
Largura útil na posição 4	760,2 [mm]
Largura útil na posição 5	760,2 [mm]
Largura útil na posição 6	760,2 [mm]
Largura útil na posição 7	760,2 [mm]
Largura útil na posição 8	760,2 [mm]
Largura útil na posição 9 (base)	697,7 [mm]
-	-

! *** ALTURA DA VIGA VERTICAL 1 ***	
Vetor das alturas da viga vertical 1	9
Altura na posição 1 (topo)	500,0 [mm]
Altura na posição 2	654,9 [mm]
Altura na posição 3	873,7 [mm]
Altura na posição 4	1088,0 [mm]
Altura na posição 5	1200,0 [mm]
Altura na posição 6	1200,0 [mm]
Altura na posição 7	1200,0 [mm]
Altura na posição 8	1200,0 [mm]
Altura na posição 9 (base)	400,0 [mm]
-	-

! *** CARGA DÁGUA NA VIGA VERTICAL 2 ***	
Vetor das cargas na viga vertical 2	9

Carga na posição 1 (topo)	0,0 [N/mm]
Carga na posição 2	48,7 [N/mm]
Carga na posição 3	117,5 [N/mm]
Carga na posição 4	184,8 [N/mm]
Carga na posição da VHS	227,3 [N/mm]
Carga na posição 5	250,7 [N/mm]
Carga na posição 6	317,4 [N/mm]
Carga na posição 7	378,7 [N/mm]
Carga na posição 8	436,2 [N/mm]
Carga na posição da VHI	468,2 [N/mm]
Carga na posição 9 (base)	501,9 [N/mm]
-	-

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA VERTICAL 2 ***

Vetor das larguras úteis da viga vertical 2	9
Largura útil na posição 1 (topo)	662,8 [mm]
Largura útil na posição 2	662,8 [mm]
Largura útil na posição 3	662,8 [mm]
Largura útil na posição 4	760,2 [mm]
Largura útil na posição 5	760,2 [mm]
Largura útil na posição 6	760,2 [mm]
Largura útil na posição 7	760,2 [mm]
Largura útil na posição 8	760,2 [mm]
Largura útil na posição 9 (base)	569,5 [mm]
-	-

! *** ALTURA DA VIGA VERTICAL 2 ***

Vetor das alturas da viga vertical 2	9
Altura na posição 1 (topo)	500,00 [mm]
Altura na posição 2	721,30 [mm]
Altura na posição 3	1033,80 [mm]
Altura na posição 4	1340,00 [mm]
Altura na posição 5	1500,00 [mm]
Altura na posição 6	1500,00 [mm]
Altura na posição 7	1500,00 [mm]
Altura na posição 8	1500,00 [mm]
Altura na posição 9 (base)	400,00 [mm]
-	-

! *** CARGA DÁGUA NA VIGA VERTICAL 3 ***

Vetor das cargas na viga vertical 3	9
Carga na posição 1 (topo)	0,0 [N/mm]
Carga na posição 2	60,4 [N/mm]
Carga na posição 3	145,8 [N/mm]
Carga na posição 4	229,4 [N/mm]
Carga na posição da VHS	282,0 [N/mm]
Carga na posição 5	311,1 [N/mm]
Carga na posição 6	393,9 [N/mm]

Carga na posição 7	469,9 [N/mm]
Carga na posição 8	541,4 [N/mm]
Carga na posição da VHI	581,0 [N/mm]
Carga na posição 9 (base)	622,9 [N/mm]
-	-
! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA VERTICAL 3 ***	
Vetor das larguras úteis da viga vertical 3	9
Largura útil na posição 1 (topo)	662,8 [mm]
Largura útil na posição 2	662,8 [mm]
Largura útil na posição 3	662,8 [mm]
Largura útil na posição 4	760,2 [mm]
Largura útil na posição 5	760,2 [mm]
Largura útil na posição 6	760,2 [mm]
Largura útil na posição 7	760,2 [mm]
Largura útil na posição 8	760,2 [mm]
Largura útil na posição 9 (base)	569,5 [mm]
-	-

! *** ALTURA DA VIGA VERTICAL 3 ***	
Vetor das alturas da viga vertical 3	9
Altura na posição 1 (topo)	500,0 [mm]
Altura na posição 2	721,3 [mm]
Altura na posição 3	1033,8 [mm]
Altura na posição 4	1340,0 [mm]
Altura na posição 5	1500,0 [mm]
Altura na posição 6	1500,0 [mm]
Altura na posição 7	1500,0 [mm]
Altura na posição 8	1500,0 [mm]
Altura na posição 9 (base)	400,0 [mm]
-	-
! *** ABAS DAS VIGAS VERTICAIS ***	
Largura da aba da viga vertical 1	300,0 [mm]
Largura da aba da viga vertical 2	400,0 [mm]
Largura da aba da viga vertical 3	400,0 [mm]

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR ***	
Vetor das larguras úteis da viga horizontal superior	3
Largura útil na posição 1 (borda)	1931,5 [mm]
Largura útil na posição 2	3066,8 [mm]
Largura útil na posição 3	3066,8 [mm]
-	-
! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR ***	

Vetor das larguras úteis da viga horizontal inferior	3
Largura útil na posição 1 (borda)	1538,1 [mm]
Largura útil na posição 2	2089,2 [mm]
Largura útil na posição 3	2089,2 [mm]
-	-

! * ABAS DAS VIGAS HORIZONTAIS *****

Largura da aba da viga horizontal superior	620,0 [mm]
Largura da aba da viga horizontal inferior	620,0 [mm]

! * ESPESSURA DO PARAMENTO *****

Vetor das espessuras do paramento	9
Espessura do paramento na posição 1 (topo)	9,5 [mm]
Espessura do paramento na posição 2	9,5 [mm]
Espessura do paramento na posição 3	9,5 [mm]
Espessura do paramento na posição 4	12,5 [mm]
Espessura do paramento na posição 5	12,5 [mm]
Espessura do paramento na posição 6	12,5 [mm]
Espessura do paramento na posição 7	12,5 [mm]
Espessura do paramento na posição 8 (base)	12,5 [mm]
-	-

! * ESPESSURA DA ALMA DA VIGA VERTICAL 1 *****

Vetor das espessuras da alma da viga vertical 1	9
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 1 (topo)	12,5 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 2	12,5 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 3	12,5 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 4	12,5 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 5	12,5 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 6	12,5 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 7	12,5 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 1 na posição 8	12,5 [mm]
-	-

! * ESPESSURA DA ABA DA VIGA VERTICAL 1 *****

Vetor das espessuras da aba da viga vertical 1	9
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 1 (topo)	16,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 2	16,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 3	16,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 4	16,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 5	16,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 6	16,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 7	16,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 1 na posição 8	16,0 [mm]
-	-

! *** ESPESSURA DA ALMA DA VIGA VERTICAL 3 ***

Vetor das espessuras da alma da viga vertical 3	9
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 1 (topo)	16,0 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 2	16,0 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 3	16,0 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 4	16,0 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 5	16,0 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 6	16,0 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 7	16,0 [mm]
Espessura da alma da viga vertical 3 na posição 8	16,0 [mm]
-	-

! *** ESPESSURA DA ABA DA VIGA VERTICAL 3 ***

Vetor das espessuras da aba da viga vertical 3	9
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 1 (topo)	19,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 2	19,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 3	19,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 4	19,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 5	19,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 6	19,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 7	19,0 [mm]
Espessura da aba da viga vertical 3 na posição 8	19,0 [mm]
-	-

! *** ESPESSURA DA ALMA DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR ***

Vetor das espessuras da alma da viga horizontal superior	3
Espessura da alma da viga horizontal sup. na posição 1 (borda)	22,4 [mm]
Espessura da alma da viga horizontal superior na posição 2	22,4 [mm]
Espessura da alma da viga horizontal superior na posição 3	22,4 [mm]
-	-

! *** ESPESSURA DA ABA DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR ***

Vetor das espessuras da aba da viga horizontal superior	3
Espessura da aba da viga horizontal sup. na posição 1 (borda)	31,5 [mm]
Espessura da aba da viga horizontal superior na posição 2	31,5 [mm]
Espessura da aba da viga horizontal superior na posição 3	31,5 [mm]
-	-

! *** ESPESSURA DA ALMA DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR ***

Vetor das espessuras da alma da viga horizontal inferior	3
Espessura da alma da viga horizontal inf. na posição 1 (borda)	22,4 [mm]
Espessura da alma da viga horizontal inferior na posição 2	22,4 [mm]
Espessura da alma da viga horizontal inferior na posição 3	22,4 [mm]
-	-

! *** ESPESSURA DA ABA DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR ***	
Vetor das espessuras da aba da viga horizontal inferior	3
Espessura da aba da viga horizontal inf. na posição 1 (borda)	31,5 [mm]
Espessura da aba da viga horizontal inferior na posição 2	31,5 [mm]
Espessura da aba da viga horizontal inferior na posição 3	31,5 [mm]
-	-

! *** ESPESSURA NOS BRAÇOS SUPERIORES ***	
Espessura das almas	25,4 [mm]
Espessura da aba superior próxima ao painel	25,4 [mm]
Espessura da aba superior próxima ao terminal	25,4 [mm]
Espessura da aba inferior próxima ao painel	25,4 [mm]
Espessura da aba inferior próxima ao terminal	25,4 [mm]

! *** ESPESSURA NOS BRAÇOS INFERIORES ***	
Espessura das almas	25,4 [mm]
Espessura da aba inferior próxima ao painel	25,4 [mm]
Espessura da aba inferior próxima ao terminal	25,4 [mm]
Espessura da aba superior próxima ao painel	25,4 [mm]
Espessura da aba superior próxima ao terminal	25,4 [mm]

! *** OUTRAS ESPESSURAS ***	
Espessura da trava do braço	8,00 [mm]

2.1.3.2 Análise em MEF utilizando o ANSYS®

A análise da estrutura da comporta foi feita em MEF 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 (é uma teoria de deformação por corte de primeira ordem: a tensão de cisalhamento transversal é constante pela seção transversal, ou seja, cortes transversais permanecem planos e não distorcidos depois de deformação).

Cada elemento *BEAM189* possui 9 nós e 4 pontos de integração como mostrados na Figura 20.

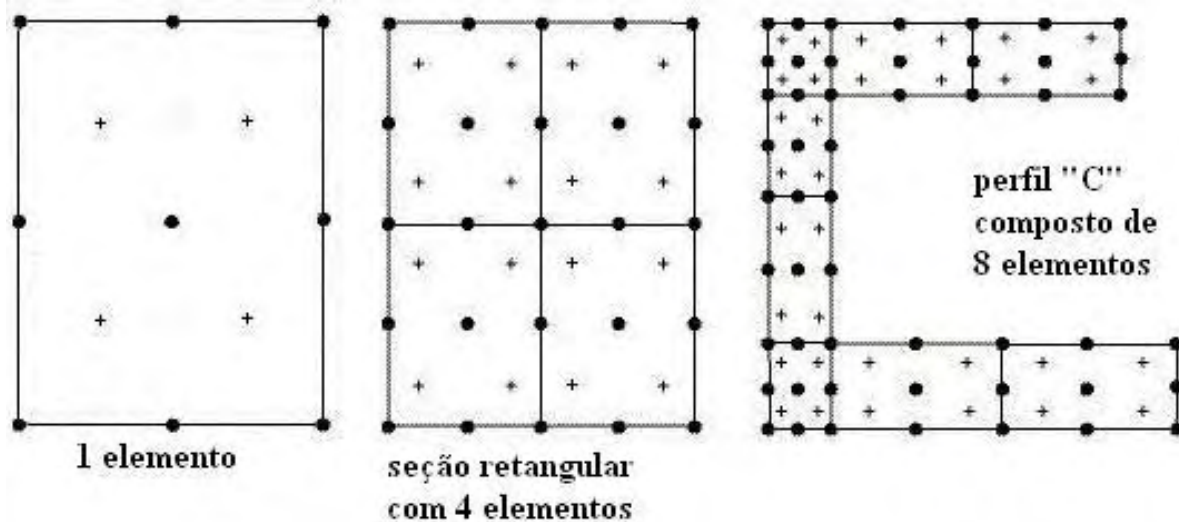


Figura 20 – Tipo de elemento utilizado – *BEAM189*.

2.1.3.2.1 Geometria do modelo

A estrutura da comporta modelada como exemplo nesta tese é formada por 2 vigas horizontais, 6 vigas verticais, 2 braços (um par superior ligado à viga horizontal superior e um par inferior ligado à viga horizontal inferior), terminal e cubo de acordo com a Figura 21.

Toda estrutura do tabuleiro desenvolvida no cálculo analítico e representada por linhas na Figura 22 e em elementos *BEAM189* na Figura 23, foi dividida em 8 painéis. A divisão em painéis de no máximo 3,2 [m] de altura é feita para efeito de transporte e montagem no canteiro de obras civis em face das dimensões máximas recomendadas nas rodovias do Brasil e em face da capacidade dos guindastes de uso mais comum no canteiro de obras.

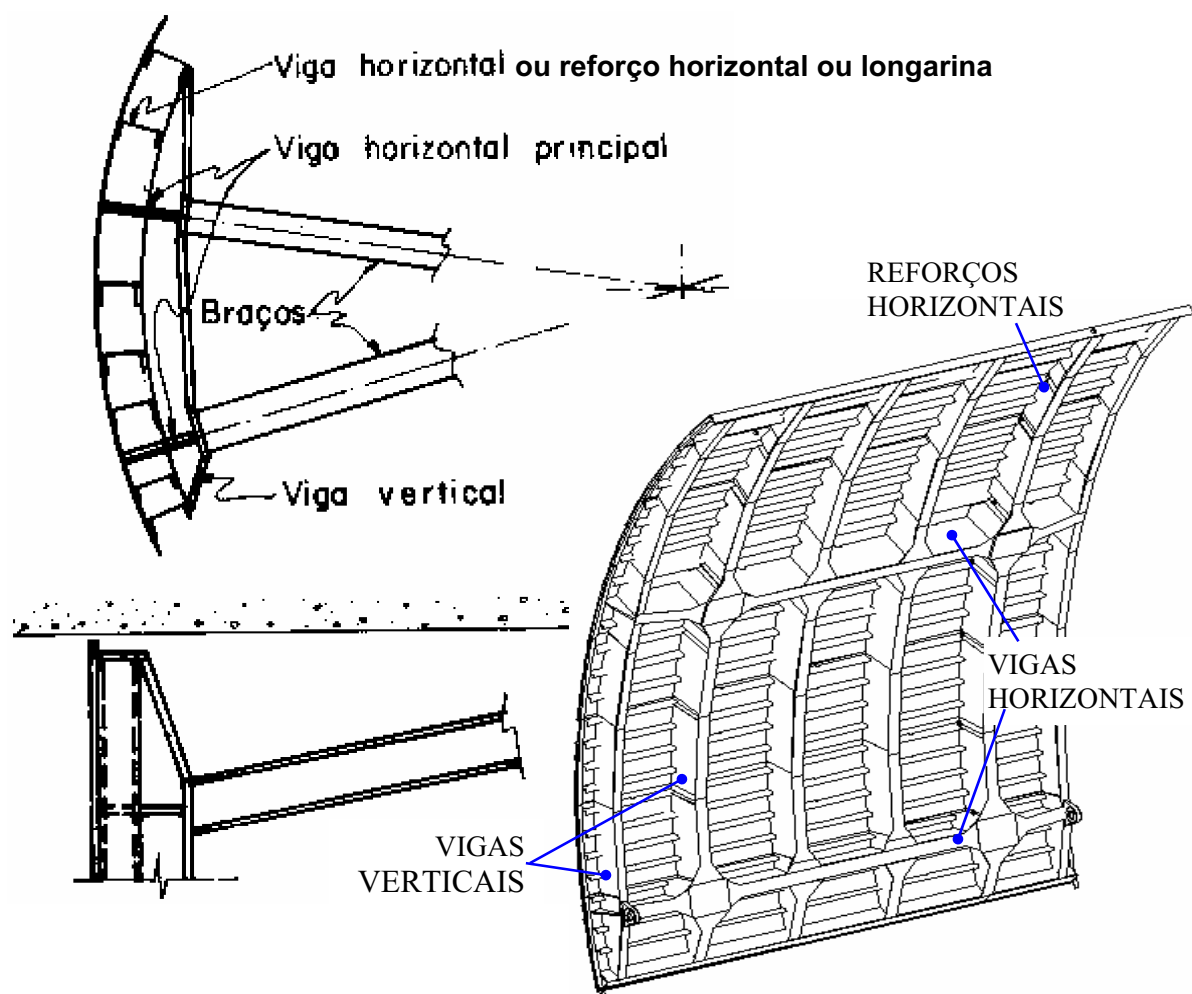


Figura 21 – Elementos estruturais associados ao paramento.

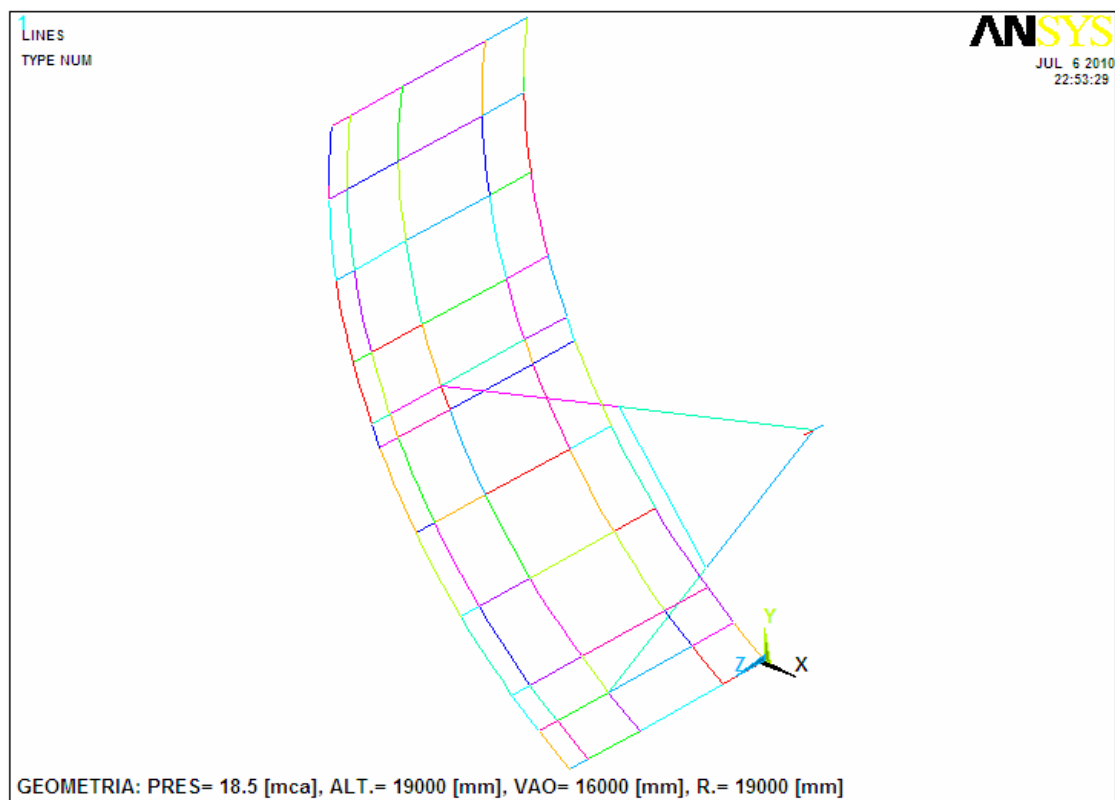


Figura 22 – Geometria da comporta mostrando os 08 painéis do paramento.

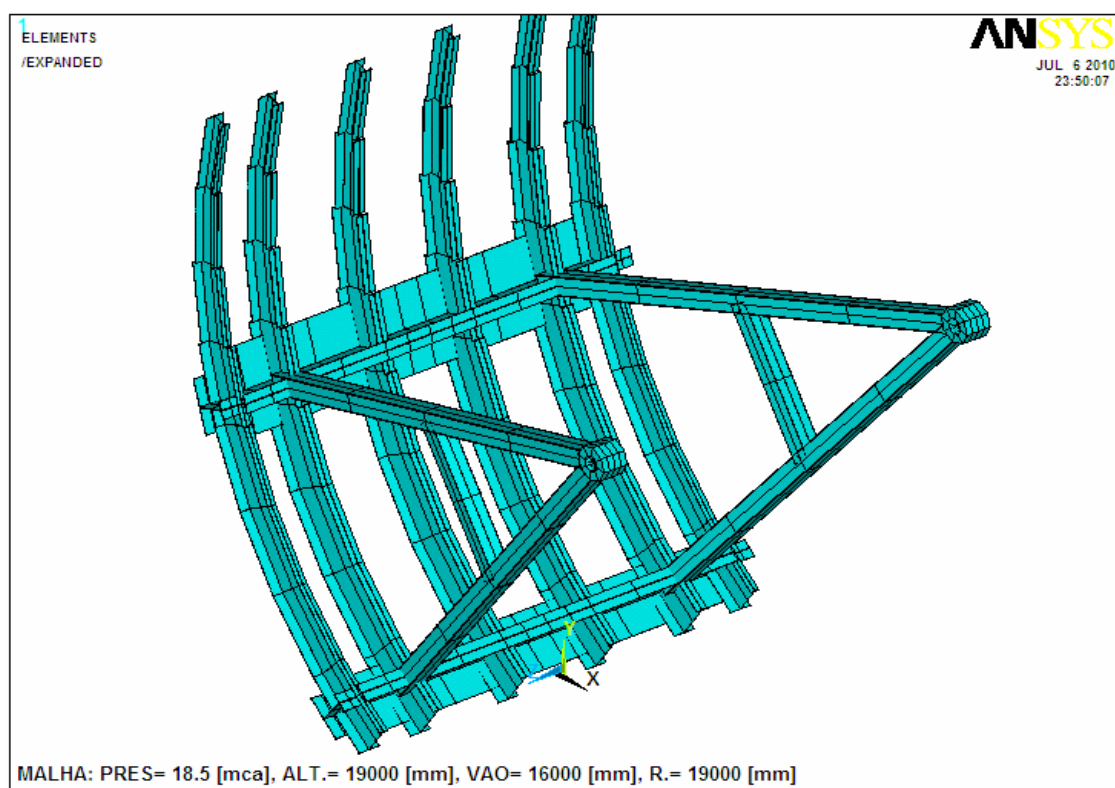


Figura 23 – Geometria da comporta mostrando a estrutura principal modelada em *BEAM189* com as respectivas seções resistentes.

2.1.3.2.2 Malhagem da estrutura

A estrutura da comporta é composta de vigas horizontais e vigas verticais com geometria da seção transversal tipo “I” (perfil I aberto), dois braços com geometria da seção transversal que pode ser do tipo “I” (perfil I aberto), tipo “□” (perfil caixão retangular) ou tubular com geometria tipo “○” (perfil tubular). Dessa forma, fazer a malha em “BEAM”, significa atribuir o tipo e o tamanho dos elementos finitos, atribuir as reais constantes e as propriedades do material e atribuir a geometria da seção transversal aos diversos elementos estruturais. Nesta etapa, a aba superior dos elementos deve ser compatível à largura colaborante da chapa de paramento calculada no cálculo analítico. O resultado do processo de malhagem da estrutura pode ser visto na Figura 24.

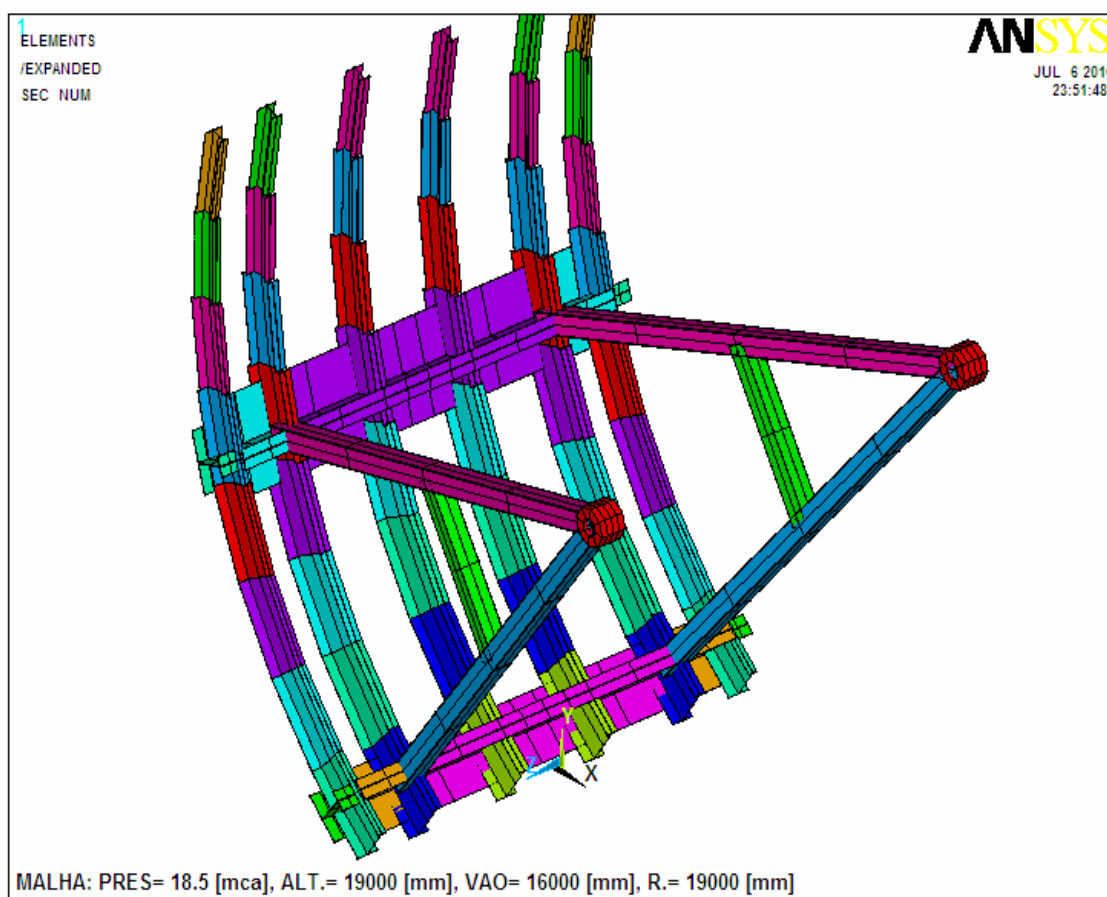


Figura 24 – Geometria mostrando os diferentes elementos *BEAM189*.

2.1.3.2.3 Condições de vinculações do modelo

A comporta pode ser considerada apoiada na soleira, lateralmente nos pilares de concreto (apesar da denominação corrente de pilar, tem a forma de viga parede), no eixo do munhão. Como existe simetria vertical, o modelo foi construído considerando essa simetria, diminuindo assim o tempo de processamento. Dessa forma, para considerar a simetria, foi considerado que os nós pertencentes a esse plano não possuem deslocamento em z (UZ) nem rotação em torno dos eixos Ox e Oy (ROTX, ROTY). Essas condições de vinculação podem ser verificadas nas Figuras 25 e 26.

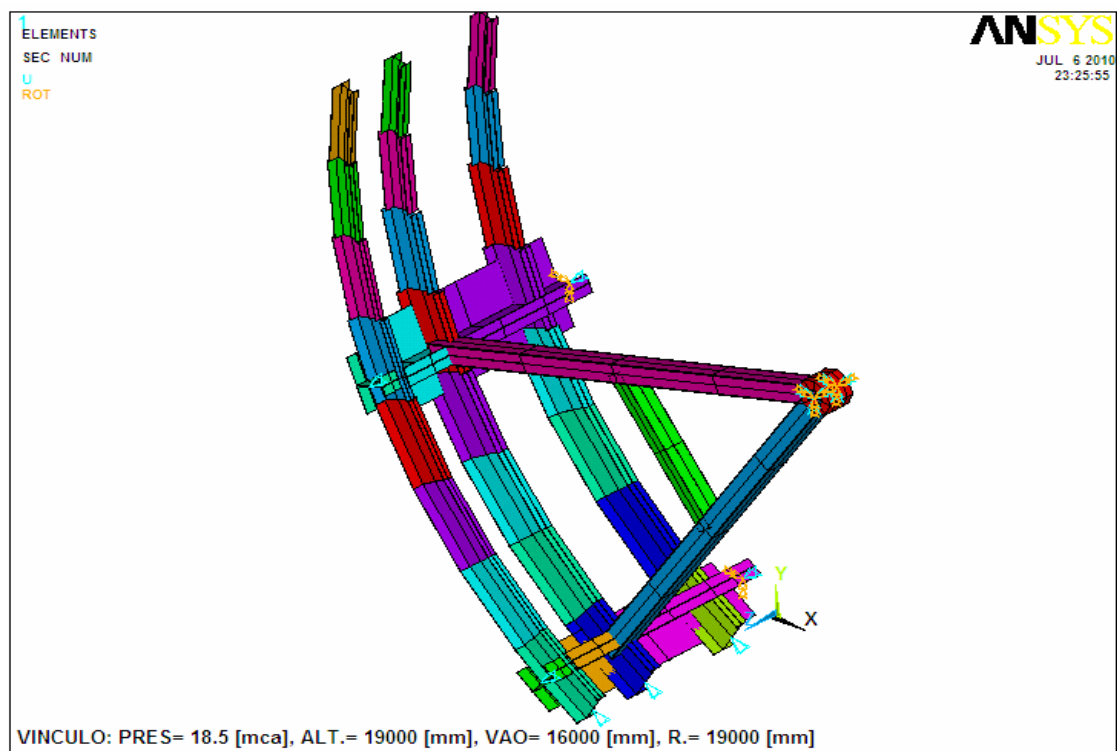


Figura 25 – Vinculações do modelo estrutural.

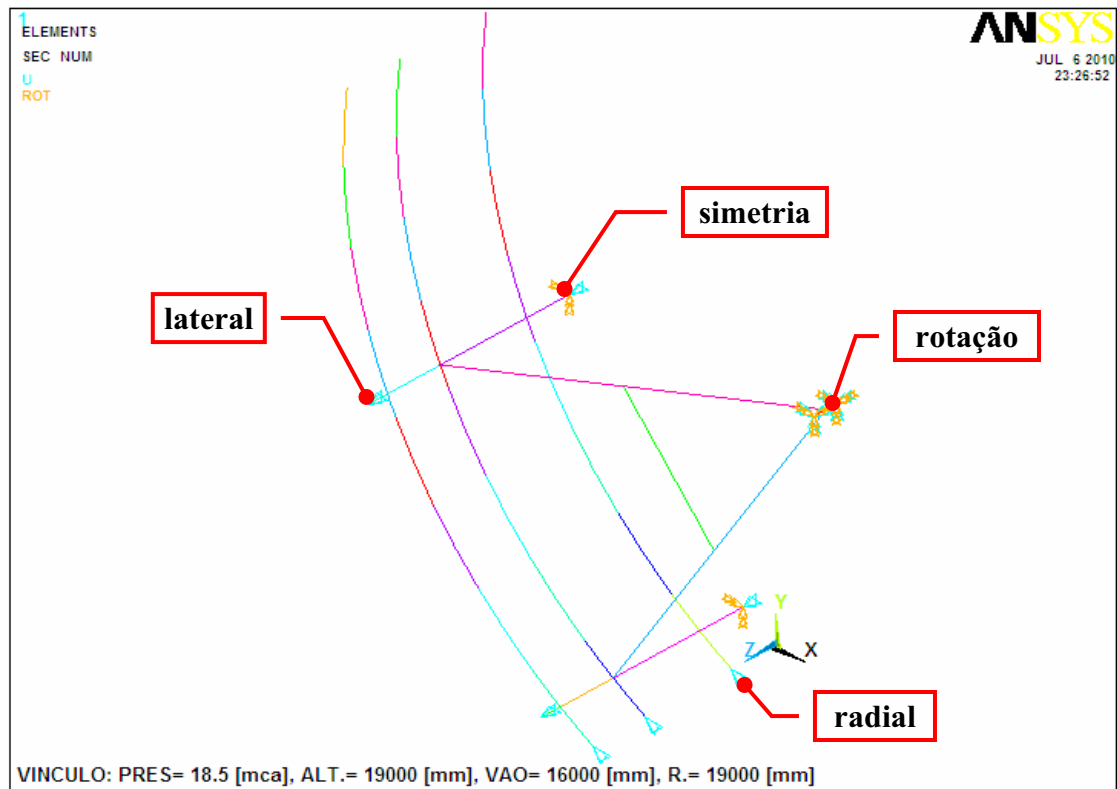


Figura 26 – Vinculações e simetria do modelo estrutural.

2.1.3.2.4 Carregamento do modelo

A comporta é calculada essencialmente para resistir à carga hidrostática. Entretanto há casos onde se deve considerar a presença de sedimentos ou de sismo. Dessa forma à carga d'água estática é adicionado o carregamento devido ao sedimento ou o incremento devido ao sismo horizontal conforme mostrado nas Figuras 27 e 28 e cujo valor máximo é de 622,9 [N/mm].. Este esforço normalmente é fornecido pelo cliente como um carregamento gerado pela aceleração horizontal do sismo proporcional à aceleração da gravidade. Por exemplo, adotando a formulação de Westergaard, temos como aceleração do sismo, para várias regiões da América Latina, o valor de $a/g = 0,278$, isto é, a aceleração do sismo (a) corresponde a 27,8% da aceleração da gravidade (g).

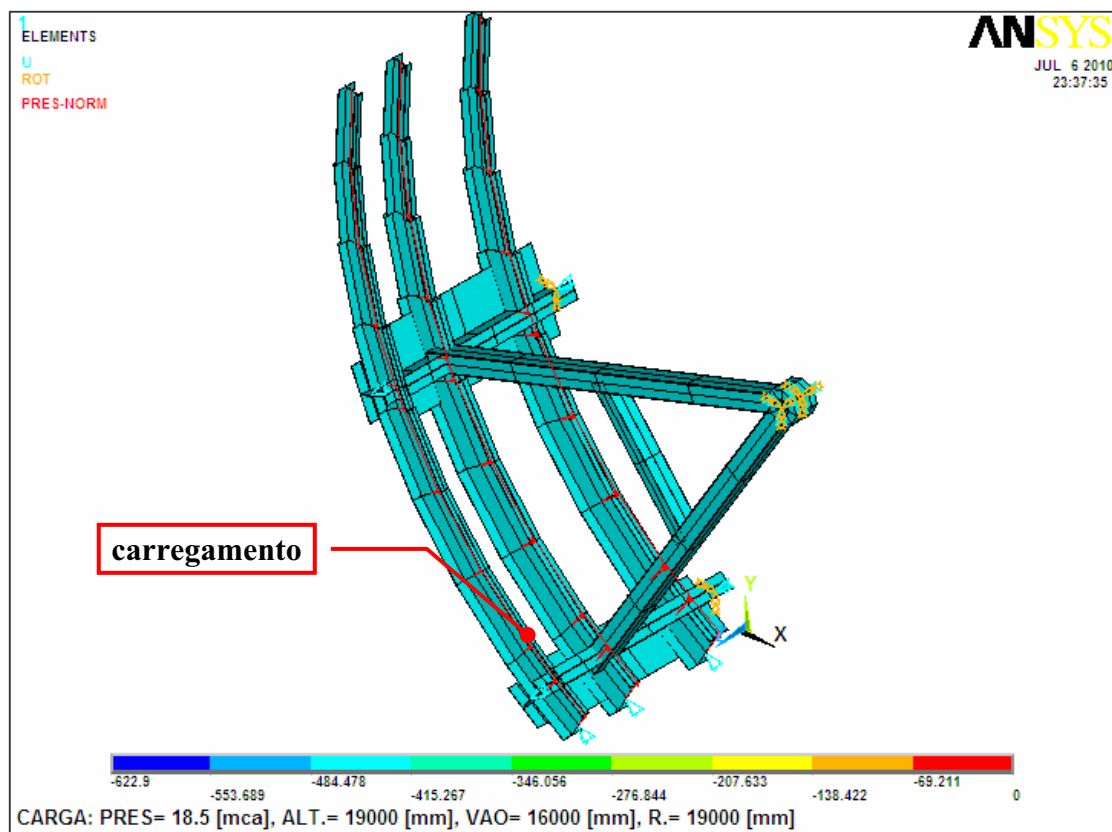


Figura 27 – Carregamento distribuído trapezoidal nas vigas verticais.

