

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2002



1110000510



CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE UMA
COMPORTA PLANA ATRAVÉS DE
PROGRAMA PARAMETRIZADO EM
SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

JOSÉ PAULO GRANDO

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

Guaratinguetá
2002

510

510



Data: 24/2/03
Valor: 20,00
C/D/T: D

Grando, José Paulo
G734o Otimização do projeto de uma Comporta Plana através de programa parametrizado em software de Elementos Finitos./José Paulo Grando. – Guaratinguetá: [s.n.], 2002. 135f.: il.

Bibliografia: f. 84-87
Inclui apêndice
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2002.
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Comporta, otimização do projeto. 2. Elementos finitos I. Título

CDU 519.0(043)



**“OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE UMA COMPORTA PLANA
ATRAVÉS DE PROGRAMA PARAMETRIZADO
EM SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS”**

JOSÉ PAULO GRANDO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE**

“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

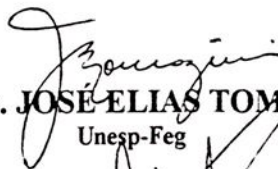


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
Unesp-Feg



Prof. Dr. MÁRCIO TADEU DE ALMEIDA
EFEL

Dezembro de 2002

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



de modo especial, aos meus pais Paulo e Maria, que com os seus anos de vida, foram os grandes incentivadores para que eu continuasse no curso, à minha esposa Rosa e aos meus filhos Marlon, Marcelo e Méliani.

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*, 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* e *Elisa* pela dedicação e alegria no atendimento,

à Alstom Brasil S.A., em particular na pessoa do engenheiro *Antonio Carlos Tonini*, pelos dados utilizados no estudo de casos.

“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. Otimização do projeto de uma comporta plana através de programa parametrizado em software de elementos finitos. Guaratinguetá, 2002. 135p. Dissertação (Mestrado 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 plana, os cálculos analíticos podem levar semanas e, após isto, os dados são passados para o projetista o qual leva aproximadamente quatro semanas para execução dos desenhos. Com a proposta deste trabalho que consiste no desenvolvimento de um programa em Fortran/Ansys a fim de criar um modelo parametrizado da comporta plana, as horas de engenharia, gastas com o projeto, cairão 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 plana, mas, após o domínio desta tecnologia, a mesma poderá ser aplicada a qualquer equipamento com enormes ganhos.

PALAVRAS-CHAVE: Comporta, parametrização, otimização, elementos finitos.



GRANDO, J. P. Optimisation of project of one flat gate though of program parameterisation in software of finite elements. Guaratinguetá, 2002. 135p. Dissertação (Mestrado 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 flat gate, the analytic calculations can take weeks and, after this, the data are passed for the planner, which takes approximately four weeks for drawings execution. With the proposal of this work that consists of the development of a program in Fortran/Ansys in order to create a parametrized model of the plane gate, the hours of engineering, worn-out with the project, they will fall for 1/10 of the time spend previously. Besides, with the model obtained parametrized, 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 flat gate, but, after the domain of this technology, the same can be applied for any equipment with enormous won.

KEYWORDS: gate, parameterisation, optimisation, finite elements.



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO	01
1.1 HISTÓRICO, DESENVOLVIMENTO E IMPORTÂNCIA DAS COMPORTAS	01
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	05
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	05
1.5 CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO DAS COMPORTAS.....	07
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
2.1 DESCRIÇÃO DO “SOFTWARE” UTILIZADO NA DISSERTAÇÃO: ANSYS.....	25
2.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA	27
2.3 OTIMIZAÇÃO DO PROJETO	30
3 METODOLOGIA ANALÍTICA	40
3.1 INTRODUÇÃO	40
3.2 CÁLCULO DE UMA VIGA BI-APOIADA.....	40
3.3 CÁLCULO ANALÍTICO DE UMA VIGA BI-APOIADA.....	42
3.4 CÁLCULO DE UMA COMPORTA PLANA	44
4 METODOLOGIA NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS	47
4.1 INTRODUÇÃO	47
4.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA DE UMA VIGA BI-APOIADA NO ANSYS.....	48
4.3 OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE UMA VIGA.....	59
4.4 MODELAGEM PARAMÉTRICA DE UMA COMPORTA PLANA NO ANSYS....	63
4.5 OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DA COMPORTA	69
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
5.1 RESULTADOS DA VIGA BI-APOIADA	70
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA VIGA BI-APOIADA	74
5.3 RESULTADOS DA COMPORTA PLANA	74
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA COMPORTA PLANA....	78
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79



TABELA - Lista de Materiais com Tensões de Escoamento e Dureza Brinell	82
REFERÊNCIAS	83
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	84
ANEXOS	87
ANEXO A - CÁLCULO ANALÍTICO DE UMA COMPORTA PLANA	87
ANEXO B - PROGRAMA PARAMÉTRICO DA COMPORTA PLANA	112
ANEXO C - PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DA COMPORTA PLANA	133
GLOSSÁRIO	135

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Vista tridimensional de uma comporta paramétrica em MDT	07
FIGURA 1.2 – Comporta Ensecadeira	08
FIGURA 1.3 – Fotografia dos tabuleiros de uma ensecadeira na fábrica	09
FIGURA 1.4 – Comporta Gaveta	10
FIGURA 1.5 – Fotografia de uma comporta gaveta (deslizante) na obra	11
FIGURA 1.6 – Comporta Vagão	12
FIGURA 1.7 – Fotografia de uma comporta vagão em fase de montagem no campo	13
FIGURA 1.8 – Comporta Lagarta	14
FIGURA 1.9 – Comporta Stoney.	15
FIGURA 1.10 – Comporta Segmento.....	16
FIGURA 1.11 – Comporta Setor	17
FIGURA 1.12 – Comporta Tambor.....	18
FIGURA 1.13 – Comporta Basculante.....	19
FIGURA 1.14 – Comporta Rolante	20
FIGURA 1.15 – Comporta Cilíndrica.....	21
FIGURA 1.16 – Comporta Mitra.....	22
FIGURA 1.17 – Comporta Telhado	23
FIGURA 1.18 – Comporta Visor.....	24
FIGURA 2.1 – Construção e análise do modelo paramétrico	29
FIGURA 2.2 – Projetos factíveis e infactíveis	31
FIGURA 2.3 – Diagrama do processo de otimização	32
FIGURA 2.4 – Diagrama do método de aproximação por sub-problema.....	35
FIGURA 2.5 – Diagrama do método de primeira ordem	36
FIGURA 2.6 – Gráfico da variação da Função Objetivo	36
FIGURA 2.7 – Gráfico do mínimo local e global da função objetivo	37
FIGURA 2.8 – Esquema de uma viga bi-engastada, variando um parâmetro.....	38
FIGURA 3.1 – Geometria da seção transversal da viga.....	40
FIGURA 3.2 – Esforços solicitantes internos devidos à flexão da viga.....	41
FIGURA 3.3 – Esforços solicitantes internos devidos à flexão da aba	41

FIGURA 3.4 – Seção transversal da viga	42
FIGURA 3.5– Fluxograma do programa de cálculo analítico da comporta.....	46
FIGURA 4.1 – Elemento do tipo Shell 63	47
FIGURA 4.2 – Modelamento da estrutura (linhas)	48
FIGURA 4.3 – Modelamento da estrutura (áreas).....	49
FIGURA 4.4 – Vinculação e carregamento.....	50
FIGURA 4.5 – Fluxograma do programa de parametrização da viga.....	52
FIGURA 4.6 – Tela de saída do programa de parametrização.....	58
FIGURA 4.7 – Fluxograma do programa de otimização da viga.....	59
FIGURA 4.8 – Tela de saída do programa de otimização.....	62
FIGURA 4.9 – Modelamento da estrutura (linhas)	63
FIGURA 4.10 – Modelamento da estrutura (Constantes Reais)	64
FIGURA 4.11 – Vinculação e carregamento.....	65
FIGURA 4.12 – Fluxograma do programa de parametrização da comporta.....	67
FIGURA 4.13– Tela de saída do programa de parametrização em Ansys.....	68
FIGURA 4.14– Tela de saída do programa de otimização da comporta.....	69
FIGURA 5.1 – Tensão de von Mises do projeto original.....	70
FIGURA 5.2 – Tensão de von Mises do projeto otimizado	71
FIGURA 5.3 – Gráfico do peso da viga x “set number”	71
FIGURA 5.4 – Gráfico de tensão máxima de von Mises x “set number”	72
FIGURA 5.5 – Gráfico das dimensões x “set number”	72
FIGURA 5.6 – Tensão de von Mises do projeto original.....	74
FIGURA 5.7 – Tensão de von Mises do projeto otimizado	75
FIGURA 5.8 – Gráfico do peso da comporta x “set number”.....	76
FIGURA 5.9 – Gráfico de tensão máxima de von Mises x “set number”	76
FIGURA 5.10 – Gráfico dos parâmetros x “set number”.....	77
FIGURA A.1 - Seção transversal da comporta.....	88
FIGURA A.2 – Largura da aba superior da viga.....	93
FIGURA A.3 – Distribuição das vigas	93
FIGURA A.4 – Seção transversal no centro da viga	94
FIGURA A.5 – Seção transversal na extremidade da viga	94

FIGURA A.6 – Pontos de tensão na placa engastada.....	95
FIGURA A.7 – Pontos de tensão na placa livre	95
FIGURA A.8 – Dimensões da seção transversal da comporta.....	97
FIGURA A.9 – Diagrama de carregamento da viga.....	97
FIGURA A.10 – Diagrama de esforço cortante da viga.....	97
FIGURA A.11 – Diagrama de momento fletor da viga.....	97
FIGURA A.12 – Pontos de cálculo da viga.....	97
FIGURA A.13 – Posicionamento das vigas e reforços	98
FIGURA A.14 – Seção do reforço externo no apoio.....	100
FIGURA A.15 – Seção do reforço externo no meio tramo	100
FIGURA A.16 – Seção do reforço interno no apoio	101
FIGURA A.17 – Seção do reforço interno no meio tramo.....	101
FIGURA A.18 – Diagrama de esforço cortante do reforço externo.....	103
FIGURA A.19 – Diagrama de momento fletor do reforço externo.....	103
FIGURA A.20 – Diagrama de esforço cortante do reforço interno	105
FIGURA A.21 – Diagrama de momento fletor do reforço interno	105
FIGURA A.22 – Pontos de cálculo dos reforços.....	106
FIGURA A.23 – Pontos de cálculo de tensões no paramento.....	107
FIGURA A.24 – Sinal das tensões de placa	107
FIGURA A.25 – Seções de cálculo da flecha.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ASTM - American Society for Testing and Materials
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials
- ACI - American Concrete Institute
- AISC - American Institute of Steel Construction
- ASCE - American Society of Civil Engineers
- AWS - American Welding Society
- NBR - Norma Brasileira Registrada
- SV - Variável de Estado (State Variable)
- DV - Variável de Projeto (Design Variable)
- OBJ - Função Objetiva (Objective Function)



LISTA DE SÍMBOLOS

L	comprimento	[cm]
t	espessura	[cm]
ha	altura da alma	[cm]
NA	Nível d'água	[m]
El	Elevação	[cm]
δ	Densidade d'água	[kg/cm ³]
V	Esforço Cortante	[kN]; [kgf]
M	Momento fletor	[kN.m]; [kgf.cm]
σ	tensão de tração, compressão e compressão	[MPa]; [kgf/cm ²]
τ	tensão de cisalhamento	[MPa]; [kgf/cm ²]
p	pressão	[mca]; [MPa]; [kgf/cm ²]
λ	Coefficiente de redução para largura de placa	---
β	Coefficiente para tensão de placa engastada	---
k	Coefficiente para tensão de placa livre	---
Y_{LN}	distância da linha de referência à Linha Neutra	[cm]
I	Momento de Inércia	[cm ⁴]
W	Módulo de resistência	[cm ³]
MS	Momento estático	[cm ³]
E	Módulo de Young do material	[MPa]; [kgf/cm ²]
f	Flecha ou deslocamento	[cm]



CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.

1.1 HISTÓRICO, DESENVOLVIMENTO E IMPORTÂNCIA DAS COMPORTAS.

As comportas hidráulicas originaram-se devido às necessidades de novas técnicas de irrigação, abastecimento d'água e navegação fluvial. Antigamente a água era represada por pequenas barragens e desviada para canais de irrigação. O excedente era escoado por cima da barragem. Em decorrência do desenvolvimento técnico, foram instaladas comportas que podiam ser removidas de sua posição de fechamento para escoar a água excedente, permitindo maior segurança e flexibilidade de operação às obras hidráulicas (ERBISTE, 1987).

Os primeiros canais para escoamento da água de enchentes assim como para transporte de mercadorias foram construídos na China. Originalmente, os chineses superaram o problema do transporte fluvial onde havia corredeiras construindo diques com rampas nas margens do canal. Os barcos eram guinchados manualmente para cima e para baixo dessas corredeiras. Essas operações, entretanto, consumiam muito tempo e energia. Por volta do ano 983 os chineses descobriram que, utilizando duas barreiras colocadas a uma certa distância, os barcos podiam entrar nos lagos criados entre elas e o nível d'água elevado e abaixado suavemente. As barreiras eram formadas por um par de pilares de pedra com sulcos ao longo da altura e fixados em ambos os lados do canal, e tendo nos sulcos troncos de árvore colocados horizontalmente, que retinham a água no nível mais alto. Para erguer os troncos, utilizavam-se cordas. Mais tarde, os troncos passaram a ser amarrados, formando uma barreira única que podia ser levantada ou abaixada como a lâmina de uma guilhotina.

O desenvolvimento das comportas na Holanda seguiu um padrão semelhante ao da China. Ali, no fim do século XIV, as eclusas eram bastante comuns. As comportas, ainda do tipo guilhotina, tinham sido equipadas com contrapesos de chumbo e possuíam acessórios de drenagem que permitiam esvaziar gradualmente a câmara da eclusa. O primeiro projeto de uma eclusa data do ano de 1497. Esse projeto apresenta as principais características de uma eclusa moderna. O alargamento no centro permitia acumular mais embarcações num tempo relativamente curto.



Nas paredes da câmara eram instalados ganchos de ancoragem aos quais as embarcações se ligavam por meio de cordas para evitar seu deslocamento durante o enchimento e o esvaziamento da câmara, operações que, certamente, causavam grande turbulência na superfície da água. A porta de montante da eclusa era constituída por uma comporta mitra como as que são usadas atualmente. 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.

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 atuariam como portas da eclusa e serviriam 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. É notório o fato de que também a comporta segmento a tração foi inventada duas vezes: em 1910 foi concedida nos EUA a L. F. Harza uma patente neste sentido e na Alemanha, as comportas segmento datam de 1894/95, e referem-se à instalação de uma com 12 m de vão e 1,87 m de altura no Werderschen Mühlegraben, Berlim, cujos braços eram submetidos à compressão.

As boas características da comporta segmento são reconhecidas há longo tempo. Em 1914, H. Engels dizia:

As comportas segmento apresentam vantagens sobre qualquer outro tipo de comporta até aproximadamente 12 m de vão.

Por sua vez, H. Kulka, em 1928, era ainda mais otimista:

A introdução dos esforços nos pilares não traz problemas, mesmo para comportas com grandes dimensões. Não há problemas nem na construção dos mancais nem na dos pilares. As comportas segmento podem ser usadas para qualquer dimensão na prática.

Realmente, foram construídas comportas segmento com dimensões notáveis:

- Barthelm, rio Oder (1920): vão 40 m e altura 3 m,
- Ladenburg, rio Neckar (1927): vão 36 m e altura 5,5 m,
- Münster, rio Neckar (1933), vão 23 m e altura 7,4 m,
- Donzère Mondragon, rio Ródano (1948): vão 45 m e altura 9 m;

Mais recentemente são encontrados os seguintes exemplos:

• Haringvliet, delta dos rios Reno, Mosela e Scheld (1967): vão 56,5 m e altura 10,5 m;

- Stör, rio Stör (1975); vão 43 m e altura 13 m;
- Altenwörth, rio Danúbio (1976): vão 24 m e altura 15,5 m;
- Itaipu, rio Paraná (1982): vão 20 m e altura 21,34 m.

As comportas segmento a tração voltaram a ser usadas em 1953, na barragem de Oberperching, no rio Lech, Alemanha. Têm 16 m de vão e 8,25 m de altura, e dispõem de uma comporta basculante no topo, com 2,15 m de altura. Devido aos

resultados altamente confiáveis dessas comportas, 28 outras foram construídas até 1976 na região de Baviera, Alemanha. As comportas duplas originaram-se na Europa, mas são muito usadas no Japão. A literatura já indicava em 1908 a instalação de 10 comportas vagão duplas na barragem de Augst-Wyhlen (Suíça), no Reno, com 17,5 m de vão e 9 m de altura. A comporta vagão dupla moderna, do tipo gancho, foi instalada pela primeira vez na barragem de Reckingen, Suíça, em 1930.

A comporta setor foi inventada nos EUA pelo engenheiro Cooley e sua primeira utilização foi feita em 1907 em Lockport, no Chicago Drainage Canal. Foram instaladas duas comportas para regulação da vazão do canal, uma com 3,66 m de vão e a outra com 14,6 m. Em ambas o raio de curvatura do paramento era de 7,92 m e a altura de represamento de 5,79 m. Na Europa, a primeira aplicação ocorreu em 1911, quando duas comportas foram instaladas na Barragem Weser, próximo a Hemelingen, Alemanha, com 54 m de vão e 4,6 m de altura. De acordo com H. Ackermann, durante a fase de anteprojeto dessa barragem foi também estudada a aplicação de comportas rolante, vagão, segmento e basculante. A escolha do tipo, entretanto, recaiu na comporta setor devido à necessidade de uma comporta submersível. Naquela época, as comportas submersíveis tipo rolante, segmento e vagão já eram conhecidas, porém ainda não haviam sido comprovadas na prática.

Em 1924 foram instaladas no Brasil três comportas tipo setor na usina da Ilha dos Pombos (Light), no rio Paraíba, com 45 m de vão e altura de 7,4 m. Essas comportas detêm até hoje o recorde de maior área de represamento (333 m^2) entre as de seu tipo. (ERBISTE, 1987).

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Inicialmente, passa-se a descrever a bibliografia disponível sobre o assunto:

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.



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

WICKERT, C., SCHMAUßER, G. **Stahlwasserbau**. Berlim: Spring-Verlag 1971.

REVISTA **Water power & dam construction**, Published by Wilmington Publishing Ltd, (mensal).

Como se observa, pelas datas acima, há muito 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 o mesmo há três décadas.

A pouca evolução nessa área, a nível mundial, que tem ocorrido 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).

Portanto, este trabalho tem um aspecto pioneiro e está sendo o ponto fundamental para que a Alstom Brasil tenha se tornado a fábrica “lead center” do grupo, em relação a equipamentos hidromecânicos, que tem matriz na França e subsidiárias em Portugal, Canadá, Inglaterra, China, Índia, Egito e em outros países.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova forma de abordagem para o cálculo de uma comporta, que é uma estrutura metálica não seriada, aplicando o método de elementos finitos de forma parametrizada. Em consequência, se 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).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.

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

O capítulo 1 faz a introdução desta dissertação, define uma comporta e propõe os objetivos referentes à parametrização e otimização de projetos, explica cada um



dos tipos de comportas que, acoplados com suas respectivas figuras, fornecem uma idéia de sua geometria.

O capítulo 2 fornece algumas características do “software” ANSYS, 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 e define otimização, explica os métodos utilizados e fornece uma visão global sobre variáveis de projeto (DV's), variáveis de estado (SV's) e função objetivo (OBJ).

O capítulo 3 realiza o cálculo analítico de uma viga bi-apoiada e de uma comporta 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.

O capítulo 4 introduz a parametrização e a otimização em uma viga metálica bi-apoiada em forma de “I” com carga distribuída. O modelo foi montado da mesma forma que se executa a geometria da comporta plana de forma a servir como uma introdução em forma ainda incipiente de se trabalhar com o software de elementos finitos. Desenvolve, ainda, a parametrização e a otimização de comportas planas com o programa paramétrico.

O capítulo 5 mostra os resultados apresentados pelos programas de parametrização e otimização da viga bi-apoiada e da comporta plana através de figuras, gráficos e tabelas, bem como se os valores dos parâmetros em cada “set” de “looping” do programa resultam em um projeto factível ou infactível.

O capítulo 6 mostra as conclusões ao trabalho ora desenvolvido e propõe sugestões para novos trabalhos tendo 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.



1.5 CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO DAS COMPORTAS.

Para atingir o objetivo proposto, foi escolhido um equipamento de grande porte e de grande utilidade para o país em função da necessidade premente na obtenção de um bem 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.

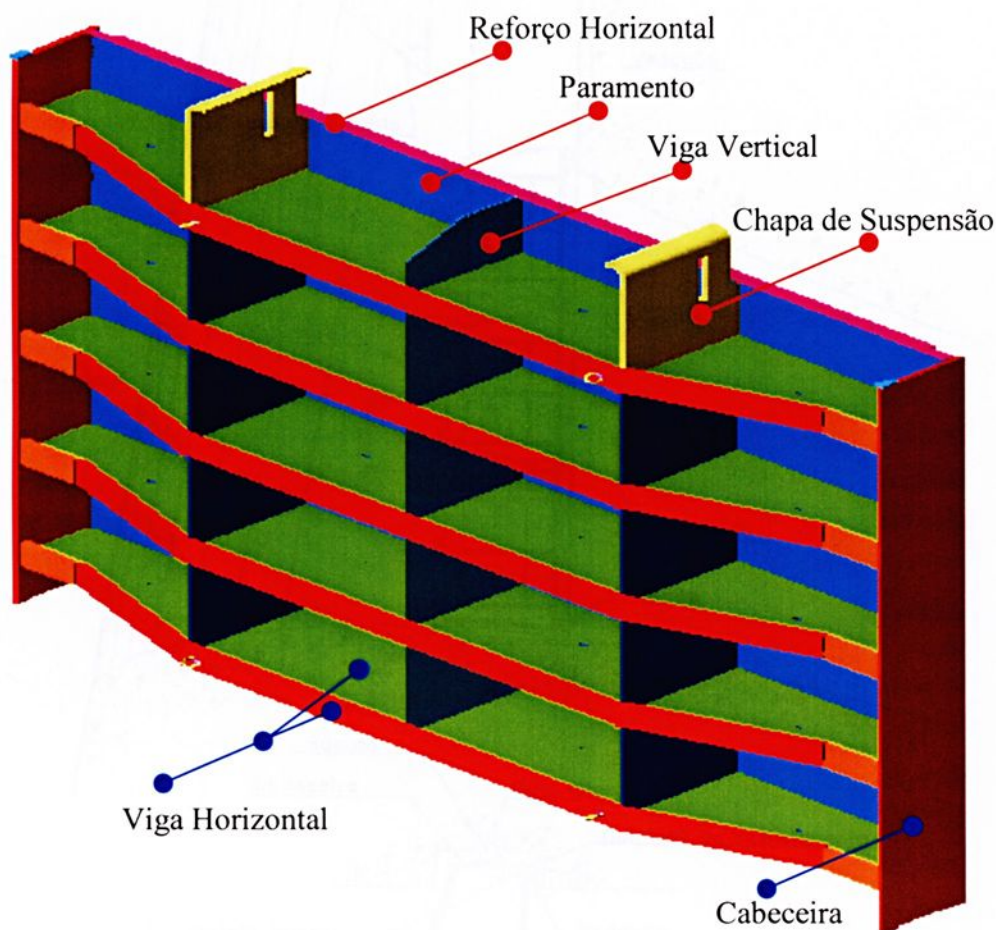


Figura 1.1 – Vista tridimensional de uma comporta paramétrica em MDT.

COMPORTA ENSECADEIRA: Comporta de deslizamento, com paramento geralmente plano e vertical, que pode ser movimentada em suas guias ou peças fixas com pressões hidráulicas equilibradas. Esta comporta também é conhecida pelo nome “stoplog” e pode ser formada por elementos independentes superpostos, sendo neste caso, cada elemento chamado de painel de “stoplog” ou de comporta ensecadeira. Geralmente a comporta ensecadeira é usada para permitir o reparo, a manutenção ou a troca de outros equipamentos (Figuras 1.2 e 1.3).

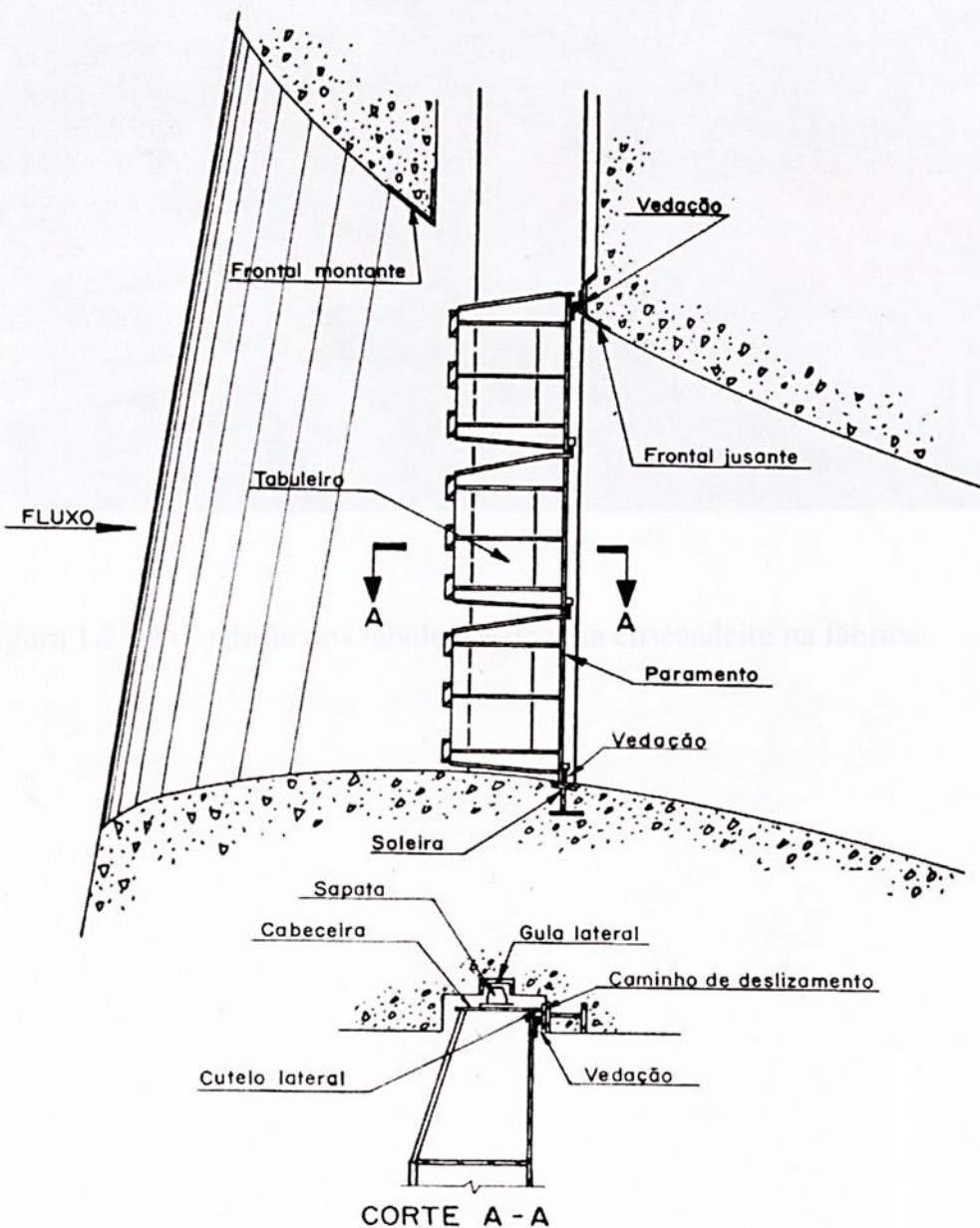


Figura 1.2 – Comporta Ensecadeira.



Figura 1.3 – Fotografia dos tabuleiros de uma ensecadeira na fábrica.

COMPORTA GAVETA: Comporta de deslizamento, com paramento geralmente plano e vertical, que pode ser operada sob fluxo hidráulico, isto é, com pressões hidráulicas desequilibradas (Figuras 1.4 e 1.5).

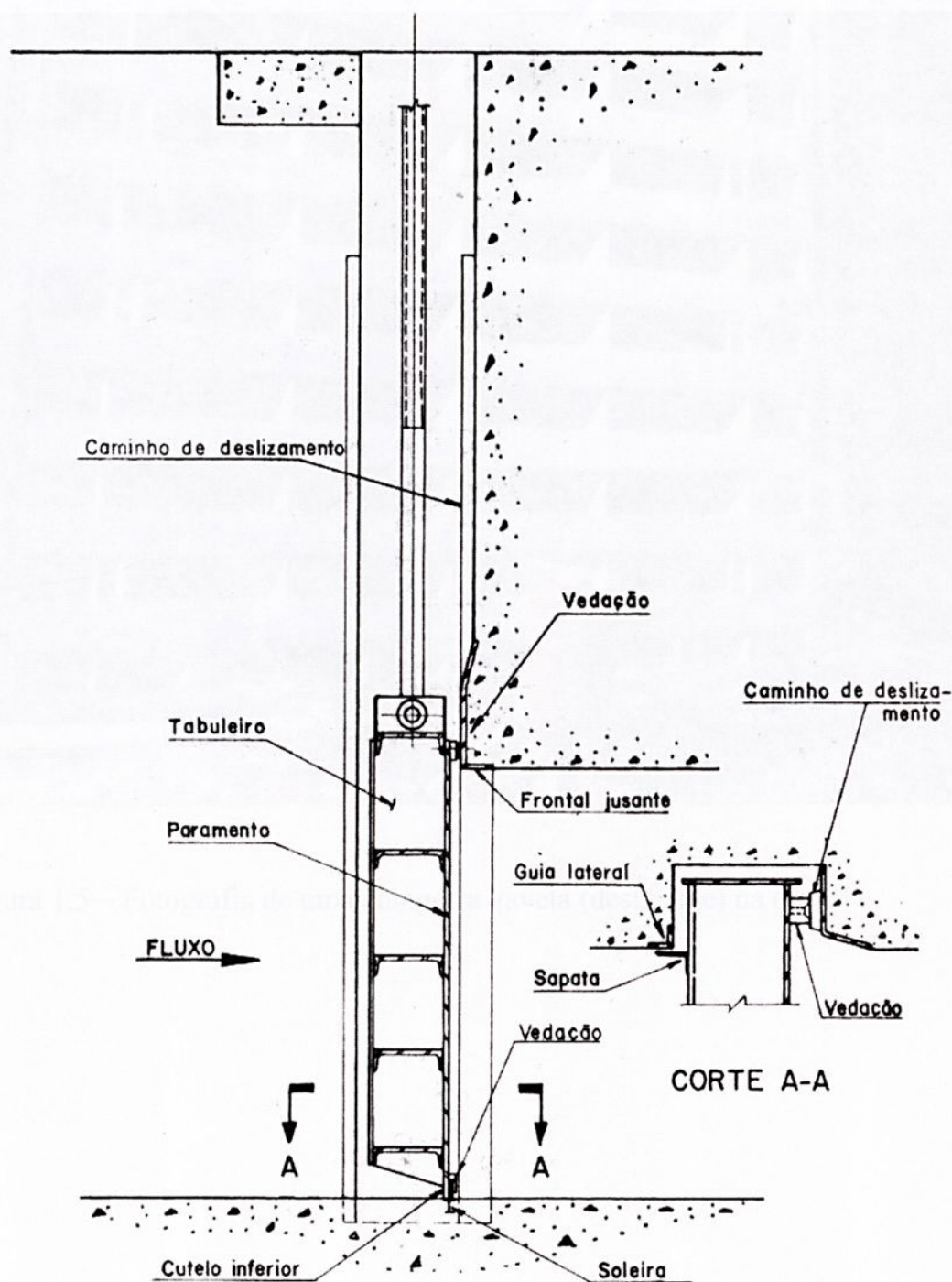


Figura 1.4 – Comporta Gaveta.



Figura 1.5 – Fotografia de uma comporta gaveta (deslizante) na obra.

COMPORTA VAGÃO: Comporta de rolamento, geralmente com paramento plano e que se movimenta em suas guias ou peças fixas sob o fluxo hidráulico, utilizando rodas ou roletes de eixos fixos (Figuras 1.6 e 1.7).

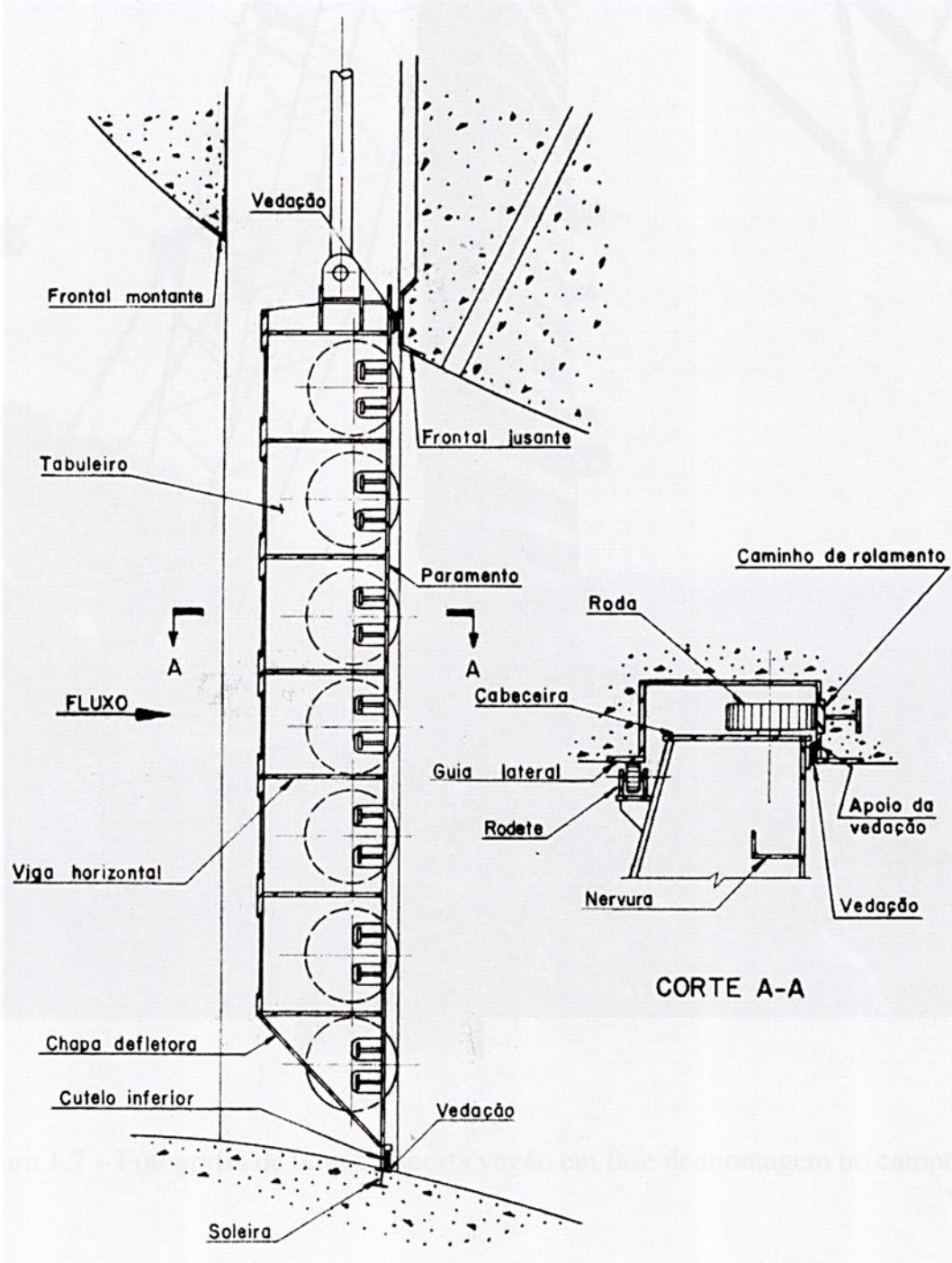


Figura 1.6 – Comporta Vagão.



Figura 1.7 – Fotografia de uma comporta vagão em fase de montagem no campo.

COMPORTA LAGARTA: Comporta de rolamento, geralmente com paramento plano e que se movimenta em suas guias ou peças fixas sob fluxo hidráulico, utilizando cadeias fechadas de rolos (Figura 1.8).

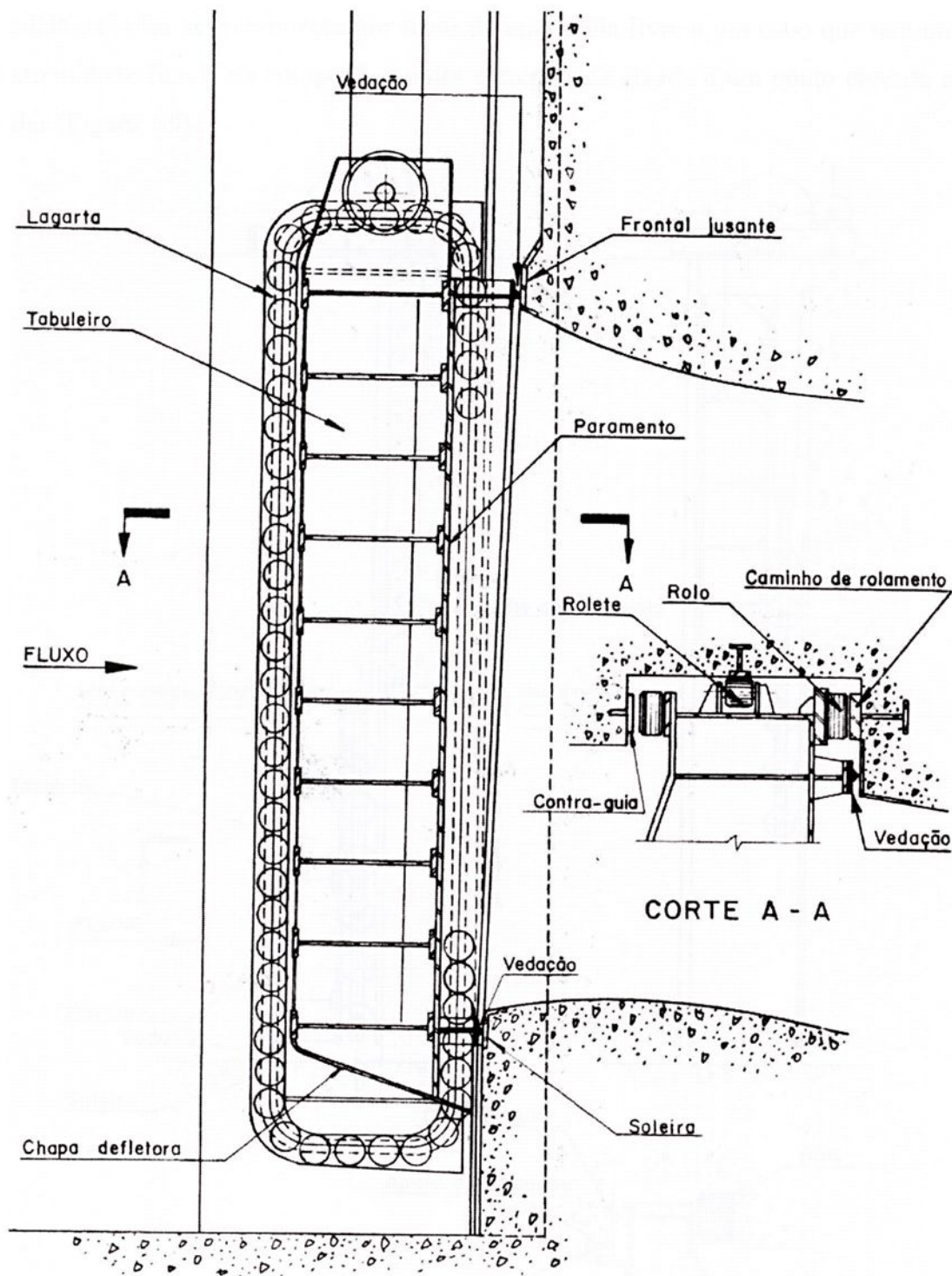


Figura 1.8 – Comporta Lagarta.

COMPORTA "STONEY": Comporta de rolamentos geralmente com paramento vertical plano e que se movimentam em suas guias ou peças fixas sob fluxo hidráulico, utilizando uma cadeia de rolos de eixos horizontais independente do tabuleiro. Esta cadeia de rolos se movimenta por meio de uma polia livre e um cabo que tem uma extremidade fixada na comporta e outra extremidade fixada a um ponto elevado no pilar (Figura 1.9).

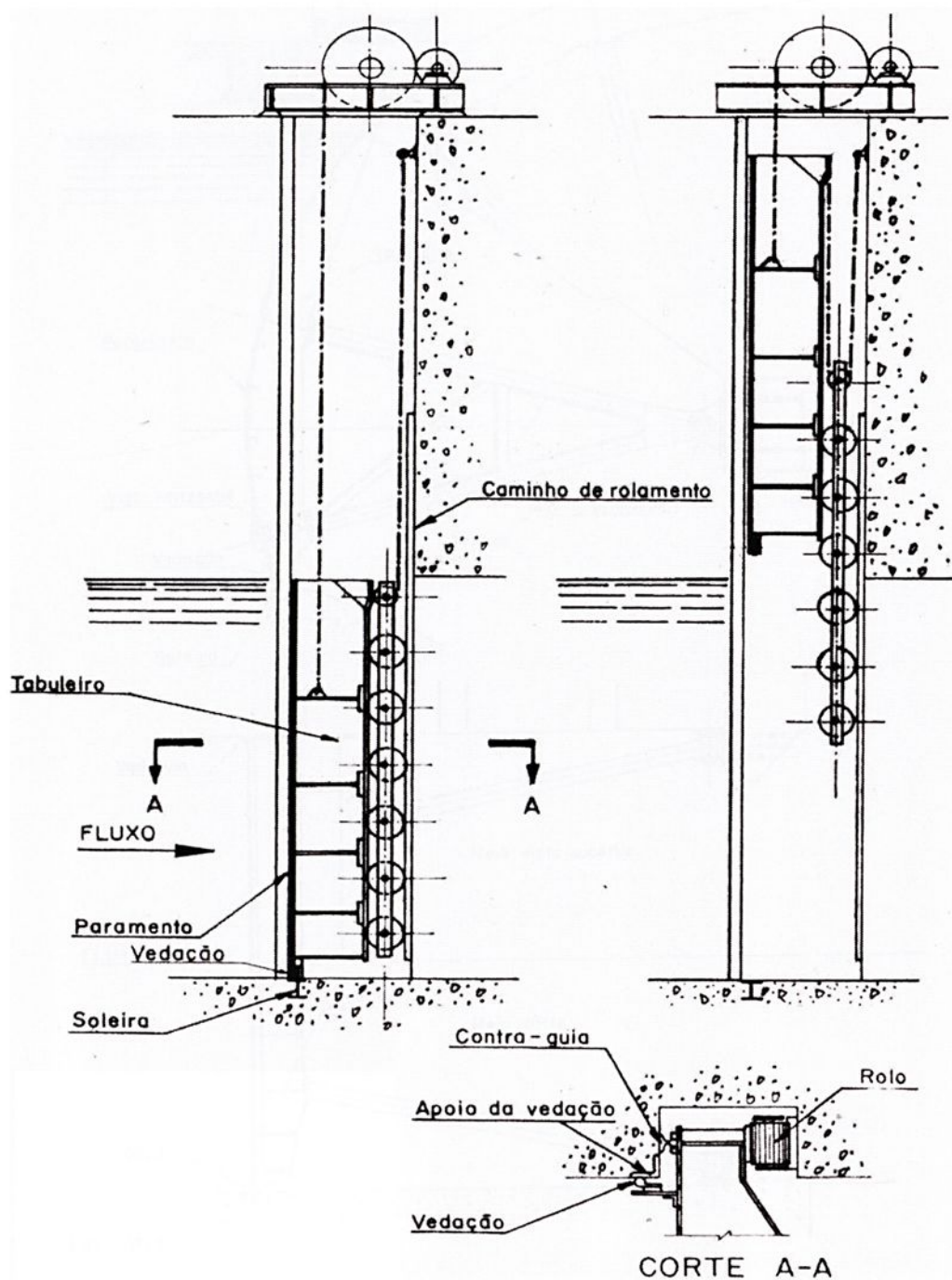


Figura 1.9 – Comporta Stoney.

COMPORTA SEGMENTO: 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 é um segmento circular (Figura 1.10).

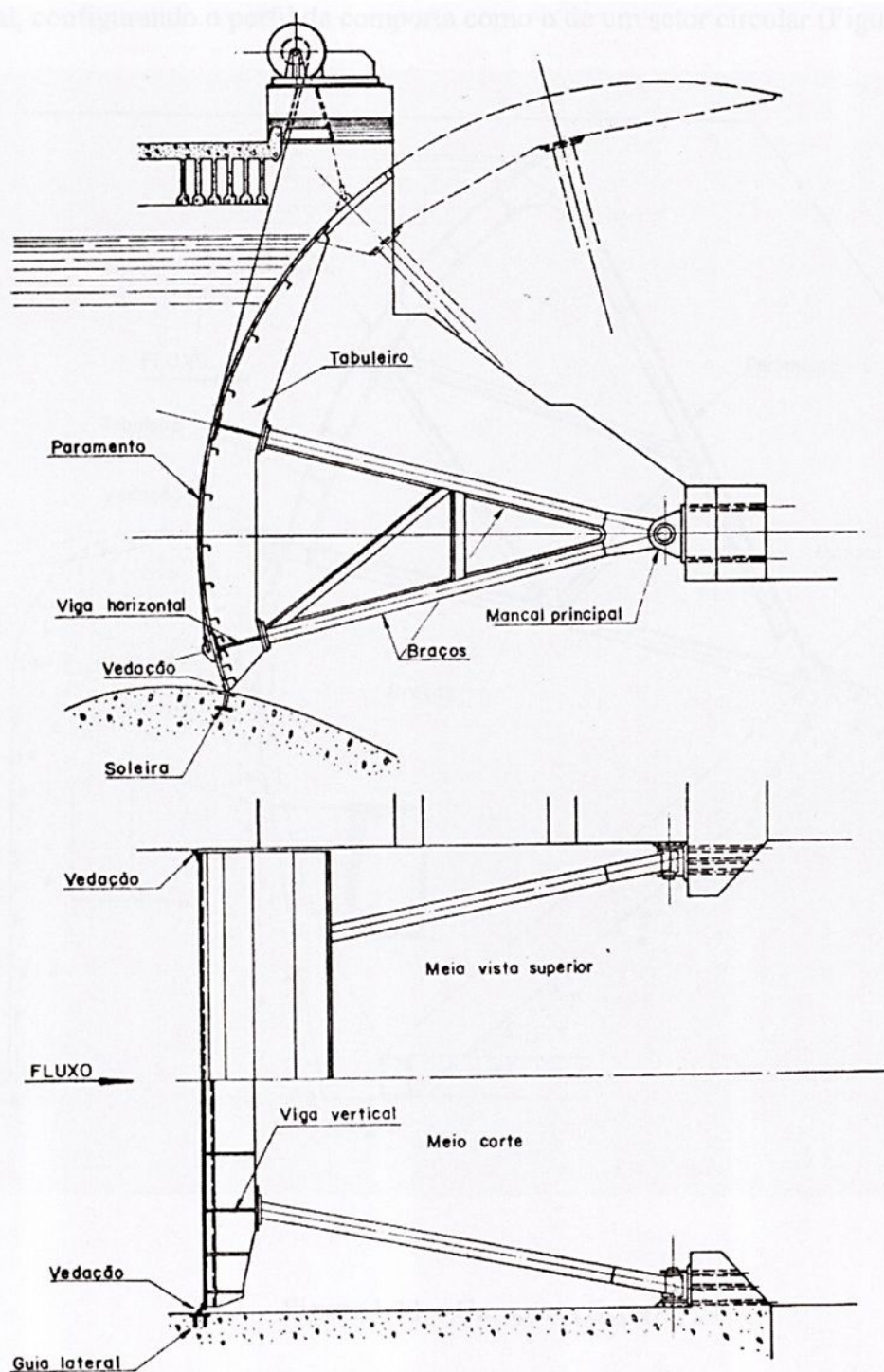


Figura 1.10 – Comporta Segmento.

COMPORTA SETOR: Comporta de rotação com paramento curvo correspondente a um segmento de cilindro com diretriz circular, apresentando uma estrutura radial que transmite a pressão hidráulica por compressão para mancais fixos a jusante. O paramento é continuado na sua parte superior por uma superfície cheia, radial, configurando o perfil da comporta como o de um setor circular (Figura 1.11).