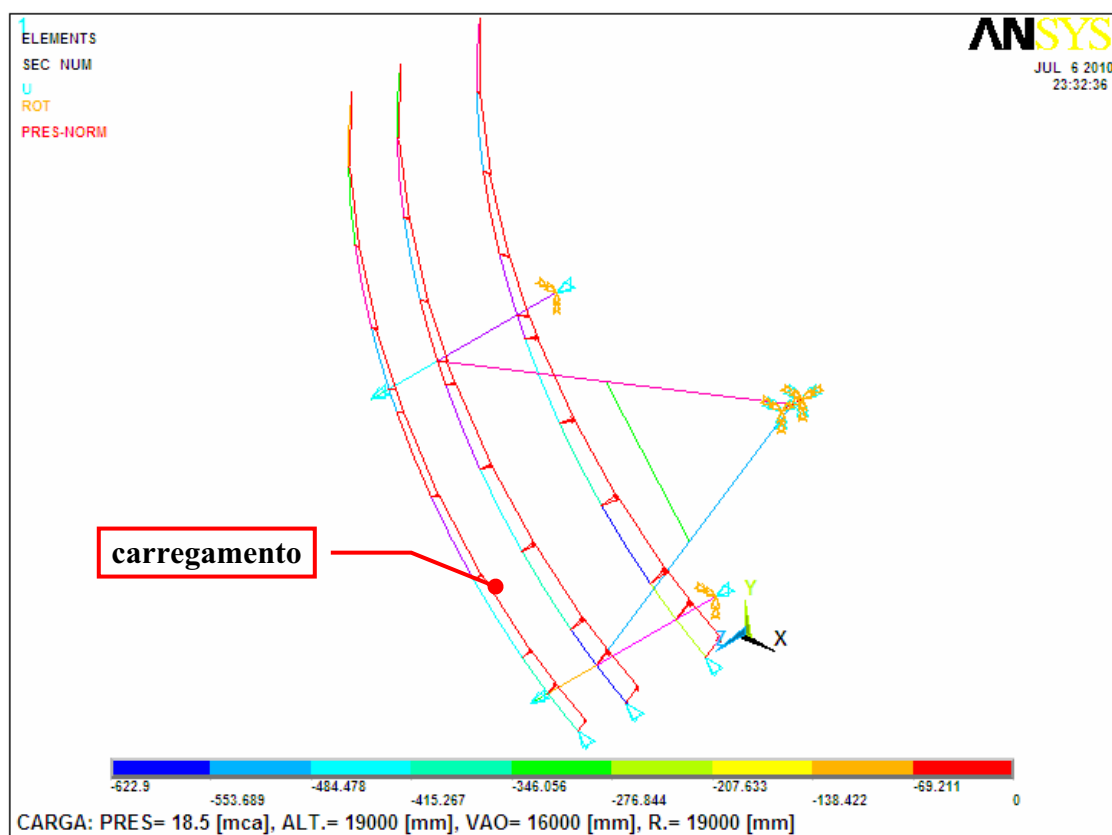


Figura 28 – Carregamento distribuído trapezoidal máximo.

2.1.4 Parametrização da comporta em elemento *BEAM189*

Para construir o modelo paramétrico deve-se inicialmente definir os parâmetros de projeto. Neste caso, como o cálculo analítico já deve ter sido executado, os parâmetros já estão definidos e podem ser encontrados no item 2.1.3.1.

Estes parâmetros são divididos em dois grupos distintos, parâmetros dependentes e parâmetros independentes. Todos os parâmetros no item 2.1.3.1 são independentes, tendo em vista que são valores numéricos advindos do programa de cálculo analítico.

O programa paramétrico é descrito no APÊNDICE B.

2.2 Processo numérico por elementos finitos

2.2.1 Introdução

A modelagem dos modelos estruturais em *ANSYS®*, quando realizada de forma paramétrica, permite uma utilização rápida além de capacitar a variação das diversas grandezas geométricas e de carregamento.

A partir de parâmetros iniciais da geometria de um modelo, o programa varia os parâmetros dentro de uma faixa pré-estabelecida com o objetivo de otimizar a estrutura e alcançar o peso mínimo sem ultrapassar as tensões admissíveis.

O elemento utilizado para o cálculo numérico é o tipo casca. Este elemento é indicado quando a relação entre a largura e a espessura for maior que 10 (dez). É selecionado o elemento *SHELL93* mostrado na Figura 29, indicado para análise estrutural onde existem chapas curvas. Este elemento é formado por 8 nós de I a P (com opção triangular de 6 nós), sendo que cada nó tem 6 graus de liberdade, translação nos eixos x , y e z e rotação em torno dos eixos x , y e z . Os pontos de 1 a 4 na face inferior e de 5 a 8 na face superior indicam a possibilidade de possuir diferentes espessuras nos 4 cantos do elemento. Os eixos x , y e z indicam as coordenadas globais e os eixos X_{IJ} , Y_{IJ} e Z_{IJ} as coordenadas locais do elemento quando não orientados pelo programador.

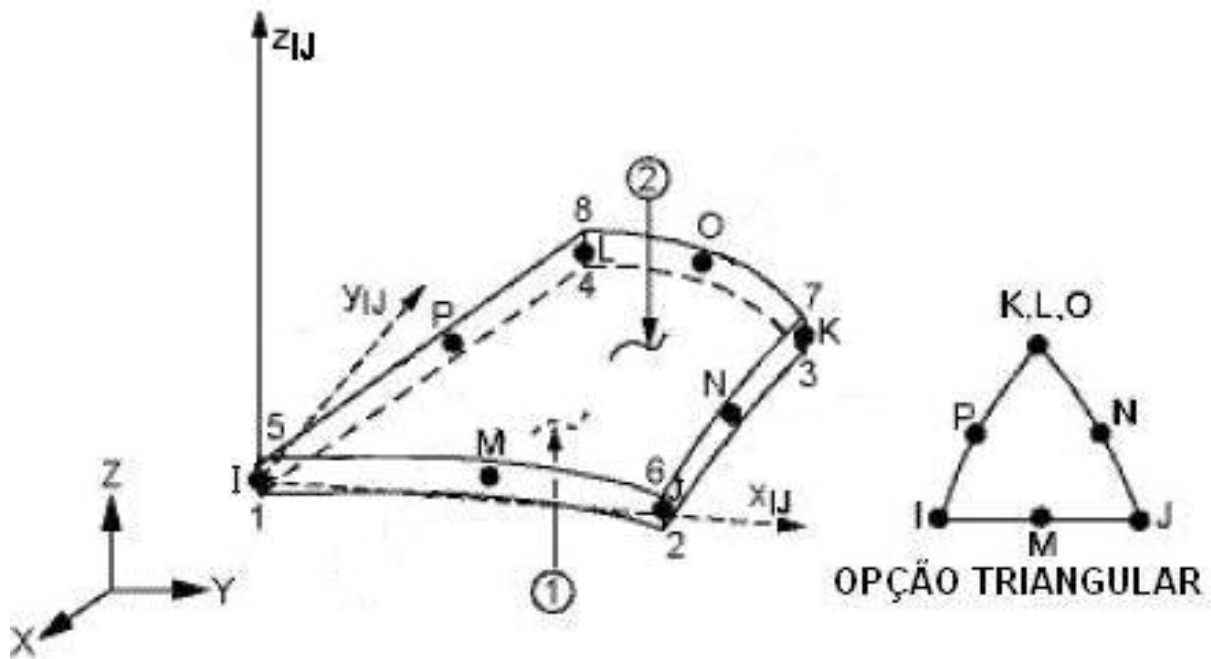


Figura 29 – Elemento do tipo *SHELL93*.

2.2.2 Modelagem paramétrica

2.2.2.1 Introdução

A utilização da ferramenta dos elementos finitos (CAE) principalmente quando se utiliza a parametrização e a otimização, aliada ao CAD (projeto parametrizado) e CAM torna o projeto, a metodização e a fabricação um processo automatizado e em consequência de menor custo e com menores possibilidades de erros.

Para se obter um projeto parametrizado, deve-se equacionar a geometria de maneira que esta varie em função de parâmetros independentes.

Para se otimizar um projeto, deve-se variar esses parâmetros, de forma a se atingir o objetivo almejado. Esse objetivo pode estar baseado no custo de projeto (menor tempo de projeto), custo de fabricação (menor tempo, facilidade de fabricação, menos material, menor volume de solda) e custo de transporte (menor peso). Normalmente, tais objetivos resultam em melhoria da confiabilidade do produto final com menores gastos em possíveis erros durante o processo, melhora no desempenho do equipamento e em consequência na satisfação do cliente.

Os programas são elaborados em linguagem APDL e executados dentro do ambiente do programa ANSYS®. É dada ênfase à análise estrutural, pois este é o tipo mais comum na concepção de equipamentos hidromecânicos.

2.2.2.2 Definição e finalidade

Modelo paramétrico é aquele elaborado e analisado em termos de parâmetros (variáveis) ao invés de números e escrito em linguagem APDL.

Simplesmente mudando os valores de certos parâmetros no modelo, pode-se construir e analisar um novo modelo.

2.2.2.3 Fundamentos de APDL

APDL é a sigla para linguagem de projeto paramétrico em ANSYS®, uma linguagem que permite parametrizar o modelo e automatizar tarefas comuns.

Usando APDL, pode-se entrar com dimensões do modelo, propriedades materiais, etc. em termos de parâmetros em lugar de números, bem como receber informação do banco de dados do ANSYS®, como localizar um nó, ou tensão máxima.

APDL também permite executar cálculos matemáticos entre parâmetros, usar parâmetros matriciais para criar e operar com vetores (matrizes), definir abreviações para usar comandos ou macros frequentemente e criar uma macro para executar uma sucessão de tarefas, com *if - then* ou então, fazer *loops* e lembretes do usuário.

2.2.3.4 Procedimento e diretrizes

O procedimento para construir e analisar um modelo paramétrico é o mesmo para uma análise de ANSYS® normal exceto que parâmetros são usados onde apropriado:

- a) definir parâmetros;
- b) construir o modelo usando parâmetros onde apropriados;

- c) aplicar cargas e obter a solução usando parâmetros onde apropriados;
- d) parametrizar resultados e dados armazenados;
- e) criar o arquivo de análise.

O procedimento de construção e análise do modelo paramétrico pode ser observado no fluxograma da Figura 30.

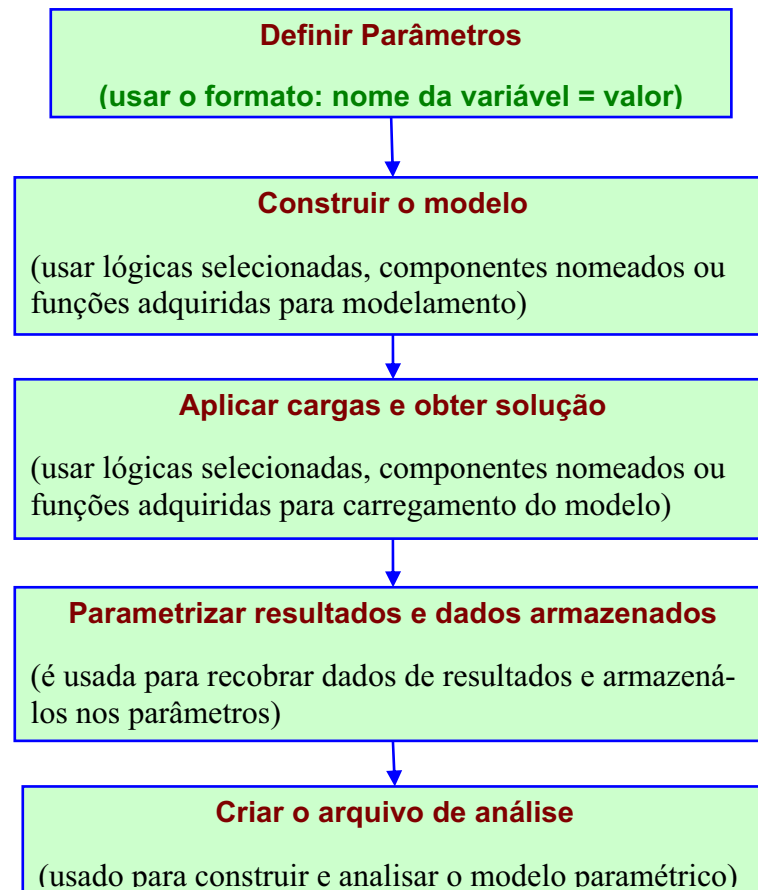


Figura 30 – Fluxograma da construção e análise do modelo.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

3.1 Modelagem paramétrica da comporta segmento no ANSYS® com elementos tipo *SHELL93*

Inicialmente será realizada a análise em elementos finitos na forma paramétrica da comporta calculada no item 2.1.

3.1.1 Descrição da análise

3.1.1.1 Elemento utilizado no modelo

O elemento utilizado para o cálculo numérico é o tipo casca, o elemento *SHELL93* de acordo com a Figura 29.

3.1.1.2 Geometria do modelo

A geometria na forma numérica é formada por linhas e áreas, como mostradas nas Figuras 31 e 32.

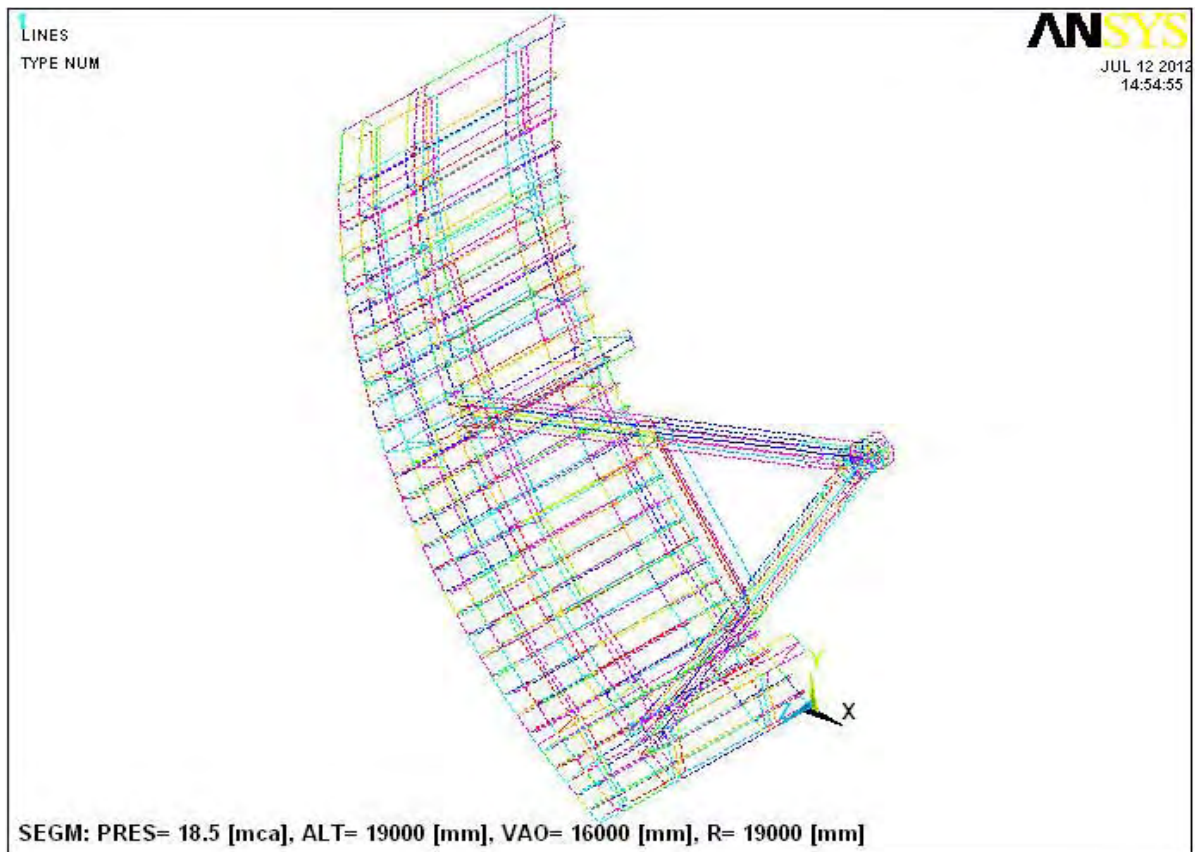


Figura 31 – Modelamento da estrutura (linhas).

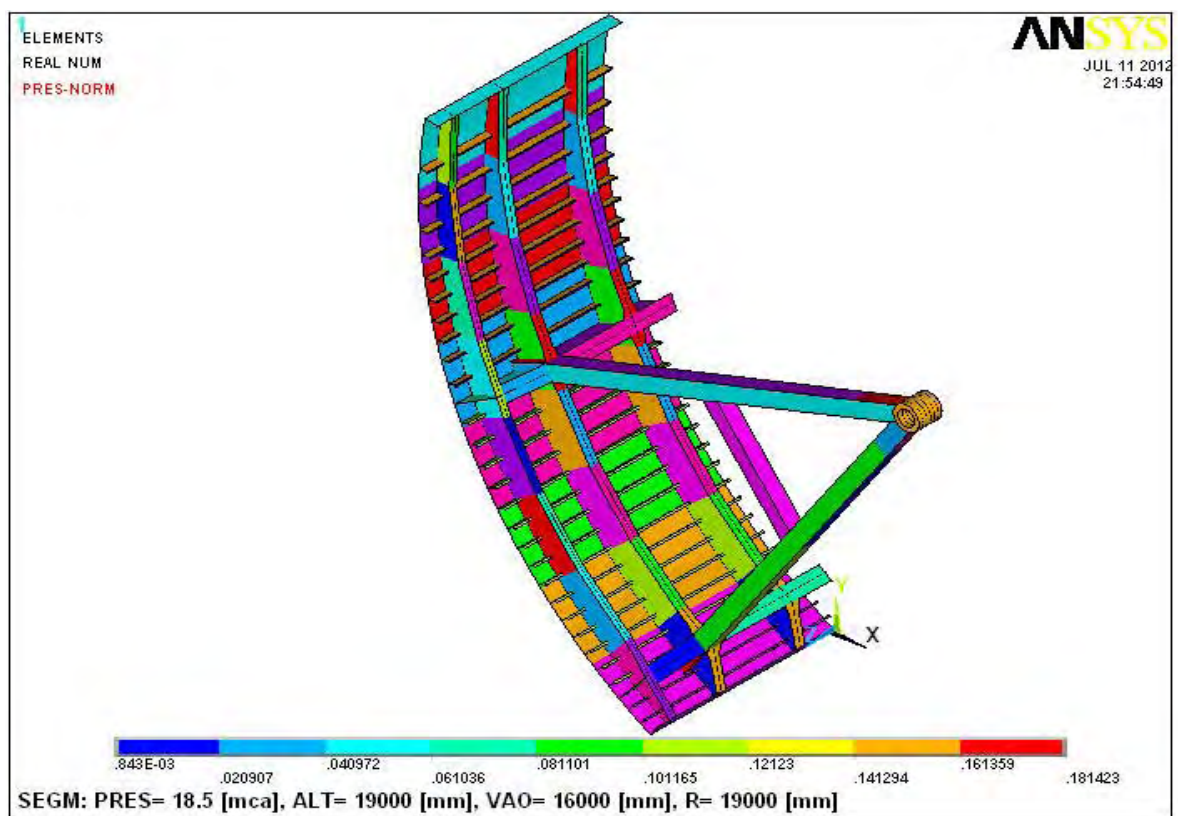


Figura 32 – Modelamento da estrutura (constantes reais).

A espessura é definida pelas constantes reais definidas pela variação da cor na Figura 32 e cujas variáveis de projeto são:

$EPAR (i_1^{np}) \equiv$ Espessuras do paramento de cada painel (painéis de 1 a np);

$EALV1 (i_1^{np}) \equiv$ Espessuras da alma da Viga Vertical1 em cada painel;

$EABV1 (i_1^{np}) \equiv$ Espessuras da aba da Viga Vertical1 em cada painel;

$EALV3 (i_1^{np}) \equiv$ Espessuras da alma da Viga Vertical3 em cada painel;

$EABV3 (i_1^{np}) \equiv$ Espessuras da aba da Viga Vertical3 em cada painel;

$EAL (i_1^3) \equiv$ Espessuras da alma das longarinas A, B e C;

$EBL (i_1^3) \equiv$ Espessuras da aba das longarinas A, B e C;

$EAVHS (i_1^3) \equiv$ Espessuras da alma da viga horizontal superior;

$EBVHS (i_1^3) \equiv$ Espessuras da aba da viga horizontal superior;

$EAVHI (i_1^3) \equiv$ Espessuras da alma da viga horizontal inferior;

$EBVHI (i_1^3) \equiv$ Espessuras da aba da viga horizontal inferior;

Espessuras das chapas do braço superior:

$EABS \equiv$ Espessuras das almas;

$EBSSP \equiv$ Espessuras da aba superior próxima ao painel;

$EBSST \equiv$ Espessura da aba superior próxima ao terminal;

$EBSIP \equiv$ Espessura da aba inferior próximo ao painel;

$EBSIT \equiv$ Espessura da aba inferior próximo ao terminal;

Espessuras das chapas do braço inferior:

$EABI \equiv$ Espessuras das almas;

$EBIIP \equiv$ Espessuras da aba inferior próxima ao painel;

$EBIIT \equiv$ Espessura da aba inferior próxima ao terminal;

$EBISP \equiv$ Espessura da aba superior próximo ao painel;

$EBIST \equiv$ Espessura da aba superior próximo ao terminal;

Espessuras do terminal:

$EPLT \equiv$ Espessura das chapas laterais do terminal;

$EPST \equiv$ Espessura das placa superior e inferior do terminal;

$ERCT \equiv$ Espessura do reforço central do terminal;

Outras espessuras:

$EFP \equiv$ Espessura dos flanges dos painéis;

$ETBB \equiv$ Espessura da trava do braço;

$EFTP \equiv$ Espessura do fechamento do topo;

EFSP $\equiv$ Espessura do fechamento da soleira;

LUEFS $\equiv$ Espessura das chapas do caixão abaixo dos braços;

3.1.1.3 Vinculação e carregamentos

A comporta foi modelada com restrição em z nas laterais, restrição radial na base, restrição de rotação no cubo e simetria no centro (geometria, vinculação e carregamento simétrico) como mostrado na Figura 33. Como carregamento aplicou-se uma pressão causada pela coluna d'água de 17,3 [mca $\equiv$ metros de coluna d'água] como mostrado na Figura 34.

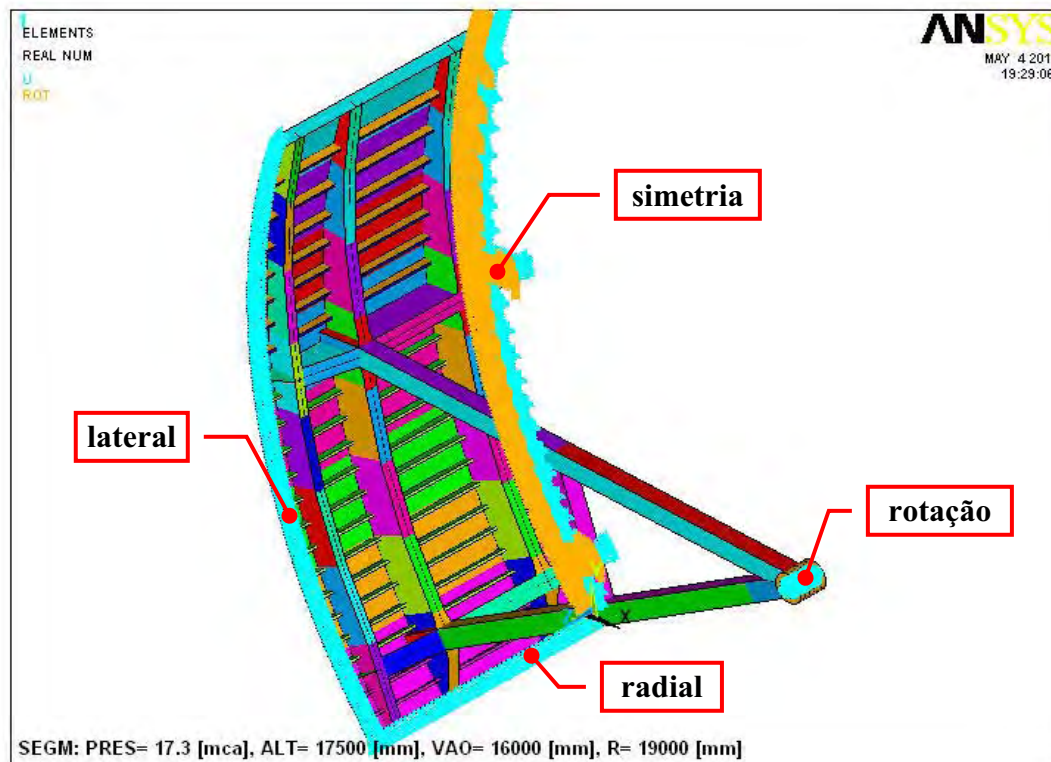


Figura 33 – Vinculação do modelo.

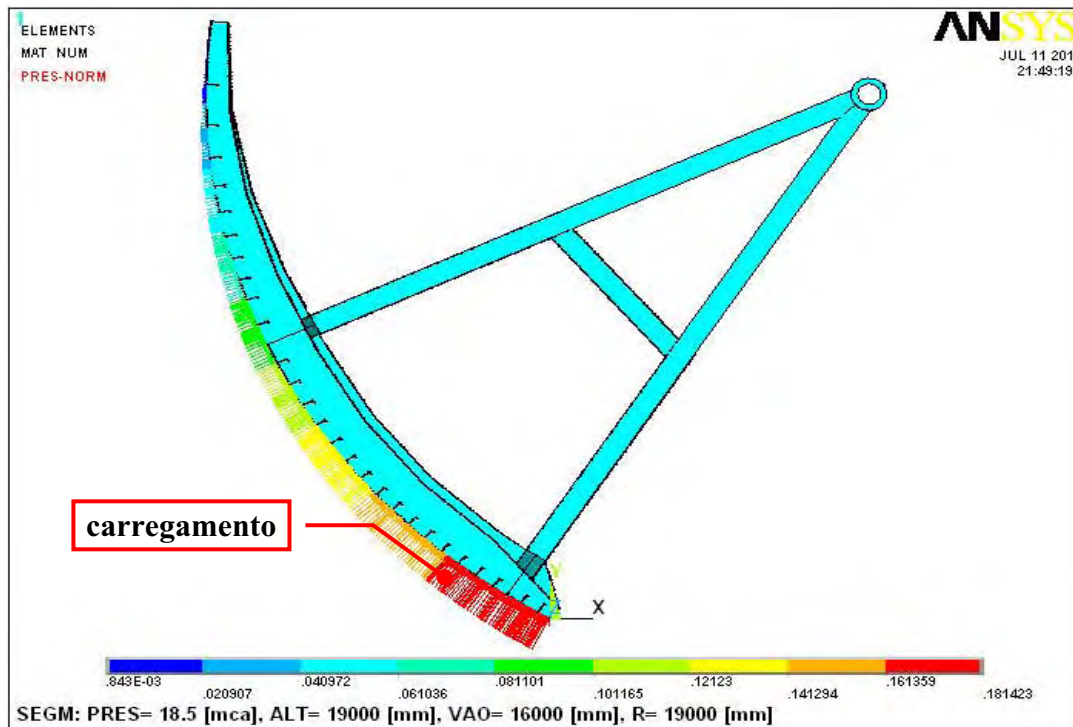


Figura 34 – Carregamento na chapa de face.

3.1.2 Programa paramétrico

Para construir o modelo paramétrico deve-se inicialmente definir os parâmetros de projeto os quais são:

- Raio do paramento de acordo com a Figura 35 - RAIO
- Vão - VAO
- Elevação do munhão – ELMUN
- Elevação da soleira - ELSOL
- Elevação do topo da comporta fechada – ELTOPO
- Altura da comporta – H
- Distância entre centros dos munhões – DEM
- Elevação do cutelo inferior – base da comporta aberta – ECICA
- Número de vigas verticais – NVT
- Largura da placa da coluna A de acordo com a Figura 19 – LPA
- Largura da placa da coluna B – LPB
- Largura da placada coluna C – LPC
- Número de longarinas acima da viga horizontal superior – NLAVHS
- Posição de cada longarina acima da viga horizontal superior – LL(i)
- Altura da alma das longarinas acima da viga horizontal superior – HL3

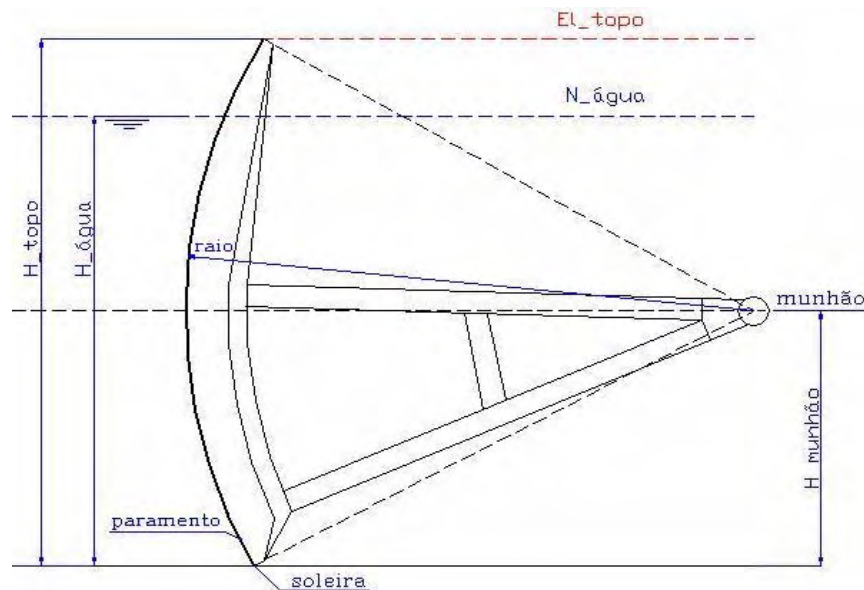


Figura 35 – Alguns dos principais parâmetros de projeto.

- Largura da aba das longarinas acima da viga horizontal superior – LA3
- Número de longarinas entre a viga horizontal inferior e superior – NLEVH
- Posição de cada longarina entre a viga horizontal inferior e superior – LL(i)
- Altura da alma das longarinas entre a viga horizontal inferior e superior – HL2
- Largura da aba das longarinas entre a viga horizontal inferior e superior – LA2
- Número de longarinas abaixo da viga horizontal inferior - NLEVI
- Posição de cada longarina abaixo da viga horizontal inferior – LL(i)
- Altura da alma das longarinas abaixo da viga horizontal inferior – HL1
- Largura da aba das longarinas abaixo da viga horizontal inferior – LA1
- Ângulo entre as vigas horizontais – PVHI
- Largura das abas do braço – FLA
- Subtipo da Seção do Braço < I (tipo perfil I), C (tipo caixão retangular), O (tipo circular)> – TIPO
- Número de painéis para transporte e montagem na obra – NP
- Tamanho do elemento – TE

Estes parâmetros são divididos em dois grupos distintos, parâmetros dependentes e parâmetros independentes. Todos os parâmetros relacionados anteriormente são independentes exceto TE que é dependente, pois depende da dimensão à qual está relacionado.

O parâmetro TE representa a dimensão do elemento na fase de se realizar o processo de fazer a malha nas áreas.

O fluxograma do programa de parametrização, resumindo as principais etapas, está descrito na Figura 36.

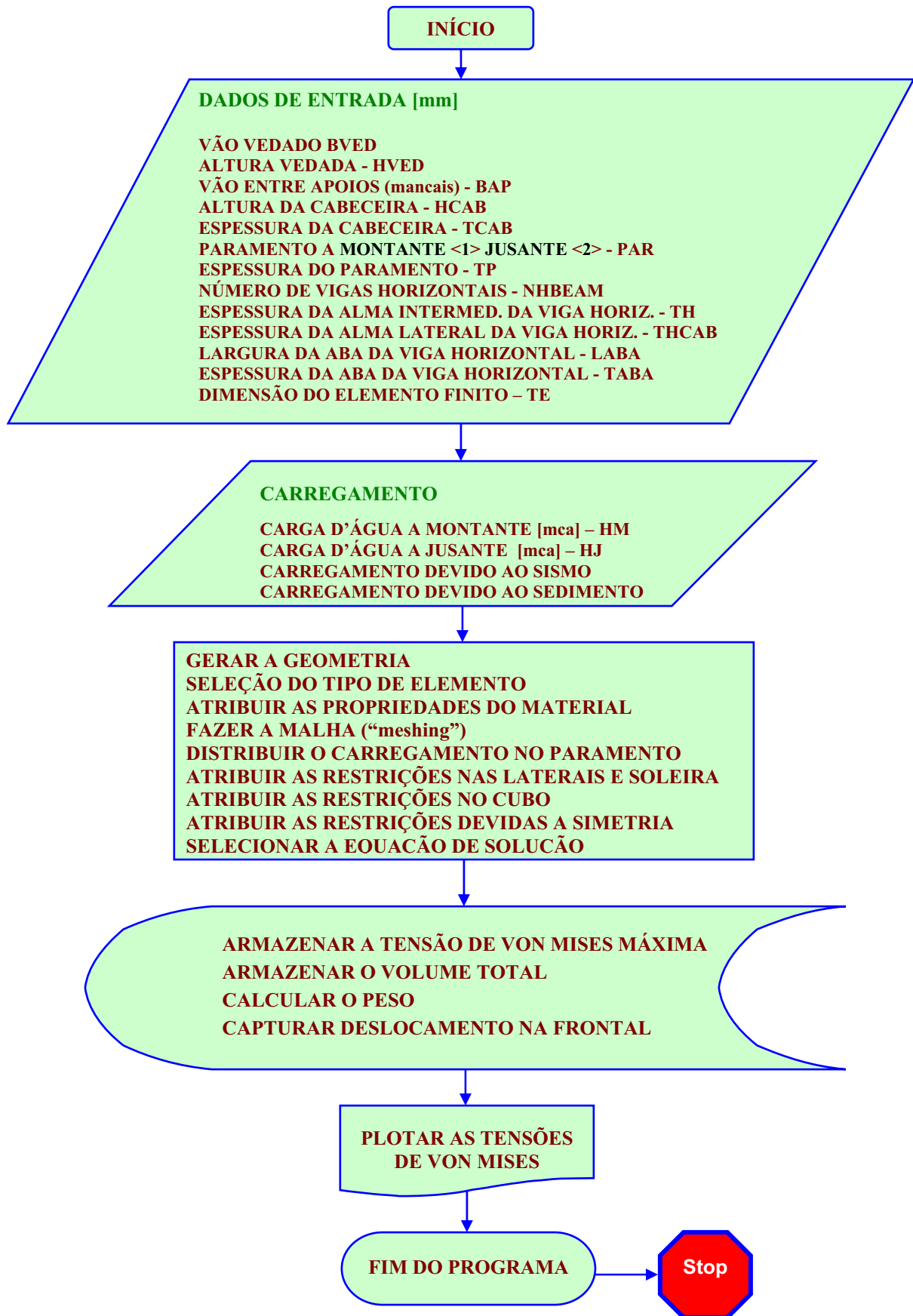


Figura 36 – Fluxograma do programa de parametrização da comporta.

Após executar o programa de parametrização, obtém-se o resultado na tela do computador conforme a Figura 37.

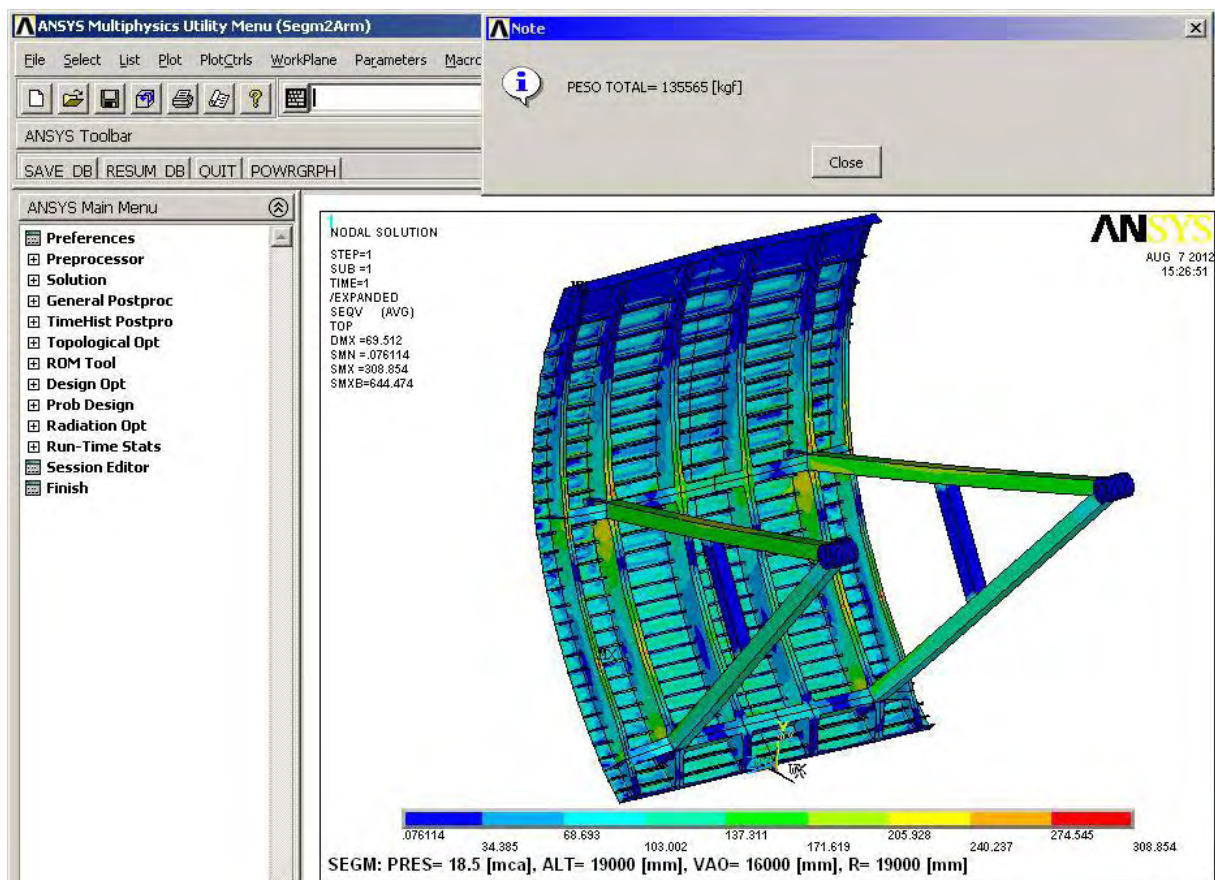


Figura 37 – Tela de saída com as tensões combinadas (von Mises) do programa de parametrização em ANSYS®.

Além das tensões unidirecionais, principais e combinadas, pode-se também obter as deflexões e rotações nos eixos das coordenadas cartesianas, bem como a soma dos deslocamentos de todos os elementos que compõe o tabuleiro.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados do programa paramétrico da comporta segmento modelada com elementos *BEAM189*

Na modelagem com elementos *BEAM189* é possível obter, além das tensões e deformações na estrutura, os esforços normais, os esforços cortantes, os momentos fletores e torçores em torno dos diversos eixos das coordenadas locais.

A força normal máxima em módulo tem o valor de 8,99 [MN] e ocorre nos braços da comporta segmento conforme pode ser observada na Figura 38. O sinal negativo significa que esse máximo esforço é de compressão.

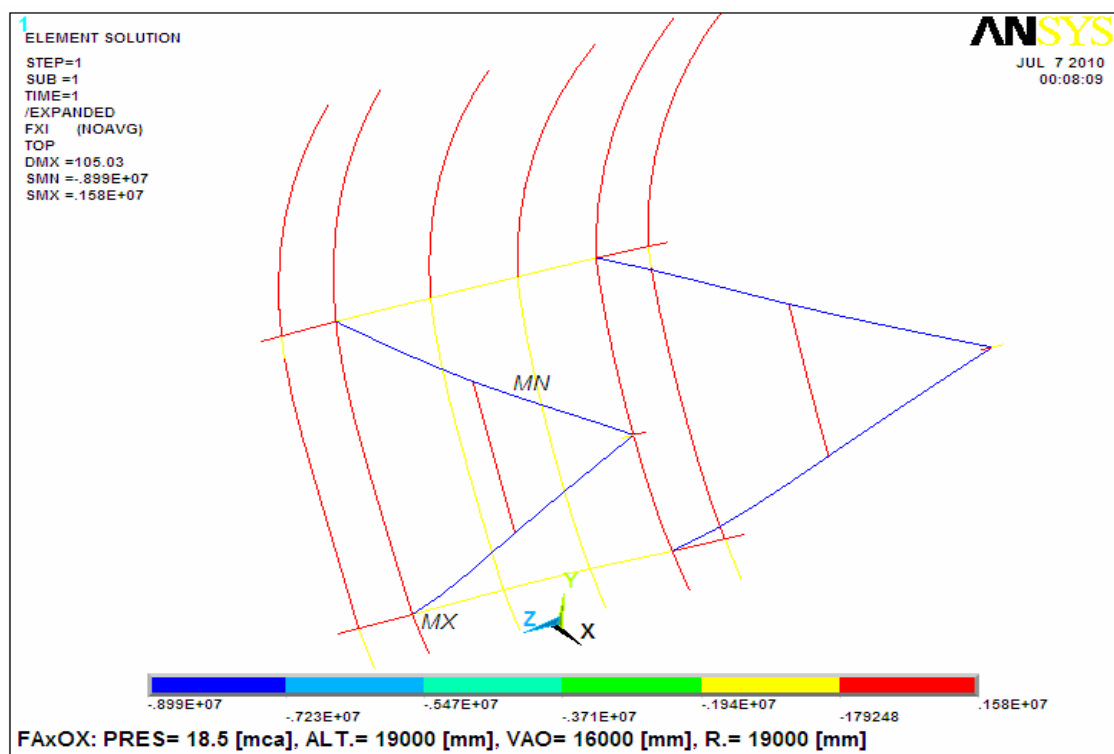


Figura 38 – Força normal orientada em OX das coordenadas locais.

As coordenadas locais do elemento *BEAM189* estão orientadas conforme a Figura 39.

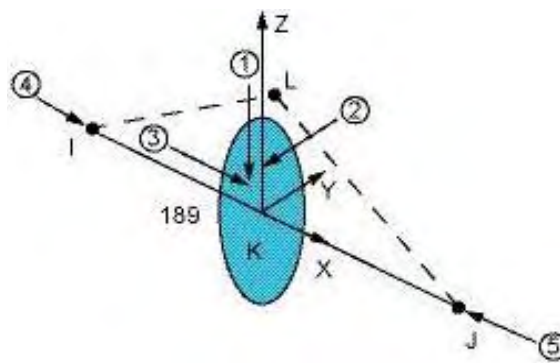


Figura 39 – Orientação das coordenadas locais do elemento *BEAM189*.

O esforço cortante com orientação OY e o momento fletor com orientação OZ das coordenadas locais observados nas Figuras 40 e 43, representam o esforços solicitantes internos no plano do pórtico tipo “A” e cujos valores devem ser transferidos para o cálculo analítico. Para maior precisão, devem-se isolar os elementos dos braços e imprimir os valores obtidos.

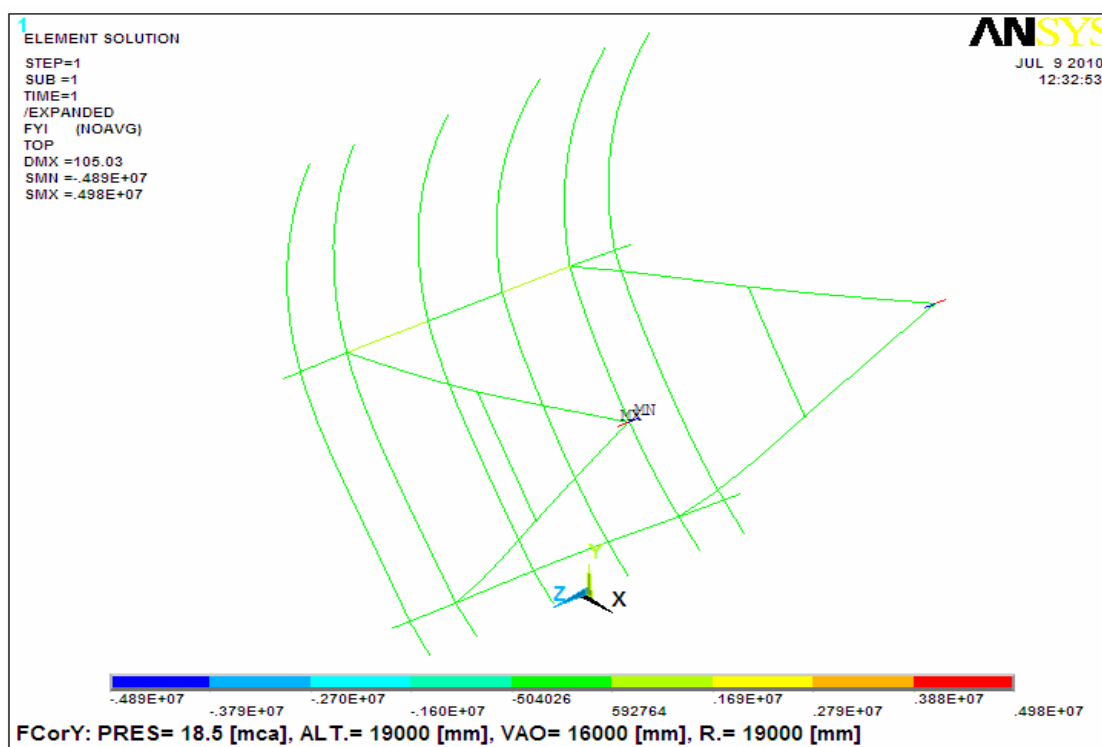


Figura 40 – Força cortante orientada em OY das coordenadas locais (pórtico tipo “A”).

O esforço cortante com orientação OZ e o momento fletor com orientação OY das coordenadas locais observados nas Figuras 41 e 42, representam o esforços solicitantes internos no plano do pórtico tipo “ π ” e obtidos com precisão no cálculo analítico.

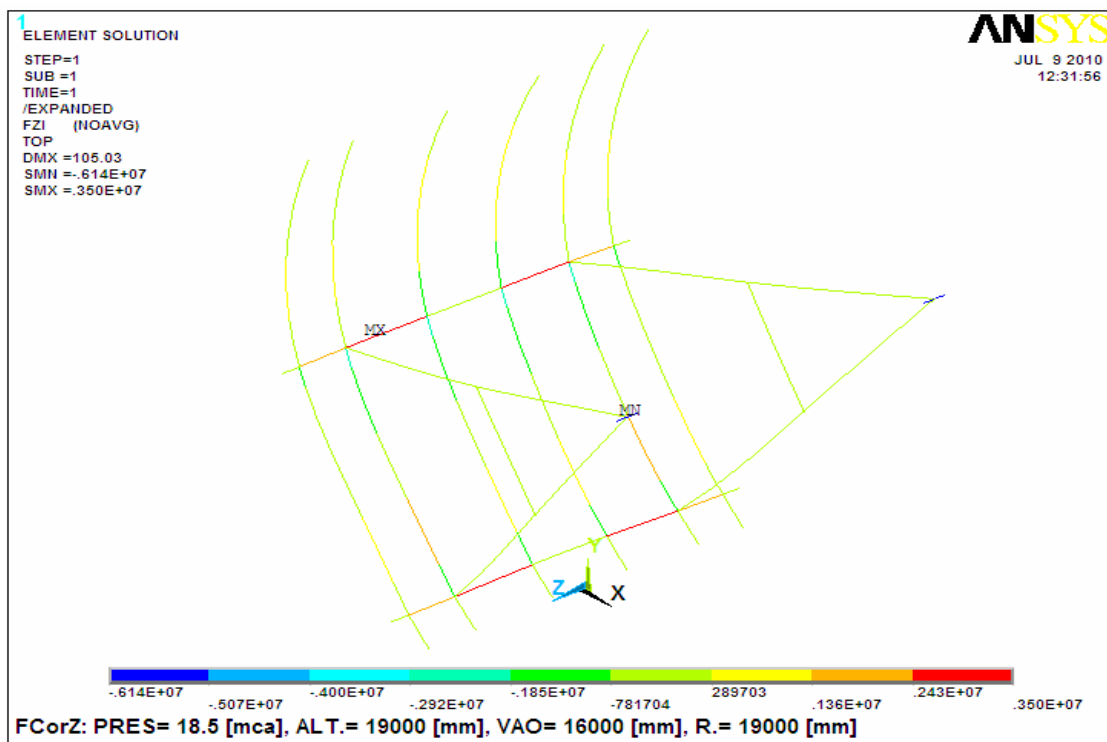


Figura 41 – Força cortante orientada em OZ das coordenadas locais (pórtico tipo “ π ”).

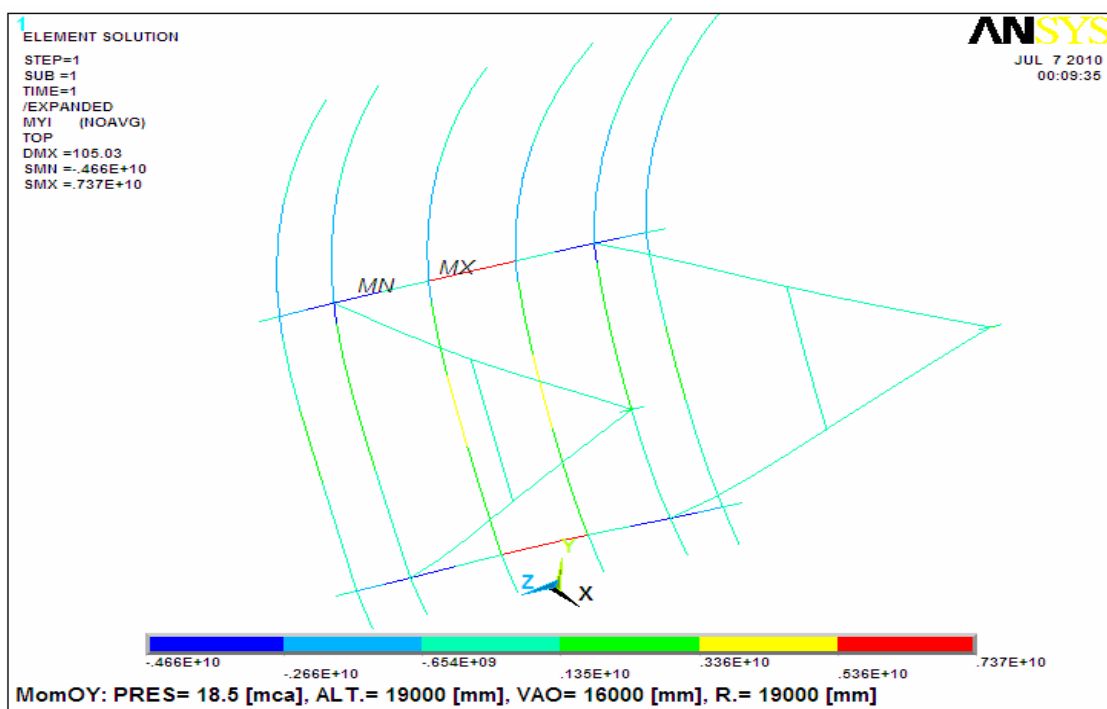


Figura 42 – Momento fletor orientado em OY das coordenadas locais locais (pórtico tipo “ π ”).

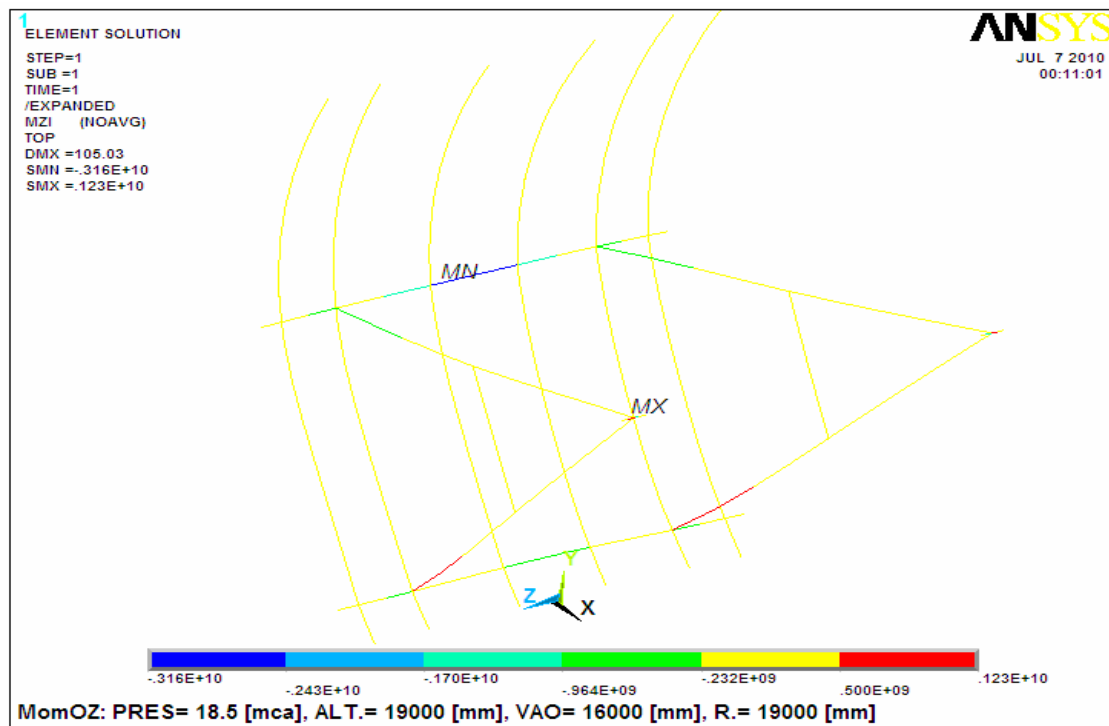


Figura 43 – Momento fletor orientado em OZ das coordenadas locais (pórtico tipo “A”).

O momento torçor com orientação OX representado pela Figura 44 apresenta baixo valor máximo e conseqüentemente sem importância para o dimensionamento da comporta.

Além dos valores dos esforços solicitantes internos que podem ser obtidos através da modelagem em elementos finitos com elementos *BEAM189*, podem ser verificadas as tensões e as deflexões nos diversos pontos da estrutura de acordo com as Figuras de 45 a 47. No entanto, como a modelagem não é completa, tanto pela falta dos reforços horizontais como pela ausência do paramento que somente pode ser representada com precisão através de elementos mais específicos de placa como por exemplo o elemento *SHELL93*, não se deve tomar os valores obtidos de tensão e deflexão para comparação com os valores analíticos.

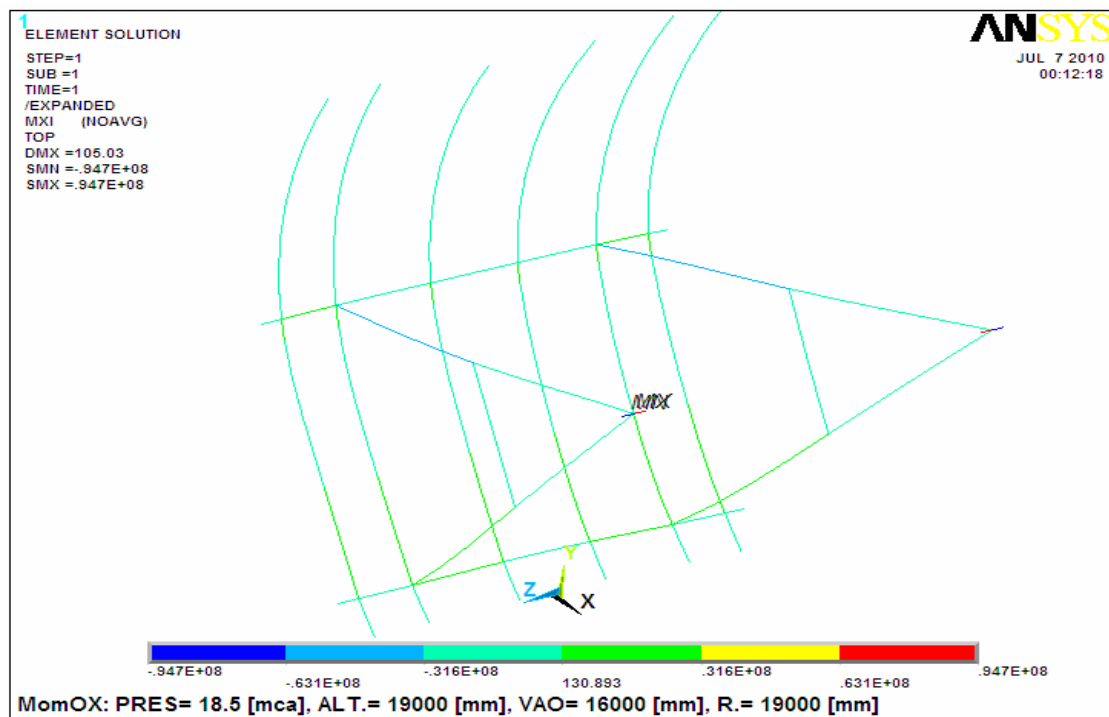


Figura 44 – Momento torçor orientado em OX das coordenadas locais.

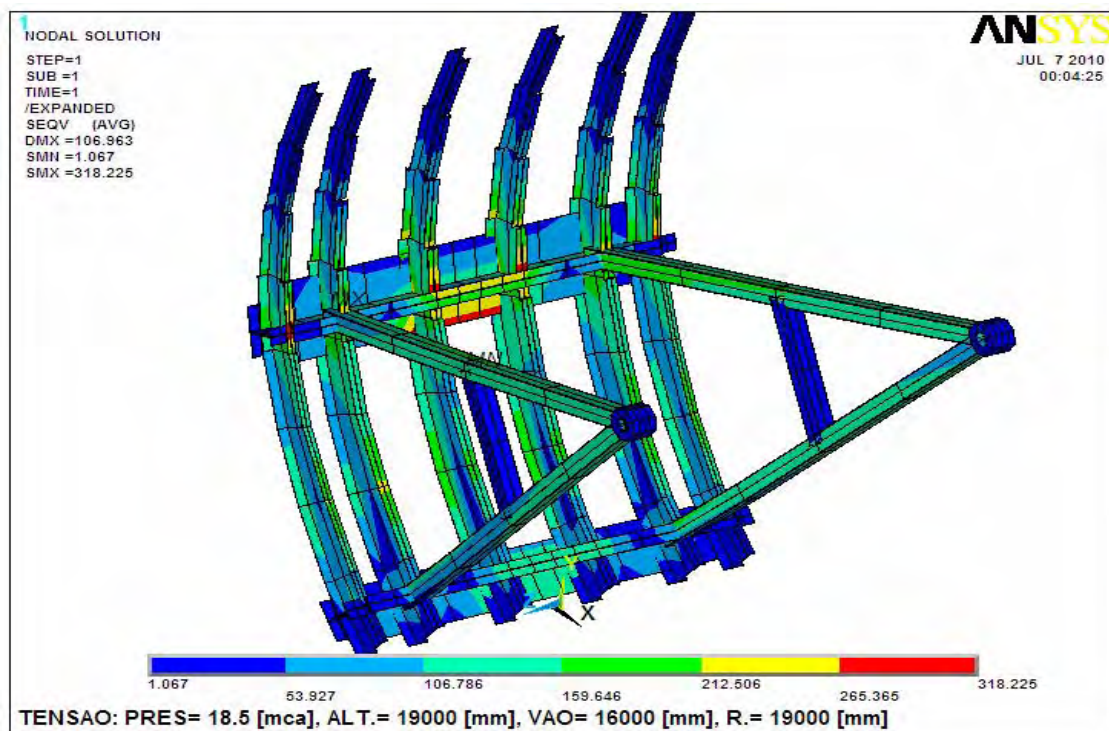


Figura 45 – Tensão equivalente de von Mises

Tensão máxima de von Mises = 318 [MPa].

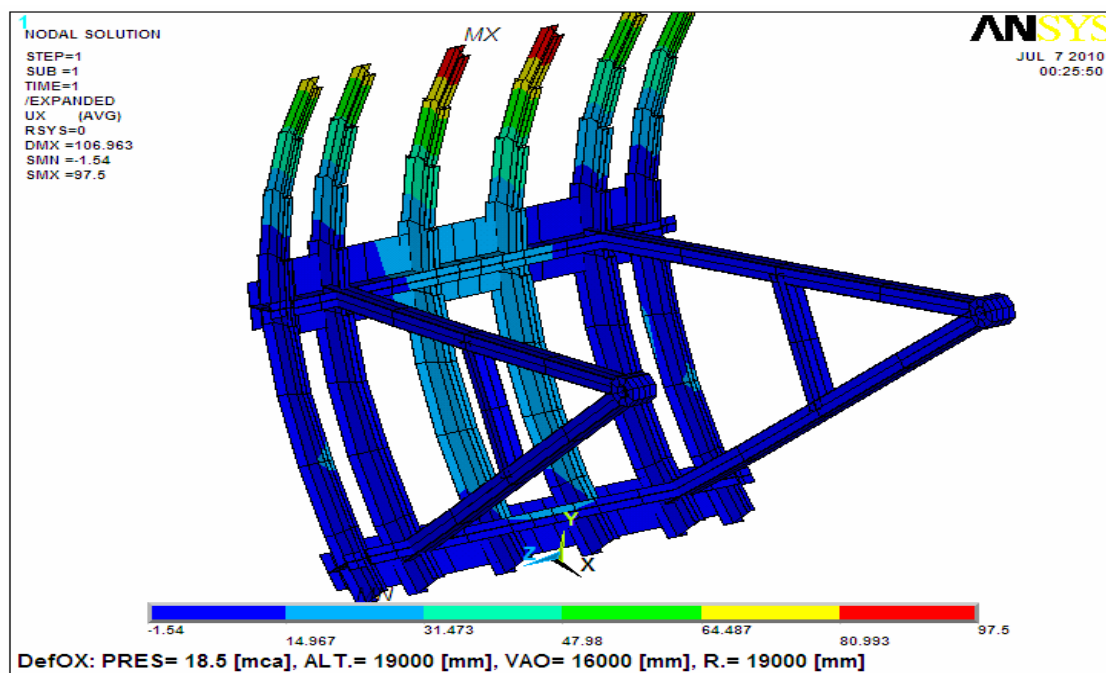


Figura 46 – Deslocamento orientado em OX das coordenadas locais.
 Deslocamento máximo em OX = 97,5 [mm].

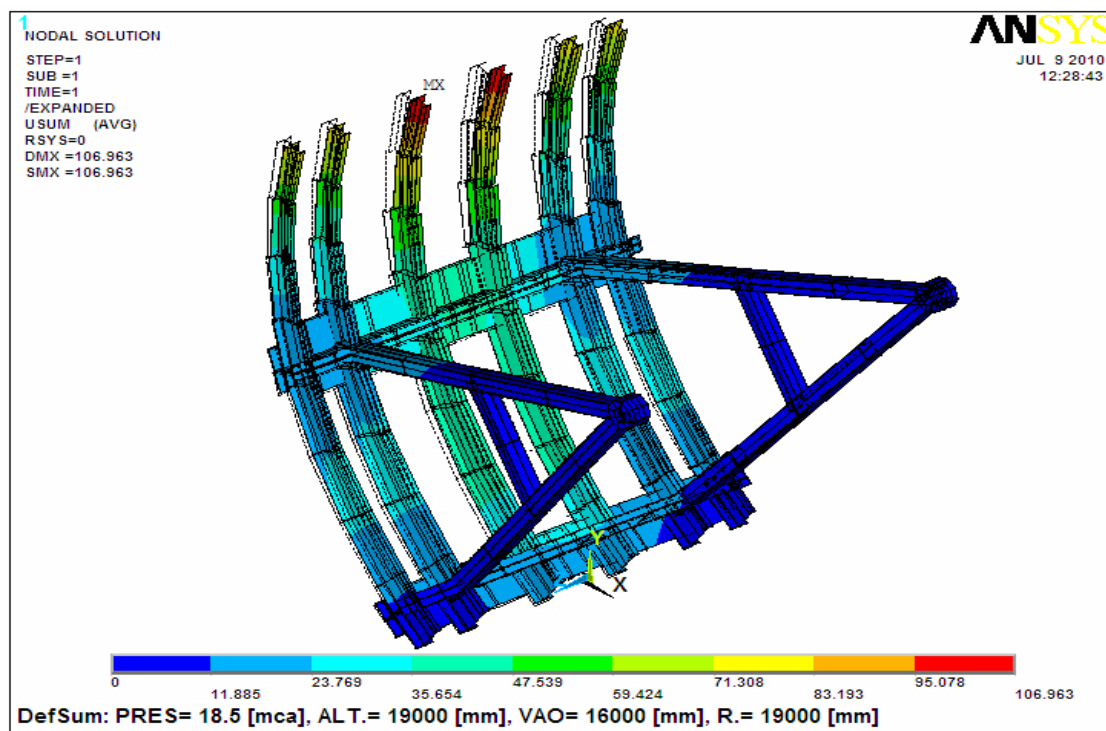


Figura 47 – Deslocamento total da estrutura (USUM $\equiv$ soma das deformações) com os contornos das vigas na posição não deformada.

Deslocamento máximo na estrutura = 106,96 [mm].

4.2 Estudo comparativo entre a estrutura da comporta calculada analiticamente e em ANSYS® com elementos BEAM189

Para efeito de comparação com dados numéricos obtidos através do cálculo analítico e do processo paramétrico em ANSYS® com elementos BEAM189, foi escolhida uma comporta de dimensões entre média e grande, mas próxima das mais comuns já projetas no Brasil. Embora os valores das características geométricas e de carregamento possam ser consultados no cálculo numérico apresentado no APÊNDICE A, pode-se enunciar os principais dados do equipamento, afirmando que o raio de curvatura do paramento é de 19,0 [m], o vão vedado é de 16,0 [m], a altura da comporta é igual a 19,0 [m] e a carga d'água com o nível normal é de 18,5 [m], tendo em vista ter sido adotada uma comporta de superfície.

Na elaboração das Tabelas de 2 a 4 foram tomados os principais elementos estruturais da comporta segmento, ou seja, as vigas verticais 1 e 3, as vigas horizontais superior e inferior e os braços superior e inferior.

Como os valores de esforços solicitantes internos de uma estrutura em elementos finitos não podem ser obtidos quando são usados elementos do tipo casca ou sólido, as Tabelas 2 e 3 mostram valores de esforços normal e cortante bem como momentos fletores utilizando o ANSYS® aplicando elementos do tipo BEAM189.

Na Tabela 2 observa-se que as maiores diferenças se encontram nos braços, motivadas pela alta hiperestaticidade dos braços com a viga vertical curva, cujos cálculos estruturais carecem de precisão. Dessa forma, justifica-se a tese ora apresentada, pois se podem utilizar os valores de momentos fletores obtidos em ANSYS® para melhorar a precisão do cálculo analítico, já que este é sempre solicitado pelo cliente que compra o equipamento hidromecânico em questão, isto é, a comporta segmento.

Tabela 2 – Comparação dos esforços entre cálculo analítico e ANSYS®

COMPARAÇÃO DOS ESFORÇOS ENTRE CÁLCULO ANALÍTICO E ANSYS®				
		Cálculo Analítico	Resultado ANSYS®	Diferença %
Viga Vertical 1 (VV1)	V _{máx} [MN]	-1.251	-1.118	-11%
	M _f _{máx} [N.mm]	2.486	2.050	-18%
Viga Vertical 3 (VV3)	V _{máx} [MN]	-2.386	-1.925	-19%
	M _f _{máx} [N.mm]	4.742	3.540	-25%
Viga Horiz. Superior (coincidente com VV1)	V _{máx} [MN]	1.993	1.962	-2%
	M _f _{máx} [N.mm]	0.000	0.000	0%
Viga Horiz. Superior (coincidente com VV2)	V _{máx} [MN]	-1.901	1.962	3%
	M _f _{máx} [N.mm]	-5.018	-4.664	-7%
Viga Horiz. Superior (coincidente com VV3)	V _{máx} [MN]	0.000	0.000	0%
	M _f _{máx} [N.mm]	7.836	7.370	-6%
Viga Horiz. Inferior (coincidente com VV1)	V _{máx} [MN]	1.753	1.589	-9%
	M _f _{máx} [N.mm]	0.000	0.000	0%
Viga Horiz. Inferior (coincidente com VV2)	V _{máx} [MN]	-3.342	-3.320	-1%
	M _f _{máx} [N.mm]	-4.464	-3.713	-17%
Viga Horiz. Inferior (coincidente com VV3)	V _{máx} [MN]	0.000	0.000	0%
	M _f _{máx} [N.mm]	6.903	5.839	-15%
Braço Superior	F _{Normal} [N]	8.917	8.957	0.4%
	V _{máx} [N]	0.036	0.042	17%
	M _f letor próximo ao tabuleiro [N.mm]	0.348	0.330	-5%
	M _f letor próximo ao cubo [N.mm]	0.174	0.235	35%
	M _f letor plano vertical "A" [N.mm]	...	0.317	...
	F _{Normal} [N]	7.839	7.364	-6%
Braço Inferior	V _{máx} [N]	0.034	0.033	-4%
	M _f letor próximo ao tabuleiro [N.mm]	0.350	0.387	11%
	M _f letor próximo ao cubo [N.mm]	0.175	0.172	-2%
	M _f letor plano vertical "A" [N.mm]	...	0.954	...
	F _{Normal} [N]	7.839	7.364	-6%

Sendo: F ≡ Força; V ≡ Esforço Cortante; M_f ≡ Momento Fletor

4.3 Estudo comparativo entre a estrutura da comporta calculada analiticamente, acrescentando os valores de esforços cortantes e momentos fletores no pórtico tipo “A” obtidos em elementos finitos e os resultados em ANSYS® com elementos *BEAM189*

Na busca de uma precisão maior entre os valores de tensões calculadas pelo processo analítico e as obtidas pelo processo numérico em elementos finitos com elementos de casca tipo *SHELL93* e na falta de uma ferramenta de cálculo como por exemplo a resolução de grelha com elementos curvos que pudesse obter os valores dos esforços solicitantes internos no pórtico tipo “A”, foi utilizada a parametrização da comporta em elementos finitos com elementos de viga tipo *BEAM189*. Assim, foram inseridos no cálculo analítico apenas os valores de esforços cortantes e momento fletor, obtidos em elementos finitos, no cálculo dos braços, apenas no plano vertical onde se forma o pórtico tipo “A”, já que todos os demais valores obtidos através do cálculo analítico satisfazem quanto a precisão necessária para o dimensionamento da estrutura.

Apesar do cálculo analítico ser relativamente longo, utilizando mais de uma centena de páginas e o cálculo em elementos finitos oferecer apenas quatro valores, podemos alterar o seu nome para cálculo misto.

Assim, observando a Tabela 3 podemos notar que as maiores diferenças encontradas na Tabela 2 foram sensivelmente diminuídas, justificando o processo proposto da inserção dos dados obtidos por elementos finitos no cálculo analítico.

Tabela 3 – Comparação dos esforços entre cálculo misto considerando o pórtico “A” e ANSYS®

COMPARAÇÃO DOS ESFORÇOS ENTRE CÁLCULO MISTO E ANSYS®				
		Cálculo Misto (Analítico+ANSYS)	Resultado ANSYS®	Diferença %
Viga Vertical 1 (VV1)	V _{máx} [N]	-1.251	-1.118	-11%
	M _f máx [N.mm]	2.486	2.050	-18%
Viga Vertical 3 (VV3)	V _{máx} [N]	-2.386	-1.925	-19%
	M _f máx [N.mm]	4.742	3.540	-25%
Viga Horiz. Superior (coincidente com VV1)	V _{máx} [N]	1.993	1.962	-2%
	M _f máx [N.mm]	0.000	0.000	0%
Viga Horiz. Superior (coincidente com VV2)	V _{máx} [N]	-1.901	1.962	3%
	M _f máx [N.mm]	-5.018	-4.664	-7%
Viga Horiz. Superior (coincidente com VV3)	V _{máx} [N]	0.000	0.000	0%
	M _f máx [N.mm]	7.836	7.370	-6%
Viga Horiz. Inferior (coincidente com VV1)	V _{máx} [N]	1.753	1.589	-9%
	M _f máx [N.mm]	0.000	0.000	0%
Viga Horiz. Inferior (coincidente com VV2)	V _{máx} [N]	-3.342	-3.320	-1%
	M _f máx [N.mm]	-4.464	-3.713	-17%
Viga Horiz. Inferior (coincidente com VV3)	V _{máx} [N]	0.000	0.000	0%
	M _f máx [N.mm]	6.903	5.839	-15%
Braço Superior	F _{Normal} [N]	8.917	8.957	0.4%
	V _{máx} [N]	0.036	0.042	17%
	M _f letor próximo ao tabuleiro [N.mm]	0.348	0.330	-5%
	M _f letor próximo ao cubo [N.mm]	0.174	0.235	35%
	M _f letor plano vertical "A" [N.mm]	0.317	0.317	0%
	F _{normal} [N]	7.839	7.364	-6%
Braço Inferior	V _{máx} [N]	0.034	0.033	-4%
	M _f letor próximo ao tabuleiro [N.mm]	0.350	0.387	11%
	M _f letor próximo ao cubo [N.mm]	0.175	0.172	-2%
	M _f letor plano vertical "A" [N.mm]	0.954	0.954	0%

4.4 Resultados da comporta segmentada modelada em ANSYS® com elementos SHELL93

Com a parametrização do projeto original obtemos os resultados a seguir:

Para comporta de dois braços são obtidas as tensões combinadas de von Mises conforme Figura 48 e os deslocamentos máximos de acordo com a Figura 49.