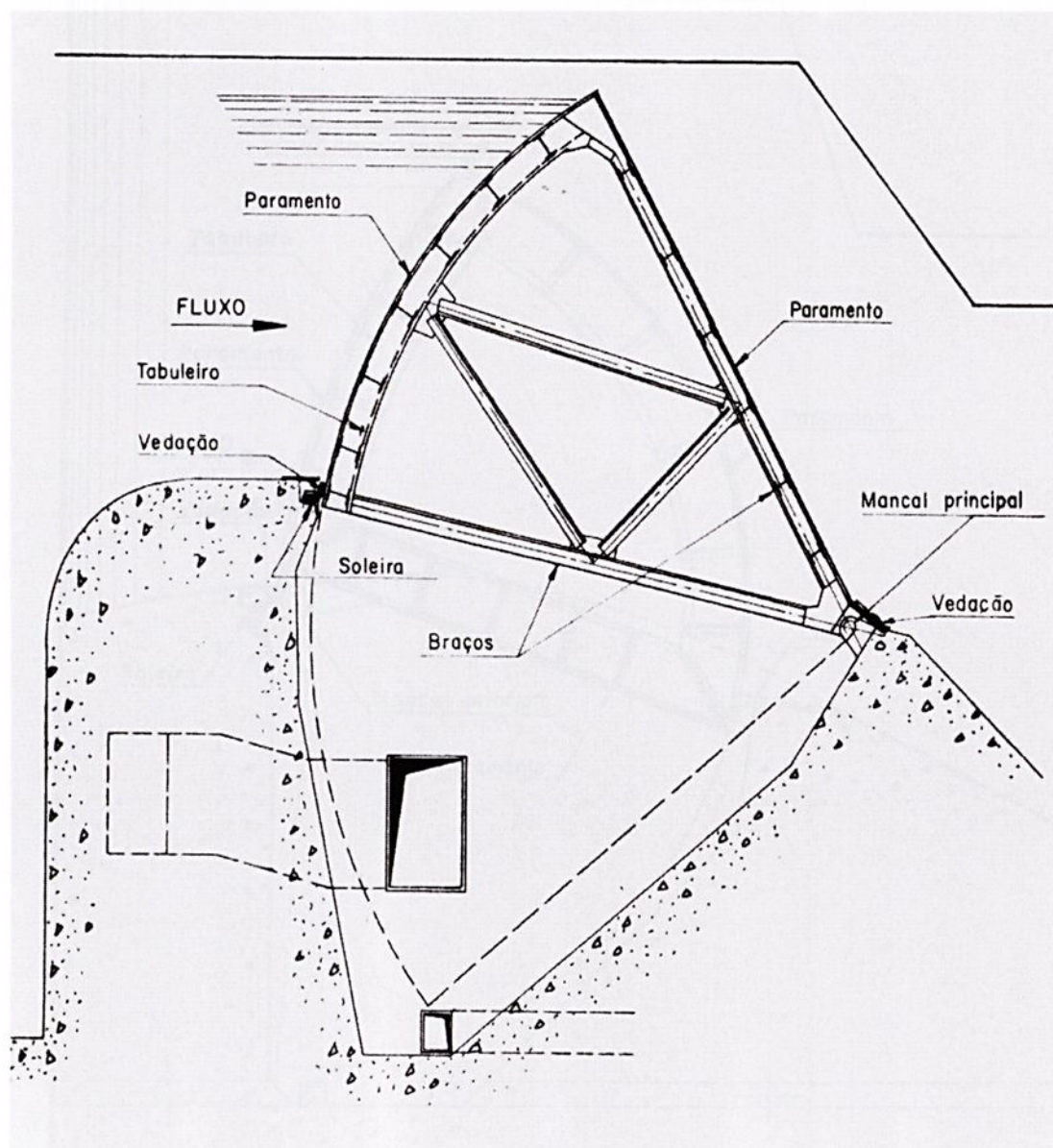


Figura 1.11 – Comporta Setor.

COMPORTA BASCULANTE: Comporta de rotação com paramento plano ou curvo, tendo a estrutura do tabuleiro fixada a mancais suportes de eixo horizontal incorporados ao próprio tabuleiro. A pressão hidráulica é transmitida aos mancais suportes e à estrutura do mecanismo de operação da comporta (Figura 1.13).

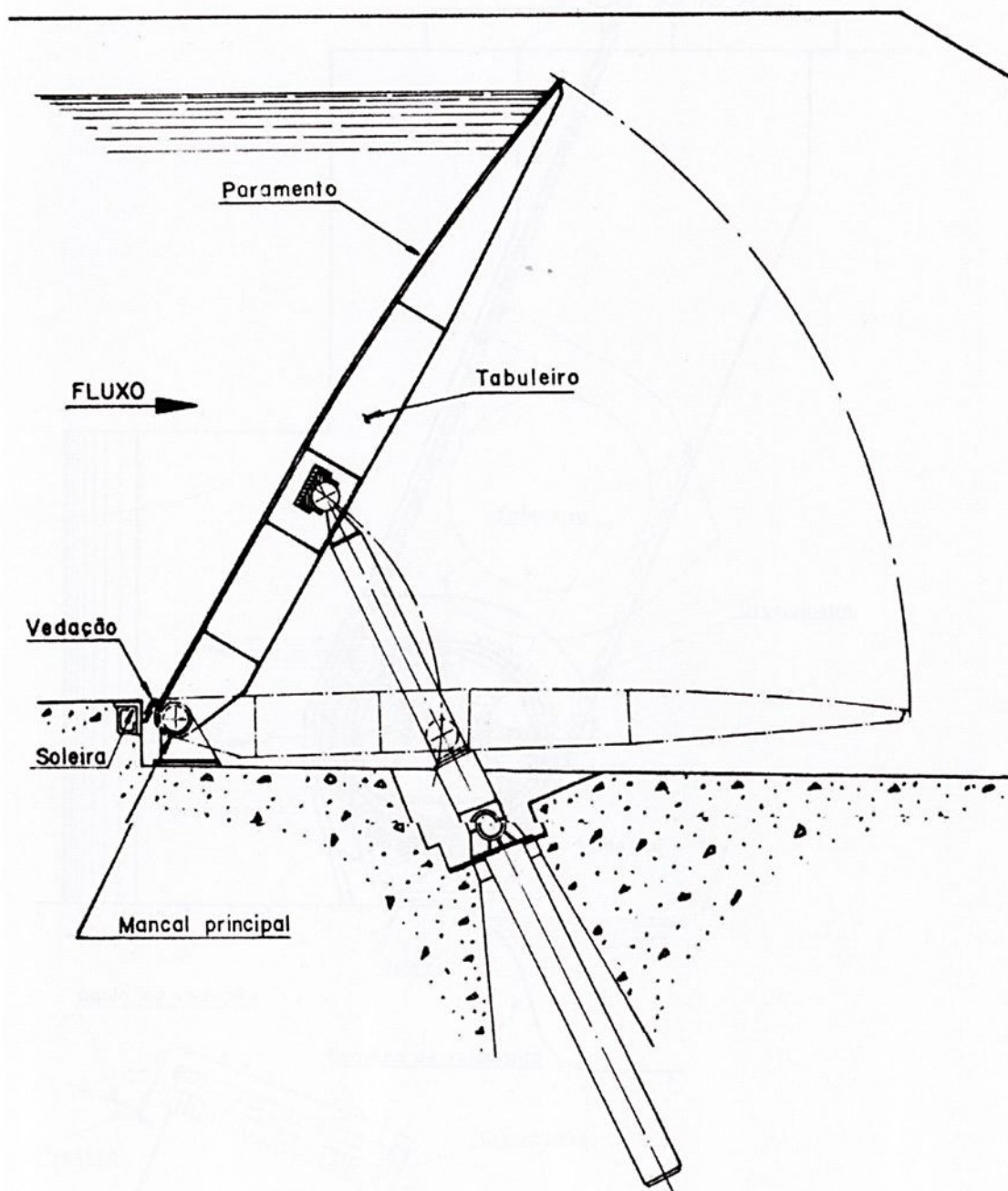


Figura 1.13 – Comporta Basculante.

COMPORTA ROLANTE: Comporta de roto-translação, de paramento geralmente curvo, apoiado em uma estrutura cilíndrica de eixo horizontal, que rola em cremalheiras fixas colocadas nos pilares em posição inclinada (Figura 1.14).

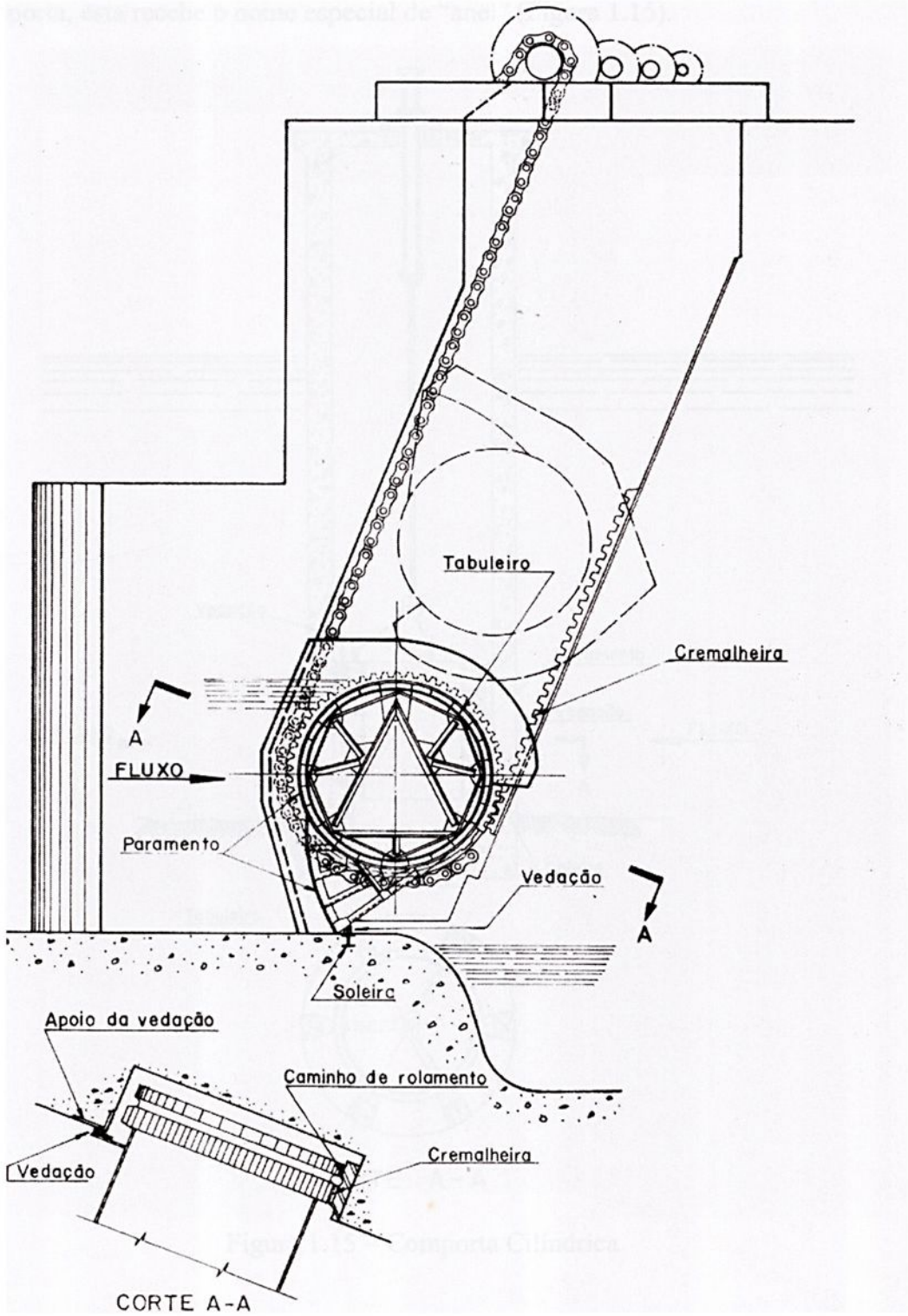


Figura 1.14 – Comporta Rolante.

COMPORTA CILÍNDRICA: Comporta de translação, com paramento cilíndrico fechado, eixo vertical e que se desloca ao longo de seu eixo. Em comporta cilíndrica de superfície quando o fluxo é admitido na sua parte superior por abaixamento da comporta, esta recebe o nome especial de “anel” (Figura 1.15).

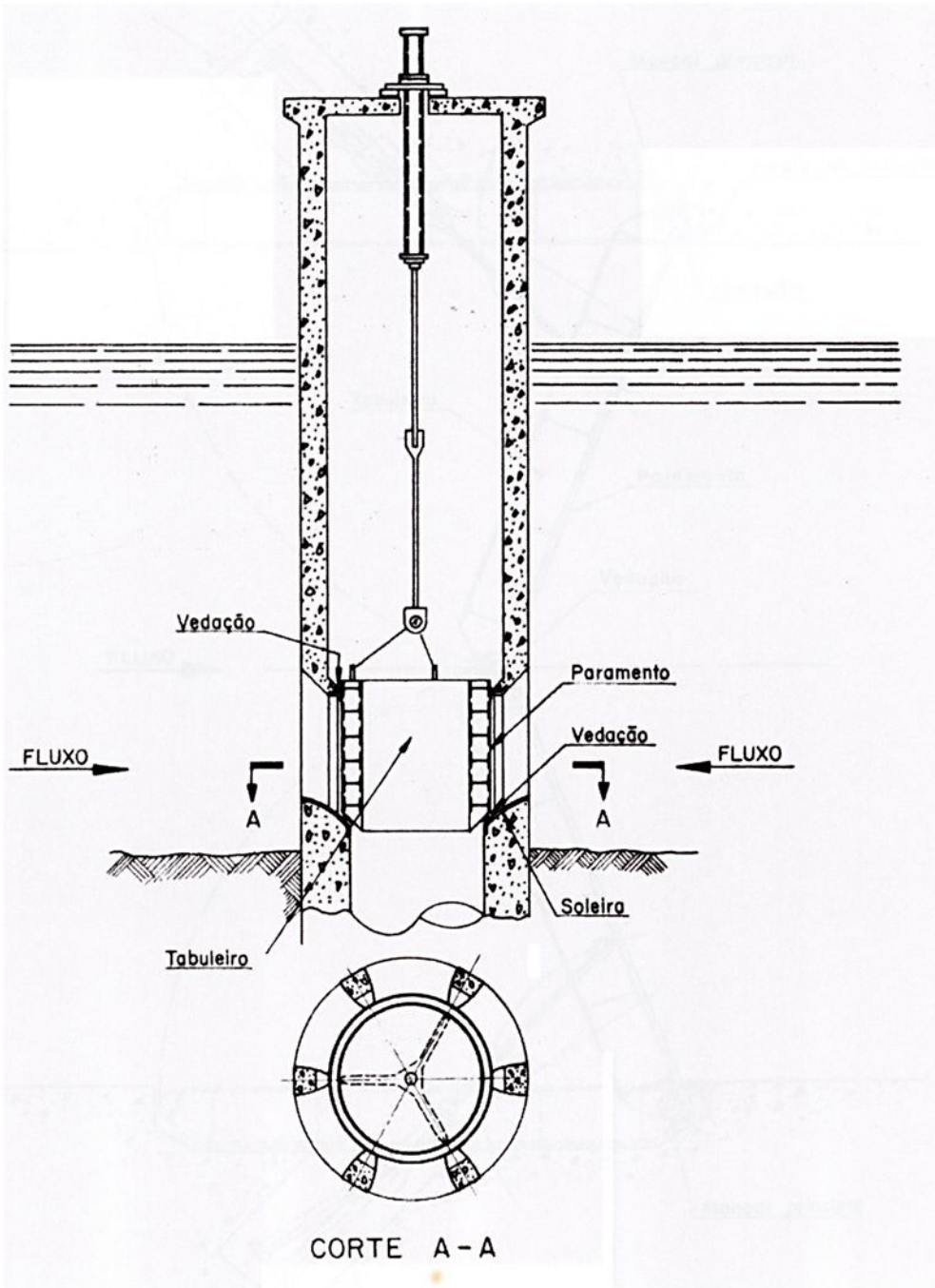


Figura 1.15 – Comporta Cilíndrica.

COMPORTA MITRA: Comporta de rotação composta de dois elementos basculantes de eixos verticais fixos localizados nas paredes do conduto. Na posição fechada os dois elementos basculantes fazem apoio entre si nas extremidades livres (Figura 1.16).

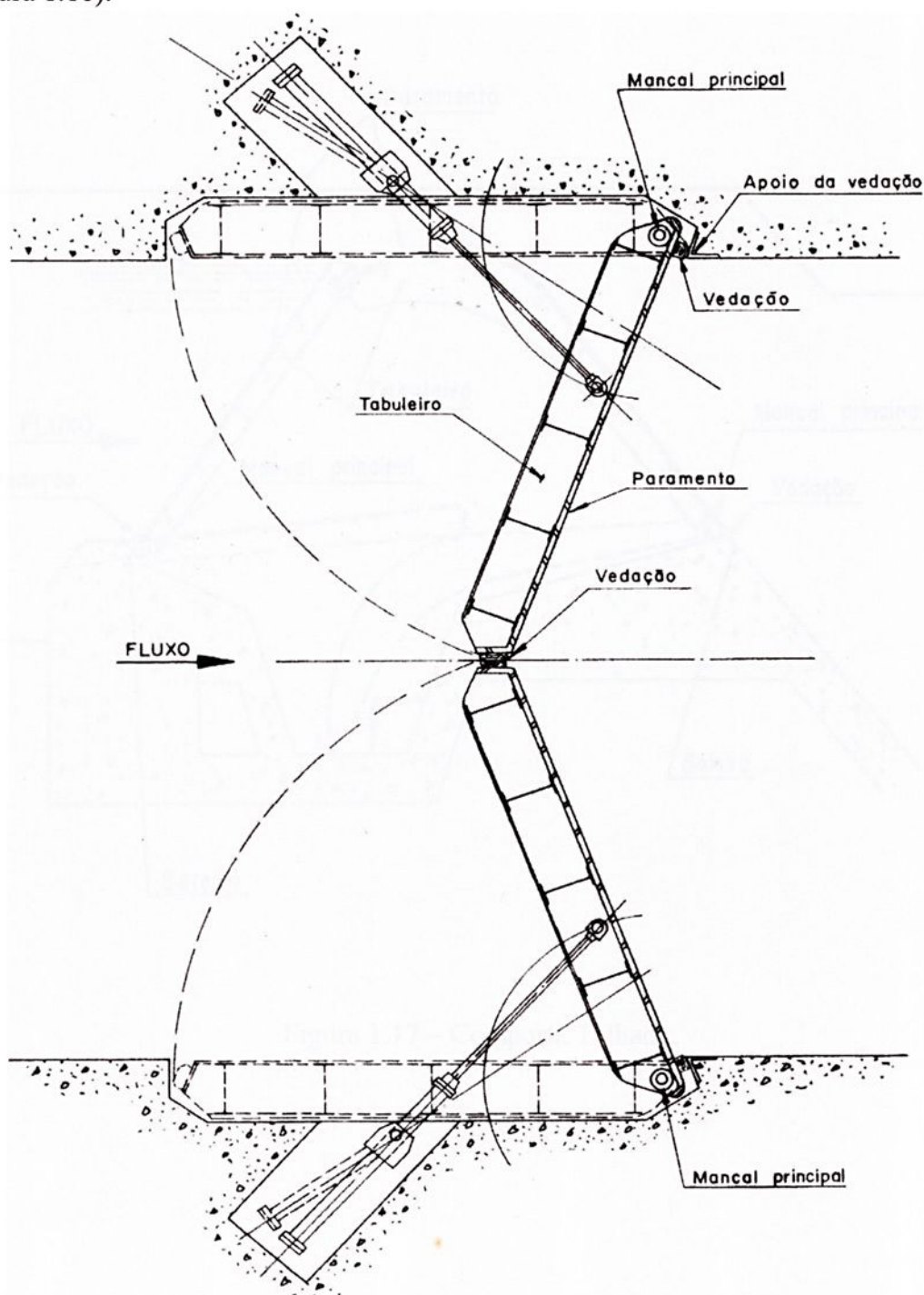


Figura 1.16 – Comporta Mitra.

COMPORTA TELHADO: Comporta de rotação composta de dois elementos basculantes de eixos horizontais fixos e paralelos, na qual o elemento de montante se apóia continuamente sobre o elemento de jusante (Figura 1.17).

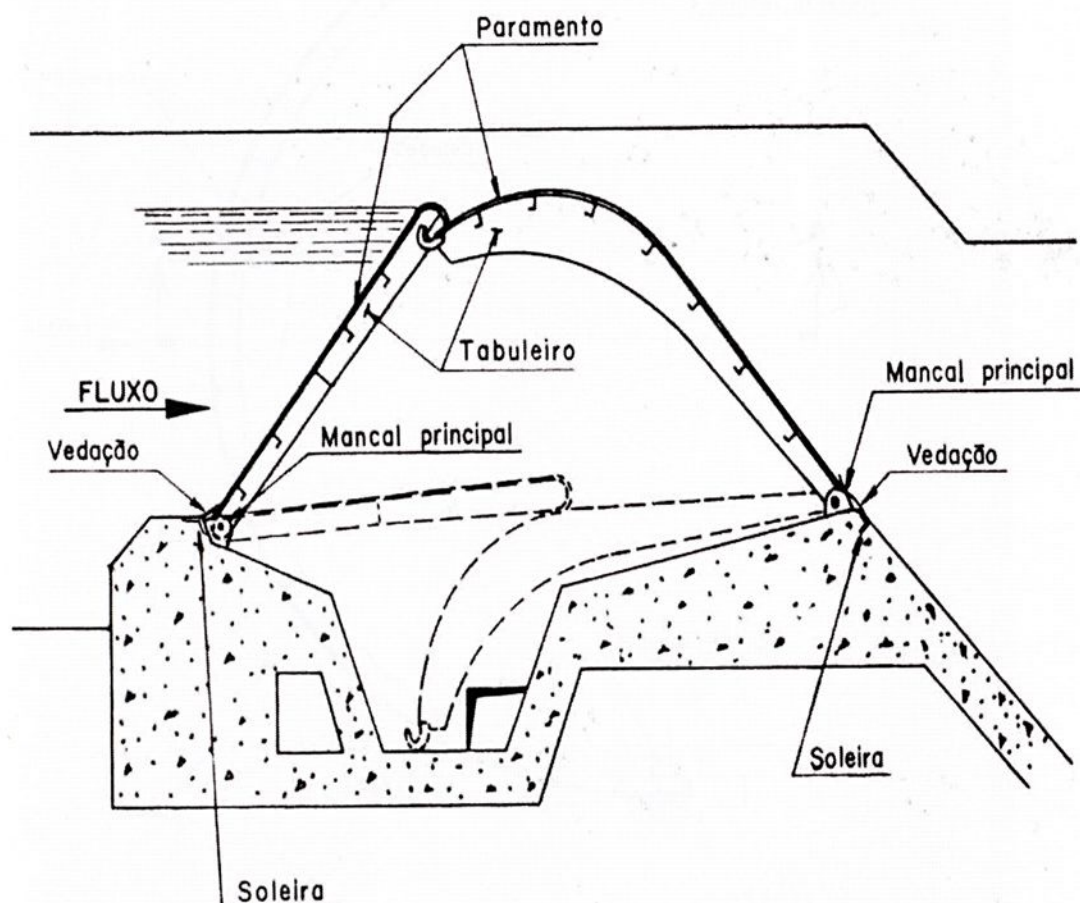


Figura 1.17 – Comporta Telhado.

COMPORTA VISOR: Comporta de rotação com paramento semicilíndrico com geratriz vertical e eixo de rotação horizontal (Figura 1.18).

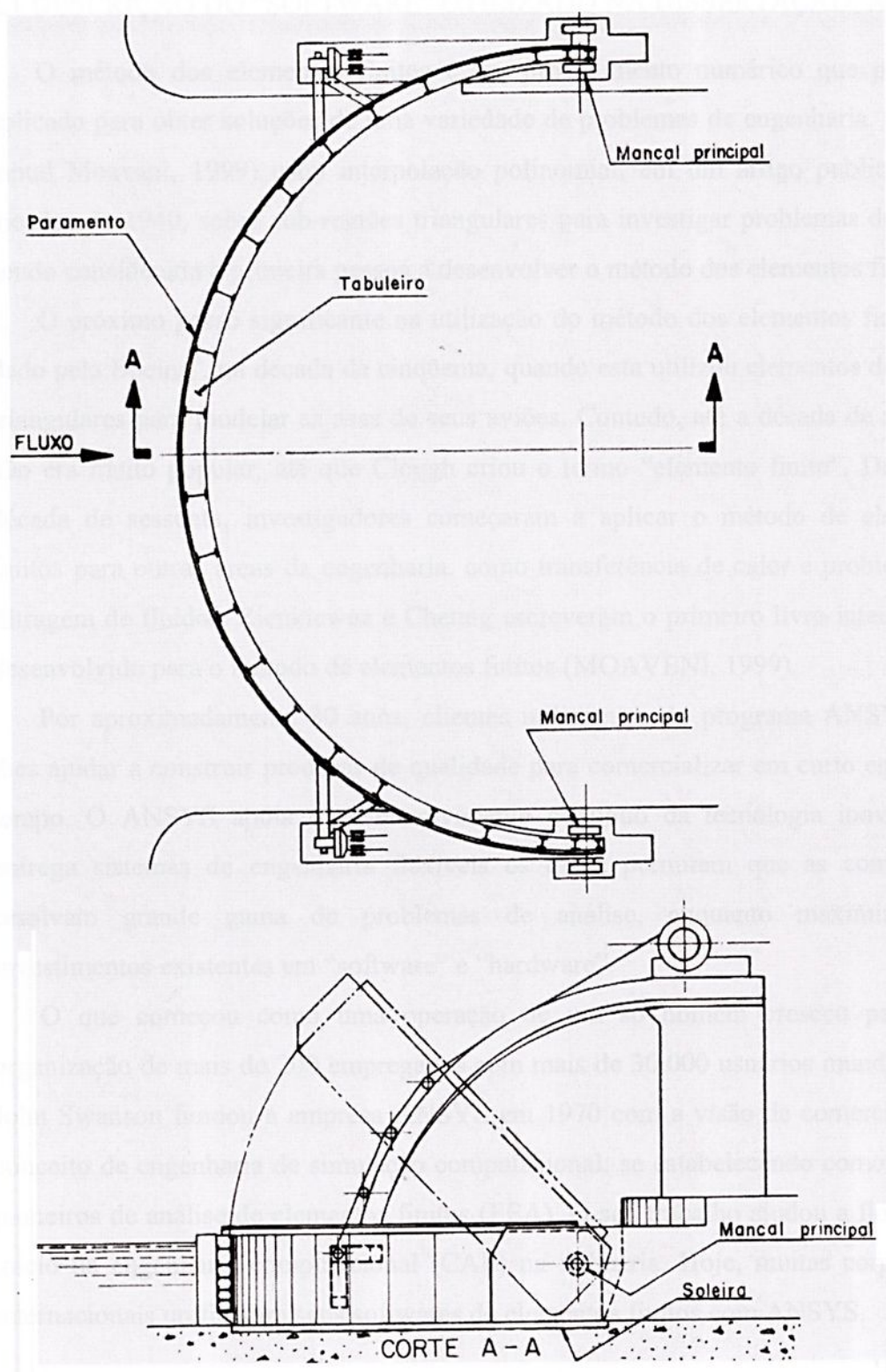


Figura 1.18 – Comporta Visor.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 DESCRIÇÃO DO “SOFTWARE” UTILIZADO NA DISSERTAÇÃO: ANSYS

O método dos elementos finitos é um procedimento numérico que pode ser aplicado para obter soluções de uma variedade de problemas de engenharia. Courant (apud Moavani, 1999) usou interpolação polinomial, em um artigo publicado em meados de 1940, sobre sub-regiões triangulares para investigar problemas de torção sendo considerada a primeira pessoa a desenvolver o método dos elementos finitos.