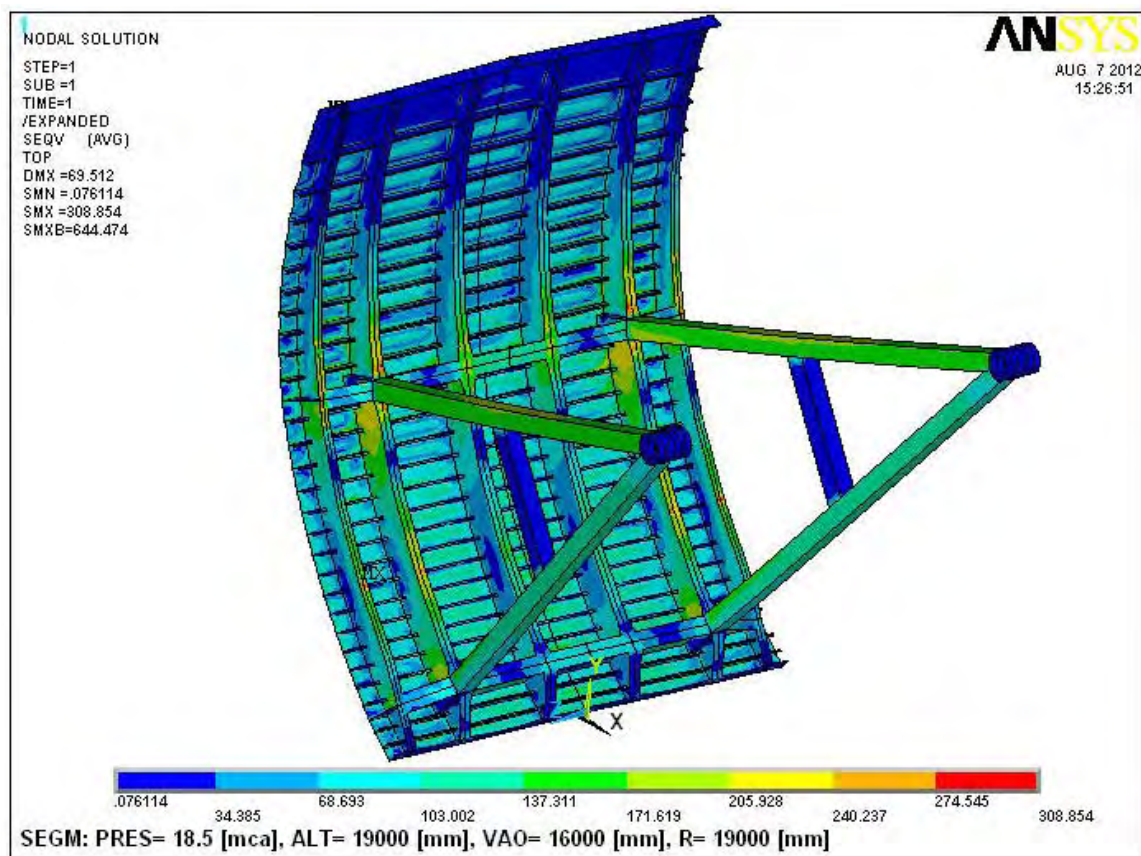


Figura 48 – Tensão de von Mises (tensão combinada) – 02 braços.

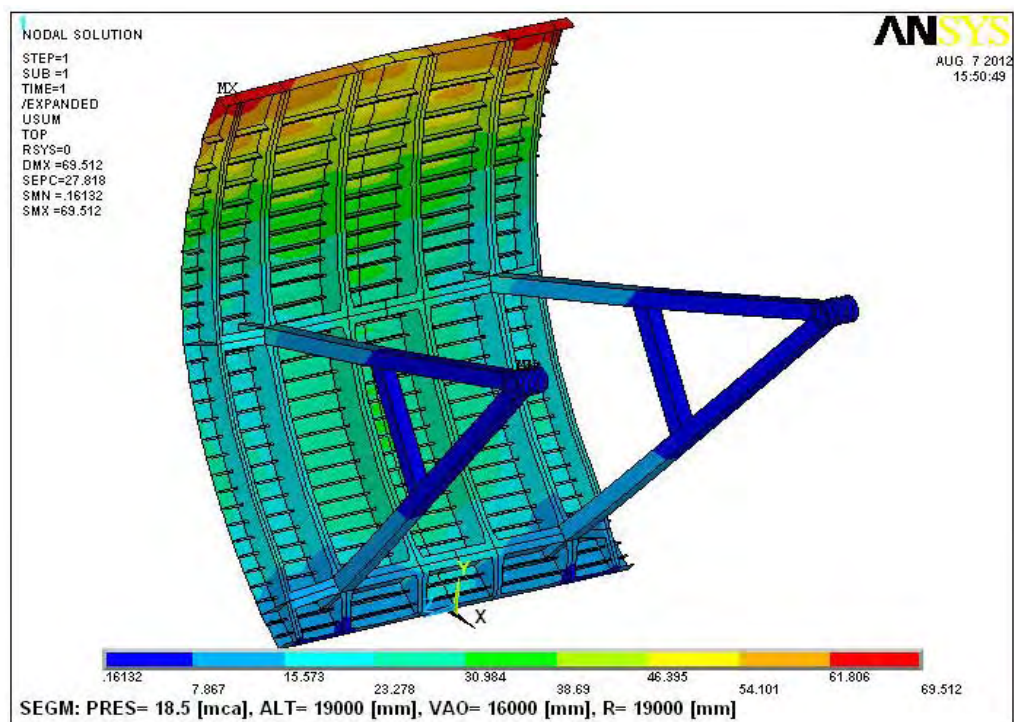


Figura 49 – Deslocamento total da estrutura (USUM) – 02 braços..

Para comporta de três braços são obtidas as tensões combinadas de von Mises conforme Figura 50 e os deslocamentos máximos de acordo com a Figura 51.

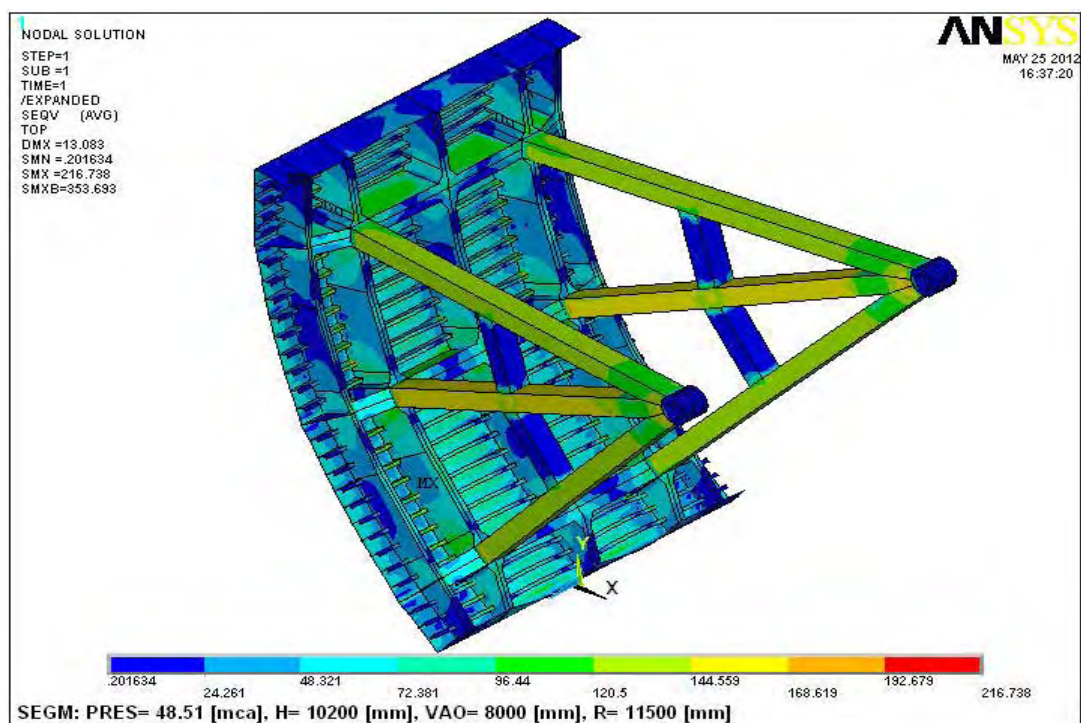


Figura 50 – Tensão de von Mises (tensão combinada) – 03 braços.

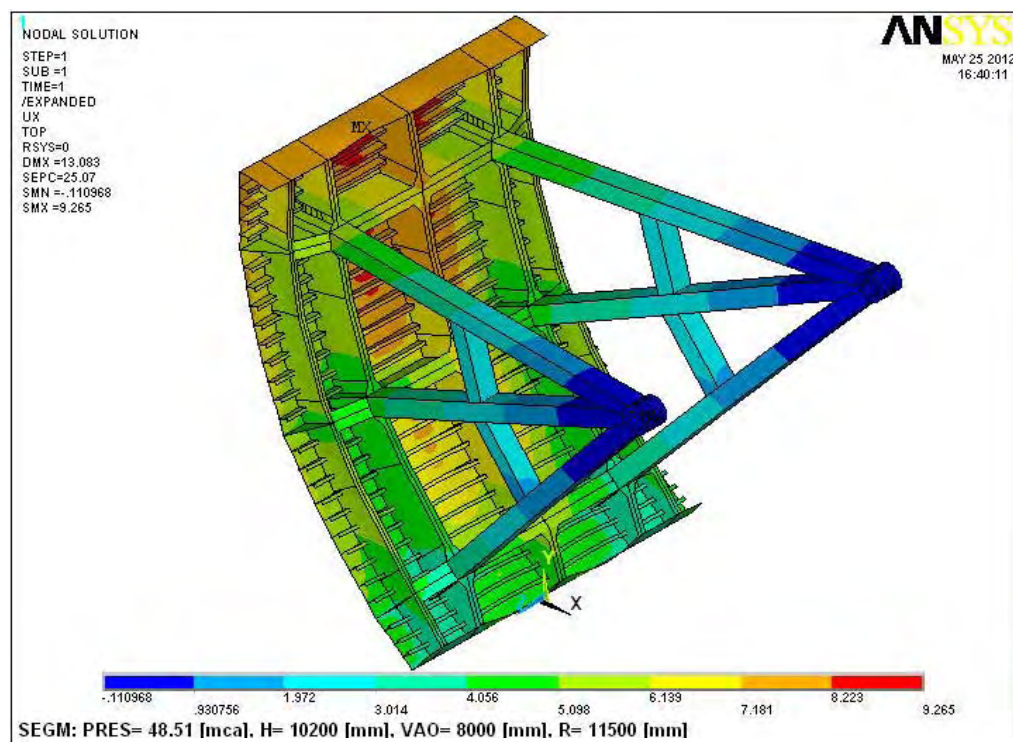


Figura 51 – Deslocamento em X da estrutura (UX) – 03 braços.

Para comporta de quatro braços são obtidas as tensões combinadas de von Mises conforme Figura 52 e os deslocamentos máximos de acordo com a Figura 53.

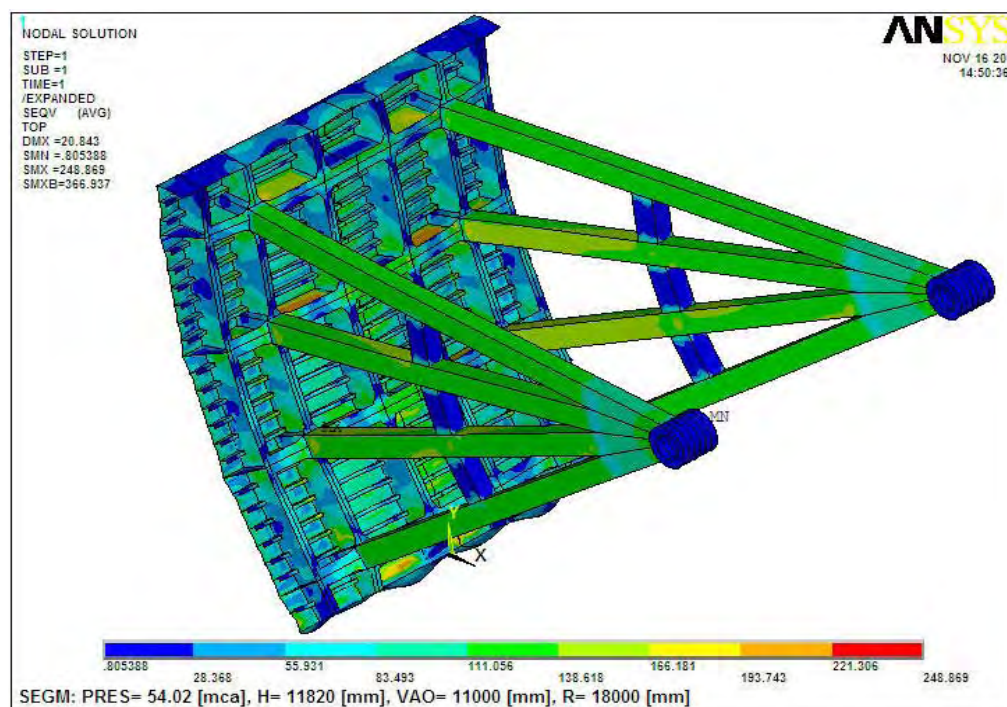


Figura 52 – Tensão de von Mises (tensão combinada) – 04 braços.

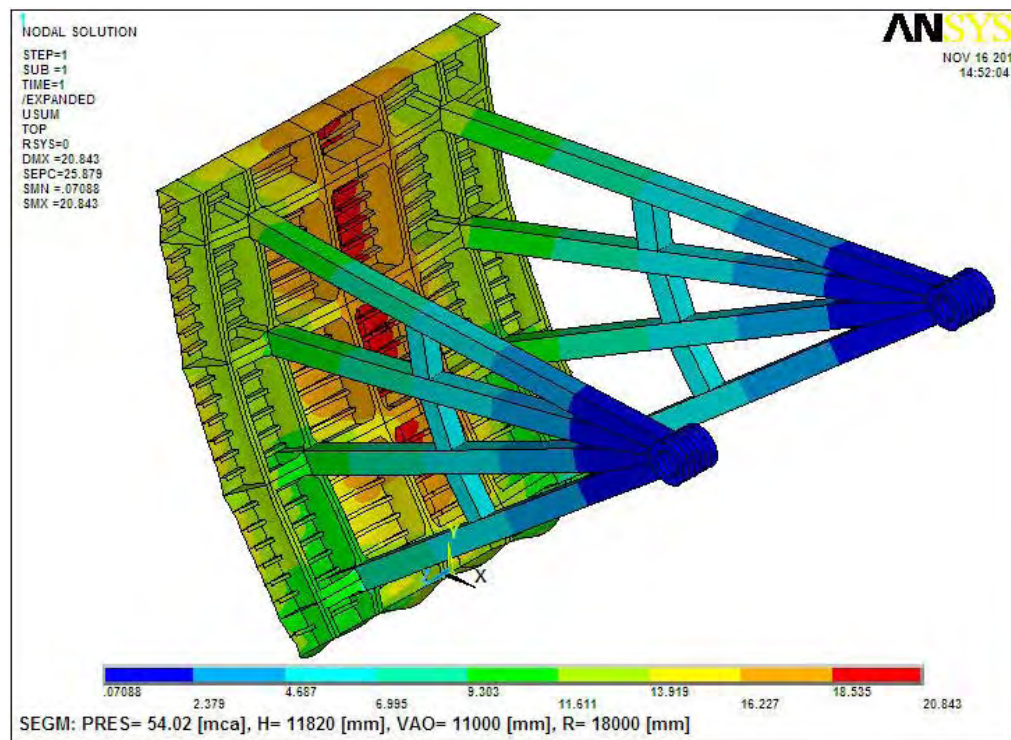


Figura 53 – Deslocamento total da estrutura (USUM) – 04 braços.

4.5 Estudo comparativo entre a estrutura da comporta calculada analiticamente e em ANSYS® com elementos SHELL93

A Tabela 4 foi elaborada de forma a mostrar de forma resumida os pontos de maiores tensões obtidas nos principais elementos estruturais da comporta. Como pode ser observado, as tensões entre o cálculo analítico e o cálculo que foi denominado de misto pois foram inseridos os valores de momento fletor e esforço cortante do pórtico tipo “A”, são iguais exceto nos braços. Dessa forma, podemos afirmar que o cálculo analítico é uma ferramenta poderosa para se fazer uma análise inicial da estrutura e para propor as características geométricas que satisfazem a necessidade de projeto.

Tabela 4 – Comparação das tensões máximas entre cálculo misto e ANSYS®

COMPARAÇÃO DAS TENSÕES ENTRE CÁLCULO ANALÍTICO, MISTO E ANSYS®						
		Cálculo analítico original	Cálculo misto (analítico com o pórtico “A”)	Resultado ANSYS®	Diferença ANSYS x original %	Diferença ANSYS x pórtico “A” %
Viga vertical 1 (VV1)	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	229	229	310	35%	35%
Viga vertical 3 (VV3)	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	257	257	230	-11%	-11%
Viga horizontal Superior	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	218	218	202	-7%	-7%
Viga horizontal Inferior	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	183	183	223	22%	22%
Braço superior	$\sigma_{\text{máx}}$ próximo ao tabuleiro [MPa]	164	234	240	46%	3%
	$\sigma_{\text{máx}}$ próximo ao cubo [MPa]	150	155	175	16%	13%
Braço inferior	$\sigma_{\text{máx}}$ próximo ao tabuleiro [MPa]	148	218	192	30%	-12%
	$\sigma_{\text{máx}}$ próximo ao cubo [MPa]	134	139	127	-5%	-9%

4.6 Discussão dos resultados da parametrização da comporta segmento

Como o objetivo do cálculo estrutural de uma comporta é buscar a melhor estrutura com a máxima segurança e o menor peso possível, procura-se aproximar as tensões máximas de cálculo com as tensões admissíveis e que tenha as deflexões dentro do recomendado pelas normas de projeto. Assim, se houver uma precisão adequada nos valores de tensões e deslocamentos pode-se garantir a segurança da estrutura.

Como pode ser observada na Tabela 4 a tensão máxima de von Mises na região dos braços, anteriormente diferentes entre 30 e 46 % nos diversos estudos realizados, apresentam valores bem próximos após a adição dos momentos fletores e esforços cortantes do pórtico tipo “A”.

As maiores diferenças encontradas entre os valores de tensão entre os cálculos ocorrem em regiões de mudança de direção de elementos estruturais em função da complexidade da estrutura, gerando concentração de tensões em regiões muito pequenas.

Dessa forma, recomendamos que sejam inseridos nos cálculos da comporta segmento os valores dos esforços solicitantes internos do pórtico tipo “A” e não mais reforçar a estrutura através da diminuição da tensão admissível nos braços visto que este processo pode conduzir a erros que podem comprometer o funcionamento do equipamento ou, por outro lado, conduzir a um aumento excessivo do seu peso, gerando assim um aumento no esforço de manobra do equipamento.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta tese teve como objetivo criar uma ferramenta capaz de fornecer ao engenheiro calculista um meio de obter valores confiáveis no desenvolvimento do projeto e cálculo analítico da comporta segmento. Em adição a este objetivo principal foi possível reduzir tempo e custo de projeto, fabricação e transporte desse importante equipamento hidromecânico em decorrência da possibilidade de otimização da estrutura pela própria confiabilidade do cálculo.

A tese foi iniciada desenvolvendo um programa de cálculo analítico de uma comporta segmento a fim de se investigar os elementos estruturais mínimos necessários para suportar o carregamento dentro das tensões admissíveis de norma e da flecha da estrutura requerida pelo comprador do equipamento.

Em decorrência de alguns acidentes ocorridos ao redor do mundo neste tipo de equipamento, tornou-se quase uma necessidade, se verificar a estrutura com outra ferramenta e neste caso se elegeu o método dos elementos finitos como uma ferramenta ideal. Nesta evolução se notou que o cálculo analítico representava relativamente bem a estrutura estudada com exceção de dois pontos importantes, ou seja, pontos de concentração de tensão em face de alguma particularidade geométrica de projeto ou facilidade de fabricação e tensões nos braços inferiores ao obtidos na forma numérica.

Em vista do exposto, verificou-se que havia uma “falha” no cálculo analítico, pois este estudava o pórtico tipo “ π ” formado pelos elementos estruturais de mesmo plano, ou seja, braços e viga horizontal. Para suprir esta falha e em vista de vários processos de cálculo testados não resultarem em valores confiáveis, foi necessário desenvolver o cálculo numérico. Para tanto, foi desenvolvido o paramétrico da comporta em *Beam*, pois este elemento estrutural possibilita a obtenção dos diversos esforços solicitantes internos na estrutura. Dentre estes, o momento fletor e o esforço cortante do pórtico tipo “A” foram lançados no cálculo analítico para que os valores das tensões se aproximassem do cálculo em elementos finitos em *Shell* ou Casca.

Em relação ao exemplo apresentado, os resultados obtidos em ANSYS® ficaram muito próximos do cálculo analítico, principalmente os braços, comprovando desta forma que o desenvolvimento da presente tese é extremamente útil para a confiabilidade do cálculo analítico. Entretanto, as diferenças significativas, principalmente em relação às vigas verticais

são explicadas pela concentração de tensões onde o desvio angular das chapas da aba é alto. Para reduzir essas concentrações e permitir uma aproximação entre os dois métodos de cálculo, recomenda-se ou projetar a aba da viga vertical paralelamente ao paramento, o que aumenta o processo na fábrica ou a colocação de enrijecedores transversais que, ao mesmo tempo em que reduz a concentração, reduz o comprimento livre da alma, diminuindo a possibilidade de flambagem.

A utilização do cálculo analítico como uma ferramenta além de ser capaz de determinar uma geometria próxima de uma solução ideal, gera os parâmetros que permitem aos programas em elementos finitos encontrar os esforços resistentes internos quando usados no paramétrico em *Beam* e as tensões e deformações quando usados no paramétrico em *Shell*.

Para se realizar uma análise em elementos finitos sem utilizar o programa paramétrico, além de tomar muito tempo, torna a possibilidade de se cometer erros muito grandes visto que, sendo o equipamento de enormes dimensões, a quantidade de linhas e áreas a gerar é grande e qualquer modificação que se queira executar requer uma outra modelagem.

Tendo em vista o acima exposto, pode-se afirmar que os programas de parametrização em elementos finitos permitem:

- Reduzir o tempo de cálculo de uma comporta além de otimizar a estrutura;
- Reduzir o peso do equipamento, principalmente quando a geometria e o carregamento sobre a estrutura não são de tratamento comum ao engenheiro calculista como por exemplo na aplicação de sedimentos sobre a comporta;
- Atribuir maior confiabilidade no produto final com menores gastos em retrabalhos por erros durante o processo, melhora no desempenho do equipamento e em consequência na satisfação do cliente.

Em decorrência da globalização e da competitividade do mercado da América Latina, incluindo o Brasil, as margens de lucro embutidas nos orçamentos de comportas tem sido extremamente baixas, nunca ultrapassando os 4% e algumas vezes com porcentagens nulas, embora se procure manter a carga fabril e maximizar o lucro durante a fase de projeto, compra ou fabricação. É, portanto, evidente que a busca da otimização da estrutura passe a ter um aspecto relevante, principalmente quando este processo ainda não é aplicado por nenhuma outra fábrica deste ramo, a nível mundial e que seja do nosso conhecimento, utilize-se do processo de parametrização com otimização. Dessa forma, esta tese tem uma importância vital para que a indústria nacional de equipamentos hidromecânicos permaneça competitiva, lucrativa e gerando empregos.

Dentre os equipamentos de bens de consumo da área de geração de energia, irrigação e saneamento que geram altas receitas para o país podemos citar: comportas planas (ensecadeiras, deslizantes e vagão), comportas segmento, blindagens, condutos forçados, bifurcações, grades de tomada d'água, válvulas, dispositivos de segurança e bombas hidráulicas.

Esta tese aborda o equipamento comporta segmento e a dissertação citada na referência **(LOPES, 2002)** trata da parametrização e otimização de blindagens e bifurcações. Conclui-se, portanto, que vários outros equipamentos acima citados necessitam de estudos similares. Ressalte-se, ainda, que no caso de grades de tomada d'água e de bombas hidráulicas é necessário um estudo complementar referente à iteração fluido-estrutura tendo em vista que os máximos esforços ocorrem contemporaneamente com o escoamento, além de ser necessária a verificação de fadiga por vibração.

É intuitivo que os processos de parametrização expostos nesta tese podem ser aplicados para a maioria dos produtos não seriados tais como: construções industriais, coberturas metálicas, turbinas hidráulicas, pontes rodoviárias e ferroviárias, torres de transmissão e muitos outros. A indústria nacional procura avidamente aplicar processos os mais diversos para aumentar a sua competitividade e lucratividade, garantindo a sua sobrevivência. A força das instituições de ensino pode ser de grande valia para que o processo de otimização dos projetos seja de conhecimento das empresas e possa ser aplicado intensamente para que o parque industrial nacional faça frente à feroz concorrência mundial.

REFERÊNCIAS

ANSYS USER'S MANUAL: Ansys theory reference: introduction to design optimization. Swanson Analysis Systems, Inc. cap. 20, 1999. 19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8883: Cálculo e fabricação de comportas hidráulicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 42p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7259: Comportas hidráulicas - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 16p.

DEUTSCHE INSTITUTE NORMEN. DIN 19704: Hydraulic Steel Structures – Part 1 Design analysis. Berlim, 1998. 28p.

ERBISTE, P.C.F. Comportas hidráulicas. Rio de Janeiro: Editora Campus/Eletróbrás, 1989. 384p.

LOPES, P. M. B. G. S. Parametrização e otimização de equipamentos hidromecânicos em elementos finitos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2002. 140p.

MOAVENI, S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999, 527p.

SCHEREIBER, G.P. Usinas hidrelétricas. Ed. Edgard Blücher Ltda, 1977.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BABUSKA, I., RHEINBOLT, W. C. Analysis of optimal finite element meshes in mathematics of computation, Vol. 33, pp.431-463, 1979.

BATHE, K. J. and DVORKIN, E. N. A formulation of general shell elements – the use of mixed interpolation of tensorial components. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 22, pp. 697-722, 1986.

DENN, M. M. Optimization by varational methods. McGraw-Hill, New York, 1969.

FERREIRA, S. M. S. P., KROEFF, M. S. Referências bibliográficas de documentos eletrônicos. Ensaios APB, n.25, 1996.

HYDRAULIC GATE AND PENSTOCK ASSOCIATION. Technical standards for gates and penstocks. 365p.

MLEJNEK, H. P., SCHIRRMACHER, R. An engineer's approach to optimal material distribution and shape finding. Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 106, pp. 1-26, 1993.

MORE, J. J., WRIGHT, S. J. Optimization software guide. SIAM, Philadelphia, p. 13, 1993.

PRASAD, B., HAFTKA, R. T. Optimal structural design with plate finite elements. J. Structural Div., ASCE, Vol. 105, No. ST11, 1979.

SEVERINO, A. J. Metodologia do trabalho científico. São Paulo: Cortez & Moraes, 1977. 112p.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação. Ed. UNESP. Diretrizes para apresentação de trabalhos acadêmicos da FEG/UNESP: referências bibliográficas. Guraratinguetá/SP: Ed. UNESP, 2011.

GLOSSÁRIO

COMPONENTES DAS COMPORTAS

Braço. Componente estrutural responsável pela transmissão de cargas do tabuleiro para o mancal principal.

Cabeceira. Viga de fechamento lateral do tabuleiro, onde se localizam os elementos de apoio.

Mancal principal. Conjunto de articulação de comporta de rotação.

Nervura. Viga com funções secundárias, usada também como elemento de enrijecimento.

Paramento. Chapa de revestimento do tabuleiro diretamente responsável pela barragem de água.

Peças fixas. Componentes da comporta que ficam embutidos no concreto e que servem para guiar e/ou alojar o tabuleiro, redistribuir as cargas para o concreto, atuando, também, como proteção do concreto e/ou elemento de apoio da vedação.

Roda. Elemento de rotação cujas funções são a transmissão de cargas e a diminuição dos esforços de atrito entre comporta e peças fixas.

Tabuleiro. Componente principal da comporta, que serve de anteparo à passagem de água, constituído de paramento e vigamento.

Vedação. Componente responsável pela estanqueidade, geralmente constituído de perfis de borracha.

Viga principal. Elemento principal do vigamento.

Vigamento. Conjunto de vigas responsáveis pela rigidez do tabuleiro e transmissão de esforços aos elementos de apoio.

APÊNDICE A: CÁLCULO DA ESTRUTURA DA COMPORTA SEGMENTO

PRINCIPAIS ITENS DO CÁLCULO ANALÍTICO

A1 . Dados

A2 . Posicionamento dos Braços

A3 . Tensão de Placa

A4 . Vigas Verticais (COMPORTA NA SOLEIRA)

A5 .Pórticos (COMPORTA NA SOLEIRA)

A6 . Braços (COMPORTA NA SOLEIRA)

A7 . Reforços ou Longarinas Horizontais

A1 . Dados

A1 .1. Características Principais

Raio do paramento	R =	19.00 [m]	19000 [mm]
Vão	V =	16.00 [m]	16000 [mm]
Elevação do munhão	El_munhão =	349.18 [m]	
Elevação da soleira	El_soleira =	332.50 [m]	
Elevação do topo do paramento	El_topo =	351.50 [m]	
Nível d'água a montante [NORMAL]	N_água N =	351.00 [m]	
Nível d'água a montante [OCASIONAL]	N_água O =	351.00 [m]	
Nível d'água a montante [EXCEPCIONAL]	N_água E =	351.00 [m]	
Altura da comporta	H =	19.00 [m]	19000 [mm]
Peso específico da água	g =	1000 [kgf/m ³]	9.81 [kN/m ³]
Número de vigas verticais	NVV =	6	
Número de vigas horizontais	NVH =	2	
Número de longarinas abaixo da viga horizontal inferior		2	
Número de longarinas entre a viga horizontal inferior e superior		15	
Número de longarinas acima da viga horizontal superior		10	
Número total de longarinas		27	
Distâncias entre centros de munhão	L_munhao =	14.18 [m]	14180 [mm]
Número de cilindros por comporta	nc =	2	
Elevação do cutelo inferior - Comporta Aberta	El_cut =	349.60 [m]	

A1 .2. Materiais

Tensões admissíveis segundo a

Norma: NB 8883 Edição Mai 2008

Material: Chapas do tabuleiro

Aço Carbono ASTM A 572 / A Gr.60

Tensão de ruptura

$\sigma_{rup} = 5303$ [kgf/cm²] 520 [MPa]

Tensão de escoamento

$\sigma_{esc} = 4232$ [kgf/cm²] 415 [MPa]

Tabela 5 - Tensões admissíveis do Aço Carbono ASTM A 572 / A Gr.60

TENSÕES ADMISSÍVEIS DAS CHAPAS DA COMPORTA						
Elemento Estrutural	Normal		Ocasional		Excepcional	
Caso de carga						
Unidades	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
tensão de comparação	2835	278	3174	311	3555	349
tensão de comparação no paramento	3428	336	3428	336	3893	382
peças essencialmente comprimidas	2497	245	2878	282	3343	328
pressão de contato com movimento relativo	2328	228	2539	249	2962	291
pressão de contato sem movimento relativo	3809	374	3809	374	3809	374

Tabela 6 - Seleção do caso de carga

SELEÇÃO DO CASO DE CARGA							
Caso	Carga d'água Ew [tf]	Carga sedimento Esed [tf]	Carga sismo Esismo [tf]	Carga total na Comp. E [tf]	Coluna de água H [m]	Tensão admissível na estrutura σ [kgf/cm ²] [MPa]	
Normal	3492.3	0.0	0.0	3492.3	18.50	2835.3	278.1
Ocasional	3492.3	0.0	0.0	3492.3	18.50	3173.9	311.3
Excepcional	3492.3	0.0	0.0	3492.3	18.50	3554.7	348.6
Caso Ocasional / Caso Normal			Eo/En	1.00	<	$\sigma o/\sigma n$	1.12
Caso Excepcional / Caso Normal			Ee/En	1.00	<	$\sigma e/\sigma n$	1.25
Caso Excepcional / Caso Ocasional			Ee/Eo	1.00	<	$\sigma e/\sigma o$	1.12
O caso crítico é Normal				portanto: Hs =		18.50	[mca]

A2 . Posicionamento dos Braços

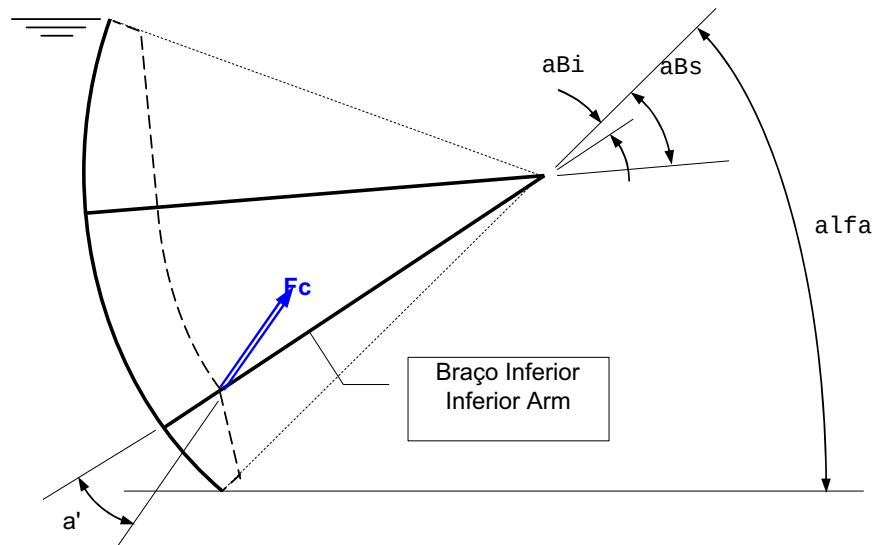


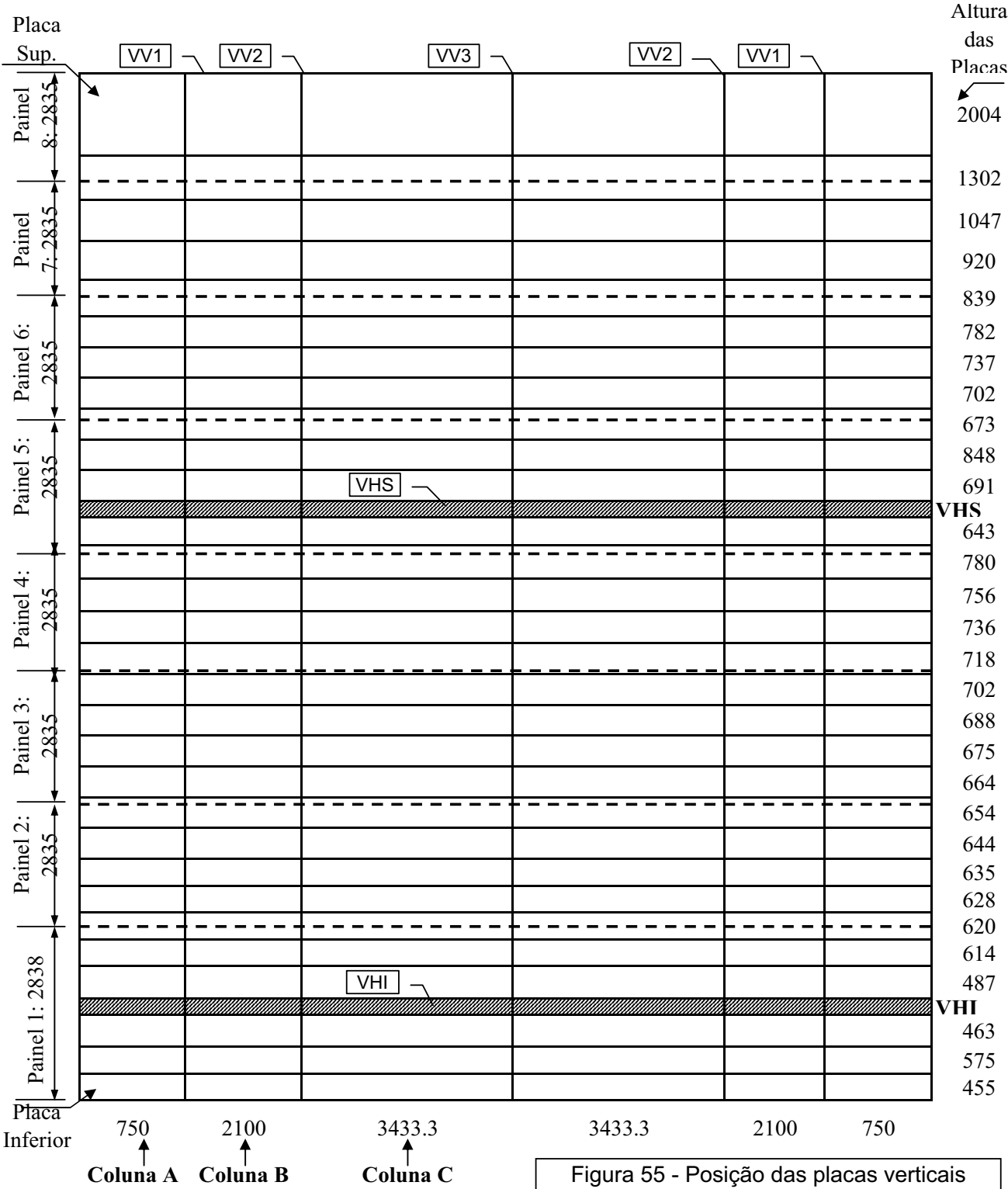
Figura 54 - Posição dos braços da comporta

Ângulo entre braço superior e soleira	$aBs =$	0.64 [rad]	36.60 °
Distância do centro do olhal de içamento ao CG da viga vertical	$m =$	95.62 [cm]	956 [mm]
Força do Cilindro na direção do braço	$Fac'' = 2.Fc.cos(a')$	$Fac'' =$	314445 [kgf] 3084 [kN]
Força do Cilindro perpendicular ao braço	$Fac' = 2.Fc.sin(a')$	$Fac' =$	153702 [kgf] 1507 [kN]
Ângulo do braço inferior com a soleira	$aBi =$	0.08 [rad]	4.50 °
Ângulo entre os braços superior e inferior		0.56 [rad]	32.1 °

A3 . Tensão de Placa

$\sigma = (k/100) \cdot p \cdot a^2 / t^2$

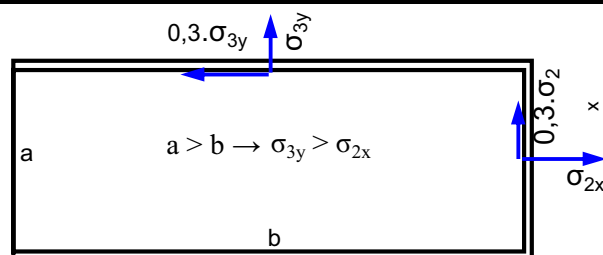
Onde: k - coeficiente da norma
p - pressão hidrostática no centro da placa
a - menor dimensão da placa
b - maior dimensão da placa
t - espessura da placa



A3 .1 Cálculo das tensões de placa para Coluna A:

Tabela 7 - Tensões de placa para coluna A

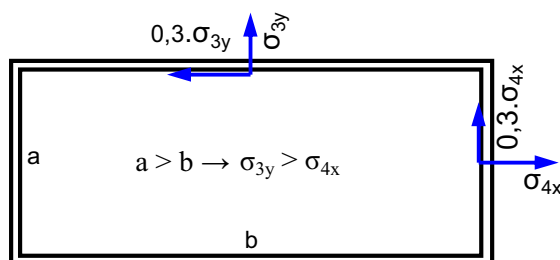
TENSÕES DE PLACA PARA A COLUNA A									
a	b	t	Dist.	a/b	k - σ_{3y}	k - σ_{2x}	p	σ_{3y}	σ_{2x}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]				[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
150.09	75.0	0.95	75.0	2.00	68.34	47.00	0.07	319	219
130.22	75.0	0.95	215.2	1.74	62.91	46.55	0.21	843	624
104.72	75.0	0.95	332.7	1.40	53.06	44.54	0.33	1099	922
92.04	75.0	0.95	431.0	1.23	46.17	42.13	0.43	1238	1129
83.95	75.0	0.95	519.0	1.12	40.57	39.73	0.52	1307	1280
78.15	75.0	0.95	600.1	1.04	35.77	37.47	0.60	1330	1393
73.73	75.0	0.95	676.0	1.02	34.05	36.62	0.67	1375	1478
70.19	75.0	0.95	748.0	1.07	37.50	38.30	0.74	1514	1546
67.28	75.0	1.25	816.7	1.11	40.31	39.61	0.80	940	924
84.85	75.0	1.25	892.8	1.13	41.26	40.04	0.88	1301	1263
69.11	75.0	1.25	969.8	1.09	38.55	38.80	0.95	1116	1123
64.31	75.0	1.25	1036.5	1.17	43.15	40.88	1.01	1151	1090
77.97	75.0	1.25	1107.6	1.04	35.60	37.39	1.07	1373	1442
75.64	75.0	1.25	1184.4	1.01	33.42	36.31	1.14	1370	1488
73.60	75.0	1.25	1259.1	1.02	34.17	36.68	1.20	1424	1529
71.82	75.0	1.25	1331.8	1.04	35.92	37.54	1.26	1497	1565
70.23	75.0	1.25	1402.8	1.07	37.46	38.28	1.32	1561	1596
68.82	75.0	1.25	1472.3	1.09	38.83	38.93	1.38	1618	1623
67.54	75.0	1.25	1540.5	1.11	40.06	39.50	1.43	1670	1646
66.40	75.0	1.25	1607.5	1.13	41.16	40.00	1.48	1715	1667
65.36	75.0	1.25	1673.3	1.15	42.15	40.44	1.52	1757	1686
64.41	75.0	1.25	1738.2	1.16	43.05	40.84	1.57	1794	1702
63.55	75.0	1.25	1802.2	1.18	43.87	41.19	1.61	1829	1717
62.76	75.0	1.25	1865.3	1.20	44.62	41.50	1.65	1860	1730
62.04	75.0	1.25	1927.7	1.21	45.30	41.78	1.69	1888	1741
61.38	75.0	1.25	1989.5	1.22	45.92	42.03	1.73	1914	1752
48.66	75.0	1.25	2044.5	1.54	57.74	45.72	1.76	1540	1220
46.31	75.0	1.25	2092.0	1.62	59.95	46.14	1.79	1470	1131
57.45	75.0	1.25	2143.8	1.31	49.59	43.42	1.81	1899	1663
45.47	75.0	1.25	2195.3	1.65	60.75	46.26	1.84	1478	1126



A3 .2 Cálculo das tensões de placa para Coluna B:

Tabela 8 - Tensões de placa para coluna B

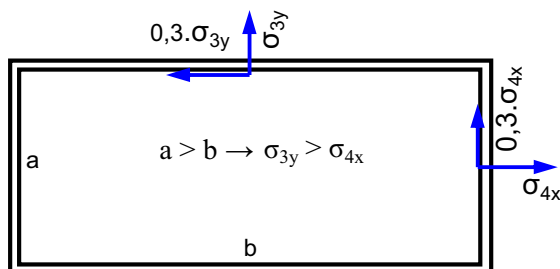
TENSÕES DE PLACA PARA A COLUNA B									
a	b	t	Dist.	a/b	k - σ_{4y}	k - σ_{3x}	p	σ_{4x}	σ_{3y}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]				[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
150.09	210.0	0.95	75.0	1.40	34.45	43.56	0.07	643	814
130.22	210.0	0.95	215.2	1.61	34.30	47.19	0.21	1385	1905
104.72	210.0	0.95	332.7	2.01	34.30	50.01	0.33	1385	2019
92.04	210.0	0.95	431.0	2.28	34.30	50.12	0.43	1385	2023
83.95	210.0	0.95	519.0	2.50	34.30	50.00	0.52	1385	2018
78.15	210.0	0.95	600.1	2.69	34.30	50.00	0.60	1385	2018
73.73	210.0	0.95	676.0	2.85	34.30	50.00	0.67	1385	2018
70.19	210.0	0.95	748.0	2.99	34.30	50.00	0.74	1385	2018
67.28	210.0	1.25	816.7	3.12	34.30	50.00	0.80	800	1166
84.85	210.0	1.25	892.8	2.48	34.30	49.82	0.88	1385	2011
69.11	210.0	1.25	969.8	3.04	34.30	50.00	0.95	993	1448
64.31	210.0	1.25	1036.5	3.27	34.30	50.00	1.01	915	1334
77.97	210.0	1.25	1107.6	2.69	34.30	50.00	1.07	1430	2084
75.64	210.0	1.25	1184.4	2.78	34.30	50.00	1.14	1430	2084
73.60	210.0	1.25	1259.1	2.85	34.30	50.00	1.20	1430	2084
71.82	210.0	1.25	1331.8	2.92	34.30	50.00	1.26	1430	2084
70.23	210.0	1.25	1402.8	2.99	34.30	50.00	1.32	1430	2084
68.82	210.0	1.25	1472.3	3.05	34.30	50.00	1.38	1430	2084
67.54	210.0	1.25	1540.5	3.11	34.30	50.00	1.43	1430	2084
66.40	210.0	1.25	1607.5	3.16	34.30	50.00	1.48	1430	2084
65.36	210.0	1.25	1673.3	3.21	34.30	50.00	1.52	1430	2084
64.41	210.0	1.25	1738.2	3.26	34.30	50.00	1.57	1430	2084
63.55	210.0	1.25	1802.2	3.30	34.30	50.00	1.61	1430	2084
62.76	210.0	1.25	1865.3	3.35	34.30	50.00	1.65	1430	2084
62.04	210.0	1.25	1927.7	3.39	34.30	50.00	1.69	1429	2084
61.38	210.0	1.25	1989.5	3.42	34.30	50.00	1.73	1429	2084
48.66	210.0	1.25	2044.5	4.32	34.29	50.00	1.76	915	1334
46.31	210.0	1.25	2092.0	4.53	34.29	50.00	1.79	841	1226
57.45	210.0	1.25	2143.8	3.66	34.30	50.00	1.81	1314	1915
45.47	210.0	1.25	2195.3	4.62	34.29	50.00	1.84	834	1216



A3 .3 Cálculo das tensões de placa para Coluna C:

Tabela 9 - Tensões de placa para coluna C

TENSÕES DE PLACA PARA A COLUNA C									
a	b	t	Dist.	b/a	k - σ_{4y}	k - σ_{3x}	p	σ_{4x}	σ_{3y}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]				[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
150.09	343.3	0.95	75.0	2.29	34.30	50.11	0.07	641	936
130.22	343.3	0.95	215.2	2.64	34.30	50.00	0.21	1385	2019
104.72	343.3	0.95	332.7	3.28	34.30	50.00	0.33	1385	2019
92.04	343.3	0.95	431.0	3.73	34.30	50.00	0.43	1385	2018
83.95	343.3	0.95	519.0	4.09	34.29	50.00	0.52	1384	2018
78.15	343.3	0.95	600.1	4.39	34.29	50.00	0.60	1384	2018
73.73	343.3	0.95	676.0	4.66	34.29	50.00	0.67	1384	2018
70.19	343.3	0.95	748.0	4.89	34.29	50.00	0.74	1384	2018
67.28	343.3	1.25	816.7	5.10	34.29	50.00	0.80	799	1166
84.85	343.3	1.25	892.8	4.05	34.29	50.00	0.88	1384	2018
69.11	343.3	1.25	969.8	4.97	34.29	50.00	0.95	993	1448
64.31	343.3	1.25	1036.5	5.34	34.28	50.00	1.01	914	1334
77.97	343.3	1.25	1107.6	4.40	34.29	50.00	1.07	1429	2084
75.64	343.3	1.25	1184.4	4.54	34.29	50.00	1.14	1429	2084
73.60	343.3	1.25	1259.1	4.66	34.29	50.00	1.20	1429	2084
71.82	343.3	1.25	1331.8	4.78	34.29	50.00	1.26	1429	2084
70.23	343.3	1.25	1402.8	4.89	34.29	50.00	1.32	1429	2084
68.82	343.3	1.25	1472.3	4.99	34.29	50.00	1.38	1429	2084
67.54	343.3	1.25	1540.5	5.08	34.29	50.00	1.43	1429	2084
66.40	343.3	1.25	1607.5	5.17	34.29	50.00	1.48	1429	2084
65.36	343.3	1.25	1673.3	5.25	34.28	50.00	1.52	1429	2084
64.41	343.3	1.25	1738.2	5.33	34.28	50.00	1.57	1429	2084
63.55	343.3	1.25	1802.2	5.40	34.28	50.00	1.61	1429	2084
62.76	343.3	1.25	1865.3	5.47	34.28	50.00	1.65	1429	2084
62.04	343.3	1.25	1927.7	5.53	34.28	50.00	1.69	1429	2084
61.38	343.3	1.25	1989.5	5.59	34.28	50.00	1.73	1429	2084
48.66	343.3	1.25	2044.5	7.06	34.26	50.00	1.76	914	1334
46.31	343.3	1.25	2092.0	7.41	34.25	50.00	1.79	840	1226
57.45	343.3	1.25	2143.8	5.98	34.28	50.00	1.81	1313	1915
45.47	343.3	1.25	2195.3	7.55	34.25	50.00	1.84	833	1216

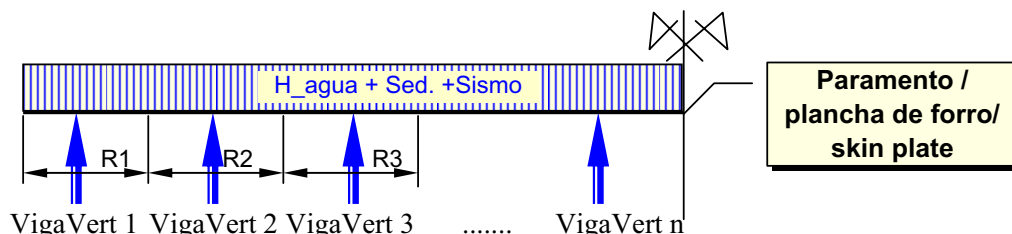


A4 . Vigas Verticais (COMPORTA NA SOLEIRA)

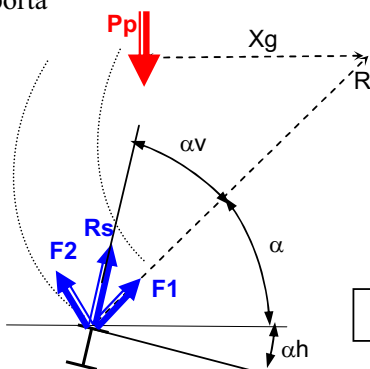
As vigas verticais são calculadas como se fossem retilíneas, apoiadas nas vigas horizontais.

A4 .1 Determinação do carregamento de cada viga vertical:

Para a determinação das cargas nas vigas verticais considera-se que a pressão hidráulica + cargas devidas a sedimento e sismo, se houverem, sejam distribuídas na largura correspondente à metade da distância entre duas vigas consecutivas. As larguras sobre carga correspondente sobre cada viga vertical valem:



Largura em carga na viga 1	R1 =	180.0 [cm]	1800 [mm]
Largura em carga na viga 2	R2 =	276.7 [cm]	2767 [mm]
Largura em carga na viga 3 e demais vigas internas	R3 =	343.3 [cm]	3433 [mm]
Peso próprio da comporta	Pp =	149950 [kgf]	1470.5 [kN]



ah =	-0.22 [rad]	-12.4 °
a =	1.07 [rad]	61.4 °
av =	0.72 [rad]	41.0 °

Figura 56 - Reações na soleira devidas ao peso

Componente tangencial da carga na soleira devida ao peso próprio	$F2 = Pp \cdot Xg / R =$	F2 =	97909 [kgf]	960162 [kN]
Componente radial da carga na soleira devida ao peso próprio	$F1 = F2 / \tan(\alpha v) =$	F1 =	112590 [kgf]	1104129 [kN]
Reação na soleira		Rs =	149207 [kgf]	1463220 [kN]

A4 .2 Largura colaborante:

Segundo norma

Norma: NB 8883 Edição Mai 2008

Em chapas que atuam como abas em seções compostas solicitadas à flexão, a largura efetiva deve ser calculada pela seguinte equação:

$$Lu = 2 \cdot B \cdot \lambda$$

Onde: Lu: largura colaborante de chapas.

B: Metade da distância entre eixos de duas vigas consecutivas ou o comprimento do balanço

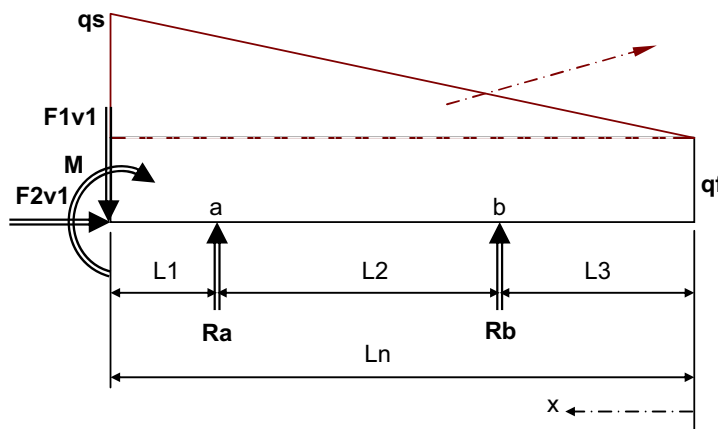
λ : Coeficiente de redução

Obs.: No caso de chapas curvas, a largura colaborante da aba das vigas localizadas no plano de curvatura deve ser limitada a;

$$1,56 \cdot (R \cdot t)^{0,5}$$

A4 .3 Viga vertical 1

A4 .3.1 Esforços atuantes



$$q(x) = 0.15013 \cdot x \quad [\text{kgf/cm}]$$

L1 =	149.2 [cm]	1492 [mm]
L2 =	1064.5 [cm]	10645 [mm]
L3 =	1004.3 [cm]	10043 [mm]
Ln =	2218.0 [cm]	22180 [mm]

Figura 57 - Carregamento na Viga Vertical1 (VV1)

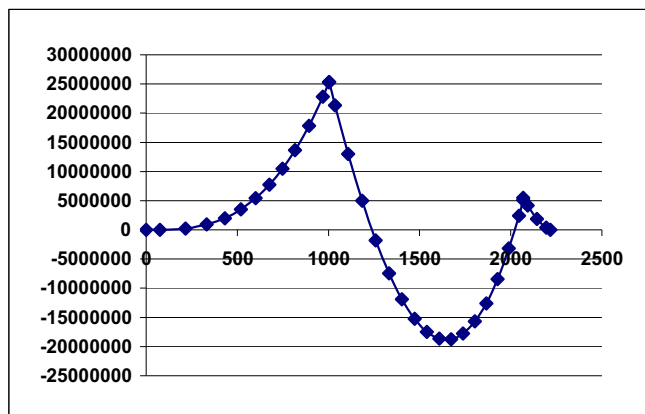
Carga na soleira	qs =	333.0 [kgf/cm]	326.6 [kN/m]
-	-	-	-
Componente tangencial da carga na soleira da viga 1 devida ao peso próprio			
	F1v1 = (F1/V).R1=	12666 [kgf]	124 [kN]
Componente radial da carga na soleira da viga 1 devida ao peso próprio			
	F2v1 = (F2/V).R1=	11015 [kgf]	108 [kN]
Momento devido ao peso próprio	F2v1.Y1= MF2v1	299629 [kgf.cm]	293836 [kN.m]
Reação no braço superior:			
(qs . (Ln/2) . (Ln/3 - L1)-F1v1*(L1) + MF2v1) / L2 =	Rb1 =	203237 [kgf]	1993 [kN]
Reação no braço inferior:			
(qs . Ln/2+F1v1 - Rb1) =	Ra1 =	178731 [kgf]	1753 [kN]

A4 .3.2 Equação do momento fletor:

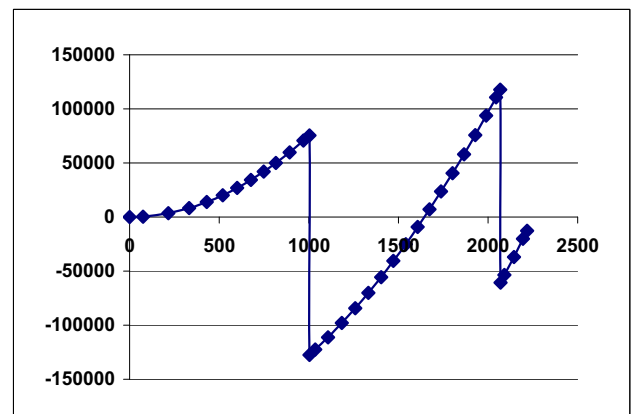
$$\begin{aligned}
 [0] < X < [L3]: M(x) &= q(x) \cdot x^2 / 6 \\
 [L3] < X < [L2+L3]: M(x) &= (q(x) \cdot x^2 / 6) - Rb1 \cdot (x - L3) \\
 [L3+L2] < X < [L1+L2+L3]: M(x) &= (q(x) \cdot x^2 / 6) - Rb1 \cdot (x - L3) - Ra1 \cdot (x - L2 - L3)
 \end{aligned}$$

A4 .3.3 Equação do esforço cortante:

$$\begin{aligned}
 [0] < X < [L3]: V(x) &= q(x) \cdot x / 2 \\
 [L3] < X < [L2+L3]: V(x) &= (q(x) \cdot x / 2) - Rb1 \\
 [L3+L2] < X < [L1+L2+L3]: V(x) &= (q(x) \cdot x / 2) - Rb1 - Ra1
 \end{aligned}$$



MOMENTO FLETOR



ESFORÇO CORTANTE

Tabela 10 - Esforços solicitantes internos na viga vertical VV1

DIMENSÕES DA SEÇÃO					
Seção	x [cm]	V [kgf]	[MN]	M [kgf.cm]	[MN.m]
a	2067.8	117734	1.155	5097150	0.500
b	1003.3	75567	0.741	25272888	2.478
V _{máx}	1004.3	-127519	-1.251	25348530	2.486
M _{máx}	1004.3	-127519	-1.251	25348530	2.486

A4 .3.4 Propriedades da seção:

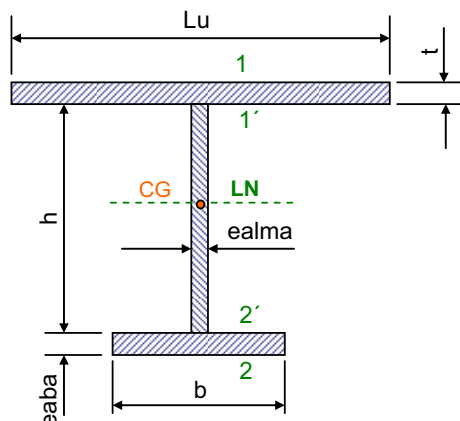


Figura 58 - Seção da viga vertical 1

Seção a: Seção na região da viga horizontal inferior
 Seção b: Seção na região da viga horizontal superior
 Seção M_{máx}: Seção na região de momento máximo

Tabela 11 - Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga vertical VV1

DIMENSÕES DA SEÇÃO									
Seção	x	Lu	t	h	b	e _{alma}	e _{aba}		
	[cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
a	2067.8	566	12.5	1200	620	44.5	16.0		
b	1004.3	760.2	12.5	1200	620	12.5	16.0		
M _{máx}	1004.3	760.2	12.5	1200	620	12.5	16.0		
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS									
Seção	A	y ₁	y ₂	I _x	W ₁	W _{1'}	W ₂	W _{2'}	MS _{LN}
	[cm ²]	[mm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]
a	704	637	591	1263145	19821	20218	21365	21959	13148
b	344	620	608	895805	14440	14737	14730	15128	8145
M _{máx}	344	620	608	895805	14440	14737	14730	15128	8145

A4 .3.5 Tensão de flexão e cisalhante:

Tensão de flexão:

Entre topo da comporta e viga horizontal superior

Entre vigas horizontais

Entre viga horizontal inferior e ponto inferior

Tensão cisalhante na Linha Neutra

$$\sigma = M / W$$

$$\sigma = M / W$$

$$\sigma = M / W + F_2 v_1 / A$$

$$\tau = V \cdot MS_{LN} / (I_x \cdot e_{alma})$$

Tabela 12 - Tensões de flexão e de cisalhamento da viga vertical VV1

TENSÕES DE FLEXÃO E CISALHAMENTO					
Seção	σ_1 [kgf/cm ²]	$\sigma_{1'}$ [kgf/cm ²]	σ_2 [kgf/cm ²]	$\sigma_{2'}$ [kgf/cm ²]	τ_{LN} [kgf/cm ²]
a	257	252	-239	-232	275
b	1755	1720	-1721	-1676	-928
M _{máx}	1755	1720	-1721	-1676	-928

A4 .3.6 Tensão de comparação

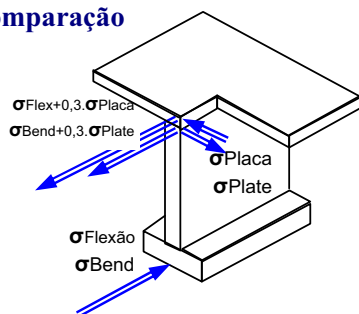


Figura 59- Orientação das tensões na viga vertical 1

Tabela 13 - Tensão de comparação da seção da viga vertical VV1

TENSÕES DE FLEXÃO, CISALHAMENTO E DE PLACA							
Tensão na viga vertical				Tensão de placa			
Seção	σ_1	σ_1'	σ_2	τ_{LN}	Coluna A σ_x	Coluna B σ_x	
	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	
a	257	252	-239	275	1540	915	
b	1755	1720	-1721	-928	1151	915	
Mmáx	1755	1720	-1721	-928	1151	915	
TENSÕES COMBINADAS							
Seção	σ_{comp1}		$\sigma_{comp1'}$		σ_{comp2}		σ_{compLN}
	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²] [MPa]
a	2068	203	1335	131	1447	142	477 47
b	1004	132	1822	179	2190	215	1607 158
Mmáx	1822	179	2190	215	1721	169	1607 158

A4 .4 Viga vertical 3

A4 .4.1 Esforços atuantes

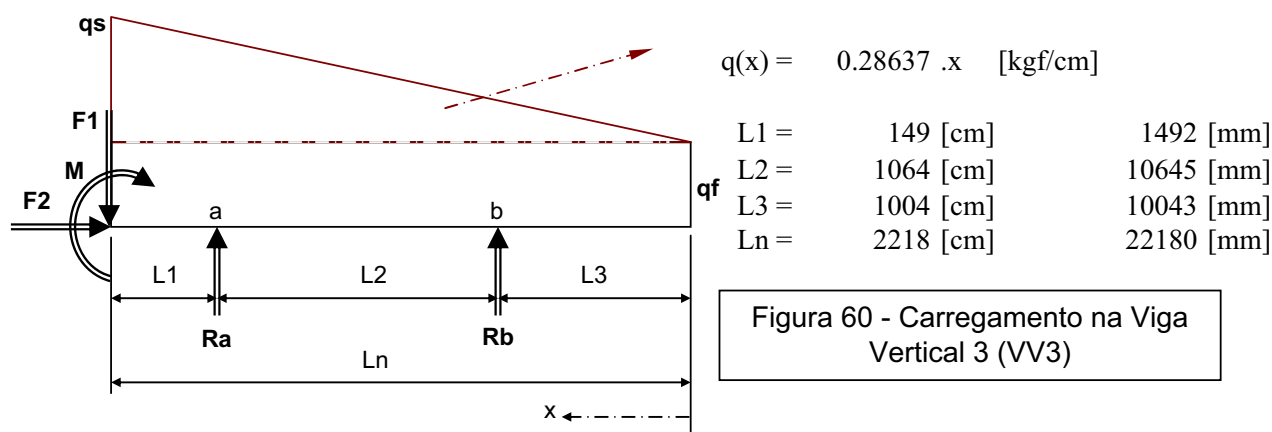


Figura 60 - Carregamento na Viga Vertical 3 (VV3)

Carga na soleira	$R3.H_{\text{agua}}/10 =$	$qs = 635.17 \text{ [kgf/cm]} \quad 622.9 \text{ [kN/m]}$
Componente tangencial da carga na soleira da viga 3 devida ao peso próprio	$F1v3 = (F1/V).R3 =$	$24160 \text{ [kgf]} \quad 237 \text{ [kN]}$
Componente radial da carga na soleira da viga 3 devida ao peso próprio	$F2v3 = (F2/V).R3 =$	$21010 \text{ [kgf]} \quad 206 \text{ [kN]}$
Momento devido ao Cilindro hidráulico;	$F2v3.Y1 = MF2v3 =$	$671522 \text{ [kgf.cm]} \quad 658538 \text{ [kN.m]}$
Reação no braço superior	$(qs \cdot (Ln/2) \cdot (Ln/3 - L1) - F1v3 \cdot (L1) + MF2v3) / L2 =$	$Rb3 = 387750 \text{ [kgf]} \quad 3803 \text{ [kN]}$
Reação no braço inferior	$(qs \cdot Ln/2 + F1v3 - Rb3) =$	$Ra3 = 340819 \text{ [kgf]} \quad 3342 \text{ [kN]}$

A4 .4.2 Equação do momento fletor:

$$[0] < X < [L3]: M(x) = q(x) \cdot x^2 / 6$$

$$[L3] < X < [L2+L3]: M(x) = (q(x) \cdot x^2 / 6) - Rb3 \cdot (x - L3)$$

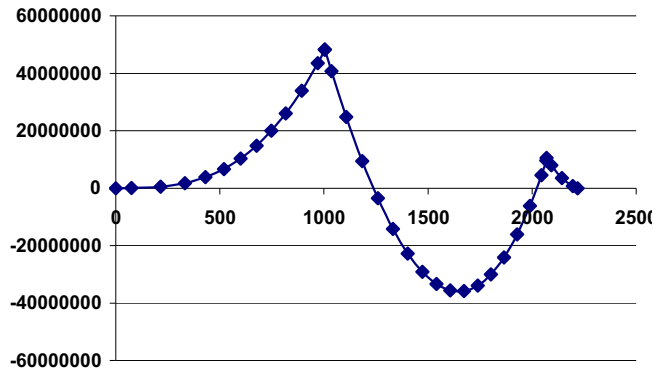
$$[L3+L2] < X < [L1+L2+L3]: M(x) = (q(x) \cdot x^2 / 6) - Rb3 \cdot (x - L3) - Ra3 \cdot (x - L2 - L3)$$

A4 4.3 Equação do momento fletor:

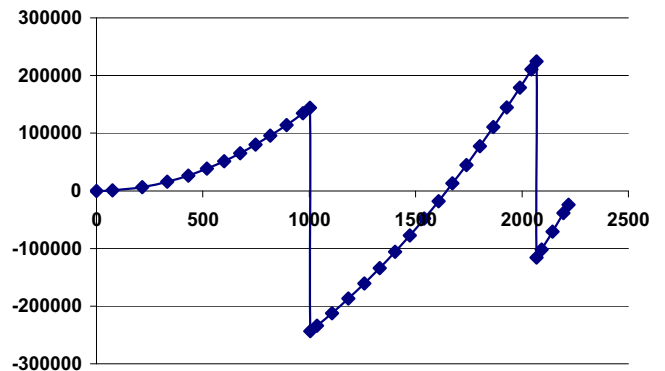
$$[0] < X < [L3]: V(x) = q(x) \cdot x / 2$$

$$[L3] < X < [L2+L3]: V(x) = (q(x) \cdot x / 2) - Rb3$$

$$[L3+L2] < X < [L1+L2+L3]: V(x) = (q(x) \cdot x / 2) - Rb3 - Ra3$$



MOMENTO FLETOR



ESFORÇO CORTANTE

Tabela 14 - Esforços solicitantes internos na viga vertical VV3

DIMENSÕES DA SEÇÃO					
Seção	x [cm]	V		M	
		[kgf]	[MN]	[kgf.cm]	[MN.m]
a	2067.8	224472	2.201	9622428	0.944
b	1003.3	144137	1.414	48205694	4.727
V _{máx}	1004.3	-243325	-2.386	48349975	4.742
M _{máx}	1004.3	-243325	-2.386	48349975	4.742

A4 .4.4 Propriedades da seção:

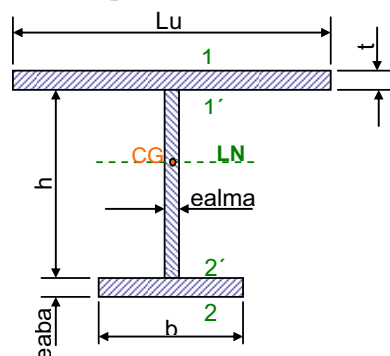


Figura 61 - Seção da viga vertical 3

Seção a: Seção na região da viga horizontal inferior

Seção b: Seção na região da viga horizontal superior

Seção M_{máx}: Seção na região de momento máximo

Tabela 15 - Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga vertical VV3

DIMENSÕES DA SEÇÃO									
Seção	x [cm]	Lu [mm]	t [mm]	h [mm]	b [mm]	e _{alma} [mm]	e _{aba} [mm]		
a	2067.8	606	12.5	1500	620	16.0	19.0		
b	1004.3	760.2	12.5	1500	620	16.0	19.0		
M _{máx}	1004.3	760.2	12.5	1500	620	16.0	19.0		
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS									
Seção	A [cm ²]	y ₁ [mm]	y ₂ [mm]	I _x [cm ⁴]	W ₁ [cm ³]	W _{1'} [cm ³]	W ₂ [cm ³]	W _{2'} [cm ³]	MS _{LN} [cm ³]
a	433	837	695	1538527	18385	18664	22148	22771	11723
b	453	801	730	1666221	20792	21122	22821	23431	12535
M _{máx}	453	801	730	1666221	20792	21122	22821	23431	12535

A4 .4.5 Tensão de flexão e cisalhante:

Tensão de flexão:

Entre topo da comporta e viga horizontal superior

Entre vigas horizontais

Entre viga horizontal inferior e ponto inferior

Tensão cisalhante na Linha Neutra:

$$\sigma = M / W$$

$$\sigma = M / W$$

$$\sigma = M / W + F2v3/A$$

$$\tau = V \cdot MS_{LN} / (I_x \cdot e_{alma})$$

Tabela 16 - Tensões de flexão e de cisalhamento da viga vertical VV3

TENSÕES DE FLEXÃO E CISALHAMENTO					
Seção	σ_1 [kgf/cm ²]	$\sigma_{1'}$ [kgf/cm ²]	σ_2 [kgf/cm ²]	$\sigma_{2'}$ [kgf/cm ²]	τ_{LN} [kgf/cm ²]
a	523	516	-434	-423	1069
b	2325	2289	-2119	-2064	-1144
M _{máx}	2325	2289	-2119	-2064	-1144

A4 .4.6 Tensão de comparação

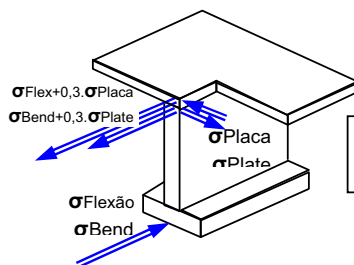


Figura 62- Orientação das tensões na viga vertical 3

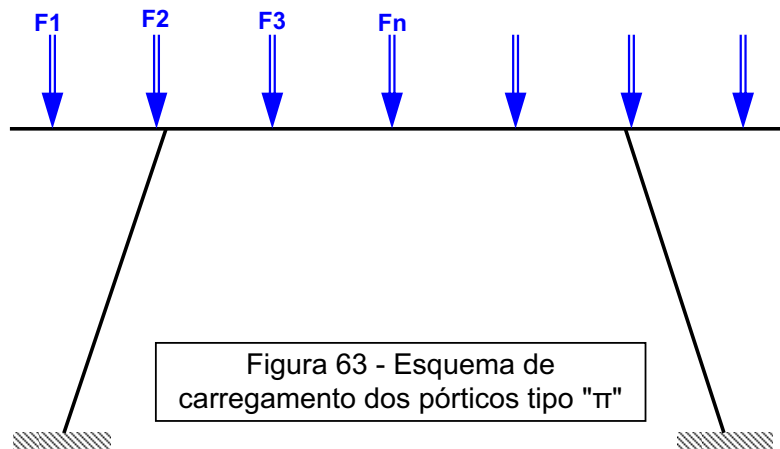
Tabela 17 - Tensão de comparação da seção da viga vertical VV3

TENSÕES DE FLEXÃO, CISALHAMENTO E DE PLACA								
Tensão na viga vertical					Tensão de placa Coluna C			
Seção	σ_1 [kgf/cm²]	σ_1' [kgf/cm²]	σ_2 [kgf/cm²]	τ_{LN} [kgf/cm²]	σ_x [kgf/cm²]			
a	523	516	-434	1069	914			
b	2325	2289	-2119	-1144	914			
Mmax	2325	2289	-2119	-1144	914			
TENSÕES COMBINADAS								
Seção	σ_{comp1} [kgf/cm²] [MPa]		$\sigma_{comp1'}$ [kgf/cm²] [MPa]		σ_{comp2} [kgf/cm²] [MPa]		σ_{compLN} [kgf/cm²] [MPa]	
a	862	84	1055	104	434	43	1852	182
b	2284	224	2596	255	2119	208	1982	194
Mmax	2284	224	2596	255	2119	208	1982	194

A5 .Pórticos (COMPORTA NA SOLEIRA)

A5 .1 Modelo para o Cálculo

As vigas horizontais com os braços formarão um pórtico, o qual sofrerá o carregamento das vigas.