O próximo passo significativo na utilização do método dos elementos finitos foi dado pela Boeing¹, na década de cinquenta, quando esta utilizou elementos de tensão triangulares para modelar as asas de seus aviões. Contudo, até a década de sessenta não era muito popular, até que Clough criou o termo “elemento finito”. Durante a década de sessenta, investigadores começaram a aplicar o método de elementos finitos para outras áreas da engenharia, como transferência de calor e problemas de filtragem de fluidos. Zienkiewicz e Cheung escreveram o primeiro livro inteiramente desenvolvido para o método de elementos finitos (MOAVENI, 1999).

Por aproximadamente 30 anos, clientes utilizam-se do programa ANSYS para lhes ajudar a construir produtos de qualidade para comercializar em curto espaço de tempo. O ANSYS apóia o desenvolvimento contínuo da tecnologia inovadora e entrega sistemas de engenharia flexíveis os quais permitem que as companhias resolvam grande gama de problemas de análise, enquanto maximizam os investimentos existentes em “software” e “hardware”.

O que começou como uma operação de um só homem cresceu para uma organização de mais de 200 empregados com mais de 30.000 usuários mundiais. Dr. John Swanson fundou a empresa ANSYS em 1970 com a visão de comercializar o conceito de engenharia de simulação computacional, se estabelecendo como um dos pioneiros de análise de elementos finitos (FEA). O seu trabalho ajudou a florescer o início da engenharia computacional (CAE) na indústria. Hoje, muitas corporações internacionais unificaram seus softwares de elementos finitos com ANSYS.

¹ Boeing Airplane Company, Seattle, EUA.



Alguns de seus clientes também fazem parte das dez maiores corporações industriais da Revista "Fortune - Global 100". ANSYS continua seu papel como um inovador tecnológico. Dentre as suas inovações incluem: o primeiro a realizar análise no computador pessoal (o PC), o primeiro a integrar o cálculo computacional de dinâmica de fluidos (CFD) e o primeiro com capacidades multi-físicas no PC.

ANSYS evoluiu para um programa de software para análise de projetos, reconhecido ao redor do mundo pelas suas muitas capacidades. A primeira versão do programa ANSYS parecia muito diferente da versão atual, oferecendo somente transferência de calor e análise estrutural linear.

No início da década 70 trazia muitas mudanças ao programa incorporando tecnologia nova e pedidos de usuários. Foram adicionadas a não-linearidade, sub-estruturação e uma diversificação de elementos. A companhia começou a olhar para os novos minicomputadores.

O modo interativo de operação era uma adição significativa ao programa. Com isto, a geração do modelo e a avaliação de resultados (pré e pós-processamento) foram simplificadas grandemente. Poderiam ser usados gráficos interativos, a real geometria do modelo e materiais diversos antes de realizar uma análise. Gráficos dos resultados de análise poderiam ser produzidos imediatamente para verificação interativa.

Hoje, o programa é extremamente poderoso e fácil usar. Cada nova versão aumenta suas capacidades o que tornam o programa mais flexível, mais fácil de utilizar e mais rápido.

Em resumo, o programa ANSYS é um pacote de análise flexível, robusto e de otimização. O software opera em computadores e sistemas operacionais desde PC's até supercomputadores. ANSYS caracteriza-se pela compatibilidade de arquivos ao longo de toda sua família de produtos e por todas as plataformas (ANSYS, 1997).



2.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA

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 (ANSYS PARAMETRIC DESIGNER LANGUAGE) 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 Definição e finalidade

Modelo paramétrico é aquele construído e analisado em termos de parâmetros (variáveis) em vez de números e escrito em linguagem APDL.

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

2.2.3 Fundamentos de APDL

APDL é a sigla para linguagem de projeto paramétrico em ANSYS, uma linguagem que permite parametrizar o modelo e automatiza 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 freqüentemente e criar uma macro para executar uma sucessão de tarefas, com “if - then” ou então, fazer ”loops” e lembretes do usuário.

2.2.4 Procedimento / 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 diagrama da Figura 2.1.

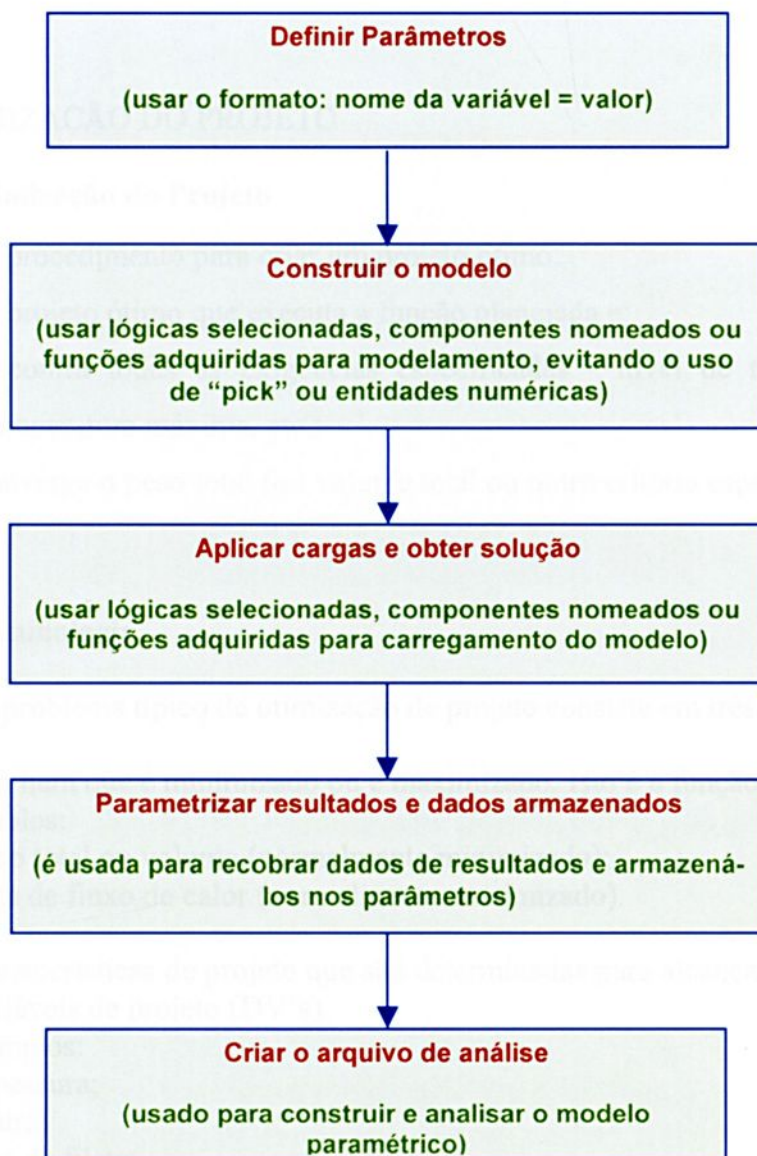


Figura 2.1 – Construção e análise do modelo paramétrico.

2.3 OTIMIZAÇÃO DO PROJETO

2.3.1 Otimização do Projeto

É um procedimento para criar um projeto ótimo.

É um projeto ótimo que executa a função planejada e:

a) Encontra todas as exigências especificadas - nível de tensão, frequência natural, temperatura máxima, etc.;

b) Converte o peso total (ou volume total ou outro critério especificado) para um mínimo.

2.3.2 Terminologia

Um problema típico de otimização de projeto consiste em três partes:

a) Um item que é minimizado ou é maximizado. Isto é a função objetivo (OBJ).

Exemplos:

- peso total ou volume (normalmente minimizado);
- taxa de fluxo de calor (normalmente maximizado).

b) Características de projeto que são determinadas para alcançar o objetivo. Estas são as variáveis de projeto (DV's).

Exemplos:

- espessura;
- altura;
- raio de filete;
- número de furos.

c) Condições que o projeto tem que atingir. Estas são variáveis de estado (VS's).

Exemplos:

- limites de tensão máxima;
- limites de deflexão máxima;
- primeira frequência natural mínima;
- limites de temperatura máxima;
- limites de gradiente térmico máximo.

Um projeto factível é aquele que satisfaz todas as restrições incluindo SV's e qualquer limite de DV, conforme Figura 2.2.

Um projeto infactível é aquele que viola pelo menos uma restrição.



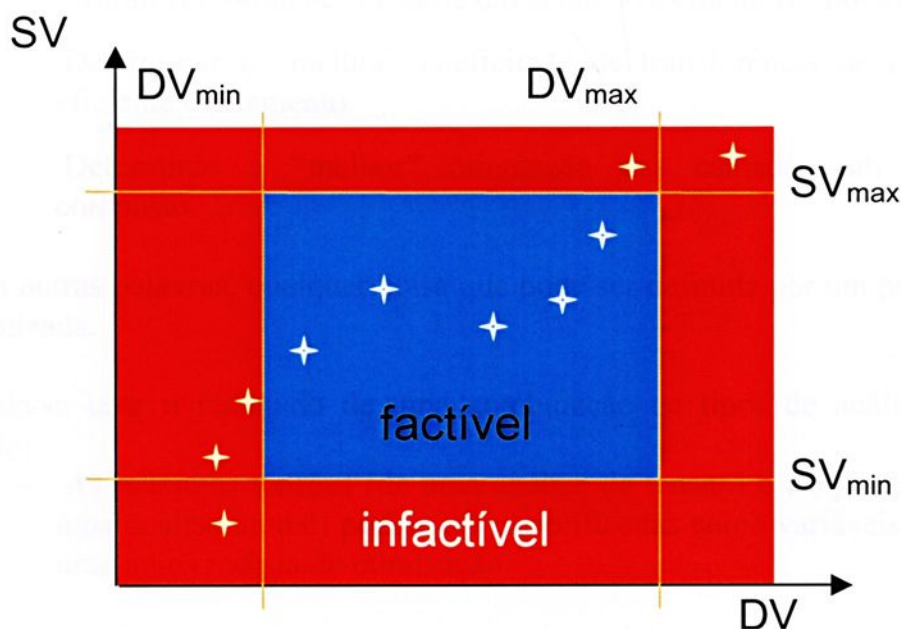


Figura 2.2 – Projetos factíveis e infactíveis.

O software ANSYS pode alcançar um projeto ótimo até mesmo se o projeto inicial é infactível.

O melhor projeto é aquele que tem o mais baixo valor (massa, volume, peso) ou mais alto valor (gradiente de temperatura) da função objetivo e que mais se aproxima de todas as restrições.

Se nenhum projeto possível estiver disponível, o melhor projeto é aquele que mais se aproxima de todas as restrições, não o que tem o mais baixo ou mais alto valor da função objetivo.

O domínio de projeto (ou espaço de projeto) é a região definida por todos os projetos possíveis.

2.3.3 Características de otimização em ANSYS

A otimização de projeto em ANSYS permite fazer o seguinte:

- Otimizar o projeto:
 - Dois métodos de otimização ou algoritmos permitem começar com um projeto inicial e podem deixar o ANSYS "afinar" até o ótimo.
 - Pode-se incorporar um algoritmo de otimização do usuário.
- Pode-se aperfeiçoar virtualmente qualquer aspecto do projeto, não só parâmetros geométricos ou de forma. Exemplos:

- Minimizar variações de deflexão achando os melhores pontos de apoio.
- Determinar o “melhor” coeficiente de transferência de calor para um eficiente esfriamento.
- Determinar a “melhor” orientação das camadas em um material composto.

Em outras palavras, qualquer coisa que pode ser definida por um parâmetro pode ser otimizada.

Pode-se usar o resultado de uma combinação de tipos de análise, como por exemplo:

- As máximas tensões (de uma análise de tensão) e frequência natural (de uma análise modal) podem ser especificadas como variáveis de estado em uma única rodada de otimização.

A otimização começa com a construção do modelo paramétrico do projeto inicial e passa a seguir para a criação de um arquivo de análise conforme Figura 2.3.

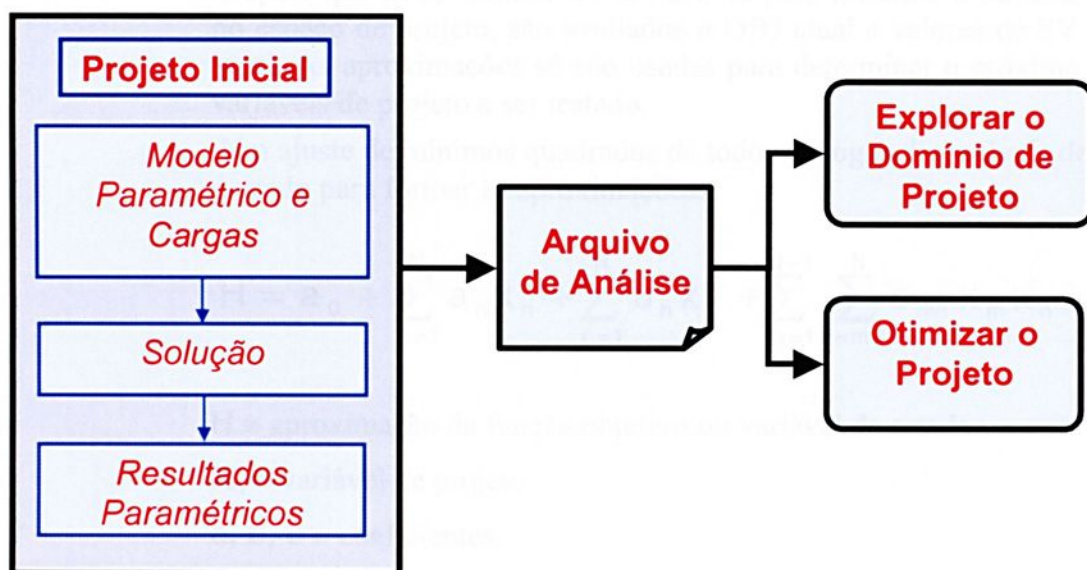


Figura 2.3 – Diagrama do processo de otimização.

2.3.4 Métodos de Otimização do Projeto

ANSYS provê dois métodos, ou algoritmos, para aperfeiçoar o projeto:

- Método de aproximação por subproblema.
- Método de primeira ordem.

Um terceiro método permite ao usuário, ao usuário incorporar seu próprio algoritmo de otimização.

2.3.4.1 Método de Aproximação por Subproblema

Um método de ordem zero requer só os valores das variáveis de resposta (SV's e OBJ), não os seus derivados.

Formar uma aproximação das variáveis de resposta com as seguintes características:

- A aproximação da função objetivo é usada para localizar o mínimo.
- São usadas aproximações das variáveis de estado para restringir o projeto.
- Depois que as aproximações são usadas para localizar o mínimo de OBJ no espaço de projeto, são avaliados o OBJ atual e valores de SV naquele local. As aproximações só são usadas para determinar o próximo jogo de variáveis de projeto a ser testado.
- Um ajuste de mínimos quadrados de todos os jogos disponíveis de projeto é usado para formar as aproximações:

$$H = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n x_n + \sum_{n=1}^N b_n x_n^2 + \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N c_{mn} x_m x_n \quad (2.1)$$

H ≡ aproximação da função objetivo ou variável de estado.

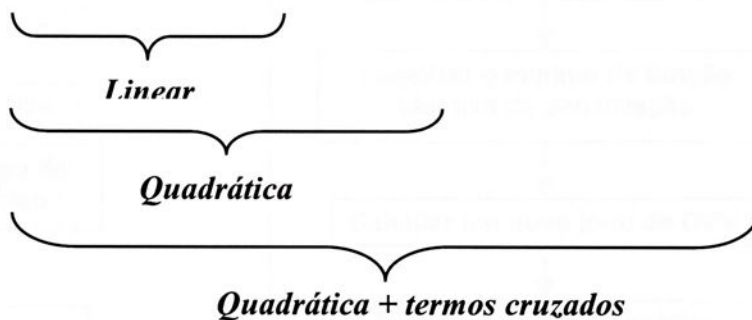
X_n ≡ variável de projeto.

a, b, c ≡ coeficientes.

N ≡ número total de variáveis de projeto.

- Para controlar a forma da aproximação pode-se usar OPEQN (ou Design Opt > Method/Tool> Subproblema):
 - Quadrática + termos cruzados (“default” para OBJ’s)
 - Quadrática somente (default para SV’s)
 - Ajuste linear

$$\tilde{H} = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n X_n + \sum_{n=1}^N b_n X_n^2 + \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N c_{mn} X_m X_n \quad (2.2)$$



Inicialmente, $N+2$ jogos de projeto são necessários para formar as aproximações ($N =$ número de DV). Para isto, o ANSYS gerará projetos randômicos ou usará projetos existentes no banco de dados de otimização. Pode-se melhorar a qualidade das aproximações começando com um "bom" projeto conhecido.

Começar com a ferramenta de "looping" único ou randômico (ou qualquer outra ferramenta) para gerar vários projetos e então manter só os projetos possíveis ou um certo número dos melhores projetos.

O diagrama de funcionamento do ANSYS durante o processo de otimização por sub-problema pode ser observado na Figura 2.4.

Método de aproximação por subproblema é recomendado para a maioria das aplicações porque:

- usa uma aproximação generalizada.
- normalmente pode-se chegar a um projeto ótimo rapidamente.

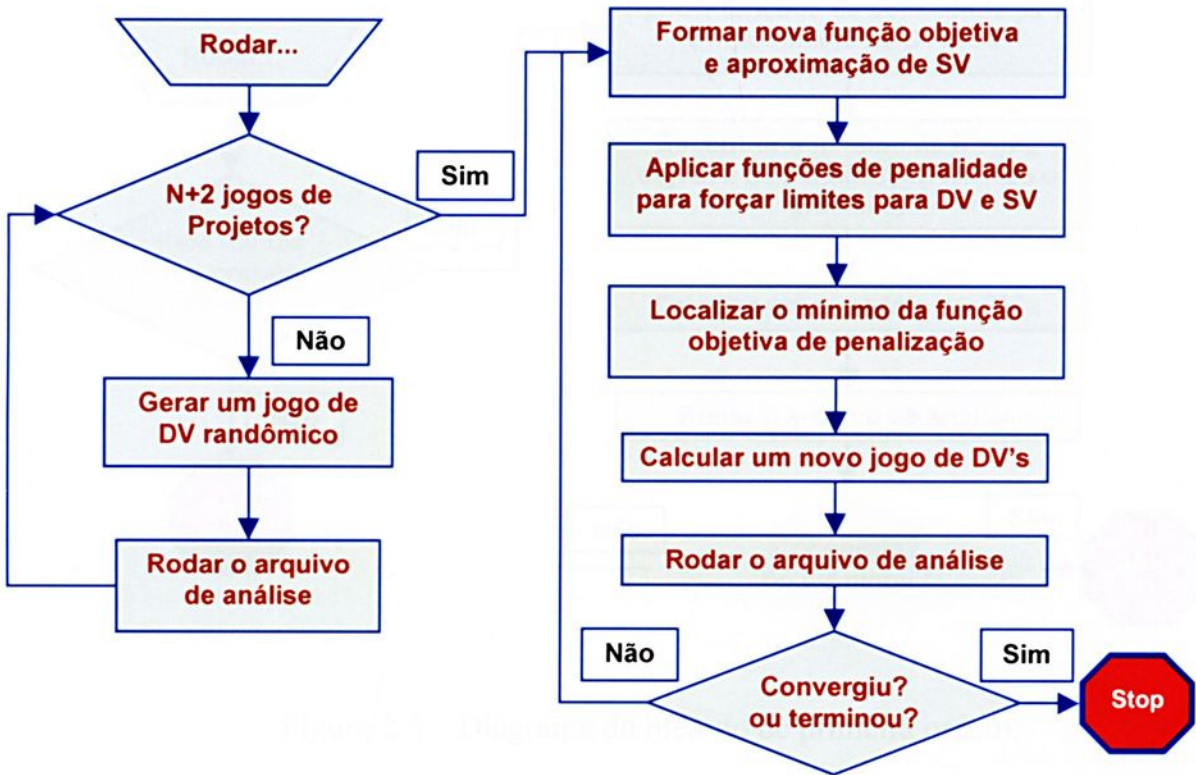


Figura 2.4 – Diagrama do método de aproximação por sub-problema.

2.3.4.2 Método de Primeira Ordem

Neste método nenhuma aproximação é usada, assim o método é mais preciso mas não é recomendado quando rapidez é essencial.

Cada repetição pode envolver várias análises (“loops” dos arquivos de análise) para determinar a própria direção de procura. Valores padrões do próprio ANSYS (“default”) para SIZE e DELTA normalmente são suficientes.

É dito que a convergência é alcançada quando ambas as condições abaixo são conhecidas:

- Mudança na função objetivo entre o projeto atual e o melhor projeto possível é menor que a tolerância: $|\text{OBJ atual} - \text{OBJ melhor}| < \text{TOLER obj}$ e
- Mudança na função objetivo entre os projetos atuais e anteriores é menor que a tolerância: $|\text{OBJ atual} - \text{OBJ anterior}| < \text{TOLER obj}$.

Outra exigência para convergência é que a repetição final tem que usar uma procura de descida mais íngreme. Caso contrário, são executadas repetições adicionais.

O roteiro de funcionamento do ANSYS durante o processo de otimização pelo método de primeira ordem é mostrado na Figura 2.5

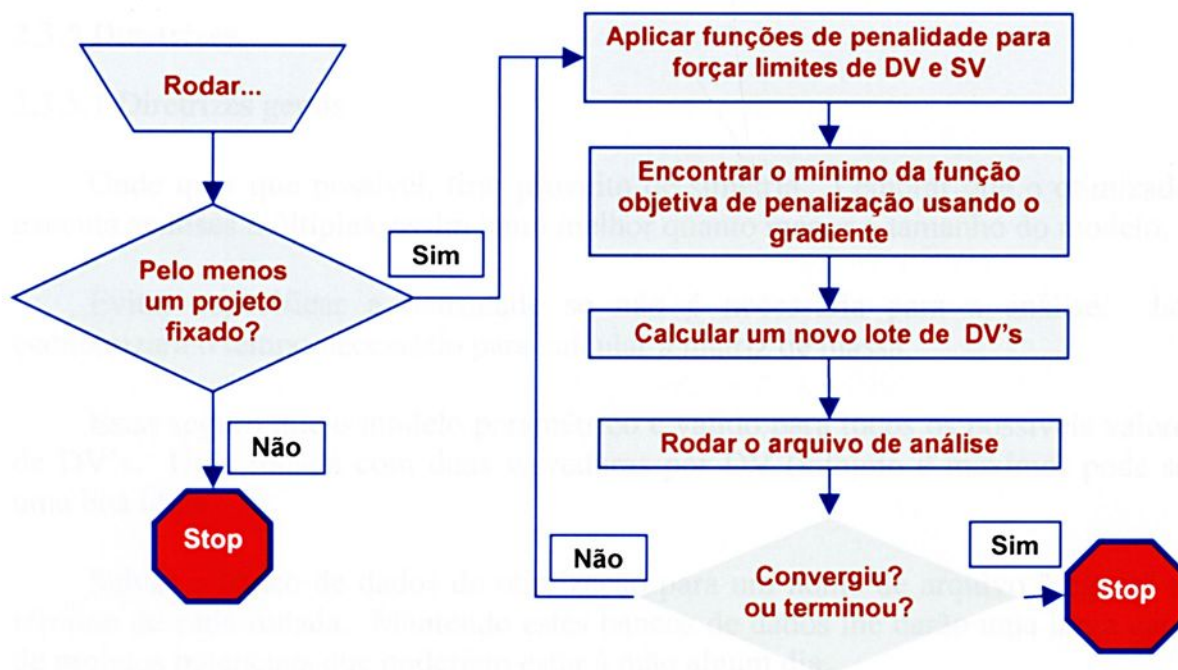


Figura 2.5 – Diagrama do método de primeira ordem.

Ambos os métodos usam funções objetivos de penalidade para obrigar limites nas DV's e SV's pois ambos usam uma função objetivo irrestrita. A função de penalidade é representada na Figura 2.6.