A5 .2 Pórtico Superior

A5 .2.1 Esforços atuantes

Reações nas vigas verticais no pórtico superior:

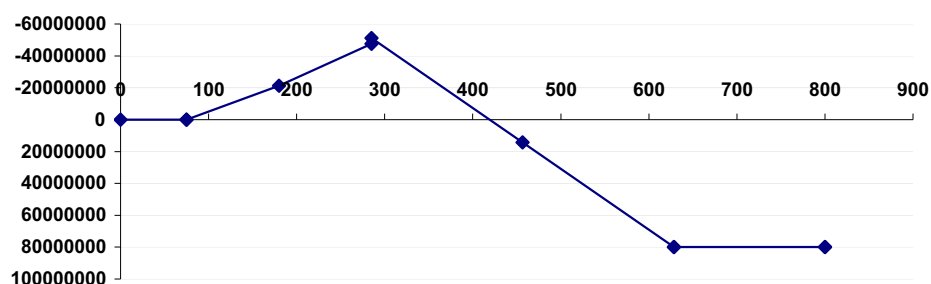
Rb1 =	Rbv1 =	203237 [kgf]	1993.1 [kN]
Rb2 =	Rbv2 =	312459 [kgf]	3064.2 [kN]
Rb3 =	Rbv3 =	387750 [kgf]	3802.5 [kN]
-	-	-	-

Esforço no eixo da viga horizontal	Cn =	103078 [kgf]	1010.8 [kN]
------------------------------------	------	--------------	-------------

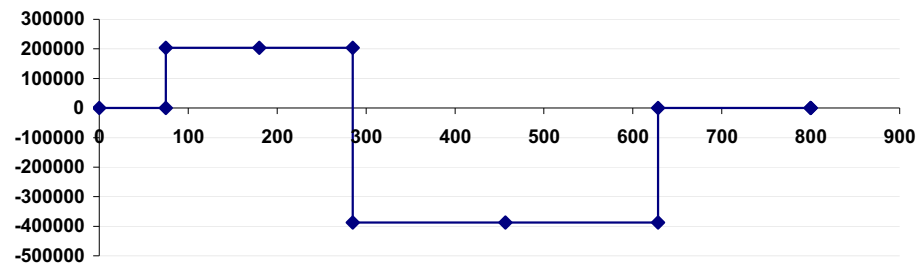
Tabela 18 - Esforços solicitantes internos na viga horizontal superior

ESFORÇOS CORTANTES E FLETOR					
Posição	Distância [cm]	Cisalhante		Flexão	
		[kgf]	[MN]	[kgf.cm]	[MN.m]
	0	0	0.000	0	0.000
1 esq	75	0	0.000	0	0.000
dir	75	203237	1.993	0	0.000
	180	203237	1.993	-21339909	-2.093
2 esq	285	203237	1.993	-47624306	-4.670
dir	285	-387752	-3.803	-51171749	-5.018
	457	-387752	-3.803	14367089	1.409
3 esq	628	-387752	-3.803	79905928	7.836
dir	628	-2	0.000	79905928	7.836
4 centr esq	800	-2	0.000	79905928	7.836
centr dir	800	-2	0.000	79905928	7.836

Momento fletor sobre a viga horizontal [kgf.cm]:



Esforço Cortante sobre a viga horizontal [kgf]:



A5 .2.2 Características da seção transversal da Viga Horizontal

Tabela 19 - Largura colaborante do paramento para a viga horizontal superior

LARGURA COLABORANTE DO PARAMENTO									
Região	B [cm]	Região Central da Viga Horizontal				Região Lateral da Viga Horizontal			
		L [cm]	L/B	λ	LU [cm]	L [cm]	L/B	λ	LU [cm]
Pl. sup.	1004.33	761.9	0.76	0.16	162.2	419.0	0.42	0.12	122.5
Pl. inf.	532.24	761.9	1.43	0.27	145.6	419.0	0.79	0.13	70.4
$Lu = Lu_{sup} + Lu_{inf} =$					307.88	192.9			

Propriedades da seção:

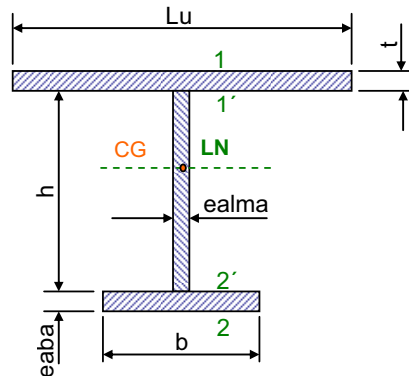


Figura 64 - Seção da viga horizontal superior

Para cada ponto de cálculo dos momento fletores e esforços cortantes, tem uma seção característica conforme croqui Figura 51

Tabela 20 - Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga horizontal superior

DIMENSÕES DA SEÇÃO									
x	V	M	Lu	t	h	b	e _{alma}	e _{aba}	
[cm]	[kgf]	[kgf.cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0	0	1929	12.5	1200.0	620.0	25.0	31.5	
75	0	0	1929	12.5	1200.0	620.0	25.0	31.5	
75	203237	0	1929	12.5	1200.0	620.0	25.0	31.5	
180	203237	-21339909	1929	12.5	1350.0	620.0	25.0	31.5	
285	203237	-47624306	1929	12.5	1500.0	620.0	25.0	75.0	
285	-387752	-51171749	1929	12.5	1500.0	620.0	25.0	75.0	
457	-387752	14367089	3079	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
628	-387752	79905928	3079	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
628	-2	79905928	3079	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
800	-2	79905928	3079	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS									
x	A	y ₁	y ₂	I _x	W ₁	W _{1'}	W ₂	W _{2'}	MS _{LN}
[cm]	[cm²]	[mm]	[mm]	[cm⁴]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]
0	736	577	667	1977860	34262	35020	29665	31136	17757
75	736	577	667	1977860	34262	35020	29665	31136	17757
75	736	577	667	1977860	34262	35020	29665	31136	17757
180	774	650	744	2552656	39300	40071	34289	35803	20586
285	1081	933	655	4655728	49926	50605	71082	80274	32918
285	1081	933	655	4655728	49926	50605	71082	80274	32918
457	955	614	930	3839955	62503	63801	41306	42755	27931
628	955	614	930	3839955	62503	63801	41306	42755	27931
628	955	614	930	3839955	62503	63801	41306	42755	27931
800	955	614	930	3839955	62503	63801	41306	42755	27931

A5 .2.3 Tensão de flexão e cisalhante na Viga Horizontal

Tensão de flexão:

$$\sigma = M / W$$

Tensão cisalhante:

$$\tau_{LN} = V \cdot MS_{LN} / (I_x \cdot e_{alma})$$

Tensão normal:

$$\sigma_n = Cn / (A)$$

Tabela 21 - Tensões de flexão e de cisalhamento da viga horizontal superior

TENSÕES DE FLEXÃO E CISALHAMENTO						
x	σ_n	σ_1	σ_1'	σ_2	σ_2'	τ_{LN}
[cm]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0
75	-140	0	0	0	0	730
180	-133	543	533	-622	-596	656
285	-95	954	941	-670	-593	575
285	-95	1025	1011	-720	-637	-1097
457	-108	-230	-225	348	336	-1128
628	-108	-1278	-1252	1934	1869	-1128
628	-108	-1278	-1252	1934	1869	0
800	-108	-1278	-1252	1934	1869	0

A5 .2.5 Tensão de comparação

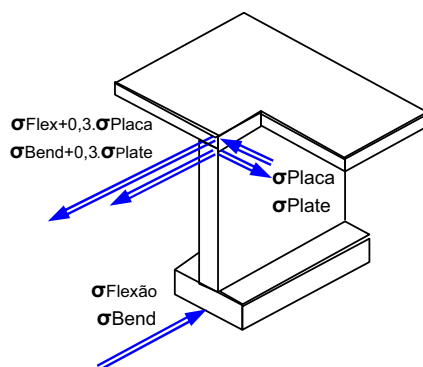


Figura 65- Orientação das tensões na Viga horizontal superior

Tabela 22 - Tensão de comparação da viga horizontal superior

TENSÕES DE FLEXÃO, CISALHAMENTO E DE PLACA								
x	Viga Horizontal				Tensão de placa			
	σ_1	σ_1'	σ_2	τ_{LN}	σ_n	Linha Sup. σ_y	Linha Inf. σ_y	
[cm]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1123	1090	
75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1116	1151	
75.0	0.0	0.0	0.0	729.9	-140	993	915	
180.0	543.0	532.6	-622.4	655.6	-133	1448	1334	
285.0	953.9	941.1	-670.0	574.8	-95	993	915	
285.0	1024.9	1011.2	-719.9	-1096.6	-95	993	914	
456.7	-229.9	-225.2	347.8	-1128.2	-108	1448	1334	
628.3	-1278.4	-1252.4	1934.5	-1128.2	-108	993	914	
628.3	-1278.4	-1252.4	1934.5	0.0	-108	993	914	
800.0	-1278.4	-1252.4	1934.5	0.0	-108	1448	1334	
TENSÕES COMBINADAS								
x	$\sigma_{1\text{comp}}$		$\sigma_{1'\text{comp}}$		$\sigma_{2\text{comp}}$		$\sigma_{LN\text{comp}}$	
[cm]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
0.0	998	97.9	998	97.9	0	0.0	0	0.0
75.0	1023	100.3	1023	100.3	0	0.0	0	0.0
75.0	750	73.5	1017	99.8	0	0.0	1264	124.0
180.0	1259	123.5	1430	140.3	622	61.0	1136	111.4
285.0	1084	106.3	1353	132.7	670	65.7	996	97.6
285.0	1792	175.7	268	26.3	720	70.6	1899	186.3
456.7	1402	137.5	1254	123.0	348	34.1	1954	191.6
628.3	601	58.9	2219	217.6	1934	189.7	1954	191.6
628.3	601	58.9	2219	217.6	1934	189.7	0	0.0
800.0	2093	205.2	1649	161.7	1934	189.7	0	0.0
σ_{max}	2093	205.2	2219	217.6	1934	189.7	1954	191.6

A5 .3 Pórtico Inferior

A5 .3.1 Esforços atuantes

Reações nas vigas verticais no pórtico inferior:

Ra1 =	Ravv1=	178731	[kgf]	1752.8 [kN]
Ra2 =	Ravv2=	274641	[kgf]	2693.3 [kN]
Ra3 =	Ravv3=	340819	[kgf]	3342.3 [kN]
-	-	-	-	-

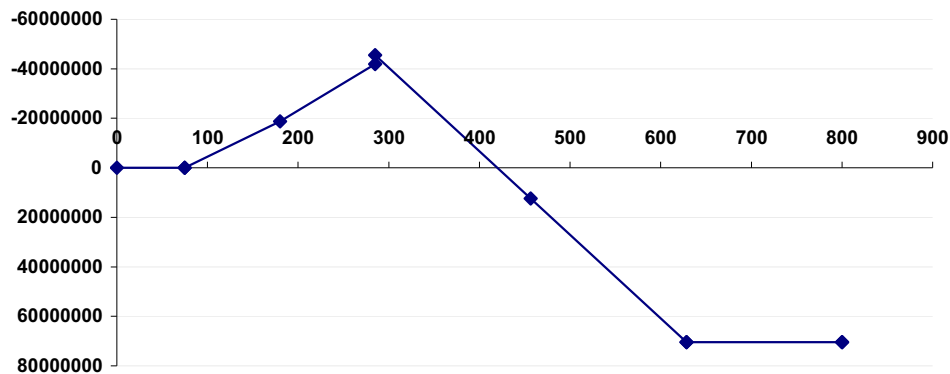
Esforço no eixo da viga horizontal

Cn = 90979 [kgf] 892.2 [kN]

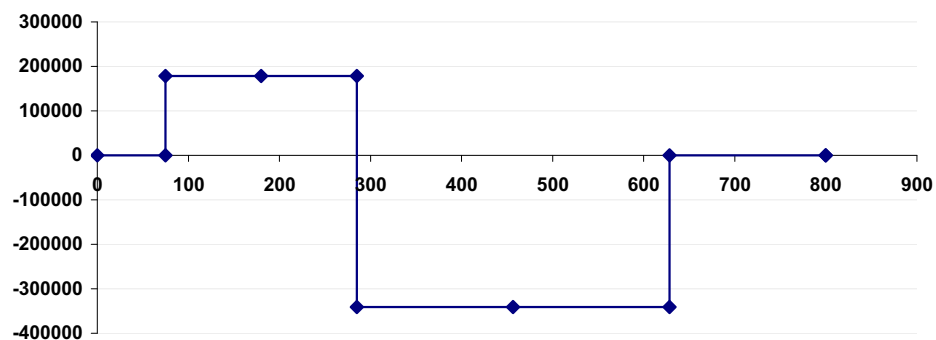
Tabela 23 - Esforços solicitantes internos na viga horizontal inferior

ESFORÇOS CORTANTES E FLETOR					
	Distância	Cisalhante		Flexão	
	[cm]	[kgf]	[MN]	[kgf.cm]	[MN.m]
	0	0	0.000	0	0.000
1 esq	75	0	0.000	0	0.000
dir	75	178731	1.753	0	0.000
	180	178731	1.753	-18766776	-1.840
2 esq	285	178731	1.753	-41952757	-4.114
dir	285	-340793	-3.342	-45520261	-4.464
	457	-340793	-3.342	12437150	1.220
3 esq	628	-340793	-3.342	70394562	6.903
dir	628	26	0.000	70394562	6.903
4 centr esq	800	26	0.000	70394562	6.903
centr dir	800	26	0.000	70394562	6.903

Momento fletor sobre a viga horizontal [kgf.cm]:



Esforço Cortante sobre a viga horizontal [kgf]:



A5 .3.2 Características da seção transversal da Viga Horizontal

Tabela 24 - Largura colaborante do paramento para a viga horizontal inferior

LARGURA COLABORANTE DO PARAMENTO									
Região	Região Central da Viga Horizontal					Região Lateral da Viga Horizontal			
	B [cm]	L [cm]	L/B	λ	LU [cm]	L [cm]	L/B	λ	LU [cm]
Pl. sup.	532	760.3	1.43	0.27	145.33	419.83	0.79	0.13	70.52
Pl. inf.	149	760.3	5.10	0.80	264.2	419.83	2.81	0.40	59.1
$Lu = Lu_{sup} + Lu_{inf} =$					409.53				

Propriedades da seção:

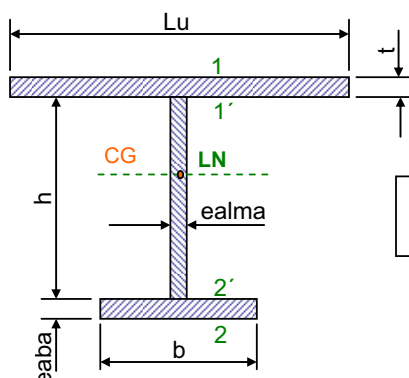


Figura 66 - Seção da viga horizontal inferior

Para cada ponto de cálculo dos momento fletores e esforços cortantes, tem uma seção característica conforme croqui acima;

Tabela 25 - Dimensões e propriedades geométricas da seção da viga horizontal inferior

DIMENSÕES DA SEÇÃO									
x	V	M	Lu	t	h	b	e _{alma}	e _{aba}	
[cm]	[kgf]	[kgf.cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0	0	1296	12.5	1200.0	620.0	25.0	31.5	
75	0	0	1296	12.5	1200.0	620.0	25.0	31.5	
75	178731	0	1296	12.5	1200.0	620.0	25.0	31.5	
180	178731	-18766776	1296	12.5	1350.0	620.0	25.0	31.5	
285	178731	-41952757	1296	12.5	1500.0	620.0	25.0	75.0	
285	-340793	-45520261	1296	12.5	1500.0	620.0	25.0	75.0	
457	-340793	12437150	4095	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
628	-340793	70394562	4095	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
628	26	70394562	4095	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
800	26	70394562	4095	12.5	1500.0	620.0	25.0	31.5	
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS									
x	A	y ₁	y ₂	I _x	W ₁	W _{1'}	W ₂	W _{2'}	MS _{LN}
[cm]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]
0	657	646	598	1688810	26142	26658	28241	29812	15383
75	657	646	598	1688810	26142	26658	28241	29812	15383
75	657	646	598	1688810	26142	26658	28241	29812	15383
180	695	723	671	2187946	30271	30804	32597	34202	17917
285	1002	1006	582	3923281	39012	39503	67429	77406	28523
285	1002	1006	582	3923281	39012	39503	67429	77406	28523
457	1082	543	1001	4254656	78359	80206	42503	43884	30993
628	1082	543	1001	4254656	78359	80206	42503	43884	30993
628	1082	543	1001	4254656	78359	80206	42503	43884	30993
800	1082	543	1001	4254656	78359	80206	42503	43884	30993

A5 .3.3 Tensão de flexão e cisalhante na Viga Horizontal

Tensão de flexão:

$$\sigma = M / W$$

Tensão cisalhante:

$$\tau_{LN} = V \cdot MS_{LN} / (I_x \cdot e_{alma})$$

Tensão Normal:

$$\sigma_n = C_n / (A)$$

Tabela 26 - Tensões de flexão e de cisalhamento da viga horizontal inferior

TENSÕES DE FLEXÃO E CISALHAMENTO						
x	σ_n	σ_1	σ_1'	σ_2	σ_2'	τ_{LN}
[cm]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0
75	-138	0	0	0	0	651
180	-131	620	609	-576	-549	585
285	-91	1075	1062	-622	-542	520
285	-91	1167	1152	-675	-588	-991
457	-84	-159	-155	293	283	-993
628	-84	-898	-878	1656	1604	-993
628	-84	-898	-878	1656	1604	0
800	-84	-898	-878	1656	1604	0

A5 .3.4 Tensão de comparação

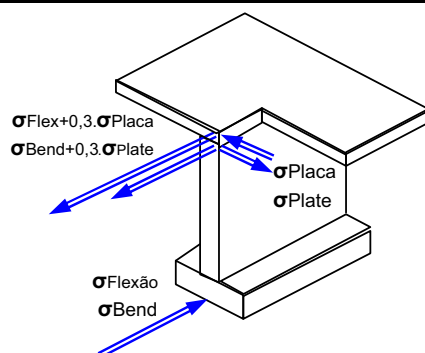


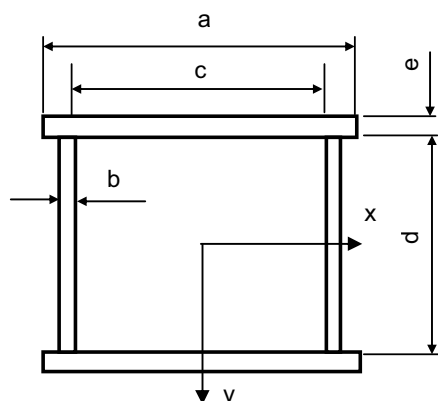
Figura 67- Orientação das tensões na Viga horizontal inferior

Tabela 27 - Tensão de comparação da viga horizontal inferior

TENSÕES DE FLEXÃO, CISALHAMENTO E DE PLACA							
x	Viga Horizontal					Tensão de placa	
	σ_1	σ_1'	σ_2	τ_{LN}	σ_n	Linha Sup. σ_y	Linha Inf. σ_y
[cm]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1220	1131
75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1540	1470
75.0	0.0	0.0	0.0	651.2	-138	915	841
180.0	620.0	609.2	-575.7	585.4	-131	1334	1226
285.0	1075.4	1062.0	-622.2	519.8	-91	915	841
285.0	1166.8	1152.3	-675.1	-991.1	-91	914	840
456.7	-158.7	-155.1	292.6	-993.0	-84	1334	1226
628.3	-898.4	-877.7	1656.2	-993.0	-84	914	840
628.3	-898.4	-877.7	1656.2	0.1	-84	914	840
800.0	-898.4	-877.7	1656.2	0.1	-84	1334	1226
TENSÕES COMBINADAS							
x	$\sigma_{1\text{comp}}$		$\sigma_{1'\text{comp}}$		$\sigma_{2\text{comp}}$		$\sigma_{LN\text{comp}}$
[cm]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]
0.0	1084	106.3	1084	106.3	0	0.0	0
75.0	1369	134.3	1369	134.3	0	0.0	0
75.0	682	66.9	946	92.8	0	0.0	1128
180.0	1176	115.3	1374	134.8	576	56.5	1014
285.0	1778	174.4	307	30.1	622	61.0	900
285.0	1868	183.2	371	36.4	675	66.2	1717
456.7	1262	123.8	1155	113.3	293	28.7	1720
628.3	314	30.8	1755	172.1	1656	162.4	1720
628.3	314	30.8	1755	172.1	1656	162.4	0
800.0	1701	166.8	1348	132.2	1656	162.4	0
σ_{max}	0	183.2	0	172.1	0	162.4	0
							168.7

A6 . Braços (COMPORTA NA SOLEIRA)

A6 .1. Características das seções



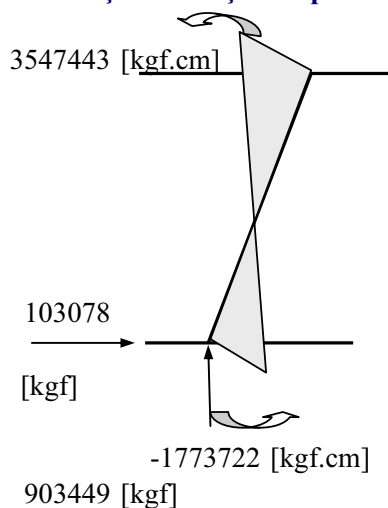
a =	67.00 [cm]	670 [mm]
b =	2.54 [cm]	25.4 [mm]
c =	57.92 [cm]	579.2 [mm]
d =	62.00 [cm]	620 [mm]
e =	2.54 [cm]	25.4 [mm]

Figura 68- Seção transversal dos braços

Propriedades geométricas da seção:

Inércia no eixo xx	Jxx	455510 [cm ⁴]	4.555E+09 [mm ⁴]
Módulo de resistência a flexão no eixo xx	Wxx	13581 [cm ³]	13581099 [mm ³]
Inércia no eixo yy	Jyy	415319 [cm ⁴]	4.153E+09 [mm ⁴]
Módulo de resistência a flexão no eixo yy	Wyy	12398 [cm ³]	12397595 [mm ³]
Área total	At	655 [cm ²]	65532 [mm ²]
Área resistente ao corte na direção x.	Aa	340 [cm ²]	34036 [mm ²]
Área resistente ao corte na direção y.	Ab	315 [cm ²]	31496 [mm ²]

A6 .2. Esforços no braço na direção do pórtico superior



Esforço normal no braço:

N	909305 [kgf]	8.917 [MN]
---	--------------	------------

Esforço cisalhante no braço:

V	3633 [kgf]	0.036 [MN]
---	------------	------------

Momento fletor perto do paramento:

Mp	3547443 [kgf.cm]	0.348 [MN.m]
----	------------------	--------------

Momento fletor perto do terminal:

Mt	1773722 [kgf.cm]	0.174 [MN.m]
----	------------------	--------------

Tabela 28 - Tensões de compressão, flexão e cisalhamento do braço do pórtico superior

TENSÕES NO BRAÇO SUPERIOR					
	Próximo do paramento			Próximo do terminal	
	Tensão	[kgf/cm ²]	[MPa]	Tensão	[kgf/cm ²]
Tensão de flexão	[Mp/Wyy]	286	28	[Mt/Wyy]	143
Tensão de compressão	[N/At]	1388	136	[N/At]	1388
Tensão de cisalhamento	[V/Aa]	11	1	[V/Aa]	11

A6 .3. Esforços no braço na direção do pórtico inferior

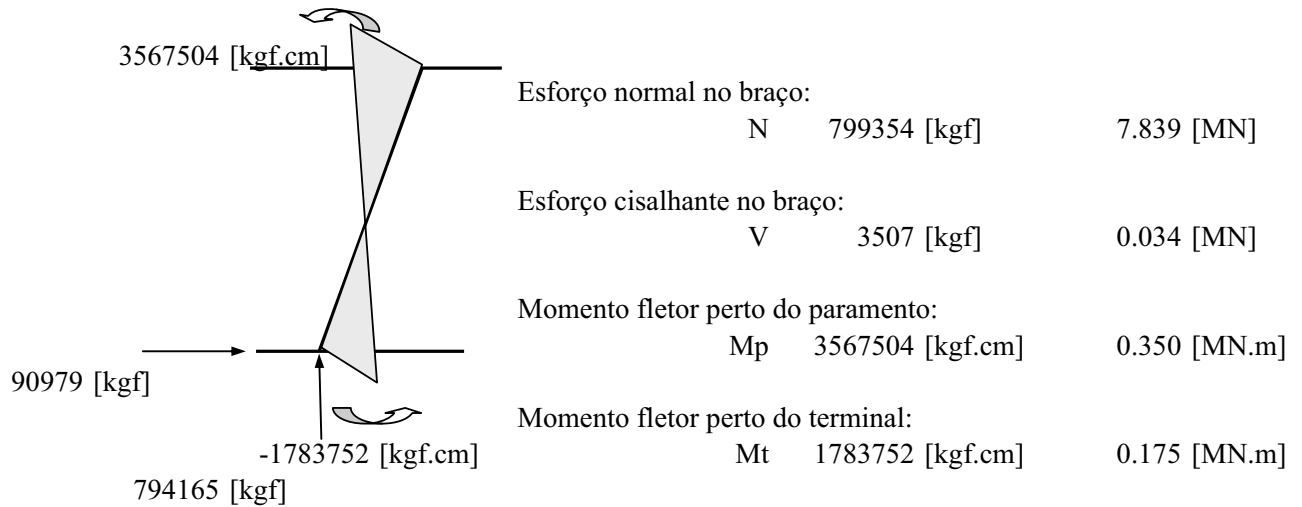
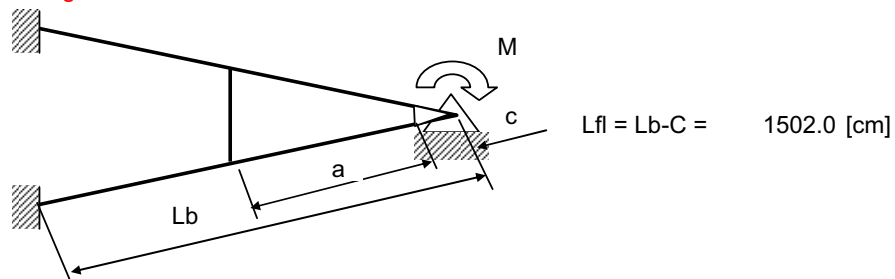


Tabela 29 - Tensões de compressão, flexão e cisalhamento do braço do pórtico inferior

TENSÕES NO BRAÇO INFERIOR						
	Próximo do paramento			Próximo do terminal		
	Tensão	[kgf/cm ²]	[MPa]	Tensão	[kgf/cm ²]	[MPa]
Tensão de flexão	[Mp/Wyy]	288	28	[Mt/Wyy]	144	14
Tensão de compressão	[N/At]	1220	120	[N/At]	1220	120
Tensão de cisalhamento	[V/Aa]	10	1	[V/Aa]	10	1

A6 .4. Esforços no braço superior no plano vertical

Modelo de cálculo para carga de atrito:



Braços com trava

Distância

Momento externo devido ao atrito

(S/N)

S

a = 751.0 [cm]

7510.0 [mm]

M = 0 [kgf.cm]

0.0 [kN.m]

Momento fletor:

Perto do paramento

Mpa =

0 [kgf.cm]

0.000 [MN.m]

Perto do terminal

Mta =

0 [kgf.cm]

0.000 [MN.m]

Esforço cortante:

Perto do paramento

Vpa =

0 [kgf]

0.000 [MN.m]

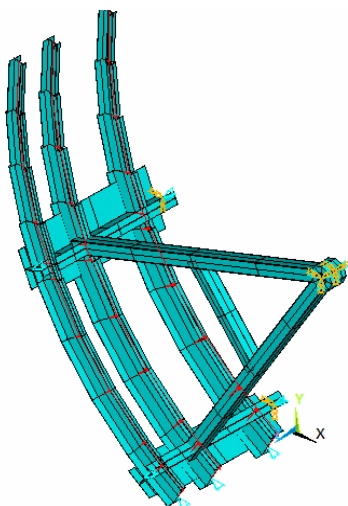
Perto do terminal

Vta =

0 [kgf]

0.000 [MN.m]

Modelo de cálculo para a carga d'água no pórtico tipo: A



Momento fletor:

Perto do paramento
Perto do terminal

$M_{pc} =$	3233520 [kgf.cm]	0.317 [MN.m]
$M_{tc} =$	721001 [kgf.cm]	0.071 [MN.m]

Esforço cortante:

Perto do paramento
Perto do terminal

$V_{pc} =$	7723.5 [kgf]	0.076 [MN]
$V_{tc} =$	4006.9 [kgf]	0.039 [MN]

Esforços no braço no plano vertical devido atrito + carga d'água

Momento fletor:

Perto do paramento
Perto do terminal

$$M_p = M_{pa} + M_{pc}$$

$$M_t = M_{ta} + M_{tc}$$

$M_p =$	3233520 [kgf.cm]	0.317 [MN.m]
$M_t =$	721001 [kgf.cm]	0.071 [MN.m]

Esforço cortante:

Perto do paramento
Perto do terminal

$$V_p = V_{pa} + V_{pc}$$

$$V_t = V_{ta} + V_{tc}$$

$V_p =$	7724 [kgf]	0.076 [MN]
$V_t =$	4007 [kgf]	0.039 [MN]

Tensões no braço no plano vertical devido atrito + carga d'água

Tensão no braço perto do paramento:

Tensão de flexão
Tensão de compressão
Tensão de cisalhamento

$$M_p/W_{xx} = \sigma_{fl} =$$

$$N/A_t = \sigma_{comp} =$$

$$V_p/(A_b) = \tau_{cis} =$$

238 [kgf/cm ²]	23.3 [MPa]
1388 [kgf/cm ²]	136.1 [MPa]
25 [kgf/cm ²]	2.4 [MPa]

Tensão no braço perto do terminal:

Tensão de flexão
Tensão de compressão
Tensão de cisalhamento

$$M_t/W_{xx} = \sigma_{fl} =$$

$$N/A_t = \sigma_{comp} =$$

$$V_t/(A_b) = \tau_{cis} =$$

53 [kgf/cm ²]	5.2 [MPa]
1388 [kgf/cm ²]	136.1 [MPa]
13 [kgf/cm ²]	1.2 [MPa]

A6 .5. Esforços no braço superior no plano vertical

Para carga de atrito:

Momento fletor:

Perto do paramento	$M_{pa} =$	1321662 [kgf.cm]	0.130 [MN.m]
Perto do terminal	$M_{ta} =$	4539182.9 [kgf.cm]	0.445 [MN.m]

Esforço cortante:

Perto do paramento	$V_{pa} =$	3299 [kgf]	0.000 [MN.m]
Perto do terminal	$V_{ta} =$	10209 [kgf]	0.001 [MN.m]

Para a carga d'água no pórtico tipo: A

Momento fletor:

Perto do paramento	$M_{pc} =$	9725849 [kgf.cm]	0.954 [MN.m]
Perto do terminal	$M_{tc} =$	569104 [kgf.cm]	0.056 [MN.m]

Esforço cortante:

Perto do paramento	$V_{pc} =$	12150.9 [kgf]	0.119 [MN]
Perto do terminal	$V_{tc} =$	220.1 [kgf]	0.002 [MN]

Esforços no braço no plano vertical devido atrito + carga d'água

Momento fletor:

Perto do paramento	$M_p = M_{pa} + M_{pc}$	$M_p =$	11047511 [kgf.cm]	1.083 [MN.m]
Perto do terminal	$M_t = M_{ta} + M_{tc}$	$M_t =$	5108287 [kgf.cm]	0.501 [MN.m]

Esforço cortante:

Perto do paramento	$V_p = V_{pa} + V_{pc}$	$V_p =$	15449 [kgf]	0.152 [MN]
Perto do terminal	$V_t = V_{ta} + V_{tc}$	$V_t =$	10429 [kgf]	0.102 [MN]

Tensões no braço no plano vertical devido atrito + carga d'água

Tensão no braço perto do paramento:

Tensão de flexão	$M_p/W_{xx} =$	$\sigma_{fl} =$	813 [kgf/cm ²]	79.8 [MPa]
Tensão de compressão	$N/At =$	$\sigma_{comp} =$	1375 [kgf/cm ²]	134.8 [MPa]
Tensão de cisalhamento	$V_p/(Ab) =$	$\tau_{cis} =$	49 [kgf/cm ²]	4.8 [MPa]

Tensão no braço perto do terminal:

Tensão de flexão	$M_t/W_{xx} =$	$\sigma_{fl} =$	376 [kgf/cm ²]	36.9 [MPa]
Tensão de compressão	$N/At =$	$\sigma_{comp} =$	1375 [kgf/cm ²]	134.8 [MPa]
Tensão de cisalhamento	$V_t/(Ab) =$	$\tau_{cis} =$	33 [kgf/cm ²]	3.2 [MPa]

A6 .6. Tensão de comparação nos braços

Tabela 30 - Tensão de comparação nos braços

TENSÕES COMBINADAS							
Braços Superiores				Braços Inferiores			
Próximo do paramento		Próximo do terminal		Próximo do paramento		Próximo do terminal	
[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
1912	188	1584	155	2225	218	1406	138

A7 . Reforços ou Longarinas Horizontais

A7 .1 Cargas atuantes nas longarinas

Obs: São calculadas apenas três longarinas, as mais carregadas

(A) Acima do pórtico superior

(B) Entre pórtico superior e inferior

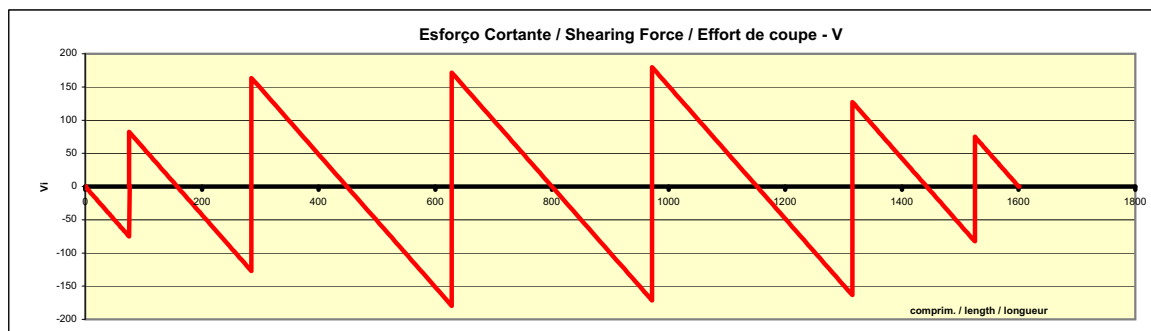
(C) Abaixo do pórtico inferior

Tabela 31 - Cargas nos reforços horizontais (longarinas)