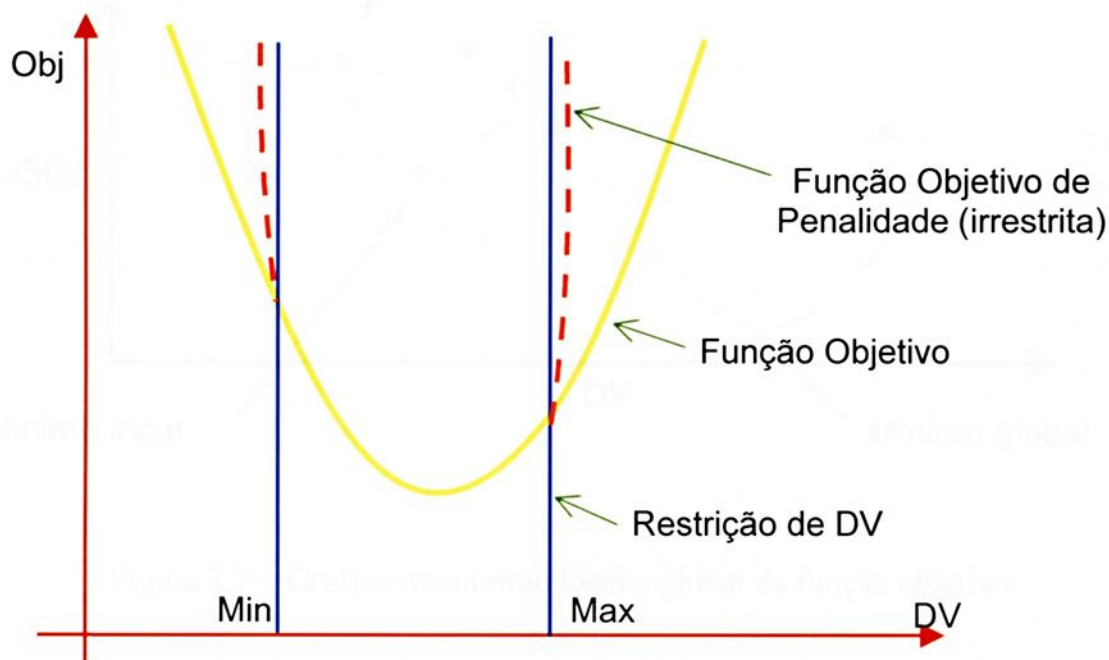


Figura 2.6– Gráfico da variação da Função Objetivo.

2.3.5 Diretrizes

2.3.5.1 Diretrizes gerais

Onde quer que possível, tirar proveito de simetria. Lembrar que o otimizador executa análises múltiplas, assim tanto melhor quanto menor o tamanho do modelo.

Evitar especificar a densidade se não é necessária para a análise. Isto economizará o tempo necessário para calcular a matriz de massa.

Estar seguro que o modelo paramétrico é válido para todos os possíveis valores de DV's. Uma rodada com duas varreduras por DV (mínimo e máximo) pode ser uma boa idéia.

Salvar o banco de dados de otimização para um nome de arquivo "seguro" ao término de cada rodada. Mantendo estes bancos de dados lhe darão uma larga gama de projetos potenciais que poderiam estar à mão algum dia.

Algumas vezes um problema de otimização pode convergir a um mínimo local conforme mostrado na Figura 2.7. Para conferir essa possibilidade pode-se utilizar a ferramenta de varredura ("sweep") (ou alguma outra ferramenta) e adotando o próprio projeto inicial.

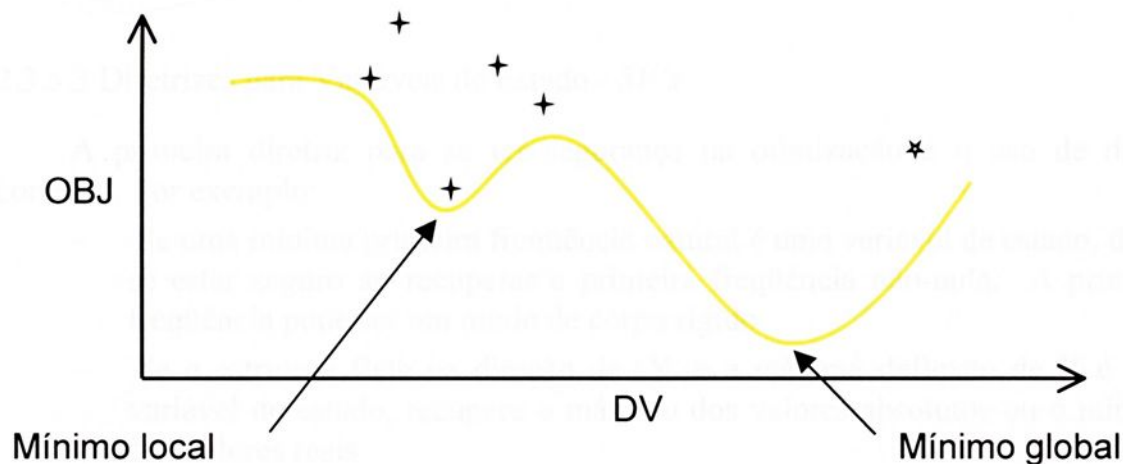


Figura 2.7 – Gráfico do mínimo local e global da função objetivo.

2.3.5.2 Diretrizes para Variáveis de Projeto - *DV*'s

Forçar o número de variáveis de projeto para um mínimo: mais que vinte não é recomendado; menos que dez é preferido. Um modo é eliminar alguns *DV*'s expressando-os em termos de outros.

Escolher *DV*'s que permitem várias configurações de projeto, mas estar atento para os projetos irrealis ou indesejáveis. Por exemplo, considere a otimização do peso de uma viga em balanço. Uma variável de projeto do tipo x_1 da Figura 2.8, funciona, mas não permite um projeto otimizado com formato cônico.

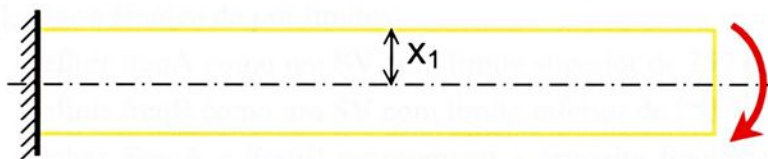


Figura 2.8 – Esquema de uma viga bi-engastada, variando um parâmetro.

Para especificar *DV*'s discretos, como número de reforços ou furos, usar a função NINT (inteiro mais próximo) ao construir o modelo. Por exemplo, se NREF representar o número de reforços, usar NINT(NREF) para fazer cópias de um reforço, então declarar NREF como um *DV* com os limites apropriados.

2.3.5.3 Diretrizes para Variáveis de Estado - *SV*'s

A primeira diretriz para se ter segurança na otimização é o uso de dados corretos. Por exemplo:

- Se uma mínima primeira frequência natural é uma variável de estado, deve-se estar seguro ao recuperar a primeira frequência não-nula. A primeira frequência pode ser um modo de corpo rígido.
- Se a estrutura flete na direção de $-Y$, e a máxima deflexão de Y é uma variável de estado, recupere o máximo dos valores absolutos ou o mínimo dos valores reais.

Variáveis de estado típicas como máxima tensão (ou deflexão ou temperatura, etc.) pode acontecer em um local diferente em cada “loop”.

- Em tais casos, não escolher só um máximo (ou mínimo) para a estrutura inteira. Fazendo isso podem resultar em aproximações de baixa qualidade. Por outro lado, escolhendo um máximo em todo elemento podem resultar em um mínimo local. Uma forma correta é selecionar algumas regiões chaves nas quais serão usadas tensões máximas como variáveis de estado.

Se singularidades existirem, como uma carga pontual ou um canto vivo, a tensão máxima está sempre naquele local. Para evitar este fato é conveniente usar “unselecting” (não seleção) em tais regiões antes de recobrar a tensão máxima.

Evitar saltos apertados em dois lados das variáveis de estado, especialmente ao usar o método de subproblema. Por exemplo, um limite da variável de estado de 500 a 1000 é melhor que 990 a 1000.

Para aplicar uma restrição de igualdade, como primeira frequência natural igual 256 [Hz], usar a técnica de por limites:

- Definir freqA como um SV com limite superior de 257 [Hz].
- Definir freqB como um SV com limite inferior de 255 [Hz].
- Ambas FreqA e FreqB representam a primeira frequência natural, mas os seus limites restringem o valor desejado. Pode ser necessário aumentar o número de sucessivos projetos impossíveis (infeasible) neste caso desde um valor de frequência maior que 255 ou menor que 257 farão o projeto impossível.

Se muitos projetos impossíveis estiverem acontecendo, provavelmente é porque uma aproximação variável de estado não representa a função de SV atual adequadamente. Para superar este problema pode-se adicionar termos cruzados para a aproximação de SV ou ser necessário usar o método de primeira ordem.

2.3.5.3 Diretrizes para a Função Objetivo - *OBJ*

Lembrar que ANSYS sempre minimiza a função objetivo. Para maximizar uma função, como taxa de fluxo de calor (Q), especificar $1/Q$ ou $k-Q$ como a função objetivo (onde k é uma constante maior que o valor mais alto esperado para Q).

A função objetivo (*OBJ*) deve permanecer positiva. Adicionar uma constante positiva se precisar assegurar este fato.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA ANALÍTICA.

3.1 INTRODUÇÃO

O cálculo analítico de uma viga bi-apoiada e 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 devemos 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.

3.2 CÁLCULO DE UMA VIGA BI-APOIADA.

Inicialmente é escolhida a seção da viga que neste caso é composta de duas abas ou mesas em uma das quais é aplicado o carregamento, e a alma como elemento de ligação, como mostrada na Figura 3.1.

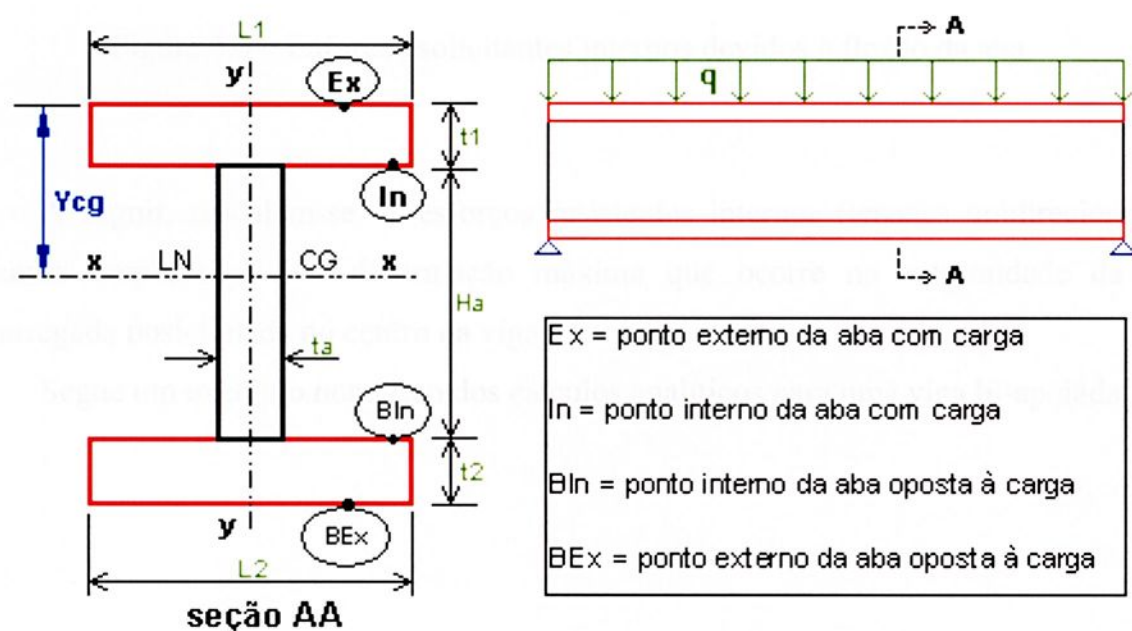


Figura 3.1 – Geometria da seção transversal da viga.

A seguir são calculadas as características geométricas como: baricentro, momento de inércia, módulo de resistência e momento estático.

Os esforços solicitantes internos são decorrentes da flexão da viga (Figura 3.2) resultando em momento fletor e cisalhamento, além da flexão da aba onde o carregamento é aplicado (Figura 3.3).

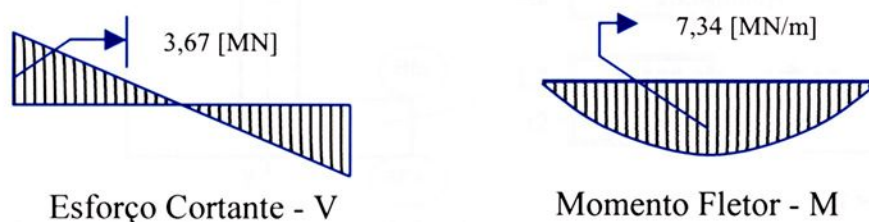


Figura 3.2 – Esforços solicitantes internos devidos à flexão da viga.

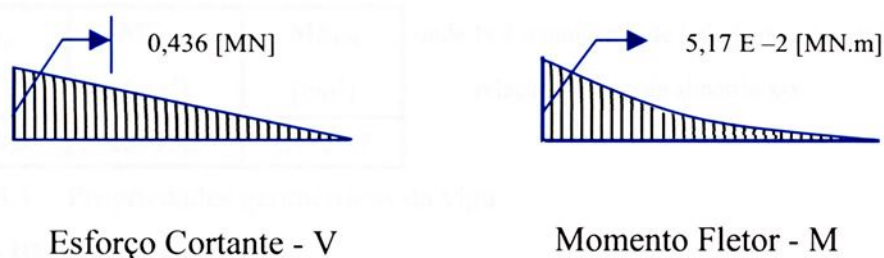


Figura 3.3 – Esforços solicitantes internos devidos à flexão da aba.

A seguir, calculam-se os esforços resistentes internos (tensões unidirecionais e tensão combinada) e a deformação máxima que ocorre na extremidade da aba carregada posicionada no centro da viga.

Segue um exemplo numérico dos cálculos analíticos para uma viga bi-apoiada.

3.3 CÁLCULO ANALÍTICO DE UMA VIGA BI-APOIADA

PROPRIEDADES DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA

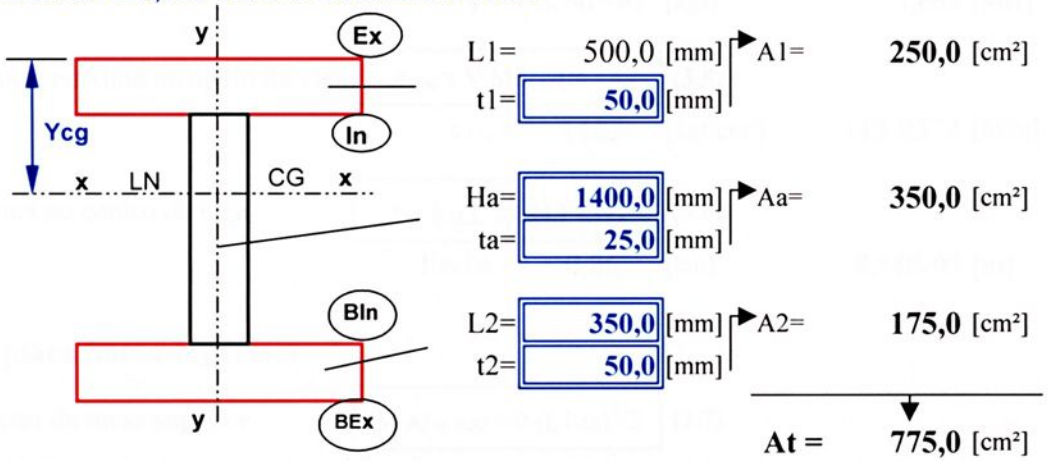


Figura 3.4 – Seção transversal da viga.

Ycg [mm]	Ix [cm ⁴]	Iy [cm ⁴]	Ip = Ix+Iy [cm ⁴]	WEx [cm ³]	WIn [cm ³]	WBin [cm ³]	WBEx [cm ³]
679,84	2768308	70130	2838438	40720,1	43952,7	35944,5	33753,2

MS _{In} [cm ³]	MS _{Bin} [cm ³]	MS _{LN} [cm ³]
16371,0	13915,3	21329,7

onde Ix é o momento de inércia de uma seção 'I' em relação ao eixo de simetria x-x.

Tabela 3.1 – Propriedades geométricas da viga.

DADOS DE ENTRADA

Pressão distribuída na viga

$$P = 18,7 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 1,83 \text{ [MPa]}$$

Carga distribuída na viga $q = P \cdot L$

$$q = 935 \text{ [kgf/cm]} \quad 0,916922 \text{ [MN/m]}$$

Comprimento da viga

$$L = 800 \text{ [cm]} \quad 8,0 \text{ [m]}$$

Módulo de Young do material (aço)

$$Es = 2100000 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 205939,7 \text{ [MPa]}$$

TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Devida a flexão da viga

Momento fletor da viga bi-apoiada

$$M = q \cdot L^2 / 8 \quad (3.1)$$

$$M = 7,48E+07 \text{ [kgf.cm]} \quad 7,34 \text{ [MN/m]}$$

Tensão na face exterior superior da viga

$$\sigma_{Ex} = M / W_{Ex} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{Ex} = 1837 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 180,1 \text{ [MPa]}$$

Tensão na face exterior inferior da viga

$$\sigma_{BEx} = M / W_{BEx} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{BEx} = 2216 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 217,3237 \text{ [MPa]}$$

Esforço cortante da viga bi-apoiada

$$V = q \cdot L / 2 \quad (3.4)$$

$$V = 3,74E+05 \text{ [kgf]} \quad 3,668 \text{ [MN]}$$

Tensão de corte máxima no apoio da viga

$$\tau_{LN} = V \cdot MS_{LN} / (ta \cdot I_x) \quad (3.5)$$

$$\tau_{LN} = 1153 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 113,0374 \text{ [MPa]}$$

Flecha máxima no centro da viga

$$f = 5 \cdot q \cdot L^4 / (384 \cdot Es \cdot I_x) \quad (3.6)$$

$$\text{flecha} = 0,86 \text{ [cm]} \quad 8,58E-03 \text{ [m]}$$

Devida a placa (mesa superior)

Momento fletor da mesa superior

$$M_{\text{Aba sup}} = P \cdot (L1 - ta)^2 / 2 \quad (3.7)$$

$$M_{\text{Aba sup}} = 5274,0 \text{ [kgf.cm]} \quad 5,17E-04 \text{ [MN/m]}$$

Módulo de resistência (por cm)

$$W_{\text{Aba sup}} = 1 \cdot (L1 - ta)^2 / 6 \quad (3.8)$$

$$W_{\text{Aba sup}} = 4,167 \text{ [cm}^3\text{]} \quad 4,17E-06 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Tensão na mesa superior

$$\sigma_{\text{Aba sup}} = M_{\text{Aba sup}} / W_{\text{Aba sup}} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\text{Aba sup}} = 1266 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 124,1283 \text{ [MPa]}$$

Flecha na aba da viga

$$f_{\text{aba}} = P \cdot ((L1 - ta) / 2)^4 / (48 \cdot Es \cdot I_{\text{aba}}) \quad (3.10)$$

$$f_{\text{aba}} = 5,67E-03 \text{ [cm]} \quad 5,67E-05 \text{ [m]}$$

de von Mises no apoio

Tensão combinada na alma

$$\sigma_{\text{Comb alma}} = \sqrt{3 \cdot \tau^2} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{\text{Comb alma}} = 1996 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 195,7865 \text{ [MPa]}$$

de von Mises no centro: flexão da viga + flexão da mesa superior

Tensão combinada na mesa superior

$$\sigma_{\text{Comb aba}} = \sqrt{\sigma_{\text{Ex}}^2 + \sigma_{\text{Abasup}}^2} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{\text{Comb aba}} = 2231 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 218,7665 \text{ [MPa]}$$

Flecha total na mesa superior

$$f_{\text{total}} = \text{flecha} + f_{\text{aba}} \quad (3.13)$$

$$f_{\text{total}} = 0,86 \text{ [cm]} \quad 8,63E-03 \text{ [m]}$$



3.4 Cálculo de uma comporta plana.

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 e, quando aplicável, se há carregamento devido sedimentos ou sobre-carregamento devido abalo sísmico.

São acrescentadas algumas características necessárias ao desenvolvimento do cálculo como: largura e altura vedada, a largura entre apoios formados pelas cabeceiras que descarregam o carregamento para o concreto da barragem, o número adotado de vigas horizontais, vigas verticais e reforços que formam um reticulado que fornece a resistência ao paramento que recebe toda a carga d'água.

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 3.4, bem como observado através do exemplo numérico no Anexo D.





Figura 3.2 Fluxograma do programa de cálculo estrutural de concreto

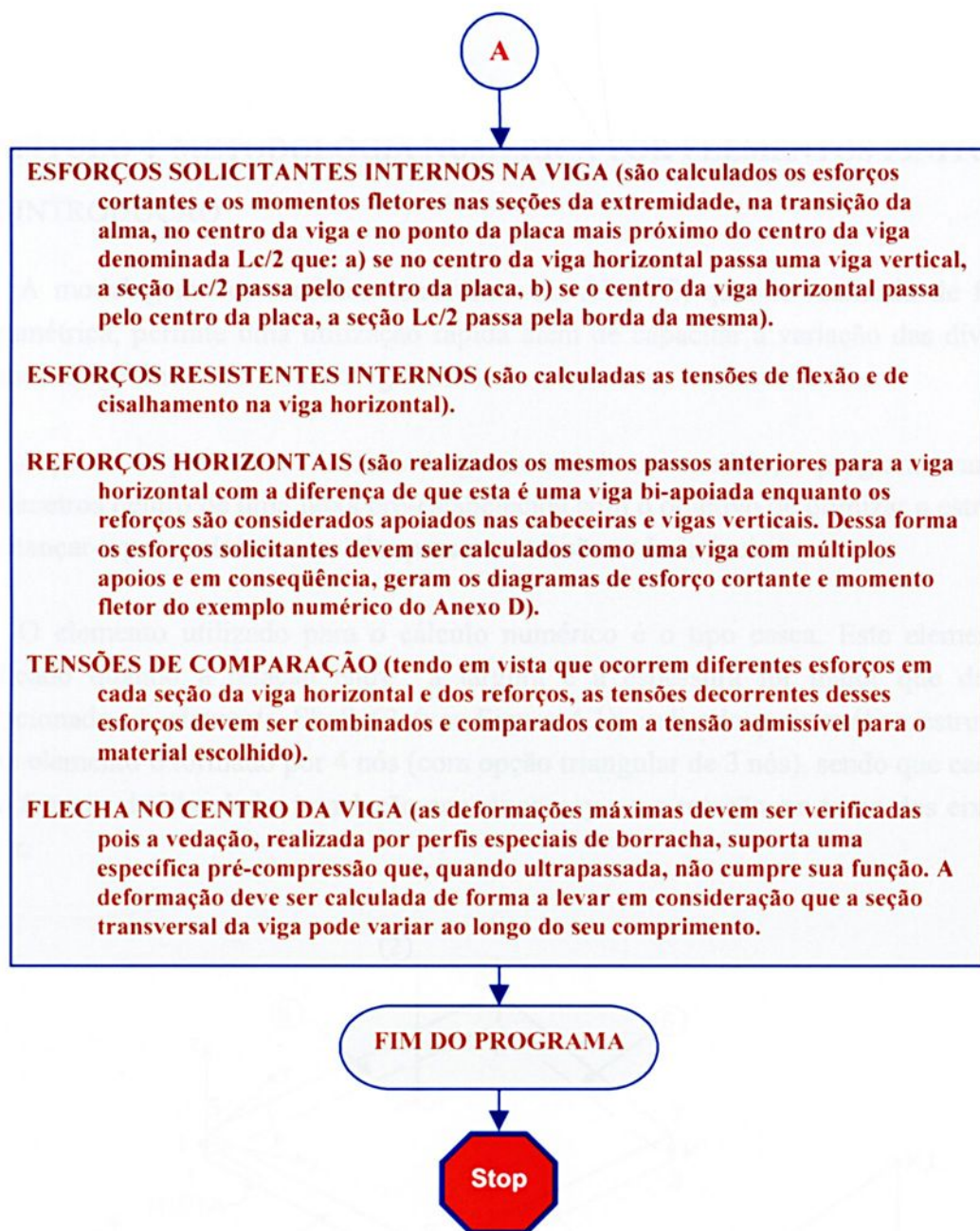


Figura 3.5– Fluxograma do programa de cálculo analítico da comporta.

CAPÍTULO 4 METODOLOGIA NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

4.1 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 dez. É selecionado o elemento Shell 63 (ver Figura 4.1), indicado para análise estrutural. Este elemento é formado por 4 nós (com opção triangular de 3 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 .

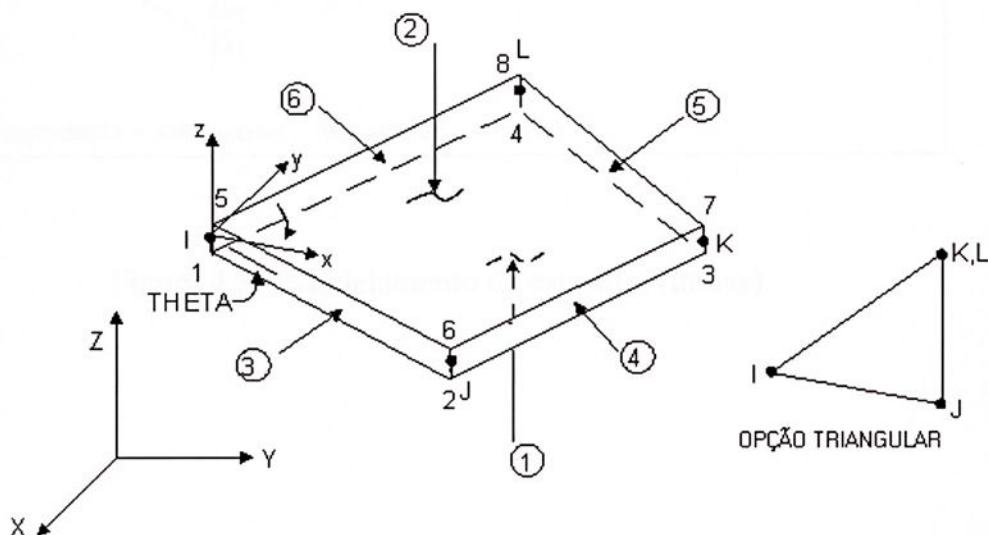


Figura 4.1 – Elemento do tipo Shell 63.

4.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA DE UMA VIGA BI-APOIADA NO ANSYS

4.2.1. Geometria do modelo

A geometria na forma numérica é formada por linhas e áreas, como mostrada nas Figuras 4.2 e 4.3.

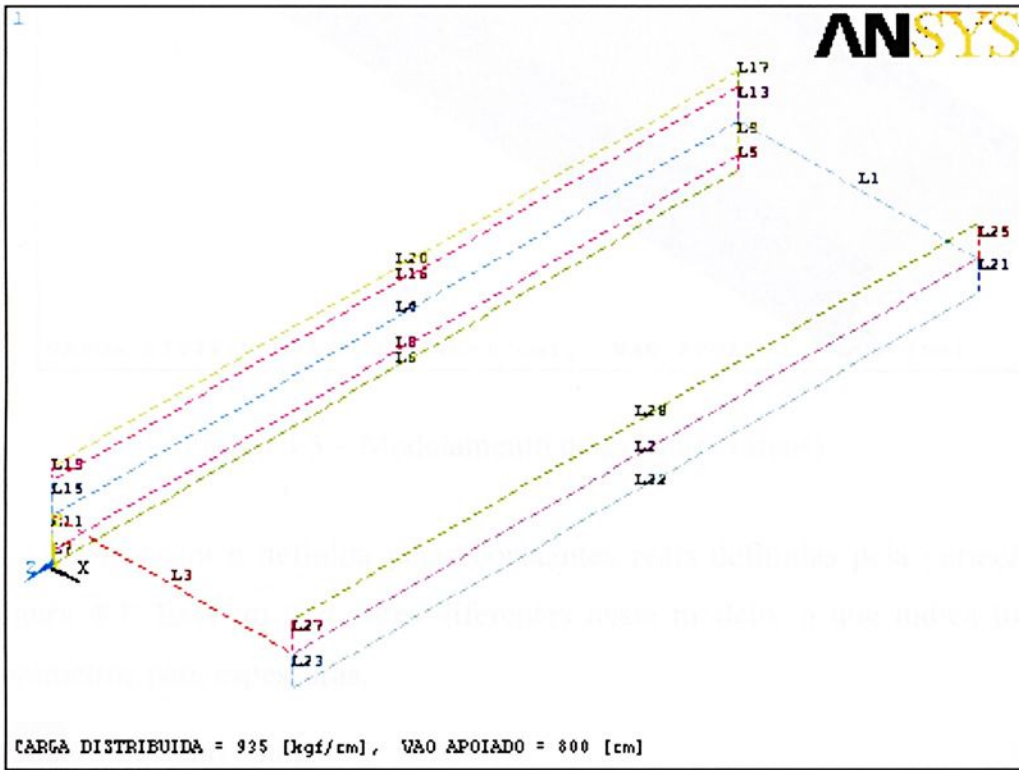


Figura 4.2 – Modelamento da estrutura (linhas).

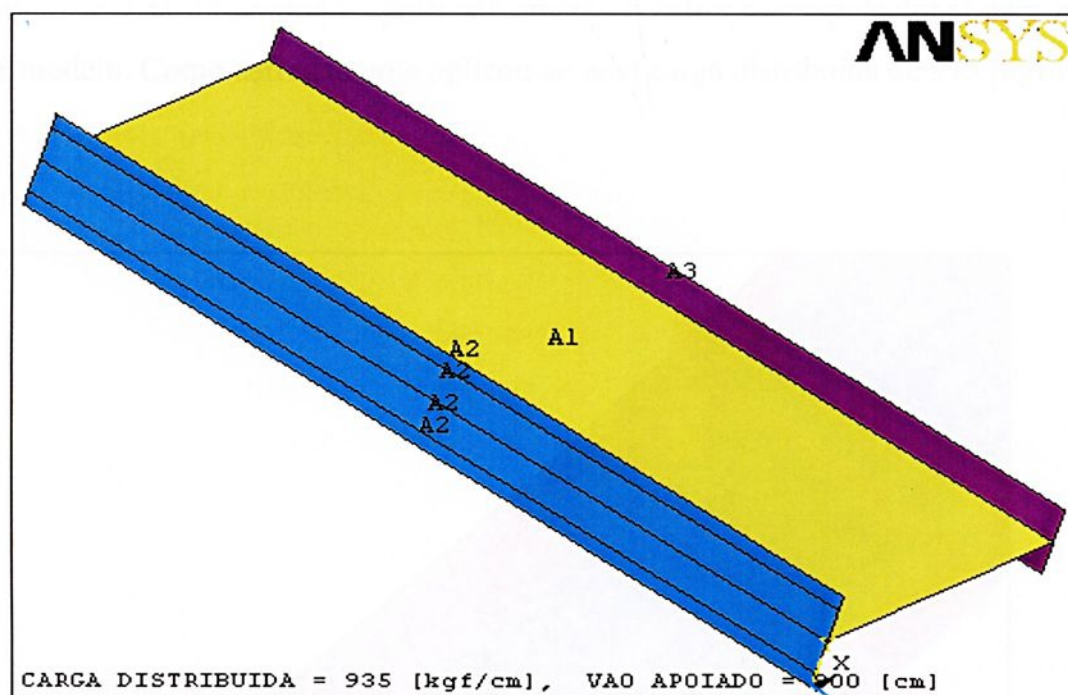


Figura 4.3 – Modelamento da estrutura (áreas).

A espessura é definida pelas constantes reais definidas pela variação da cor na Figura 4.3. Existem três cores diferentes neste modelo, o que indica três diferentes parâmetros para espessuras.

- 5,0 [cm] - alma
- 2,50 [cm] – mesa esquerda
- 5,0 [cm] – mesa direita

4.2.2 Vinculação e Carregamentos

A viga foi modelada com restrição em x nas extremidades (viga bi-apoiada) e simetria no centro (geometria, vinculação e carregamento simétrico) como mostrado na Figura 4.4. Ao aplicar simetria, na verdade se está restringindo a rotação em dois planos e a translação em um eixo, por exemplo, ao aplicar simetria no plano xy se está restringindo a translação no eixo z e a rotação nos planos xz e yz. Ao utilizar este

artifício se está diminuindo significativamente o esforço computacional para resolver este modelo. Como carregamento aplicou-se uma carga distribuída de 935 [kgf/cm].

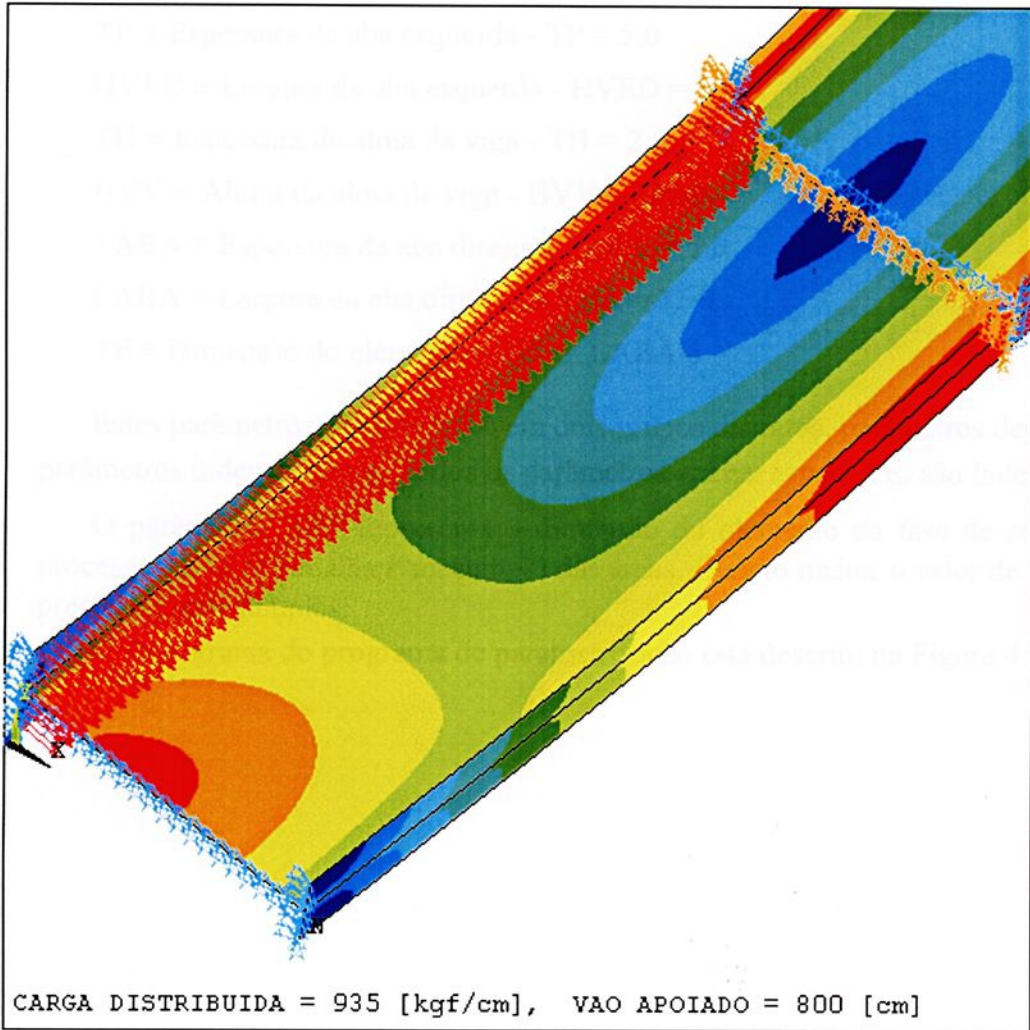


Figura 4.4 – Vinculação e carregamento.

4.2.3 Programa paramétrico

Para construir o modelo paramétrico deve-se inicialmente definir os parâmetros de projeto os quais são: TP, HVED, TH, HVV, TABA, LABA e TE, onde:

TP \equiv Espessura da aba esquerda - TP = 5.0

HVED \equiv Largura da aba esquerda - HVED = 50.0

TH \equiv Espessura da alma da viga - TH = 2.5

HVV \equiv Altura da alma da viga - HVV = 140.0

TABA \equiv Espessura da aba direita - TABA = 5.0

LABA \equiv Largura da aba direita - LABA = 35.0

TE \equiv Dimensão do elemento - TE = LABA/5

Estes parâmetros são divididos em dois grupos distintos, parâmetros dependentes e parâmetros independentes. Todos os parâmetros acima, exceto TE, são independentes.

O parâmetro “TE” representa a dimensão do elemento na fase de se realizar o processo de fazer a malha (“meshing”) das áreas. Quanto menor o valor de TE maior a precisão dos resultados.

O fluxograma do programa de parametrização está descrito na Figura 4.5.

Figura 4.5 Fluxograma do programa de parametrização da viga

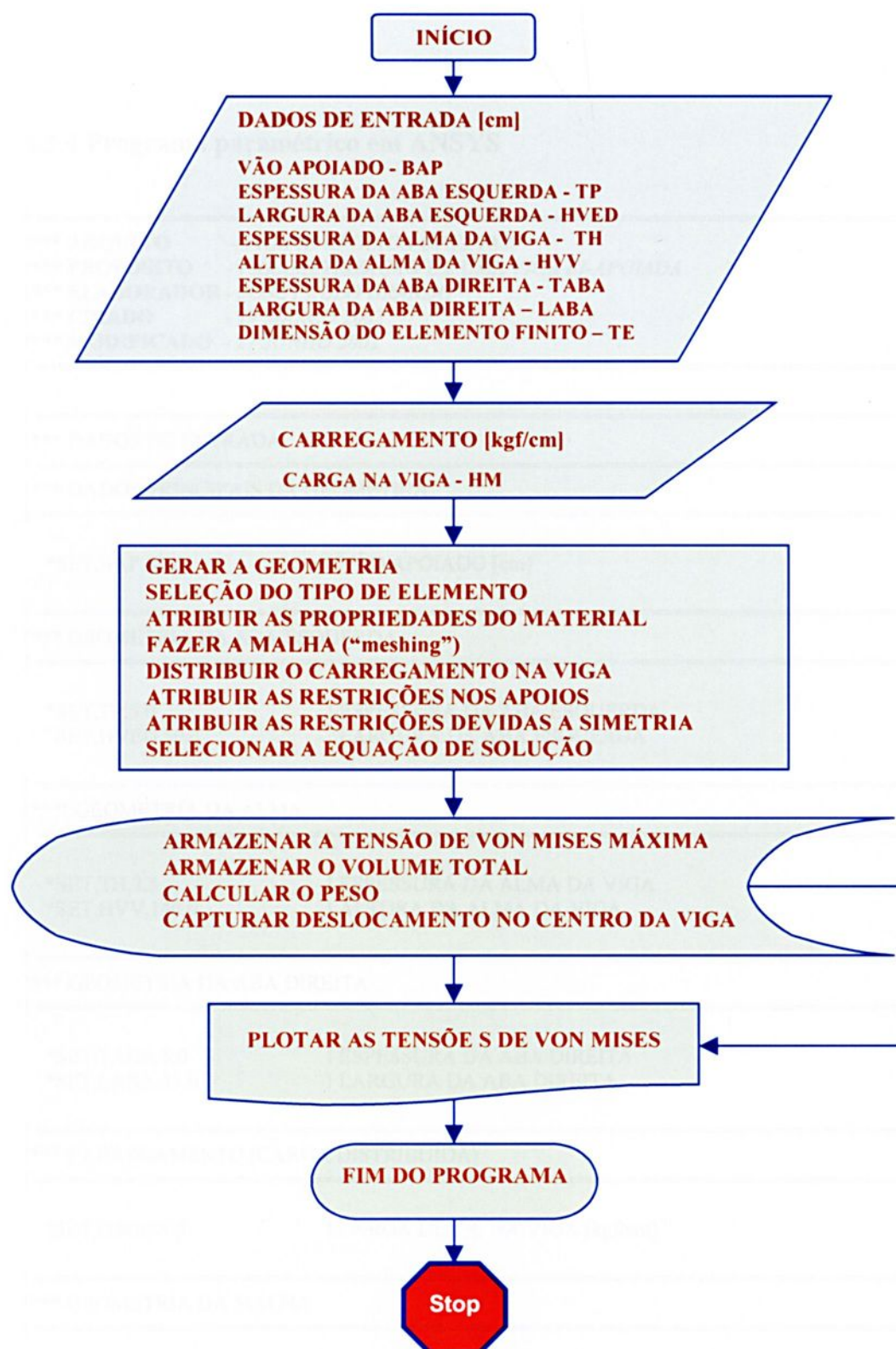


Figura 4.5 – Fluxograma do programa de parametrização da viga.

4.2.4 Programa paramétrico em ANSYS

```

=====
!*** ARQUIVO      - VIGA BI-APOIADA OPT2.TXT
!*** PROPÓSITO   - PARAMETRIZAÇÃO DE UMA VIGA BI-APOIADA
!*** ELABORADOR  - JOSÉ PAULO GRANDO
!*** CRIADO      - 19 MARÇO 2002
!*** MODIFICADO  - 27 JUNHO 2002
=====

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

*SET,BAP,800          ! VÃO APOIADO [cm]

!
=====
!*** GEOMETRIA DA ABA ESQUERDA
!
=====

*SET,TP,5.0          ! ESPESSURA DA ABA ESQUERDA
*SET,HVED,50.0       ! LARGURA DA ABA ESQUERDA

!
=====
!***! GEOMETRIA DA ALMA
!
=====

*SET,TH,2.5          ! ESPESSURA DA ALMA DA VIGA
*SET,HVV,140.0       ! ALTURA DA ALMA DA VIGA

!
=====
!*** GEOMETRIA DA ABA DIREITA
!
=====

*SET,TABA,5.0        ! ESPESSURA DA ABA DIREITA
*SET,LABA,35.0       ! LARGURA DA ABA DIREITA

!
=====
!*** CARREGAMENTO (CARGA DISTRIBUÍDA)
!
=====

*SET,HM,935.0        ! CARGA DISTR. NA VIGA [kgf/cm]

!
=====
!*** GEOMETRIA DA MALHA
!
=====

*SET,TE,LABA/5       ! DIMENSÃO DO ELEMENTO FINITO

!
=====
!*** GERAÇÃO DA GEOMETRIA
!
=====

NHB=1
/PREP7

```

/TITLE,CARGA DISTRIBUIDA = %HM% [kgf/cm], VAO APOIADO = %BAP% [cm]

!=====
!*** GERAÇÃO DA METADE DA VIGA (REFLECT)
!=====

/VIEW, 1, 1, 1, 1
/ANG, 1
APLOT
CSYS, 4
WPROT, , 90
WPOFF, , , -HVED/2
RECT, 0, HVV, 0, -BAP/2 ! ALMA DA VIGA
WPRO, , , -90.000000
RECT, LABA/2, HVED/2, 0, -BAP/2, ! ABA ESQ INFERIOR À ABA DIR
RECT, 0, LABA/2, 0, -BAP/2, ! ABA ESQ NA ALTURA INF DA ABA DIR
RECT, 0, -LABA/2, 0, -BAP/2, ! ABA ESQ NA ALTURA SUP DA ABA DIR
RECT, -LABA/2, -HVED/2, 0, -BAP/2, ! ABA ESQ SUPERIOR À ABA DIR
WPOFF, , , -(HVV)
RECTNG, 0, LABA/2, 0, -BAP/2, ! PARTE INFERIOR DA ABA DIR
RECTNG, 0, -LABA/2, 0, -BAP/2, ! PARTE SUPERIOR DA ABA DIR
NUMMRG, KP, , , , LOW

!=====
!*** CRIAR ENTIDADE ÁREA DAS ABAS
!=====

WPCSYS, -1, 0
ALLSEL
NUMMRG, KP, , , , LOW
AGLUE, ALL
/AUTO, 1
/REP
APLOT

!=====
!*** SELEÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO E SUAS REAIS CONSTANTES
!=====

ET, 1, SHELL63
R, 1, TH, , , , ,
R, 2, TP, , , , ,
R, 3, TABA, , , , ,

!=====
!*** PROPRIEDADES DO MATERIAL
!=====

MPTEMP, , , , , , , ,
MPTEMP, 1, 0
MPDATA, EX, 1, , 2.1E6
MPDATA, PRXY, 1, , , 3

!=====
!*** MALHA DA ABA ESQUERDA
!=====

AGLUE, ALL
ASEL, S, LOC, X, +.1, -.1



```

TYPE,1
MAT,1
REAL,2
ESYS,0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,
AMESH,ALL
ESLA,S
CM,PARM,ELEM
ALLSEL

```

```

=====
!*** MALHA DA ABA DIREITA
=====

```

```

ASEL,S,LOC,X,+HVV-.1,+HVV+.1
TYPE,1
MAT,1
REAL,3
ESYS,0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,
AMESH,ALL
ESLA,S
CM,ABAS,ELEM
ALLSEL

```

```

=====
!*** MALHA DA ALMA
=====

```

```

WPCSYS,-1,0
CSYS,4
ASEL,U,REAL,,2,8
WPOFF,,HVED/2,
ASEL,R,LOC,Y,-.1,+.1
TYPE,1
MAT,1
REAL,1
ESYS,0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,
AMESH,ALL
ESLA,S
CM,VHORZ,ELEM
ALLSEL

```

```

=====
!*** CARGA NA VIGA
=====

```

```

/SOLU

```

```

=====
!*** PRESSÃO DISTRIBUÍDA NA ABA ESQUERDA
=====

```

```

ASEL,S,LOC,X,+.1,-.1          ! SELECIONAR ABA ESQUERDA
ASEL,R,LOC,Z,0,-BAP/2        ! MEIA ABA ESQ (REFLECT)

```

```

ASEL,R,LOC,Y,-HVED/2,HVED/2    ! SELECIONA ABA ESQUERDA
ESLA,S
SFGRAD,PRES, ,Y, ,+0.000,
SFE,ALL,1,PRES, ,-HM/HVED, , ,

```

```

=====
!*** RESTRIÇÃO NO APOIO
=====

```

```

LSEL,S,LOC,Z,-.1,.1    ! Seleciona a extremidade da viga (3 linhas)
DL,ALL,,UX,
DL,ALL,,UY,
ALLSEL

```

```

=====
!*** RESTRIÇÃO DEVIDA A SIMETRIA
=====

```

```

ASEL,U,LOC,Z,-BAP/2+.1,-BAP/2-.1 ! Seleciona as linhas da simetria
ASEL,INVE
DA,ALL,SYMM
ALLSEL
LSEL,U,LOC,Z,-BAP/2+.1,-BAP/2-.1
LSEL,INVE
DL,ALL, ,ROTY,
DL,ALL, ,ROTX,
DL,ALL, ,UZ,
ALLSEL

```

```

=====
!*** SELEÇÃO DA EQUAÇÃO DE SOLUÇÃO
=====

```

```

ALLSEL
EQSLV,PCG,1E-7
ALLSEL
SOLVE

```

```

=====
!*** VISUALIZAÇÃO DO MODELO NA TELA
=====

```

```

/POST1
/EFACE,4
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
RSYS,0
CSYS,0
/EXPAND,2,RECT,HALF,,,-BAP/2, ,RECT,FULL,,,, ,RECT,FULL,,,,

```

```

=====
!*** RESULTADOS
=====
!*** PLOTA TENSÕES DE VON MISES
=====

```

```

PLNSOL,S,EQV,0,1

```

```
!=====  
!*** ARMAZENA RESULTADOS EM PARÂMETROS  
!=====  
  
!=====  
!*** ARMAZENA A TENSÃO DE COMPARAÇÃO MÁXIMA NO PARÂMETRO SMAX  
!=====  
  
NSORT,S,EQV  
*GET,SMAX,SORT,,MAX  
  
!=====  
!*** ARMAZENA O VOLUME TOTAL NO PARÂMETRO "VOLU" E CALCULA O PESO  
!=====  
  
ETABLE,EVOL,VOLU  
SSUM  
*GET,VTOT,SSUM,,ITEM,EVOL           ! VTOT = VOLUME TOTAL  
PESO=2*VTOT*0.00785  
  
!=====  
!*** CAPTURA DESLOCAMENTO EM X DO NÓ NO CENTRO DA VIGA  
!=====  
  
NODEF=NODE(0,HVED,-BAP/2)           ! NOMEIA NÓ NO CENTRO DA VIGA  
*GET,DEFX,NODE,NODEF,U,X !CAPTURA O DESLOCAMENTO EM X NO CENTRO  
  
!=====  
!*** NOTA NA TELA MOSTRANDO O PESO DA VIGA  
!=====  
  
*MSG,UI,'PESO','TOTAL=',PESO,'[kgf]'  
%C %C %I %C  
  
!=====  
!*** FIM DO PROGRAMA DE PARAMETRIZAÇÃO DA VIGA BI-APOIADA  
!=====
```

Após executar o programa de parametrização, obtém-se o seguinte resultado na tela:

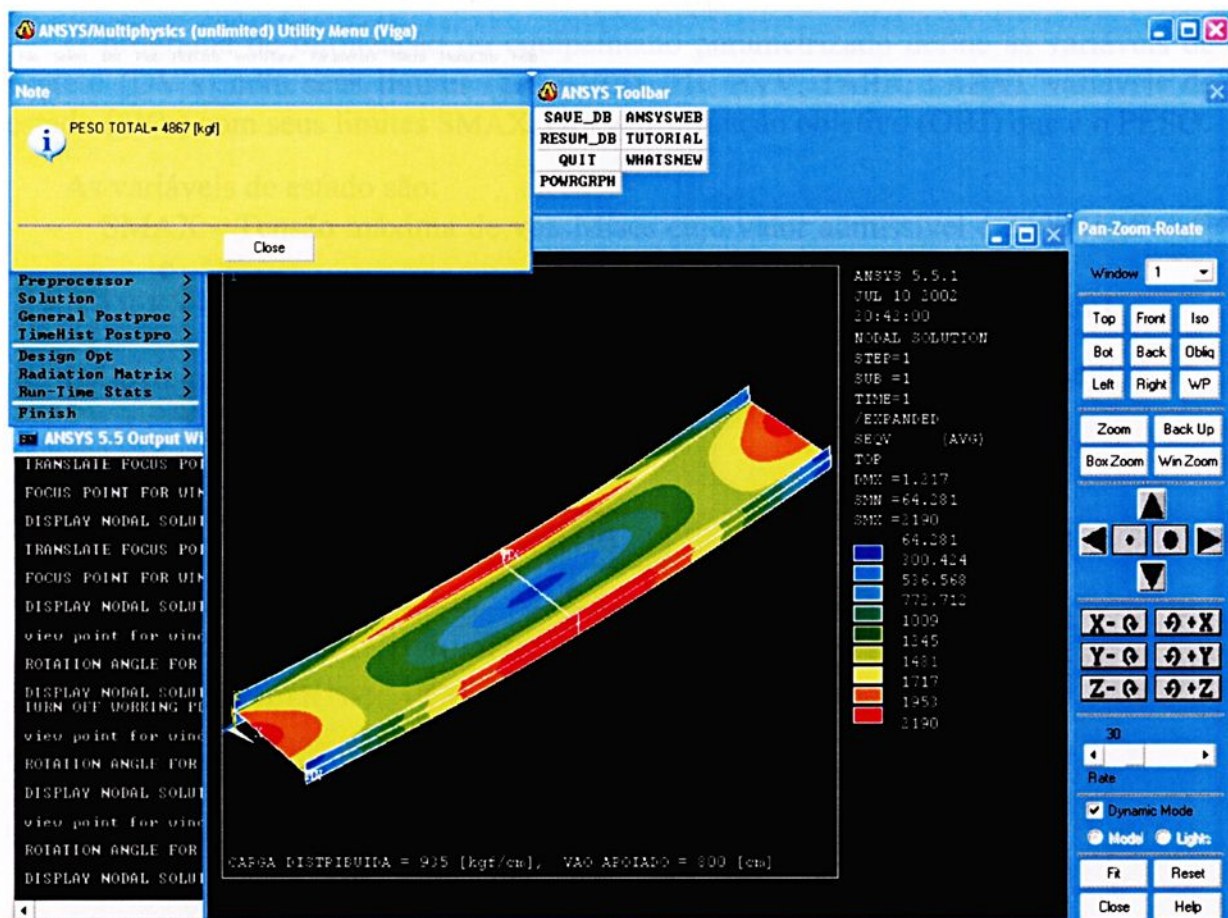


Figura 4.6 – Tela de saída do programa de parametrização.