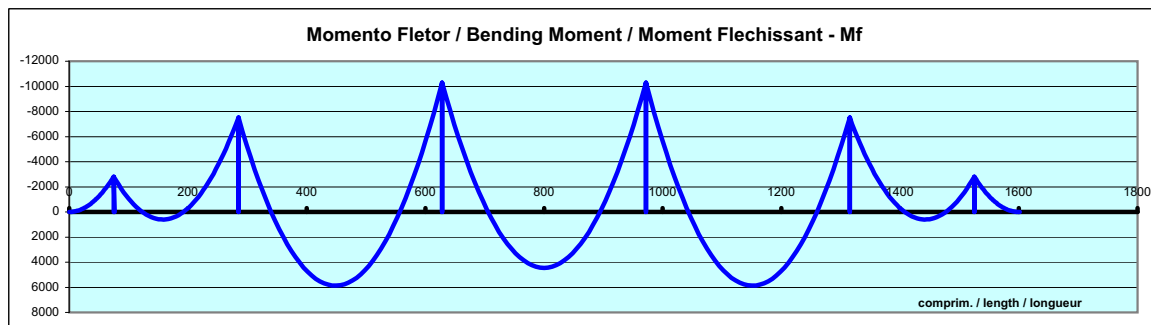
CARGAS NOS REFORÇOS HORIZONTAIS						
Dist. [cm]	Pressão [kgf/cm ²]	t [cm]	Bs [cm]	Bi [cm]	Largura Bc [cm]	Carga [kgf/cm]
150	0.15	0.95	75.0	65.1	140.2	21.0
280	0.28	0.95	65.1	52.4	117.5	32.9
385	0.38	0.95	52.4	46.0	98.4	37.8
477	0.48	0.95	46.0	42.0	88.0	41.9
561	0.56	0.95	42.0	39.1	81.0	45.2
639	0.63	0.95	39.1	36.9	75.9	48.2
713	0.71	0.95	36.9	35.1	72.0	50.8
783	0.77	0.95	35.1	33.6	68.7	53.1
850	0.84	1.25	33.6	42.4	76.1	63.6
935	0.92	1.25	42.4	35.1	77.0	70.5
1004	0.98					
1069	1.04	1.25	32.2	39.0	71.1	73.7
1147	1.11	1.25	39.0	37.8	76.8	84.9
1222	1.17	1.25	37.8	36.8	74.6	87.4
1296	1.23	1.25	36.8	35.9	72.7	89.6
1368	1.29	1.25	35.9	35.1	71.0	91.8
1438	1.35	1.25	35.1	34.4	69.5	93.7
1507	1.40	1.25	34.4	33.8	68.2	95.6
1574	1.45	1.25	33.8	33.2	67.0	97.3
1641	1.50	1.25	33.2	32.7	65.9	98.9
1706	1.55	1.25	32.7	32.2	64.9	100.4
1770	1.59	1.25	32.2	31.8	64.0	101.8
1834	1.63	1.25	31.8	31.4	63.2	103.2
1897	1.67	1.25	31.4	31.0	62.4	104.4
1959	1.71	1.25	31.0	30.7	61.7	105.6
2020	1.75	1.25	30.7	24.3	55.0	96.1
2068.8	1.77					
2115	1.80	1.25	23.2	28.7	51.9	93.3
2173	1.83	1.25	28.7	22.7	51.5	94.1

A7 .2. Esforços Atuantes nas Longarinas

**Esforço
Cortante**



**Momento
Fletor**



A7 .2.1 Esforços Atuantes na Longarina A

Propriedades de sua seção:

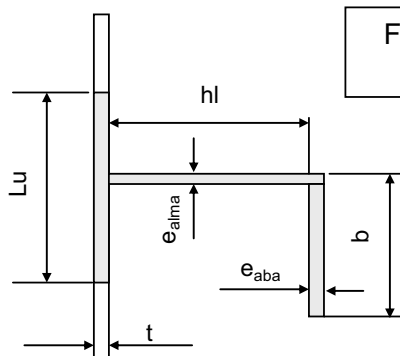


Figura 69- Seção transversal das longarinas

Tabela 32 - Largura colaborante do paramento para a longarina A

LARGURA COLABORANTE DO PARAMENTO									
Região	B [cm]	No centro do Vão				Na região do apoio			
		L [cm]	L/B	λ	LU [cm]	L [cm]	L/B	λ	LU [cm]
Pl. sup.	42.42	216.7	5.11	0.80	33.8	122.9	2.90	0.41	17.2
Pl. inf.	35.12	216.7	6.17	0.85	29.9	122.9	3.50	0.47	16.6
Lu = Lu _{sup} + Lu _{inf} =					63.74				

Tabela 33 - Dimensões e propriedades geométricas da seção da longarina A

DIMENSÕES DA SEÇÃO								
Região	V [kgf]	M [kgf.cm]	Lu [mm]	t [mm]	hl [mm]	b [mm]	e _{alma} [mm]	e _{aba} [mm]
Apoio	12666	42382	338.77	12.5	300	60	12.50	12.50
C.Vão	0	413597	637.43	12.5	300	60	12.50	12.50
Apoio	12666	31952	338.77	9.5	300	60	12.50	12.50
C.Vão	0	311813	637.43	9.5	300	60	12.50	12.50
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS								
Região	A [cm ²]	y ₁ [mm]	y ₂ [mm]	I _x [cm ⁴]				
Apoio	87.3	100.2	224.8	11594.5				
C.Vão	124.7	72.0	253.0	13906.2				
Apoio	77.2	110.2	211.8	10474.8				
C.Vão	105.6	81.8	240.2	12782.0				
Região	W ₁ [cm ³]	W _{1'} [cm ³]	W _{2'} [cm ³]	W ₂ [cm ³]	MS _{1'} [cm ³]	MS _{2'} [cm ³]	MS _{LN} [cm ³]	
Apoio	1157.5	1322.6	546.0	515.7	397.7	163.9	445.7	
C.Vão	1930.2	2335.4	578.3	549.7	524.2	185.0	546.4	
Apoio	950.9	1040.6	525.5	494.5	339.2	154.2	402.6	
C.Vão	1562.1	1767.3	561.4	532.2	466.7	175.4	499.4	

Tabela 34 - Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da longarina A

TENSÕES DE FLEXÃO E CISALHAMENTO							-	-
Região	σ_1 [kgf/cm ²]	σ_1' [kgf/cm ²]	σ_2' [kgf/cm ²]	σ_2 [kgf/cm ²]	τ_{LN} [kgf/cm ²]	σ_{3x} [kgf/cm ²]		
Apoio	-37	-32	78	82	28	1384		
C.Vão	-214	-177	752	752	0	2018		
Apoio	-34	-31	61	65	31	1384		
C.Vão	-200	-176	586	586	0	2018		

Tabela 35 - Tensão de comparação da seção da longarina A

TENSÕES COMBINADAS								
Região	σ_{comp1}		$\sigma_{comp2'}$		σ_{comp2}		σ_{compLN}	
	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
Apoio	1195	117	78	8	82	8	49.2	5
C.Vão	1854	182	752	74	752	74	0.0	0
Apoio	1198	117	61	6	65	6	54.5	5
C.Vão	1849	181	586	57	586	57	0.0	0

A7 .2.2 Esforços Atuantes na Longarina B

Tabela 36 - Dimensões e propriedades geométricas da seção da longarina B

DIMENSÕES DA SEÇÃO								
Região	V	M	Lu	t	hl	b	e _{alma}	e _{aba}
	[kgf]	[kgf.cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Apoio	18975	63492	320.45	12.5	300	80	12.50	12.50
C.Vão	0	619611	544.93	12.5	300	80	12.50	12.50
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS								
Região	A	y ₁	y ₂	I _x				
	[cm ²]	[mm]	[mm]	[cm ⁴]				
Apoio	87.6	108.9	216.1	12520.8				
C.Vão	115.6	84.0	241.0	14761.9				
Região	W ₁	W _{1'}	W _{2'}	W ₂	MS _{1'}	MS _{2'}	MS _{LN}	
	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	
Apoio	1150.1	1299.3	614.9	579.3	411.0	209.9	469.1	
C.Vão	1758.2	2065.8	645.9	612.4	529.3	234.8	561.2	

Tabela 37 - Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da longarina B

TENSÕES DE FLEXÃO E CISALHAMENTO								
Região	σ_1	σ_1'	σ_2'	σ_2	τ_{LN}	σ_{3x}	-	-
	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]		
Apoio	-55	-49	103	110	40	1429		
C.Vão	-352	-300	1012	1012	0	2084		

Tabela 38 - Tensão de comparação da seção da longarina B

TENSÕES COMBINADAS								
Região	σ_{comp1}		$\sigma_{comp2'}$		σ_{comp2}		σ_{compLN}	
	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
Apoio	1217	119	103	10	110	11	70.1	7
C.Vão	1962	192	1012	99	1012	99	0.0	0

A7 .2.3 Esforços Atuantes na Longarina C

Tabela 39 - Dimensões e propriedades geométricas da seção da longarina C

DIMENSÕES DA SEÇÃO								
Região	V	M	Lu	t	hl	b	e _{alma}	e _{aba}
	[kgf]	[kgf.cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Apoio	16906	56569	294.23	12.5	300.00	60.0	12.5	12.5
C.Vão	0	552046	470.45	12.5	300.00	60.0	12.5	12.5
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS								
Região	A	y ₁	y ₂	I _x				
	[cm ²]	[mm]	[mm]	[cm ⁴]				
Apoio	81.8	106.6	218.4	11069.3				
C.Vão	103.8	85.3	239.7	12818.2				
Região	W ₁	W _{1'}	W _{2'}	W ₂	MS _{1'}	MS _{2'}	MS _{LN}	
	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	
Apoio	1038.8	1176.9	537.5	506.7	368.9	159.1	424	
C.Vão	1503.2	1761.4	564.1	534.7	464.7	175.1	498	

Tabela 40 - Tensões de flexão e de cisalhamento da seção da longarina C

TENSÕES DE FLEXÃO E CISALHAMENTO							
Região	σ ₁	σ _{1'}	σ _{2'}	σ ₂	τ _{LN}	σ _{3x}	-
	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	-
Apoio	-54.5	-48.1	105.2	111.6	39.9	1312.8	
C.Vão	-367.2	-313.4	1032.4	1032.4	0.0	1915.1	

Tabela 41 - Tensão de comparação da seção da longarina C

TENSÕES COMBINADAS							
Região	σ _{comp1}		σ _{comp2'}		σ _{comp2}		σ _{compLN}
	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]
Apoio	1115	109	105	10	112	11	69.0
C.Vão	1820	179	1032	101	1032	101	0.0

APÊNDICE B: PROGRAMA PARAMÉTRICO DA COMPORTA SEGMENTO DE DOIS BRAÇOS EM ANSYS® COM ELEMENTOS BEAM189

Apresenta-se a seguir o programa paramétrico da comporta segmento em BEAM189 para obtenção dos esforços solicitantes internos, nomeadamente esforços cortante e momentos fletores do pórtico tipo “A” para utilização no programa analítico.

```

=====
!*** PROGRAMA      : CONSTRUCAO DA COMPORTA SEGMENTO EM BEAM *****
!*** ARQUIVO       : SOLUCAO_BEAM05.TXT *****
!*** CRIADO POR    : JOSE PAULO GRANDO *****
!*** CRIADO EM     : 18 MAIO 2010 *****
!*** VERIFICADO POR : Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA *****
!*** VERIFICADO EM : 18 JUNHO 2010 *****
=====

!*** ENTRADA DE DADOS DA GEOMETRIA DA COMPORTA *****
=====

!*** IDIOMA PARA IMPRESSAO ***

*SET,IDIOMA,1

! *** CARGA D'AGUA DE CALCULO - [mca] ***

*SET,PRESS,18.5
*SET,DEPRES,-0.000925

! *** ENTRADA DE DADOS DA GEOMETRIA DA COMPORTA - [mm] ***

*SET,RAIO,19000
*SET,VAO,16000
*SET,ELMUN,349180
*SET,ELSOL,332500
*SET,ELTOPO,351500
*SET,NAN,351000
*SET,NAO,351000
*SET,NAE,351000
*SET,H,19000
*SET,DEM,14180
*SET,ECICA,349600
*SET,EFGL,358450
*SET,ESCP,0
*SET,ESC,0

! *** LARGURA DAS PLACAS - [mm] ***

*SET,NVT,6
*SET,NVV,1
*SET,VPAR,0
*SET,LPA,750
*SET,LPB,2100
*SET,LPC,3433.34

```

! *** GEOMETRIA DA LONGARINA A - [mm] ***

*SET,NLAVHS,10

*SET,HL3,300

*SET,LA3,60

! *** GEOMETRIA DA LONGARINA B - [mm] ***

*SET,NLEVH,15

*SET,HL2,300

*SET,LA2,80

! *** GEOMETRIA DA LONGARINA C - [mm] ***

*SET,NLAVHI,2

*SET,HL1,300

*SET,LA1,60

! *** POSICIONAMENTO DAS LONGARINAS - [mm] ***

*DIM,LL,ARRAY,45

LL(1)=454.66

LL(2)=0

LL(3)=0

LL(4)=574.51

LL(5)=463.1

LL(6)=486.63

LL(7)=0

LL(8)=0

LL(9)=0

LL(10)=0

LL(11)=0

LL(12)=0

LL(13)=0

LL(14)=613.77

LL(15)=620.38

LL(16)=627.59

LL(17)=635.47

LL(18)=644.1

LL(19)=653.56

LL(20)=663.96

LL(21)=675.44

LL(22)=688.16

LL(23)=702.32

LL(24)=718.18

LL(25)=736.05

LL(26)=756.38

LL(27)=779.72

LL(28)=643.12

LL(29)=691.08

LL(30)=0

LL(31)=0

LL(32)=0

LL(33)=0

LL(34)=848.49

LL(35)=672.84

LL(36)=701.94

LL(37)=737.28

LL(38)=781.54
 LL(39)=839.46
 LL(40)=920.43
 LL(41)=1047.24
 LL(42)=1302.16
 LL(43)=1500.88

! *** POSICAO DAS VIGAS HORIZONTAIS - [grau] ***

*SET,PVHS,31.80306
 *SET,PVHI,32.1
 *SET,EPPS,5
 *SET,EPPI,1

! *** CAIXA DE APOIO DOS BRACOS NA COMPORTA - [mm] ***

*SET,LEB,645.4
 *SET,WEB,604.6

*SET,TIPO,2

*SET,FLA,670
 *SET,DEXTB,0
 *SET,DINTB,0
 *SET,HEB,1500

! *** PARÂMETROS DO BRAÇO - [mm] ***

*SET,COMPT,2500
 *SET,POSIT,7531.5

*SET,DINT,600
 *SET,DCUB,1260
 *SET,EXC,10
 *SET,CCU,904
 *SET,ACU,63
 *SET,LBCU,714

! *** NUMERO DE PAINEIS ***

*SET,NP,8

! *** ALTURA DOS PAINEIS - [grau] ***

*DIM,HP,ARRAY,10

HP(1)=8.55912399142712
 HP(2)=8.54913341682044
 HP(3)=8.54913341682044
 HP(4)=8.54913341682044
 HP(5)=8.54913341682044
 HP(6)=8.54913341682044
 HP(7)=8.54913341682044
 HP(8)=8.54913341682044

! *** CARGA D'AGUA NA VIGA VERTICAL 1 - [N/mm] ***

*DIM,CAV1,ARRAY,12

CAV1(1)=0
 CAV1(2)=31.7
 CAV1(3)=76.4
 CAV1(4)=120.2
 CAV1(11)=147.9
 CAV1(5)=163.1
 CAV1(6)=206.5
 CAV1(7)=246.4
 CAV1(8)=283.8
 CAV1(12)=304.6
 CAV1(9)=326.6

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA VERTICAL 1 - [mm] ***

*DIM,LUV1,ARRAY,10

LUV1(1)=662.8
 LUV1(2)=662.8
 LUV1(3)=662.8
 LUV1(4)=760.2
 LUV1(5)=760.2
 LUV1(6)=760.2
 LUV1(7)=760.2
 LUV1(8)=760.2
 LUV1(9)=697.7

! *** ALTURA DA VIGA VERTICAL 1 - [mm] ***

*DIM,HV1,ARRAY,10

HV1(1)=500
 HV1(2)=654.9
 HV1(3)=873.7
 HV1(4)=1088
 HV1(5)=1200
 HV1(6)=1200
 HV1(7)=1200
 HV1(8)=1200
 HV1(9)=400

! *** CARGA D'AGUA NA VIGA VERTICAL 2 - [N/mm] ***

*DIM,CAV2,ARRAY,12

CAV2(1)=0
 CAV2(2)=48.7
 CAV2(3)=117.5
 CAV2(4)=184.8
 CAV2(11)=227.3
 CAV2(5)=250.7
 CAV2(6)=317.4
 CAV2(7)=378.7
 CAV2(8)=436.2
 CAV2(12)=468.2
 CAV2(9)=501.9

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA VERTICAL 2 - [mm] ***

*DIM,LUV2,ARRAY,10

LUV2(1)=662.8
 LUV2(2)=662.8
 LUV2(3)=662.8
 LUV2(4)=760.2
 LUV2(5)=760.2
 LUV2(6)=760.2
 LUV2(7)=760.2
 LUV2(8)=760.2
 LUV2(9)=569.5

! *** ALTURA DA VIGA VERTICAL 2 - [mm] ***

*DIM,HV2,ARRAY,10

HV2(1)=500
 HV2(2)=721.3
 HV2(3)=1033.8
 HV2(4)=1340
 HV2(5)=1500
 HV2(6)=1500
 HV2(7)=1500
 HV2(8)=1500
 HV2(9)=400

! *** CARGA D'AGUA NA VIGA VERTICAL 3 - [N/mm] ***

*DIM,CAV3,ARRAY,12

CAV3(1)=0
 CAV3(2)=60.4
 CAV3(3)=145.8
 CAV3(4)=229.4
 CAV3(11)=282
 CAV3(5)=311.1
 CAV3(6)=393.9
 CAV3(7)=469.9
 CAV3(8)=541.4
 CAV3(12)=581
 CAV3(9)=622.9

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA VERTICAL 3 - [mm] ***

*DIM,LUV3,ARRAY,10

LUV3(1)=662.8
 LUV3(2)=662.8
 LUV3(3)=662.8
 LUV3(4)=760.2
 LUV3(5)=760.2
 LUV3(6)=760.2
 LUV3(7)=760.2
 LUV3(8)=760.2
 LUV3(9)=569.5

! *** ALTURA DA VIGA VERTICAL 3 - [mm] ***

*DIM,HV3,ARRAY,10

HV3(1)=500

HV3(2)=721.3
 HV3(3)=1033.8
 HV3(4)=1340
 HV3(5)=1500
 HV3(6)=1500
 HV3(7)=1500
 HV3(8)=1500
 HV3(9)=400

! *** ABAS DAS VIGAS VERTICAIS - [mm] ***

*SET,LAV1,300
 *SET,LAV2,400
 *SET,LAV3,400

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR - [mm] ***

*DIM,LUVS,ARRAY,4

LUVS(1)=1931.5
 LUVS(2)=3066.8
 LUVS(3)=3066.8

! *** LARGURA COLABORANTE DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR - [mm] ***

*DIM,LUVI,ARRAY,4

LUVI(1)=1538.1
 LUVI(2)=2089.2
 LUVI(3)=2089.2

! *** ABAS DAS VIGAS HORIZONTAIS - [mm] ***

*SET,AVHS,620
 *SET,AVHI,620

! *** REDUCAO DOS ADOCAMENTOS DAS ABAS ***

*SET,RABAS,0.55

! *** ESPESSURA DO PARAMENTO - [mm] ***

*DIM,EPAR,ARRAY,10

EPAR(1)=9.5
 EPAR(2)=9.5
 EPAR(3)=9.5
 EPAR(4)=12.5
 EPAR(5)=12.5
 EPAR(6)=12.5
 EPAR(7)=12.5
 EPAR(8)=12.5

! *** ESPESSURA DA ALMA DA VIGA VERTICAL 1 - [mm] ***

*DIM,EALV1,ARRAY,10

EALV1(1)=12.5
 EALV1(2)=12.5

EALV1(3)=12.5
 EALV1(4)=12.5
 EALV1(5)=12.5
 EALV1(6)=12.5
 EALV1(7)=12.5
 EALV1(8)=12.5

! *** ESPESSURA DA ABA DA VIGA VERTICAL 1 - [mm] ***

*DIM,EABV1,ARRAY,10

EABV1(1)=16
 EABV1(2)=16
 EABV1(3)=16
 EABV1(4)=16
 EABV1(5)=16
 EABV1(6)=16
 EABV1(7)=16
 EABV1(8)=16

! *** ESPESSURA DA ALMA DA VIGA VERTICAL 3 - [mm] ***

*DIM,EALV3,ARRAY,10

EALV3(1)=16
 EALV3(2)=16
 EALV3(3)=16
 EALV3(4)=16
 EALV3(5)=16
 EALV3(6)=16
 EALV3(7)=16
 EALV3(8)=16

! *** ESPESSURA DA ABA DA VIGA VERTICAL 3 - [mm] ***

*DIM,EABV3,ARRAY,10

EABV3(1)=19
 EABV3(2)=19
 EABV3(3)=19
 EABV3(4)=19
 EABV3(5)=19
 EABV3(6)=19
 EABV3(7)=19
 EABV3(8)=19

! *** ESPESSURAS DAS ALMAS DAS LONGARINAS - [mm] ***

*DIM,EAL,ARRAY,4

*SET,EAL(1),12.5
 *SET,EAL(2),12.5
 *SET,EAL(3),12.5

! *** ESPESSURAS DAS ABAS DAS LONGARINAS - [mm] ***

*DIM,EBL,ARRAY,4

*SET,EBL(1),12.5

*SET,EBL(2),12.5

*SET,EBL(3),12.5

! *** ESPESSURA DA ALMA DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR - [mm] ***

*DIM,EAVHS,ARRAY,4

EAVHS(1)=22.4

EAVHS(2)=22.4

EAVHS(3)=22.4

! *** ESPESSURA DA ABA DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR - [mm] ***

*DIM,EBVHS,ARRAY,4

EBVHS(1)=31.5

EBVHS(2)=31.5

EBVHS(3)=31.5

! *** ESPESSURA DA ALMA DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR - [mm] ***

*DIM,EAVHI,ARRAY,4

EAVHI(1)=22.4

EAVHI(2)=22.4

EAVHI(3)=22.4

! *** ESPESSURA DA ABA DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR - [mm] ***

*DIM,EBVHI,ARRAY,4

EBVHI(1)=31.5

EBVHI(2)=31.5

EBVHI(3)=31.5

! *** ESPESSURA NOS BRACOS SUPERIORES - [mm] ***

*SET,EABS,25.4

*SET,EBSSP,25.4

*SET,EBST,25.4

*SET,EBSIP,25.4

*SET,EBSIT,25.4

! *** ESPESSURA NOS BRACOS INFERIORES - [mm] ***

*SET,EABI,25.4

*SET,EBIIP,25.4

*SET,EBIIT,25.4

*SET,EBISP,25.4

*SET,EBIST,25.4

! *** OUTRAS ESPESSURAS - [mm] ***

*SET,EFP,75

*SET,ETBB,8

*SET,EFTP,12.5

*SET,EFSP,16

! *** ESPESSURAS DO CAIXAO - [mm] ***

*SET,EACP,25.4

! *** ESPESSURAS DO TERMINAL - [mm] ***

*SET,EPLT,31.5

*SET,EPST,31.5

*SET,ECCC,50

*SET,ERCT,50

!=====
!*** MODELING *****
!=====

*IF,IDIOMA,EQ,1,THEN

/TITLE,TENSAO: PRES= %PRESS% [mca], ALT.= %H% [mm], VAO= %VAO% [mm], R.= %RAIO% [mm]

*ENDIF

*IF,IDIOMA,EQ,2,THEN

/TITLE,TENSION: PRES= %PRESS% [mca], ALT.= %H% [mm], VANO= %VAO% [mm], R.= %RADIO% [mm]

*ENDIF

*IF,IDIOMA,EQ,3,THEN

/TITLE,STREES: PRES= %PRESS% [mca], HEI.= %H% [mm], VAO= %SPAN% [mm], R.= %RAY% [mm]

*ENDIF

!=====
!*** ENTRAR NO PRE-PROCESSAMENTO *****
!=====

/PREP7

/COM, Structural

KEYW,PR_STRUC,1

!=====
!*** ANGULO DE VIZUALIZACAO *****
!=====

/VIEW, 1,1,1,1

/ANG, 1

!=====
!*** GERAR PARAMENTO *****
!=====

*SET,PI,4*ATAN(1) !DEFINE O NUMERO PI

*AFUN,DEG

*SET,HTOPO,ELTOPO-ELSOL

*SET,HMUN,ELMUN-ELSOL

*SET,ALFA,ASIN(HMUN/RAIO)

*SET,BETA,ASIN((HTOPO-HMUN)/RAIO)

WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO

```

CYLIND,RAIO,0,0,VAO/2,90,450,      ! GERA CILINDRO

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,,-90,
WPRO,,,BETA                      !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO

VSBW,1
VSEL,S,,,2
VDELE,2,,,1
ALLSEL,ALL

WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,,-90,
WPRO,,,ALFA                      !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA

VSBW,3
VSEL,S,,,2
VDELE,2,,,1

ALLSEL,ALL

VDELE,1
WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
wpstyle,0.05,0.1,-1,1,0.003,1,2,,5
CSYS,4
ASEL,S,LOC,X,,RAIO-0.001
ADELE,ALL, , ,1
ALLSEL,ALL
APLOT

!=====
!*** CORTAR PLACAS NA VERTICAL *****
!=====

WPOFF,,,VAO/2
WPOFF,,,LPA
ASBW,ALL
WPOFF,,,LPB
ASBW,ALL
*SET,NVC,NVV                      !NUMERO DE VIGAS VERTICAIS CENTRAIS
*DO,VC,1,NVC
    WPOFF,,,LPC
    ASBW,ALL
*ENDDO

!=====
!*** CORTAR ALTURA DOS PAINEIS *****
!=====

WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0
WPRO,,-90,
WPRO,,,ALFA
*DO,PP,1,NP-1
    *IF,HP(PP),NE,0,THEN

```

```

        WPRO,,HP(PP)
        ASBW,ALL
    *ENDIF
*ENDDO

!=====
!*** CORTE DAS VIGAS HORIZONTAIS *****
!=====

WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0  !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,, -90,
WPRO,,BETA          !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO

WPRO,, -PVHS
ASBW,ALL
WPRO,, -PVHI
ASBW,ALL

!=====
!*** GERAR LINHAS DO CENTRO DO BRACO DA COMPORTA *****
!=====

*SET,ANGB,ATAN((DEM/2-(VAO/2-(LPA+LPB)))/(RAIO))
        ! CALCULA O ANGULO DE INCLINACAO DO BRACO

WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0  !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPOFF,,DEM/2
K,,0,0,0          !GERA KP NA POSICAO DO MUNHAO
P80=KP(0,0,0)      !NOMEIA OS KP

WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0  !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,, -90,
WPRO,,BETA          !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,, -PVHS        !POSICIONA O WP NA LINHA DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR
WPOFF,, -VAO/2,
WPOFF,,LPA,
WPOFF,,LPB,
WPOFF, -(RAIO),, !POSICIONA O WP SOBRE A ESPERA DO BRACO SUPERIOR
P81=KP(0,0,0)
LSTR,P80,P81      !GERAR LINHA DO BRACO SUPERIOR
wpro, -ANGB,,      ! GIRA O WP PARA A DIRECAO DO BRACO SUPERIOR
LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,0.001 !LOCALIZA LINHA DO BRACO SUPERIOR
*GET,LBS,LINE,0,NUM,MAX  !DESCOBRE O Nº DA LINHA DO BRACO SUPERIOR

WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0  !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,, -90,
WPRO,,BETA          !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,, -(PVHS+PVHI) !POSICIONA O WP NA LINHA DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR
WPOFF,, -VAO/2,
WPOFF,,LPA,
WPOFF,,LPB,
WPOFF, -(RAIO),, !POSICIONA O WP SOBRE A ESPERA DO BRACO INFERIOR
P82=KP(0,0,0)
LSTR,P80,P82      !GERAR LINHA DO BRACO INFERIOR

```

```
wpro,-ANGB,,          ! GIRA O WP PARA A DIRECAO DO BRACO INFERIOR
LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,0.001  !LOCALIZA LINHA DO BRACO INFERIOR
*GET,LBI,LINE,0,NUM,MAX    !DESCOBRE O Nº DA LINHA DO BRACO INFERIOR
```

```
!=====
!*** GERAR LINHAS DO CENTRO DA TRAVA DO BRACO *****
!=====
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
LWPL,-1,LBS,0          !ALINHA O WP COM A LINHA DO BRACO SUPERIOR
WPOFF,,,(POSIT+COMPT)
LSEL,S,,LBS
LSBW,ALL
P83=KP(0,0,0)
ALLSEL,ALL
```

```
LWPL,-1,LBI,0          !ALINHA O WP COM A LINHA DO BRACO SUPERIOR
WPOFF,,,(POSIT+COMPT)
LSEL,S,,LBI
LSBW,ALL
P84=KP(0,0,0)
ALLSEL,ALL
```

```
LSTR,P83,P84          !GERAR LINHA CENTRAL DA TRAVA
```

```
ALLSEL,ALL
LPLOT
```

```
!=====
!*** GERAR LINHA CENTRAL DO CUBO *****
!=====
```

```
WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0  !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPOFF,,DEM/2
```

```
WPOFF,,CCU/2          !DESLOCA WP PARA FACE EXTERNA DO MUNHAO
K,,0,0,0              !GERA KP NA LATERAL DO CUBO
P90=KP(0,0,0)         !NOMEIA O KP
LSTR,P80,P90          !GERAR LINHA DO BRACO SUPERIOR
```

```
WPOFF,,CCU
K,,0,0,0              !GERA KP NA OUTRA LATERAL DO CUBO
P91=KP(0,0,0)         !NOMEIA O KP
```

```
LSTR,P80,P91          !GERAR LINHA CENTRAL DO CUBO
```

```
ALLSEL,ALL
LPLOT
```

```
!=====
!*** FIM DO PROGRAMA DE GERACAO DA GEOMETRIA *****
!=====
```

```
!=====
!*** GERACAO DA MALHA PROPRIAMENTE DITA *****
!=====
```

```

=====
!
=====
!
*** PREPARAÇÃO DA MALHA DAS ESPESSURAS E DO MATERIAL *****
=====

ET,1,BEAM189          ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO
ET,2,SHELL93          ! DEFINE O TIPO DE ELEMENTO

KEYOPT,1,4,2
DOF,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.06E5    ! MÓDULO DE YOUNG DO AÇO [MPa]
MPDATA,PRXY,1,,0.3     ! COEFICIENTE DE POISSON
MPDATA,DENS,1,,7.85E-6 ! DENSIDADE [kg/mm^3]

=====
!** AJUSTE DE MALHA - NÚMERO DE DIVISOES DO ELEMENTO BEAM (DIVISAO DA LINHA) ***
=====

NDVV=1      ! N° DE DIVISOES DO ELEMENTO BEAM DA VIGA VERTICAL
NDVH=2      ! N° DE DIVISOES DO ELEMENTO BEAM DA VIGA HORIZONTAL
NDBR=2      ! N° DE DIVISOES DO ELEMENTO BEAM DO BRACO
NDTR=2      ! N° DE DIVISOES DO ELEMENTO BEAM DA TRAVA DO BRACO
NDCU=2      ! N° DE DIVISOES DO ELEMENTO BEAM DO CUBO

=====
!** APLICACAO DAS REAIS CONSTANTES NAS VIGAS *****
=====

=====
!** SECAO DA VIGA VERTICAL 1 *****
=====

*DO,K,1,NP
  SECTYPE, 11+NP-K, BEAM, I, VV1, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
  SECDATA,LUV1(K),LAV1,HV1(K)+EABV1(K)+EPAR(K),EPAR(K),EABV1(K),EALV1(K),0,0,0,0
    !LParSup, LBInf, HTot, EParSup, EBInf, EAlma,0,0,0,0
*ENDDO

=====
!** SECAO DA VIGA VERTICAL 2 *****
=====

*DO,K,1,NP
  SECTYPE, 21+NP-K, BEAM, I, VV2, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
  SECDATA,LUV2(K),LAV2,HV2(K)+EABV3(K)+EPAR(K),EPAR(K),EABV3(K),EALV3(K),0,0,0,0
    !LParSup, LBInf, HTot, EParSup, EBInf, EAlma,0,0,0,0
*ENDDO

=====
!** SECAO DA VIGA VERTICAL 3 *****
=====

*DO,K,1,NP

```

```

SECTYPE, 31+NP-K, BEAM, I, VV3, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
SECDATA, LUV3(K), LAV3, HV3(K)+EABV3(K)+EPAR(K), EPAR(K), EABV3(K), EALV3(K), 0, 0, 0, 0
!LParSup, LBInf, HTot, EParSup, EBInf, EAlma, 0, 0, 0, 0
*ENDDO

```

```

=====
!*** SECAO DA VIGA VERTICAL 3 DA SIMETRIA (SE HOVER) *****
=====

```

```

*DO, K, 1, NP
SECTYPE, 41+NP-K, BEAM, CHAN, VV3S, 0
SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
SECDATA, LUV3(K)/2, LAV3/2, HV3(K)+EABV3(K)+EPAR(K), EPAR(K), EABV3(K), EALV3(K)/2, 0, 0, 0, 0
!LParSup, LBInf, HTot, EParSup, EBInf, EAlma, 0, 0, 0, 0
*ENDDO

```

```

=====
!*** SELECIONAR AS PARTES DA VIGA VERTICAL 1 *****
=====

```

```

WPCSYS, -1, 0
CSYS, 4
WPOFF, RAIO*COS(ALFA), HMUN, 0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO, -, -90,

```

```

WPOFF, -, -VAO/2, !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
WPOFF, -, LPA, !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 1

```

```

WPRO, -, BETA !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
K, 1006, -RAIO, 0, 0 !CRIAR KEYPOINT DE REFERENCIA NO TOPO DA COMPORTA

```

```

WPRO, -, -ALFA-BETA !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA
K, 1001, -RAIO, 0, 0 !CRIAR KEYPOINT DE REFERENCIA NA SOLEIRA

```

```

LSEL, S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL, R, LOC, Z, (-0.001, (ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA DESDE A SOLEIRA ATE A VHI DA V VERTICAL 1

```

```

LATT, 1, 1, 1, 1, 1006, 11 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

```

```

LESIZE, ALL, , , NDVV, , , , 1
LMESH, ALL
ALLSEL, ALL

```

```

LSEL, S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL, R, LOC, Z, (ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO-1, (HP(1))*PI/180*RAIO+1
!SELECIONA DESDE A VHI ATE TOPO PAINEL 1 DA V VERTICAL 1

```

```

LATT, 1, 1, 1, 1, 1006, 11 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

```

```

LESIZE, ALL, , , NDVV, , , , 1
LMESH, ALL
ALLSEL, ALL

```

```

WPRO, -, HP(1)
*DO, KK, 2, EPPS
LSEL, S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL, R, LOC, Z, -0.001, HP(KK)*PI/180*RAIO+0.001

```

```

!SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL 1 ATE PAINEL DA VHS

LATT,1,1,1, ,1001, ,10+KK      !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

LESIZE,ALL, , ,NDVV, , , ,1
LMESH,ALL
WPRO,,,HP(KK)
ALLSEL,ALL
*ENDDO

*DO,KK,EPPS+1,NP
LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL,R,LOC,Z,-0.001,HP(KK)*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL DA VHS ATE TOPO V VERTICAL 1

LATT,1,1,1, ,1001, ,10+KK      !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

LESIZE,ALL, , ,NDVV, , , ,1
LMESH,ALL
WPRO,,,HP(KK)
ALLSEL,ALL
*ENDDO

EPLOT

!=====
!*** SELECIONAR AS PARTES DA VIGA VERTICAL 2 *****
!=====

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,,-90,

WPOFF,,-VAO/2,                    !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
WPOFF,,LPA,                        !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 1
WPOFF,,LPB,                        !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 2

WPRO,,,BETA                        !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
K,2006,-RAIO,0,0                  !CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NO TOPO DA COMPORTA

WPRO,,,ALFA-BETA                  !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA
K,2001,-RAIO,0,0                  !CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NA SOLEIRA

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA DESDE A SOLEIRA ATE A VHI DA V VERTICAL 2

LATT,1, ,1, ,2006, ,21          !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

LESIZE,ALL, , ,NDVV, , , ,1
LMESH,ALL
ALLSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
LSEL,R,LOC,Z,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO-1,(HP(1))*PI/180*RAIO+1
!SELECIONA DESDE A VHI ATE TOPO PAINEL 1 DA V VERTICAL 2

LATT,1, ,1, ,2006, ,21          !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