Figura 4.7 – Diagrama de parametrização da otimização de peso.

4.3 OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DA VIGA

4.3.1 Programa de otimização

O programa de otimização do equipamento parametrizado define as variáveis de projeto (DV's) com seus limites (TP, HVED, TH, HVV, TABA, LABA), variáveis de estado (SV's) com seus limites SMAX, DEFX, e a função objetivo (OBJ) que é o PESO.

As variáveis de estado são:

- SMAX - Tensão máxima de von Mises cujo valor admissível é 2400 [kgf/cm²]
- e
- DEFX – Deslocamento (flecha máxima) cujo valor admissível é 0,3 [cm].

O fluxograma do programa de otimização está descrito abaixo na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Fluxograma do programa de otimização da viga.

4.3.2 Programa de otimização em ANSYS

```

=====
!*** ARQUIVO      - VigaBi_ApoiadaOpt2_OPT.Txt
!*** PROPÓSITO   - OTIMIZAÇÃO DE UMA VIGA BI-APOIADA
!*** ELABORADOR  - JOSÉ PAULO GRANDO
!*** CRIADO      - 20 JUNHO 2002
!*** MODIFICADO  - 28 JUNHO 2002
=====

!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DO ARQUIVO DE ANÁLISE
!=====

/OPT
OPANL,VigaBi_ApoiadaOpt2,txt,C:\AnsysTemp

!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO
!=====

OPVAR,TP,DV,2.5,5.0      ! ESPESSURA DA ABA ESQUERDA
OPVAR,HVED,DV,46,56     ! LARGURA DA ABA ESQUERDA
OPVAR,TH,DV,1.9,2.5     ! ESPESSURA DA ALMA DA VIGA
OPVAR,HVV,DV,120,150    ! ALTURA DA ALMA DA VIGA
OPVAR,TABA,DV,2.5,5.0   ! ESPESSURA DA ABA DIREITA
OPVAR,LABA,DV,25,45     ! LARGURA DA ABA DIREITA

!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTADO
!=====

OPVAR,SMAX,SV,,2400,001
OPVAR,DEFX,SV,,0.3,0.001

!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO
!=====

OPVAR,PESO,OBJ

!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO
!=====

OPTYPE,SUBP
OPSUBP,12,2
OPKEEP,ON

!=====
!*** EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO
!=====

OPSAVE,VIGA1,OPT0

```



OPEXE

```
!=====  
!*** VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS  
!=====
```

OPLIST
PLVAROPT,SMAX
PLVAROPT,VTOT
FINISH

```
!=====  
!*** FIM DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DA VIGA BI-APOIADA  
!=====
```

Após executar o programa de otimização, obtém-se o seguinte resultado na tela:

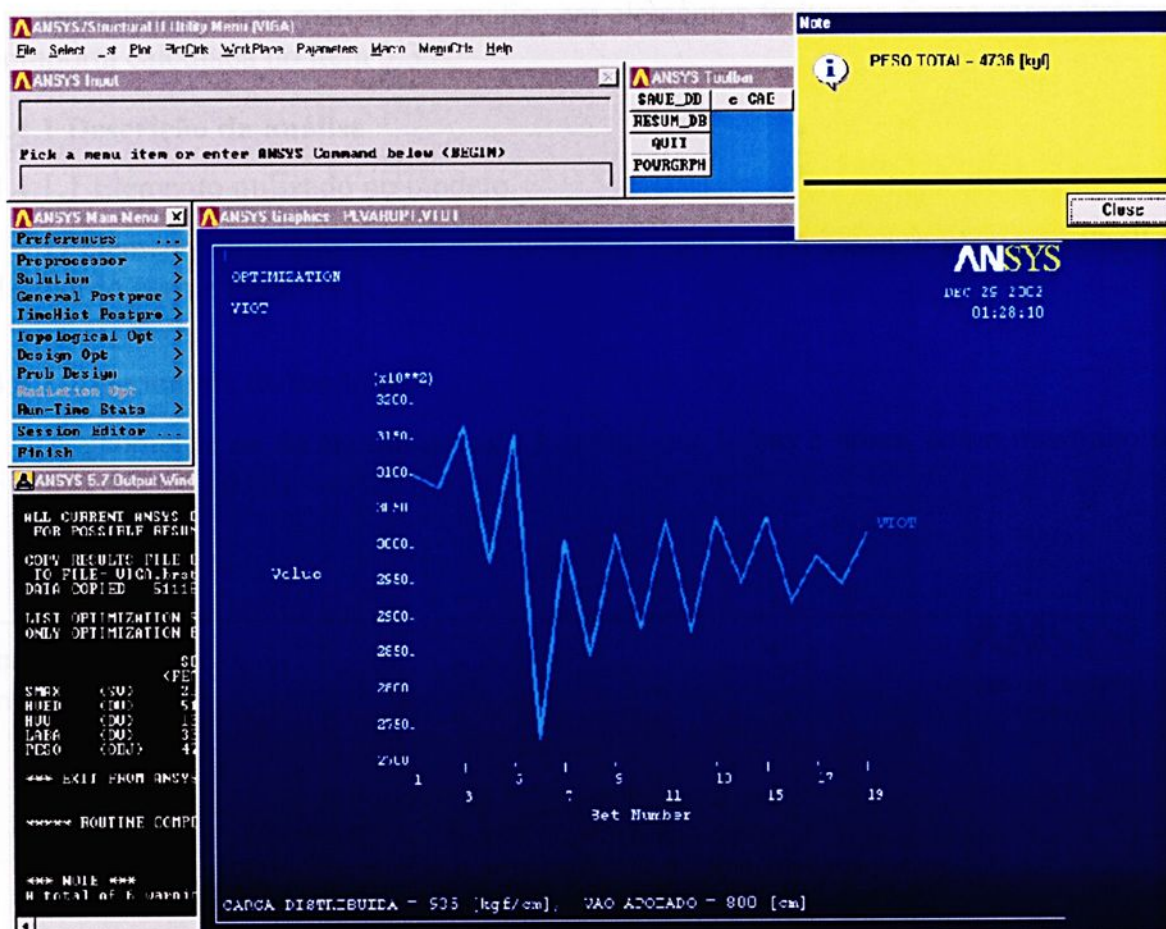


Figura 4.8 – Tela de saída do programa de otimização.

4.4 MODELAGEM PARAMÉTRICA DE UMA COMPORTA PLANA NO ANSYS.

Inicialmente será realizada a análise em elementos finitos na forma paramétrica da comporta calculada no item 3.3.

4.4.1 Descrição da análise

4.4.1.1 Elemento utilizado no modelo

O elemento utilizado para o cálculo numérico é o tipo casca, o elemento Shell 63 de acordo com a Figura 4.1.

4.4.1.2 Geometria do modelo

A geometria na forma numérica é formada por linhas e áreas, como mostrado nas Figuras 4.9 e 4.10.

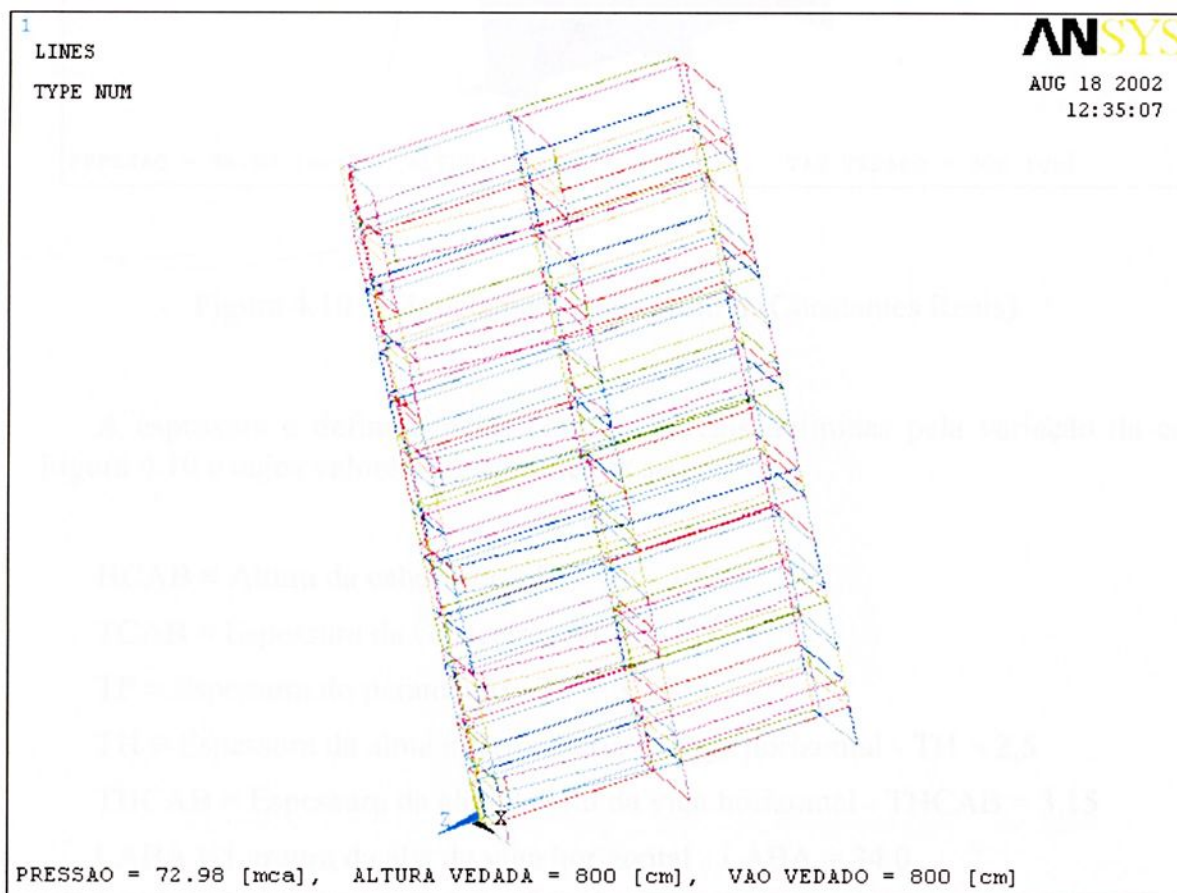


Figura 4.9 – Modelamento da estrutura (linhas).

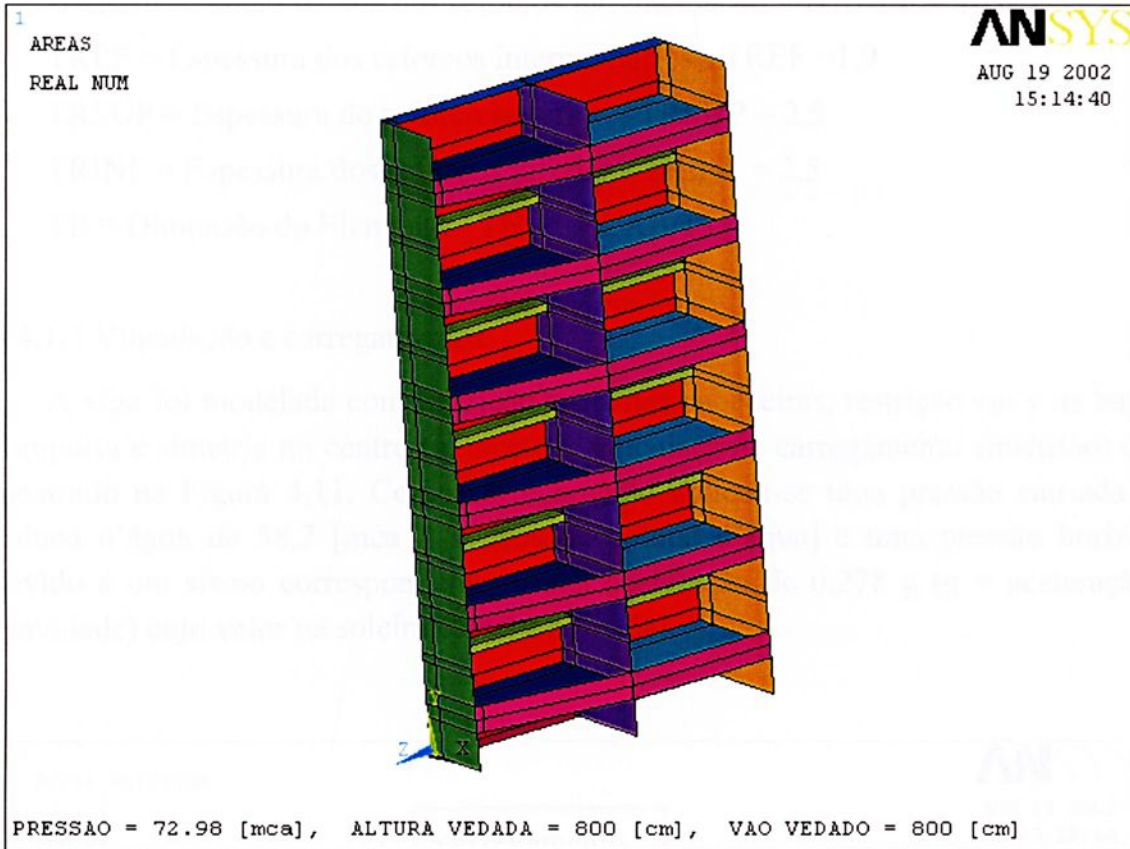


Figura 4.10 – Modelamento da estrutura (Constantes Reais).

A espessura é definida pelas constantes reais definidas pela variação da cor na Figura 4.10 e cujos valores em centímetros são:

HCAB \equiv Altura da cabeceira - HCAB = 100,0

TCAB \equiv Espessura da cabeceira - TCAB = 3,15

TP \equiv Espessura do paramento - TP = 3,15

TH \equiv Espessura da alma intermediária da viga horizontal - TH = 2,5

THCAB \equiv Espessura da alma lateral da viga horizontal - THCAB = 3,15

LABA \equiv Largura da aba da viga horizontal - LABA = 34,0

TABA \equiv Espessura da aba da viga horizontal - TABA = 5,0

HVV \equiv Altura da alma da viga vertical - HVV = 140,0

TV \equiv Espessura da alma da viga vertical - TV = 1,9

HREF \equiv Altura da alma dos reforços - HREF = 25,0

HAREF \equiv Altura da aba dos reforços intermediários – HAREF = 10,0

TREF \equiv Espessura dos reforços intermediários - TREF = 1,9

TRSUP \equiv Espessura do reforço superior – TRSUP = 2,5

TRINF \equiv Espessura dos reforços inferior - TRINF = 2,5

TE \equiv Dimensão do Elemento - TE = HCAB/15

4.4.1.3 Vinculação e carregamentos

A viga foi modelada com restrição em x nas cabeceiras, restrição em y na base da comporta e simetria no centro (geometria, vinculação e carregamento simétrico) como mostrado na Figura 4.11. Como carregamento aplicou-se uma pressão causada pela coluna d'água de 58,7 [mca \equiv metros de coluna d'água] e uma pressão horizontal devido a um sismo correspondente a uma aceleração de 0,278 g (g \equiv aceleração da gravidade) cujo valor na soleira é de 14,28 [mca].

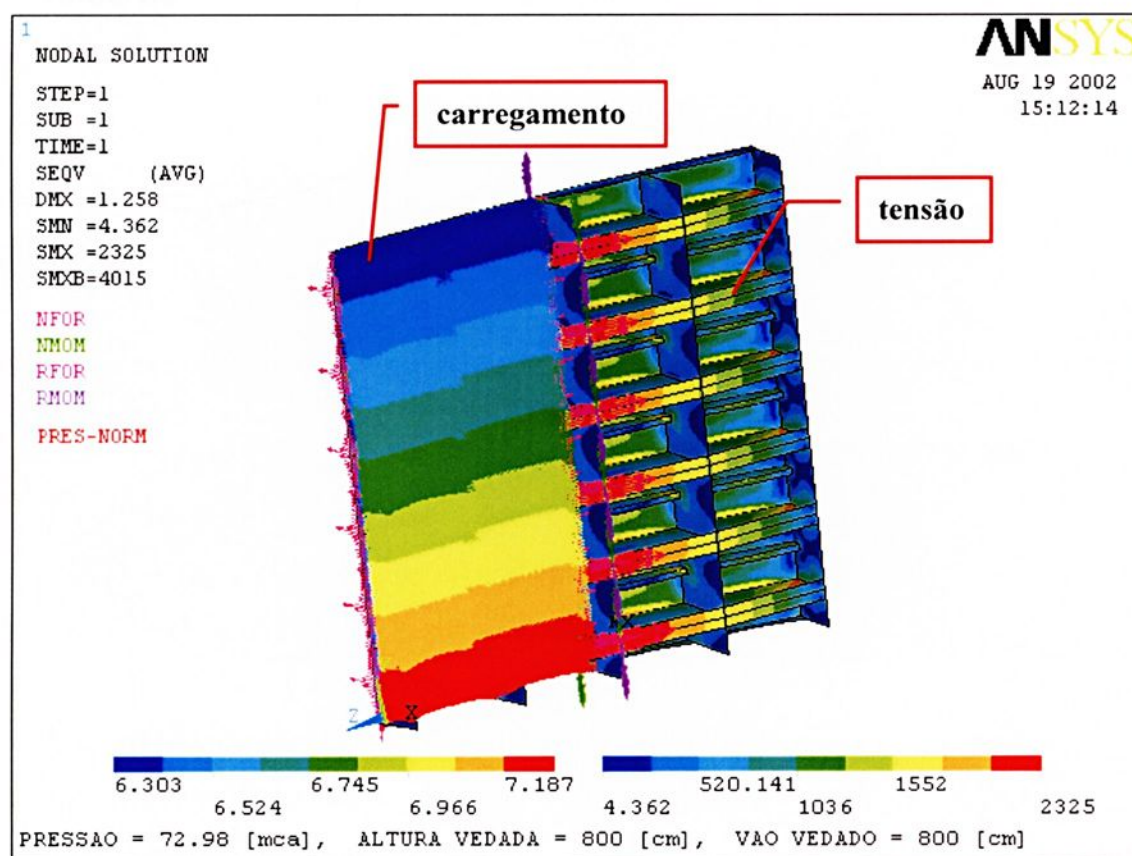


Figura 4.11 – Vinculação e carregamento.

4.4.1.4 Programa paramétrico

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

HCAB, TCAB, TP, TH, THCAB, LABA, TABA, HVV, TV, HREF, HAREF, TREF, TRSUP, TRINF e TE.

Estes parâmetros são divididos em dois grupos distintos, parâmetros dependentes e parâmetros independentes. Todos os parâmetros acima são independentes exceto TE que é dependente.

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 abaixo na Figura 4.12 e o programa paramétrico em Ansys se encontra no Anexo B..

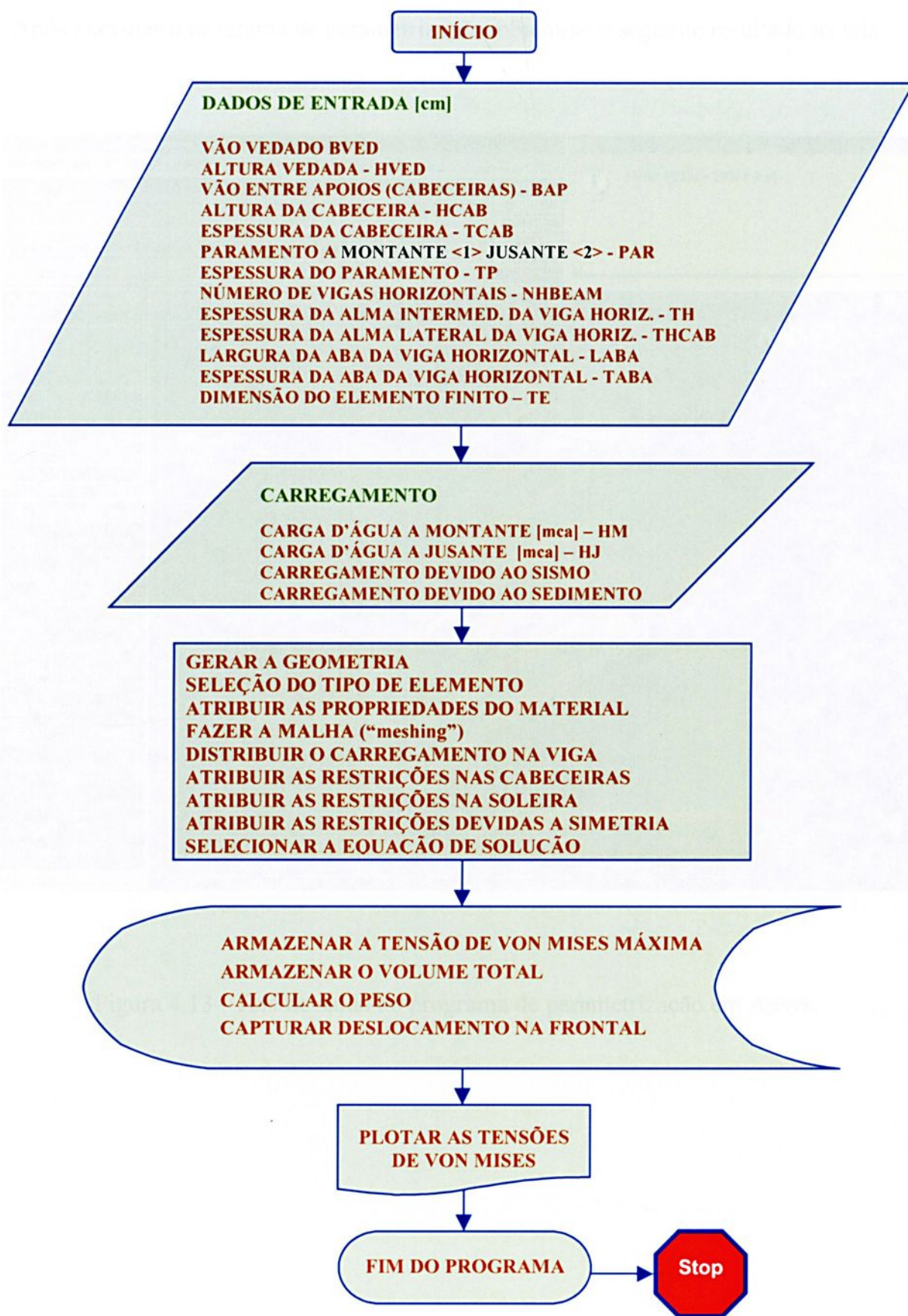


Figura 4.12 – Fluxograma do programa de parametrização da comporta.