```

```
LESIZE,ALL,,NDVV,,,,,1
LMESH,ALL
ALLSEL,ALL
```

```
WPRO,,,HP(1)
*DO,KK,2,EPPS
  LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
  LSEL,R,LOC,Z,-0.001,HP(KK)*PI/180*RAIO+0.001
  !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL 1 ATE PAINEL DA VHS
```

```
LATT,1,,1,,2001,,20+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM
```

```
LESIZE,ALL,,NDVV,,,,,1
LMESH,ALL
WPRO,,,HP(KK)
ALLSEL,ALL
```

```
*ENDDO
```

```
*DO,KK,EPPS+1,NP
  LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
  LSEL,R,LOC,Z,-0.001,HP(KK)*PI/180*RAIO+0.001
  !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL DA VHS ATE TOPO V VERTICAL 2
```

```
LATT,1,,1,,2001,,20+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM
```

```
LESIZE,ALL,,NDVV,,,,,1
LMESH,ALL
WPRO,,,HP(KK)
ALLSEL,ALL
```

```
*ENDDO
```

```
EPLLOT
```

```
!=====
!*** SELECIONAR AS PARTES DAS VIGAS VERTICAIS CENTRAIS DE 1 A NVV *****
!=====
```

```
WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,,-90,
```

```
WPOFF,,-VAO/2, !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
WPOFF,,LPA, !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 1
WPOFF,,LPB, !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 2
```

```
*SET,NVC,NVV+VPAR !NUMERO DE VIGAS VERTICAIS CENTRAIS
```

```
*DO,VC,1,NVC
```

```
*IF,VC,EQ,NVC,THEN
  *IF,VPAR,EQ,0, THEN
    WPOFF,,LPC !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 3
  *ELSE
    WPOFF,,LPC/2 !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 3 DA SIMETRIA
  *ENDIF
```

```

*ELSE
    WPOFF,,LPC    !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 3
*ENDIF

WPRO,,BETA          !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
K,3005+VC,-RAIO,0,0 !CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NO TOPO DA COMPORTA

WPRO,,-ALFA-BETA !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA
K,3000+VC,-RAIO,0,0 !CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NA SOLEIRA

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 3
LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO+0.001
    !SELECIONA DESDE A SOLEIRA ATE A VHI DA V VERTICAL I

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
    *IF,VPAR,EQ,0, THEN
        LATT,1,,1,,3005+VC,,31 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

    *ELSE
        LATT,1,,1,,3005+VC,,41 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

    *ENDIF
*ELSE
    LATT,1,,1,,3005+VC,,31 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

*ENDIF
LESIZE,ALL,, ,NDVV,, , , ,1
LMESH,ALL
ALLSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
LSEL,R,LOC,Z,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO-1,(HP(1))*PI/180*RAIO+1
    !SELECIONA DESDE A VHI ATE TOPO PAINEL 1 DA V VERTICAL I

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
    *IF,VPAR,EQ,0, THEN
        LATT,1,,1,,3000+VC,,31 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

    *ELSE
        LATT,1,,1,,3000+VC,,41 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

    *ENDIF
*ELSE
    LATT,1,,1,,3000+VC,,31 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

*ENDIF
LESIZE,ALL,, ,NDVV,, , , ,1
LMESH,ALL
ALLSEL,ALL

WPRO,,HP(1)
*DO,KK,2,EPPS
    LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
    LSEL,R,LOC,Z,-0.001,HP(KK)*PI/180*RAIO+0.001
        !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL 1 ATE PAINEL DA VHS

    *IF,VC,EQ,NVC,THEN
        *IF,VPAR,EQ,0, THEN
            LATT,1,,1,,3000+VC,,30+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

```

```

*ELSE
  LATT,1,,1,,3000+VC,,40+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

*ENDIF
*ELSE
  LATT,1,,1,,3000+VC,,30+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

*ENDIF
LESIZE,ALL,,NDVV,,,,,1
LMESH,ALL
WPRO,,,HP(KK)
ALLSEL,ALL
*ENDDO

*DO,KK,EPPS+1,NP
  LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
  LSEL,R,LOC,Z,-0.001,HP(KK)*PI/180*RAIO+0.001
  !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL DA VHS ATE TOPO V VERTICAL I

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
  *IF,VPAR,EQ,0, THEN
    LATT,1,,1,,3000+VC,,30+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

  *ELSE
    LATT,1,,1,,3000+VC,,40+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

  *ENDIF
*ELSE
  LATT,1,,1,,3000+VC,,30+KK !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

*ENDIF

LESIZE,ALL,,NDVV,,,,,1
LMESH,ALL
WPRO,,,HP(KK)
ALLSEL,ALL
*ENDDO
WPRO,,,ALFA-BETA !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA
*ENDDO

ALLSEL,ALL
EPLLOT

=====
!*** SECAO DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR *****
=====

*DO,K,1,(NVV+2)
  SECTYPE, 60+K, BEAM, I, VHI, 0
  !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
  KU = NP
  *IF,K,EQ,1, THEN
    HAlma = HV1(KU)
  *ELSEIF,K,EQ,2
    HAlma = HV2(KU)
  *ELSE
    HAlma = HV3(KU)

```

```

*ENDIF

SECDATA,LUVI(K),AVHI,HALma+EBVHI(K)+EPAR(KU),EPAR(KU),EBVHI(K),EAVHI(K),0,0,0,0
!LParSup, LBInf, HTot, EParSup, EBInf, EAlma,0,0,0,0
*ENDDO

=====
!*** SELECIONAR A PARTE EXTERNA DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR *****
=====

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,, -90,
WPRO,,,BETA                      !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,,,PVHS-PVHI                 !POSICIONA O WP NA VIGA HORIZONTAL INF
WPOFF,, -VAO/2,                  !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO

LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001      !SELECIONA V HORIZONTAL INF
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,LPA+0.001  !SELECIONA PARTE EXTERNA DA V HORIZONTAL INF
LSEL,R,LOC,X,-RAIO-0.001,-RAIO+0.001 !DESSELECIONA LINHA DO CUBO

K,5001,-RAIO,0,0      ! CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NA BORDA DO PARAMENTO
K,5002,0,0,0          ! CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NO MUNHAO

LATT,1,1,1, ,5001,5002,61
LESIZE,ALL, , ,NDVH, , , ,1
LMESH,ALL

ALLSEL,ALL
EPLOT

=====
!*** SELECIONAR A PARTE DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR ENTRE VV1 E VV2 *****
=====

LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001      !SELECIONA V HORIZONTAL INF
WPOFF,,LPA,                    !DESLOCA WP PARA A VV1
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,LPB+0.001  !SELECIONA PARTE DA V HORIZ INF ENTRE VV1 E VV2
LSEL,R,LOC,X,-RAIO-0.001,-RAIO+0.001 !DESSELECIONA LINHAS DO BRACO

LATT,1, ,1, ,5001,5002,62 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM
LESIZE,ALL, , ,NDVH, , , ,1
LMESH,ALL

ALLSEL,ALL
EPLOT

=====
!*** SELECIONAR A PARTE DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR ENTRE VV2 E VVn *****
=====

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,, -90,
WPRO,,,BETA                      !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,,,PVHS-PVHI                 !POSICIONA O WP NA VIGA HORIZONTAL INF
WPOFF,, -VAO/2,                  !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO

```

```

LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001      !SELECIONA V HORIZONTAL INF
WPOFF,,LPA,                    !DESLOCA WP PARA A VV1
WPOFF,,LPB,                    !DESLOCA WP PARA A VV2
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,VAO/2+0.001 !SELECIONA PARTE DA V HORIZ INF ENTRE VV1 E VV2

```

```

WPRO,90,,
LATT,1, ,1, ,5001,5002,63 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

```

```

LESIZE,ALL, , ,NDVH, , , ,1
LMESH,ALL
WPRO,-90,,
ALLSEL,ALL
EPLOT

```

```

=====
!*** SECAO DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR *****
=====

```

```

*DO,K,1,(NVV+2)
  SECTYPE, 65+K, BEAM, I, VHS, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
  KU = NP-EPPS+1
  *IF,K,EQ,1, THEN
    HAlma = HV1(KU)
  *ELSEIF,K,EQ,2
    HAlma = HV2(KU)
  *ELSE
    HAlma = HV3(KU)
  *ENDIF

  SECDATA,LUVS(K),AVHS,HAlma+EBVHS(K)+EPAR(KU),EPAR(KU),EBVHS(K),EAVHS(K),0,0,0,0
  !LParSup, LBInf, HTot, EParSup, EBInf, EAlma,0,0,0,0
*ENDDO

```

```

=====
!*** SELECIONAR A PARTE EXTERNA DAS VIGAS HORIZONTAL SUPERIOR *****
=====

```

```

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,-90,
WPRO,,,BETA !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,,,PVHS !POSICIONA O WP NA VIGA HORIZONTAL SUP
WPOFF,-VAO/2, !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO

```

```

LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001      !SELECIONA V HORIZONTAL SUP
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,LPA+0.001 !SELECIONA PARTE EXTERNA DA V HORIZONTAL SUP
LSEL,R,LOC,X,-RAIO-0.001,-RAIO+0.001 !DESSELECIONA LINHA DO CUBO

```

```

K,6001,-RAIO,0,0 ! CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NA BORDA DO PARAMENTO
K,6002,0,0,0 ! CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA NO MUNHAO

```

```

LATT,1, ,1, ,6001,6002,66 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM
LESIZE,ALL, , ,NDVH, , , ,1
LMESH,ALL

```

```

ALLSEL,ALL

```

EPLLOT

```
!=====
!*** SELECIONAR A PARTE DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR ENTRE VV1 E VV2 *****
!=====
```

```
LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001      !SELECIONA V HORIZONTAL SUP
WPOFF,,LPA,                    !DESLOCA WP PARA A VV1
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,LPB+0.001  !SELECIONA PARTE DA V HORIZ SUP ENTRE VV1 E VV2
LSEL,R,LOC,X,-RAIO-0.001,-RAIO+0.001  !DESSELECIONA LINHAS DO BRACO
```

```
LATT,1,1,1,6001,6002,67  !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM
LESIZE,ALL,, ,NDVH,, , ,1
LMESH,ALL
```

ALLSEL,ALL
EPLLOT

```
!=====
!*** SELECIONAR A PARTE DA VIGA HORIZONTAL SUPERIOR ENTRE VV2 E VVn *****
!=====
```

```
WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0    !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,, -90,
WPRO,,BETA                     !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,, -PVHS                   !POSICIONA O WP NA VIGA HORIZONTAL SUP
WPOFF,, -VAO/2,                !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
```

```
LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001      !SELECIONA V HORIZONTAL SUP
WPOFF,,LPA,                    !DESLOCA WP PARA A VV1
WPOFF,,LPB,                    !DESLOCA WP PARA A VV2
LSEL,R,LOC,Y,-0.001,VAO/2+0.001 !SELECIONA PARTE DA V HORIZ SUP ENTRE VV1 E VV2
```

```
LATT,1,1,1,6001,6002,68  !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM
LESIZE,ALL,, ,NDVH,, , ,1
LMESH,ALL
```

ALLSEL,ALL
EPLLOT

```
!=====
!*** SECAO DO BRACO INFERIOR *****
!=====
```

```
*IF, TIPO, EQ, 1, THEN
  SECTYPE, 70, BEAM, I, VBI, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT      ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
  SECDATA, (FLA), (FLA), (LEB+EBIIP/2+EBISP/2), EBIIP, EBISP, EABI, 0, 0, 0
*ENDIF
```

```
*IF, TIPO, EQ, 2, THEN
  SECTYPE, 70, BEAM, HREC, VBI, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT      ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z

  SECDATA, (FLA), (LEB+EBIIP/2+EBISP/2), EABI, EABI, EBIIP, EBISP, 0, 0, 0
  !LTot, HTot, EVE, EVD, EHI, EHS, 0, 0, 0
*ENDIF
```

```
*IF, TIPO, EQ, 3, THEN
  SECTYPE, 70, BEAM, CTUBE, VBI, 0
  SECOFFSET, CENT
  SECDATA, DINT/2, DEXT/2, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0 !Ri, Ro, N, 0, 0, 0, 0, 0, 0
*ENDIF
```

```
!=====
!*** SELECIONAR O BRACO INFERIOR *****
!=====
```

```
WPCSYS, -1, 0
CSYS, 4
WPOFF, RAO * COS(ALFA), HMUN, 0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO, -, 90,
WPRO, -, BETA !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO, -, PVHS - PVHI !POSICIONA O WP NA VIGA HORIZONTAL INF
WPOFF, -, VAO/2, !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
```

```
LSEL, S, LOC, Z, -0.001, 0.001 !SELECIONA V HORIZONTAL INF E BRACO
LSEL, U, LOC, X, -RAIO - 0.001, -RAIO + 0.001 !DESSELECIONA LINHAS DA V HORIZONTAL
LSEL, U, LOC, X, -0.001, +0.001 !DESSELECIONA LINHAS DO CUBO
```

```
K, 6001, 0, 0, 0 ! CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA
LATT, 1, 1, 1, 6001, 70 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM
```

```
LESIZE, ALL, , , NDBR, , , , 1
LMESH, ALL
```

```
ALLSEL, ALL
EPLOT
```

```
!=====
!*** SECAO DO BRACO SUPERIOR *****
!=====
```

```
*IF, TIPO, EQ, 1, THEN
  SECTYPE, 71, BEAM, I, VBS, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z
  SECDATA, (FLA), (FLA), (LEB + EBIP/2 + EBISP/2), EBIP, EBISP, EABI, 0, 0, 0
*ENDIF
```

```
*IF, TIPO, EQ, 2, THEN
  SECTYPE, 71, BEAM, HREC, VBS, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
  SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z

  SECDATA, (FLA), (LEB + EBSIP/2 + EBSSP/2), EABS, EABS, EBSIP, EBSSP, 0, 0, 0
  !LTot, HTot, EVE, EVD, EHI, EHS, 0, 0, 0
*ENDIF
```

```
*IF, TIPO, EQ, 3, THEN
  SECTYPE, 71, BEAM, CTUBE, VBS, 0
  SECOFFSET, CENT
  SECDATA, DINT/2, DEXT/2, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0 !Ri, Ro, N, 0, 0, 0, 0, 0, 0
*ENDIF
```

```
!=====
!*** SELECIONAR O BRACO SUPERIOR *****
!=====
```

```

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,,-90,
WPRO,,,BETA                      !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,,,PVHS                      !POSICIONA O WP NA VIGA HORIZONTAL SUP
WPOFF,,-VAO/2,                  !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO

```

```

LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001      !SELECIONA V HORIZONTAL SUP E BRACO
LSEL,U,LOC,X,-RAIO-0.001,-RAIO+0.001  !DESSELECIONA LINHAS DA V HORIZONTAL
LSEL,U,LOC,X,-0.001,+0.001      !DESSELECIONA LINHAS DO CUBO

```

```

LATT,1, ,1, ,6001, ,71  !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

```

```

LESIZE,ALL, , ,NDBR, , , ,1
LMESH,ALL

```

```

ALLSEL,ALL
EPLOT

```

```

!=====
!*** SECAO DA TRAVA DO BRACO *****
!=====

```

```

SECTYPE, 72, BEAM, HREC, VBT, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
SECOFFSET, CENT      ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z

```

```

SECDATA,(FLA),(LEB+ETBB),ETBB,ETBB,ETBB,ETBB,0,0,0,0
      !LTot, HTot, EVE, EVD, EHI, EHS,0,0,0,0

```

```

!=====
!*** SELECIONAR A TRAVA DO BRACO *****
!=====

```

```

WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSIÇÃO DO MUNHÃO
WPRO,,-90,
WPRO,,,BETA                      !POSICIONA O WP NO TOPO DO PARAMENTO
WPRO,,,-(PVHS+PVHI/2)          !POSICIONA O WP NA LINHA DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR
WPOFF,,-DEM/2,
*SET,ANGT,ATAN((RAIO-HEB)/(DEM/2-(VAO/2-LPA-LPB)))
WPRO,-(90-ANGT),,

```

```

LSEL,S,LOC,Z,-DCUB/3,DCUB/3
LSEL,R,LOC,X,-(POSIT+HEB+COMPT),-COMPT

```

```

K,6002,0,0,0  ! CRIA KEYPOINT DE REFERENCIA
LATT,1, ,1, ,6002, ,72  !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

```

```

LESIZE,ALL, , ,NDTR, , , ,1
LMESH,ALL

```

```

ALLSEL,ALL
EPLOT

```

```

!=====
!*** SECAO DO CUBO *****
!=====

```

SECTYPE, 80, BEAM, CTUBE, VCU, 0 !SECTYPE, SECID, Type, Subtype, Name, REFINEKEY
 SECOFFSET, CENT ! Location, OFFSET1, OFFSET2, CG-Y, CG-Z, SH-Y, SH-Z

SECDATA,DINT/2,DCUB/2,8,0,0,0,0,0,0
 !Ri, Ro, N,0,0,0,0,0,0,0

!=====

WPCSYS,-1,0
 WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
 WPOFF,,,DEM/2 !POSICIONA O WP NO CENTRO DO CUBO
 WPOFF,,,CCU/2 !POSICIONA O WP NA FACE DO CUBO
 WPRO,,90,

LSEL,S,LOC,Y,0,CCU
 LSEL,R,LOC,Z,-0.01,0.01

K,7001,CCU,0,0 ! CRIA PRIMEIRO KEYPOINT DE REFERENCIA
 K,7002,CCU,DCUB/2,0 ! CRIA SEGUNDO KEYPOINT DE REFERENCIA
 LATT,1,1,,7001,7002,80 !LATT, MAT, REAL, TYPE, --, KB, KE, SECNUM

LESIZE,ALL,,NDCU,,1
 LMESH,ALL

ALLSEL,ALL
 EPLOT

!=====

!*** APRESENTAÇÃO DE TELA *****

!=====

!=====

!~~~~~

WPCSYS,-1,0
 CSYS,4
 WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
 wpstyle,0.05,1,-1,,0.003,0,2,,5
 WPRO,,90,
 WPRO,,,ALFA !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA

```
LSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,X,-(RAIO+0.001),-(RAIO-0.001)
NSLL,S,1
NROTAT,ALL
D,ALL, , , , ,UZ, , , ,
```

```
ALLSEL,ALL
EPLOT
```

```
!~~~~~
!*** RESTRICAO NA LATERAL DO PARAMENTO ~~~~~
!~~~~~
```

```
WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPOFF,,,VAO/2 !POSICIONA O WP NO CENTRO DO PARAMENTO
wpstyle,0.05,1,-1,1,0.003,1,2,,5
LSEL,S,LOC,X,(RAIO+0.001),(RAIO-0.001)
LSEL,R,LOC,Z,-0.001,0.001
```

```
NSLL,S,1 !SELECIONA OS NOS ASSOCIADOS AS LINHAS SELECIONADAS
D,ALL, , , , ,UZ, , , ,
```

```
!DL,ALL, ,UZ,
```

```
ALLSEL,ALL
EPLOT
```

```
!~~~~~
!*** RESTRICAO PARA SIMULAR SIMETRIA ~~~~~
!~~~~~
```

```
WPCSYS,-1,0
CSYS,4
NSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001
D,ALL, , , , ,UZ,ROTX,ROTY, , ,
```

```
ALLSEL,ALL
EPLOT
```

```
!~~~~~
!*** RESTRICAO PARA O MUNHAO ~~~~~
!~~~~~
```

```
WPCSYS,-1,0
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPOFF,,,DEM/2 !POSICIONA O WP NO CENTRO DO CUBO
WPOFF,,,CCU/2 !POSICIONA O WP NA FACE INTERNA DO CUBO
WPRO,,90,
```

```
NSEL,S,LOC,X,-0.001,0.001
NSEL,R,LOC,Y,-0.001,0.001
```

```
D,ALL, , , , ,ALL, , , ,
```

```
ALLSEL,ALL
```

```

WPOFF,,CCU,          !POSICIONA O WP NA FACE EXTERNA DO CUBO

NSEL,S,LOC,X,-0.001,0.001
NSEL,R,LOC,Y,-0.001,0.001

D,ALL, , , , ,ALL, , , ,

ALLSEL,ALL
EPLOT

!=====
!*** FIM DO PROGRAMA DE RESTRICOES *****
!=====

!=====
!*** ACUMULAR CARGAS E PRESSÕES APLICADAS *****
!=====

SFCUM,PRES,ADD,1,1,  ! ADICIONA PRESSOES EM UM MESMO ELEMENTO
! DOFSEL,S, ,FX,FY,FZ,MX,MY,MZ ! SELECIONA OS TIPOS DE CARGA ADICIONADAS
FCUM,ADD,1,          ! ADICIONA CARREGAMENTOS NUM MESMO ELEMENTO

!=====
!*** APLICA PRESSAO NA VIGA VERTICAL 1 *****
!=====

!~~~~~
!*** SELECIONAR AS PARTES DA VIGA VERTICAL 1 *****
!~~~~~

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,,-90,
WPRO,,-ALFA                      !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA

WPOFF,,-VAO/2,                  !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
WPOFF,,-LPA,                    !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 1

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO+0.001
                        !SELECIONA DESDE A SOLEIRA ATÉ A VHI DA V VERTICAL 1

ESLL,S          ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV1(NP+1),-CAV1(12), , , ,  ! APLICA PRESSÃO MÉDIA

ALLSEL,ALL

/PNUM,SECT,1
/NUMBER,1
/REPLIT

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL,R,LOC,Z,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO-0.001,(HP(1))*PI/180*RAIO+0.001
                        !SELECIONA DESDE A VHI ATÉ TOPO PAINEL 1 DA V VERTICAL 1

ESLL,S          ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV1(NP),-CAV1(12), , , ,  ! APLICA PRESSÃO MÉDIA

```

```

ALLSEL,ALL

*SET, SOMA, HP(1)
WPRO,,,HP(1)

*DO, KK, 2, EPPS-1
  LSEL, S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
  LSEL, R, LOC, Z, -0.001, (HP(KK))*PI/180*RAIO+0.001
  !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL 1 ATÉ PAINEL ANTERIOR A VHS

  ESLL, S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
  SFBEAM, ALL, 1, PRES, -CAV1(NP+2-KK), -CAV1(NP+1-KK), , , , ! APLICA PRESSÃO

  ALLSEL, ALL
  SOMA = SOMA + HP(KK)
  WPRO,,,HP(KK)
*ENDDO

LSEL, S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL, R, LOC, Z, -0.001, (ALFA+BETA-PVHS-SOMA)*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA PARTE INFERIOR DO PAINEL DA VHS

ESLL, S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
SFBEAM, ALL, 1, PRES, -CAV1(NP+2-EPPS), -CAV1(11), , , , ! APLICA PRESSÃO

ALLSEL, ALL

LSEL, S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
LSEL, R, LOC, Z, (ALFA+BETA-PVHS-SOMA)*PI/180*RAIO-0.001, (HP(EPPS))*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA PARTE SUPERIOR DO PAINEL DA VHS

ESLL, S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
SFBEAM, ALL, 1, PRES, -CAV1(NP+1-EPPS), -CAV1(11), , , , ! APLICA PRESSÃO

ALLSEL, ALL

SOMA = SOMA + HP(EPPS)
WPRO,,,HP(EPPS)

*DO, KK, EPPS+1, NP
  LSEL, S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
  LSEL, R, LOC, Z, -0.001, (HP(KK))*PI/180*RAIO+0.001
  !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL DA VHS ATE TOPO V VERTICAL 1

  ESLL, S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA

  *IF, KK, EQ, NP, THEN
    SFBEAM, ALL, 1, PRES, -CAV1(NP+1-KK), -CAV1(NP+2-KK), , , , ! APLICA PRESSÃO
  *ELSE
    SFBEAM, ALL, 1, PRES, -CAV1(NP+2-KK), -CAV1(NP+1-KK), , , , ! APLICA PRESSÃO
  *ENDIF
  ALLSEL, ALL
  SOMA = SOMA + HP(KK)
  WPRO,,,HP(KK)
*ENDDO

EPLOT

```

!~~~~~

!*** SELECIONAR AS PARTES DA VIGA VERTICAL 2 *****
 !~~~~~

WPCSYS,-1,0
 CSYS,4
 WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0 !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
 WPRO,,,-90,
 WPRO,,,ALFA !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA
 WPOFF,,VAO/2, !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
 WPOFF,,LPA, !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 1
 WPOFF,,LPB, !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 2

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
 LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO+0.001
 !SELECIONA DESDE A SOLEIRA ATÉ A VHI DA V VERTICAL 2

ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
 SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV2(NP+1),-CAV2(12), , , , ! APLICA PRESSÃO MÉDIA

ALLSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
 LSEL,R,LOC,Z,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO-0.001,(HP(1))*PI/180*RAIO+0.001
 !SELECIONA DESDE A VHI ATÉ TOPO PAINEL 1 DA V VERTICAL 2

ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
 SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV2(NP),-CAV2(12), , , , ! APLICA PRESSÃO MÉDIA

ALLSEL,ALL

*SET, SOMA, HP(1)
 WPRO,,,HP(1)

*DO,KK,2,EPPS-1
 LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
 LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(HP(KK))*PI/180*RAIO+0.001
 !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL 1 ATÉ PAINEL ANTERIOR A VHS

ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
 SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV2(NP+2-KK),-CAV2(NP+1-KK), , , , ! APLICA PRESSÃO

ALLSEL,ALL
 SOMA = SOMA + HP(KK)
 WPRO,,,HP(KK)
 *ENDDO

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
 LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(ALFA+BETA-PVHS-SOMA)*PI/180*RAIO+0.001
 !SELECIONA PARTE INFERIOR DO PAINEL DA VHS

ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
 SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV2(NP+2-EPPS),-CAV2(11), , , , ! APLICA PRESSÃO

ALLSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL 1
 LSEL,R,LOC,Z,(ALFA+BETA-PVHS-SOMA)*PI/180*RAIO-0.001,(HP(EPPS))*PI/180*RAIO+0.001
 !SELECIONA PARTE SUPERIOR DO PAINEL DA VHS

```
ESLL,S      ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV2(NP+1-EPPS),-CAV2(11),, , , , ! APLICA PRESSÃO
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
SOMA = SOMA + HP(EPPS)
WPRO,,,HP(EPPS)
```

```
*DO, KK, EPPS+1, NP
  LSEL,S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL 2
  LSEL,R, LOC, Z, -0.001, (HP(KK))*PI/180*RAIO+0.001
                                !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL DA VHS ATE TOPO V VERTICAL 2
```

```
ESLL,S      ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
*IF, KK, EQ, NP, THEN
  SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV2(NP+1-KK),-CAV2(NP+2-KK),, , , , ! APLICA PRESSÃO
*ELSE
  SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV2(NP+2-KK),-CAV2(NP+1-KK),, , , , ! APLICA PRESSÃO
*ENDIF
ALLSEL,ALL
SOMA = SOMA + HP(KK)
WPRO,,,HP(KK)
*ENDDO
```

```
EPLOT
```

```
!~~~~~
!*** SELECIONAR AS PARTES DAS VIGAS VERTICAIS CENTRAIS DE 1 A NVV *****
!~~~~~
```

```
WPCSYS,-1,0
CSYS,4
WPOFF,RAIO*COS(ALFA),HMUN,0      !DESLOCA WP PARA A POSICAO DO MUNHAO
WPRO,,-90,
WPRO,,,ALFA                      !POSICIONA O WP NA DIRECAO MUNHAO SOLEIRA

WPOFF,,-VAO/2,                  !DESLOCA WP PARA A BORDA DO PARAMENTO
WPOFF,,LPA,                      !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 1
WPOFF,,LPB,                      !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 2

*SET,NVC,NVV+VPAR              !NUMERO DE VIGAS VERTICAIS CENTRAIS

*DO, VC, 1, NVC

  *IF, VC, EQ, NVC, THEN
    *IF, VPAR, EQ, 0, THEN
      WPOFF,,LPC                !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 3
    *ELSE
      WPOFF,,LPC/2              !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 3 DA SIMETRIA
    *ENDIF
  *ELSE
    WPOFF,,LPC                  !DESLOCA WP PARA A V VERTICAL 3
  *ENDIF

  LSEL,S, LOC, Y, -0.001, 0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
  LSEL,R, LOC, Z, -0.001, (ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO+0.001
                                !SELECIONA DESDE A SOLEIRA ATÉ A VHI DA V VERTICAL I
  ESLL,S      ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
```

```

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
  *IF,VPAR,EQ,0, THEN
    SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1),-CAV3(12),, , , , ! APLICA PRESSÃO

  *ELSE
    SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1)/2,-CAV3(12)/2, , , , ! APLICA PRESSÃO

  *ENDIF
*ELSE
  SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1),-CAV3(12),, , , , ! APLICA PRESSÃO

*ENDIF
ALLSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
LSEL,R,LOC,Z,(ALFA+BETA-PVHS-PVHI)*PI/180*RAIO-0.001,(HP(1))*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA DESDE A VHI ATÉ TOPO PAINEL 1 DA V VERTICAL I

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
  *IF,VPAR,EQ,0, THEN
    ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
    SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP),-CAV3(12),, , , , ! APLICA PRESSÃO

    ALLSEL,ALL
  *ELSE
    ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
    SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP)/2,-CAV3(12)/2, , , , ! APLICA PRESSÃO

    ALLSEL,ALL
  *ENDIF
*ELSE
  ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA
  SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP),-CAV3(12),, , , , ! APLICA PRESSÃO

  ALLSEL,ALL
*ENDIF

*SET, SOMA, HP(1)
WPRO,,HP(1)

*DO, KK, 2, EPPS-1
  LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
  LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(HP(KK))*PI/180*RAIO+0.001
  !SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL 1 ATÉ PAINEL ANTERIOR A VHS
  ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA

  *IF,VC,EQ,NVC,THEN
    *IF,VPAR,EQ,0, THEN
      SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-KK),-CAV3(NP+1-KK),, , , , ! APLICA PRESSÃO

    *ELSE
      SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-KK)/2,-CAV3(NP+1-KK)/2, , , , ! APLICA PRESSÃO

    *ENDIF
  *ELSE
    SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-KK),-CAV3(NP+1-KK),, , , , ! APLICA PRESSÃO

  *ENDIF

```

```

ALLSEL,ALL
SOMA = SOMA + HP(KK)
WPRO,,,HP(KK)
*ENDDO

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(ALFA+BETA-PVHS-SOMA)*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA PARTE INFERIOR DO PAINEL DA VHS

ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
*IF,VPAR,EQ,0, THEN
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-EPPS),-CAV3(11),,,, ! APLICA PRESSÃO

*ELSE
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-EPPS)/2,-CAV3(11)/2,,,,, ! APLICA PRESSÃO

*ENDIF
*ELSE
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-EPPS),-CAV3(11),,,, ! APLICA PRESSÃO

*ENDIF
ALLSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
LSEL,R,LOC,Z,(ALFA+BETA-PVHS-SOMA)*PI/180*RAIO-0.001,(HP(EPPS))*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA PARTE SUPERIOR DO PAINEL DA VHS

ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA]

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
*IF,VPAR,EQ,0, THEN
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1-EPPS),-CAV3(11),,,, ! APLICA PRESSÃO

*ELSE
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1-EPPS)/2,-CAV3(11)/2,,,,, ! APLICA PRESSÃO

*ENDIF
*ELSE
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1-EPPS),-CAV3(11),,,, ! APLICA PRESSÃO

*ENDIF
ALLSEL,ALL

SOMA = SOMA + HP(EPPS)
WPRO,,,HP(EPPS)

*DO, KK, EPPS+1, NP
LSEL,S,LOC,Y,-0.001,0.001 !SELECIONA V VERTICAL I
LSEL,R,LOC,Z,-0.001,(HP(KK))*PI/180*RAIO+0.001
!SELECIONA DESDE O TOPO PAINEL DA VHS ATE TOPO V VERTICAL I
ESLL,S ! SELECIONA ELEMENTOS ATACHADOS À LINHA

*IF,VC,EQ,NVC,THEN
*IF,VPAR,EQ,0, THEN
*IF, KK, EQ, NP, THEN
SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1-KK),-CAV3(NP+2-KK),,,, ! APLICA PRESSÃO
*ELSE

```

```

        SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-KK),-CAV3(NP+1-KK),,,, ! APLICA PRESSÃO
    *ENDIF
    *ELSE
    *IF,KK, EQ, NP, THEN
        SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1-KK)/2,-CAV3(NP+2-KK)/2,,,, ! APLICA PRESSÃO
    *ELSE
        SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-KK)/2,-CAV3(NP+1-KK)/2,,,, ! APLICA PRESSÃO
    *ENDIF

    *ENDIF
    *ELSE
    *IF,KK, EQ, NP, THEN
        SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+1-KK),-CAV3(NP+2-KK),,,, ! APLICA PRESSÃO
    *ELSE
        SFBEAM,ALL,1,PRES,-CAV3(NP+2-KK),-CAV3(NP+1-KK),,,, ! APLICA PRESSÃO
    *ENDIF

    *ENDIF
    ALLSEL,ALL
    SOMA = SOMA + HP(KK)
    WPRO,,,HP(KK)
    *ENDDO
*ENDDO

ALLSEL,ALL
EPLOT

WPCSYS,-1,0
CSYS,4

!=====
!*** FIM DO PROGRAMA DE APLICACAO DE CARGAS *****
!=====

!=====
!*** SOLUTION AND POS-PROCESSING *****
!=====

!=====
!*** SELEÇÃO DA EQUAÇÃO DE SOLUÇÃO *****
!=====

/SOL                ! ENTRA NO SOLVER
EQSLV,PCG,1E-7      ! ESCOLHE O MODO DE CÁLCULO
SOLVE              ! INICIA A SOLUÇÃO DO MODELO

!=====
!*** PLOTA TENSÕES DE VON MISES *****
!=====

/POST1              ! ENTRA NO PÓS-PROCESSADOR
/EXPAND,2,RECT,HALF,,0.00001 ! EXPANDE SIMETRIA PARA MODELO COMPLETO

PLNSOL,S,EQV,0,1    ! PLOTA TENSÃO DE VON MISES

PLNSOL,S,X,0,1.0    ! PLOTA TENSÃO DE FLEXAO EM OX

PLNSOL, U,SUM, 0,1.0 ! PLOTA DEFORMAÇÃO TOTAL NA ESTRUTURA

```

```

/VIEW, 1,1,1,1
/ANG, 1
/REP,FAST

```

```

=====
!*** PLOTA FORÇAS AXIAIS *****
=====

```

```

ETABLE,FXi,smisc,1      ! CRIA TABELA COM FORÇAS AXIAIS EM X
ETABLE,FXj,smisc,14
PLETAB,FXi,NOAV         ! PLOTA FORÇAS AXIAIS EM X
PRETAB,FXi,NOAV         ! LISTA FORÇAS AXIAIS EM X

```

```

=====
!*** PLOTA MOMENTOS EM MY *****
=====

```

```

ETABLE,MYi,smisc,2      ! CRIA TABELA COM MOMENTOS EM Y
ETABLE,MYj,smisc,15
!PLLS,MYi,MYj           ! TESTAR
PLETAB,MYi,NOAV         ! PLOTA MOMENTOS EM Y
PRETAB,MYi,NOAV         ! LISTA MOMENTOS EM Y

```

```

=====
!*** PLOTA MOMENTOS EM MZ *****
=====

```

```

ETABLE,MZi,smisc,3      ! CRIA TABELA COM MOMENTOS EM Z
ETABLE,MZj,smisc,16
PLETAB,MZi,NOAV         ! PLOTA MOMENTOS EM Z
PRETAB,MZi,NOAV         ! LISTA MOMENTOS EM Z

```

```

=====
!*** PLOTA MOMENTOS EM MX *****
=====

```

```

ETABLE,MXi,smisc,4      ! CRIA TABELA COM MOMENTOS EM X
ETABLE,MXj,smisc,17
PLETAB,MXi,NOAV         ! PLOTA MOMENTOS EM X
PRETAB,MXi,NOAV         ! LISTA MOMENTOS EM X

```

```

=====
!*** PLOTA TENSOES DE FLEXAO EM Z *****
=====

```

```

ETABLE,SZi,smisc,34     ! CRIA TABELA COM TENSOES DE FLEXAO EM Z
ETABLE,SZj,smisc,39
PLETAB,SZi,NOAV         ! PLOTA TENSOES DE FLEXAO EM Z
PRETAB,SZi,NOAV         ! LISTA TENSOES DE FLEXAO EM Z

```

```

=====
!*** ARMAZENA RESULTADOS EM PARÂMETROS *****
=====

```

```

=====
!*** ARMAZENA O VOLUME TOTAL DOS ELEM. NO PARÂMETRO "VOLU" E CALCULA O PESO
!*** DO MODELO ***
=====

```

```

ETABLE,EVOL,VOLU      ! CRIA UM VETOR COM O VOLUME DE CADA ELEMENTO
SSUM                  ! SOMA O VOLUME DE TODOS OS ELEMENTOS
*GET,VTOT,SSUM,,ITEM,EVOL  ! DÁ AO PARAM. VTOT VALOR DO VOLUME TOTAL DOS ELEM.
PESO=2*VTOT*7.85e-6    ! CALCULA O PESO DA COMPORTA EM VIGAS

```

```

!=====
!*** NOTA NA TELA MOSTRANDO O PESO DA COMPORTA *****
!=====

```

```

*MSG,UI,'PESO','TOTAL=','PESO','[kgf]'  ! MOSTRA O PESO TOTAL NA TELA
%C %C %I %C

```

```

!=====
!*** END OF PROGRAM *****
!=====

```