Após executar o programa de parametrização, obtém-se o seguinte resultado na tela:

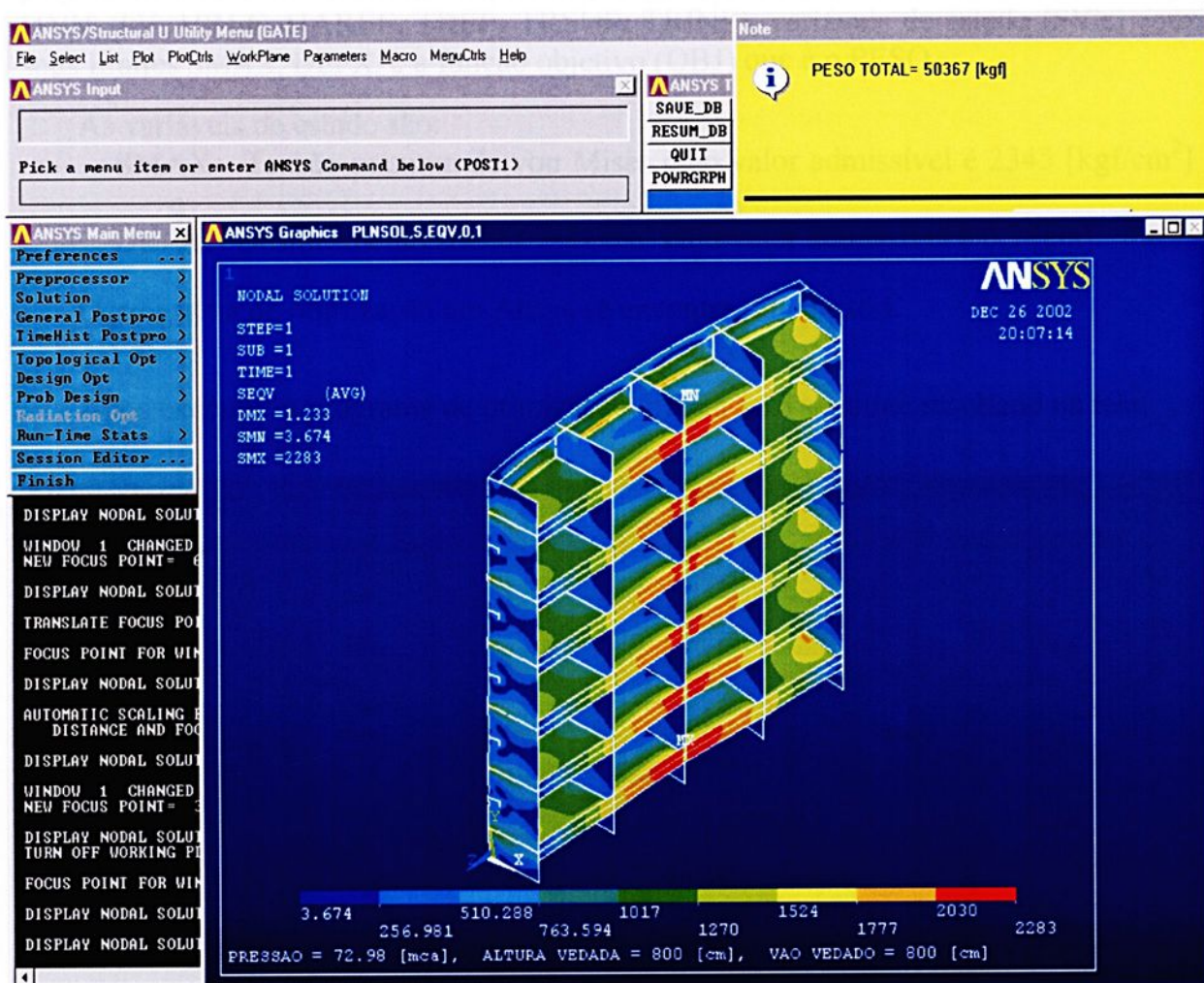


Figura 4.13– Tela de saída do programa de parametrização em Ansys.

4.5 OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DA COMPORTA

O programa de otimização do equipamento parametrizado define as variáveis de projeto (DV's) com seus limites (HCAB, TCAB, TP, TH, THCAB, LABA, TABA, HVV, TV, HREF, HAREF, TREF, TRSUP, TRINF), variáveis de estado (SV's) com seus limites SMAX, DEFX, e a função objetivo (OBJ) que é o PESO.

As variáveis de estado são:

- SMAX - Tensão máxima de von Mises cujo valor admissível é $2345 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$
- DEFX – Deslocamento (flecha máxima) cujo valor admissível é $0,3 \text{ [cm]}$.

O programa de otimização em Ansys se encontra no Anexo C.

Após executar o programa de otimização, obtém-se o seguinte resultado na tela:

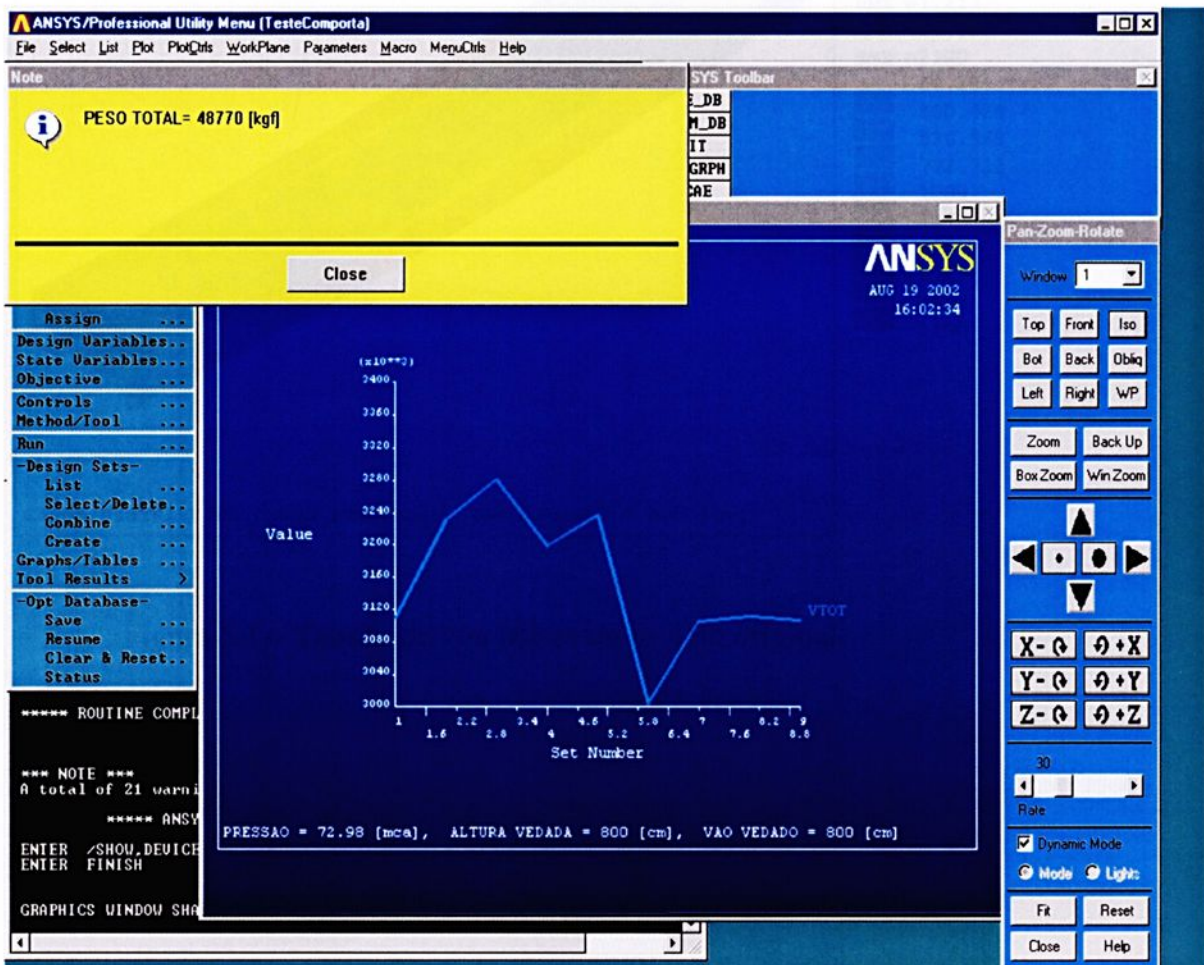


Figura 4.14– Tela de saída do programa de otimização da comporta.

CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DA VIGA BI-APOIADA

Com a parametrização do projeto original obtemos as seguintes tensões de von Mises:

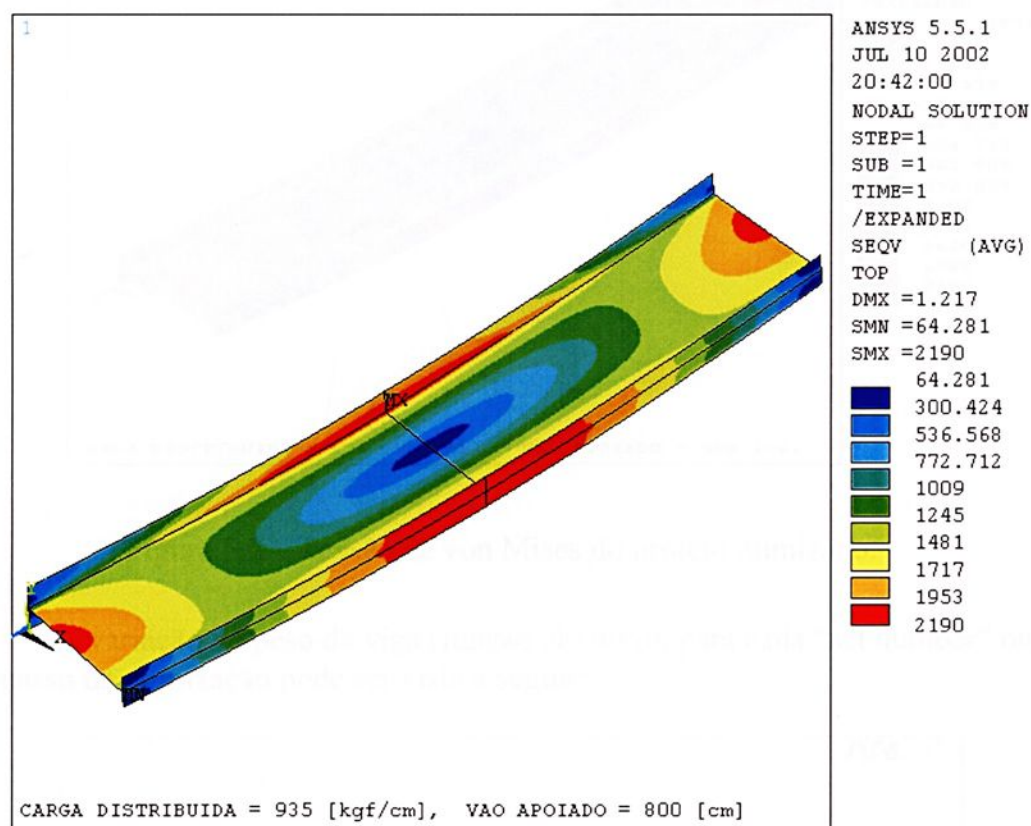


Figura 5.1 – Tensão de von Mises do projeto original.

Após processo de otimização obtemos as seguintes tensões de von Mises:

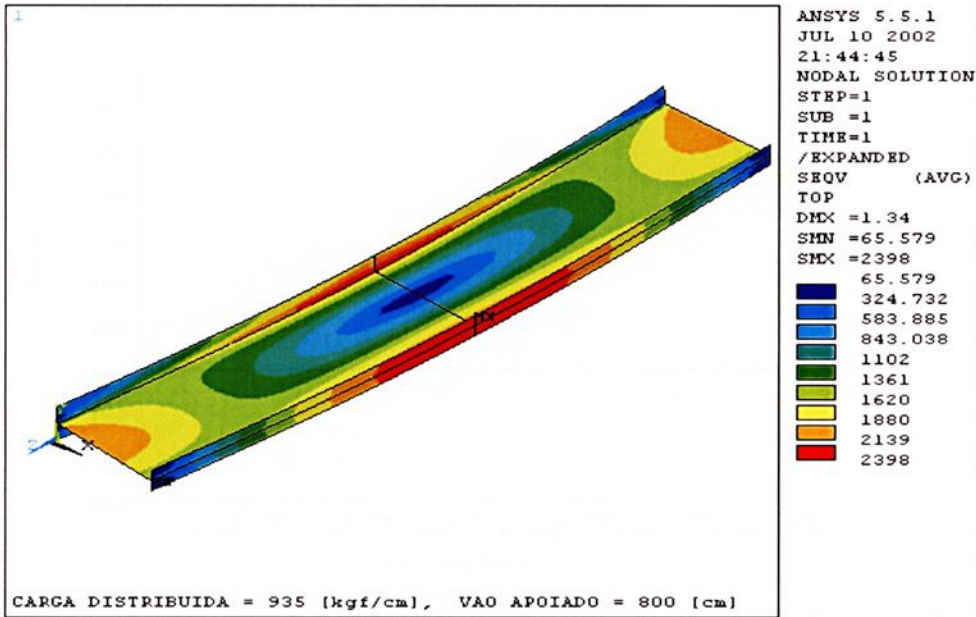


Figura 5.2 – Tensão de von Mises do projeto otimizado.

A variação do peso da viga (função objetivo), para cada “set number” ou seja, cada passo da otimização pode ser vista a seguir:

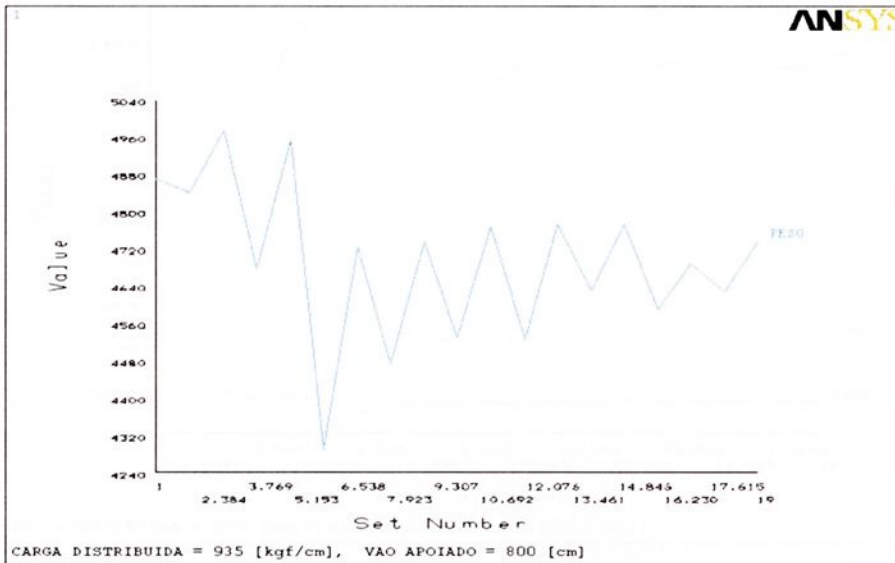


Figura 5.3 – Gráfico do peso da viga x “set number”.

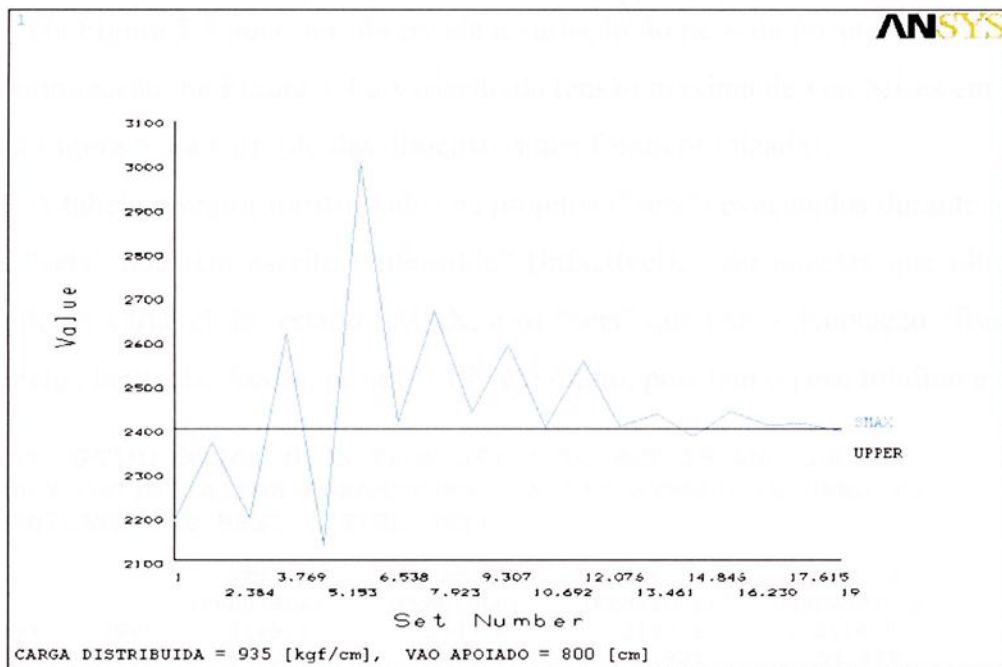


Figura 5.4 – Gráfico de tensão máxima de von Mises x “set number”.

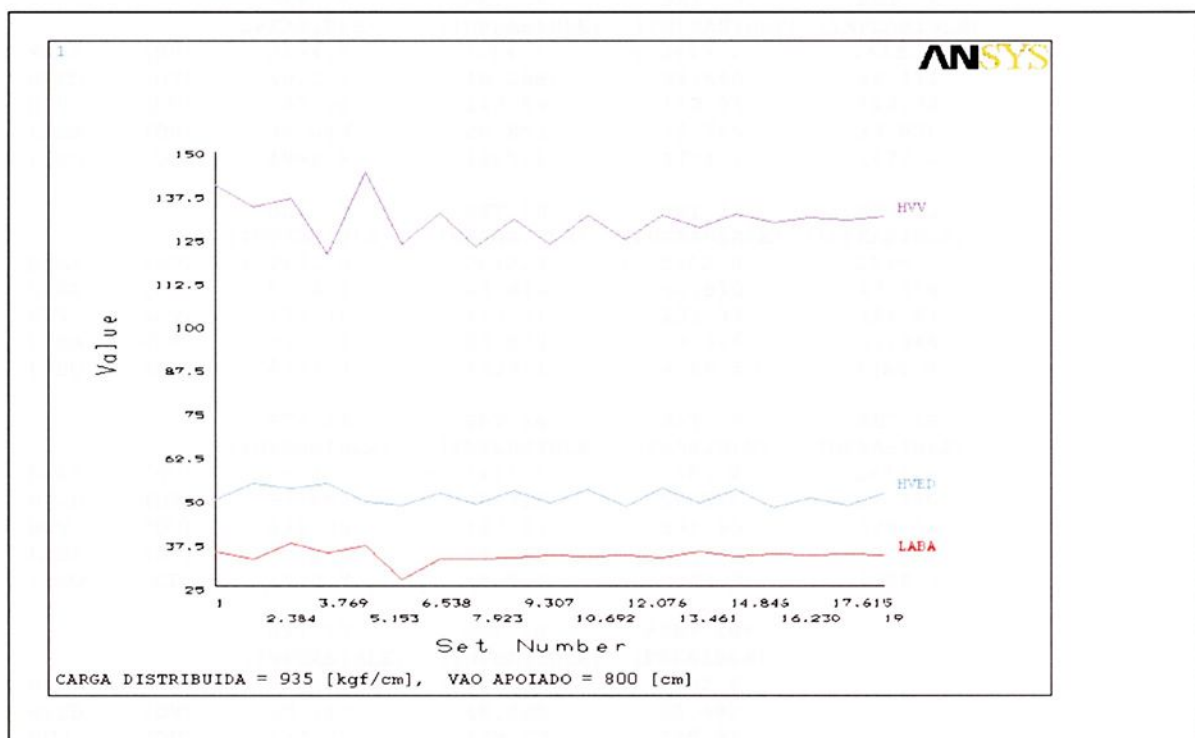


Figura 5.5 – Gráfico das dimensões x “set number”.

Na Figura 5.3 pode ser observada a variação do peso da estrutura durante o processo de otimização, na Figura 5.4 a variação da tensão máxima de von Mises em cada projeto e na Figura 5.5 a variação das dimensões que foram otimizadas.

A tabela a seguir mostra todos os projetos (“sets”) executados durante a otimização. Os “sets” que têm escrito “infeasible” (infactível), são aqueles que ultrapassaram o limite da variável de estado SMÁX, e os “sets” que têm a denotação “feasible” são os projetos factíveis. Assim, projeto “19” é o ótimo, pois tem o peso mínimo e é factível.

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 19 AND SHOW ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS. (A "*" SYMBOL IS USED TO INDICATE THE BEST LISTED SET)

		SET 1 (FEASIBLE)	SET 2 (FEASIBLE)	SET 3 (FEASIBLE)	SET 4 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	2189.6	2367.6	2197.1	> 2616.9
HVED	(DV)	50.000	54.472	52.924	54.478
HVV	(DV)	140.00	133.72	136.13	120.10
LABA	(DV)	35.000	32.760	37.358	34.382
PESO	(OBJ)	4867.0	4838.4	4972.0	4675.8
		SET 5 (FEASIBLE)	SET 6 (INFEASIBLE)	SET 7 (INFEASIBLE)	SET 8 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	2134.8	> 3004.3	> 2413.2	> 2665.7
HVED	(DV)	49.203	48.298	51.540	48.411
HVV	(DV)	143.78	122.89	132.23	122.28
LABA	(DV)	36.643	26.853	32.765	32.876
PESO	(OBJ)	4952.9	4289.1	4723.2	4472.2
		SET 9 (INFEASIBLE)	SET 10 (INFEASIBLE)	SET 11 (INFEASIBLE)	SET 12 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	> 2435.8	> 2592.9	> 2402.0	> 2555.2
HVED	(DV)	52.474	48.844	52.810	47.854
HVV	(DV)	130.46	123.11	131.33	124.61
LABA	(DV)	33.051	33.839	33.326	33.946
PESO	(OBJ)	4733.7	4529.1	4766.5	4524.8
		SET 13 (INFEASIBLE)	SET 14 (INFEASIBLE)	SET 15 (FEASIBLE)	SET 16 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	> 2404.3	> 2433.3	2383.2	> 2437.4
HVED	(DV)	53.083	48.715	52.526	47.336
HVV	(DV)	131.26	127.91	131.65	129.32
LABA	(DV)	33.281	34.765	33.615	34.122
PESO	(OBJ)	4772.7	4629.5	4771.7	4588.1
		SET 17 (INFEASIBLE)	SET 18 (INFEASIBLE)	*SET 19* (FEASIBLE)	
SMAX	(SV)	> 2407.6	> 2409.4	2392.8	
HVED	(DV)	50.145	48.000	51.493	
HVV	(DV)	130.72	129.97	130.91	
LABA	(DV)	33.774	34.337	33.868	
PESO	(OBJ)	4687.3	4626.0	4735.6	

Tabela 5.1 – Lista dos projetos otimizados da viga.



5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA VIGA BI-APOIADA

Como pode ser observada na Figura 5.3 a tensão máxima de von Mises ficou abaixo da tensão “SMÁX” que é de 2400 [kgf/cm²].

A Figura 5.5 mostra a variação das dimensões a cada projeto.

Comparando o projeto inicial 1 (“set 1”) e o projeto otimizado 19 (“set 19”) nota-se que o peso de 4867,0 [kgf] foi reduzido para 4735,6 [kgf], isto significa uma redução de 131,4 [kgf] ou seja, aproximadamente 2,7%.

5.3 RESULTADOS DA COMPORTA PLANA

Com a parametrização do projeto original obtemos as seguintes tensões de von Mises:

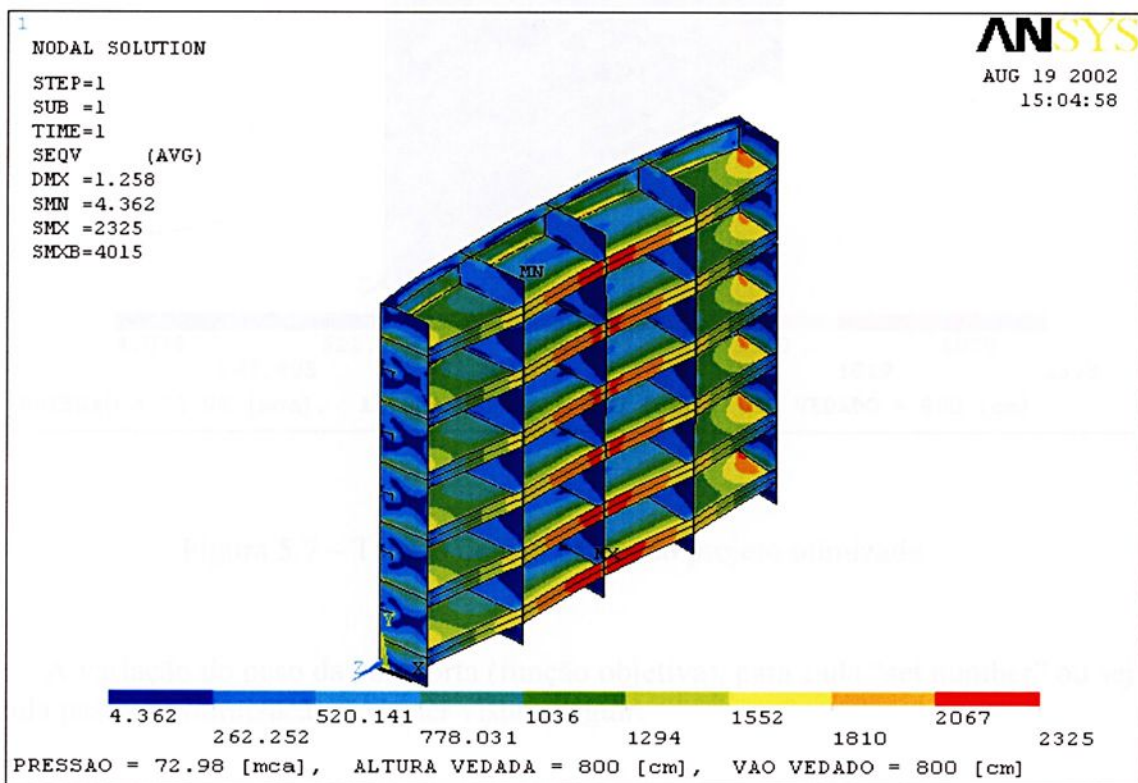


Figura 5.6 – Tensão de von Mises do projeto original.

Após o processo de otimização obtemos os seguintes as seguintes tensões de von Mises:

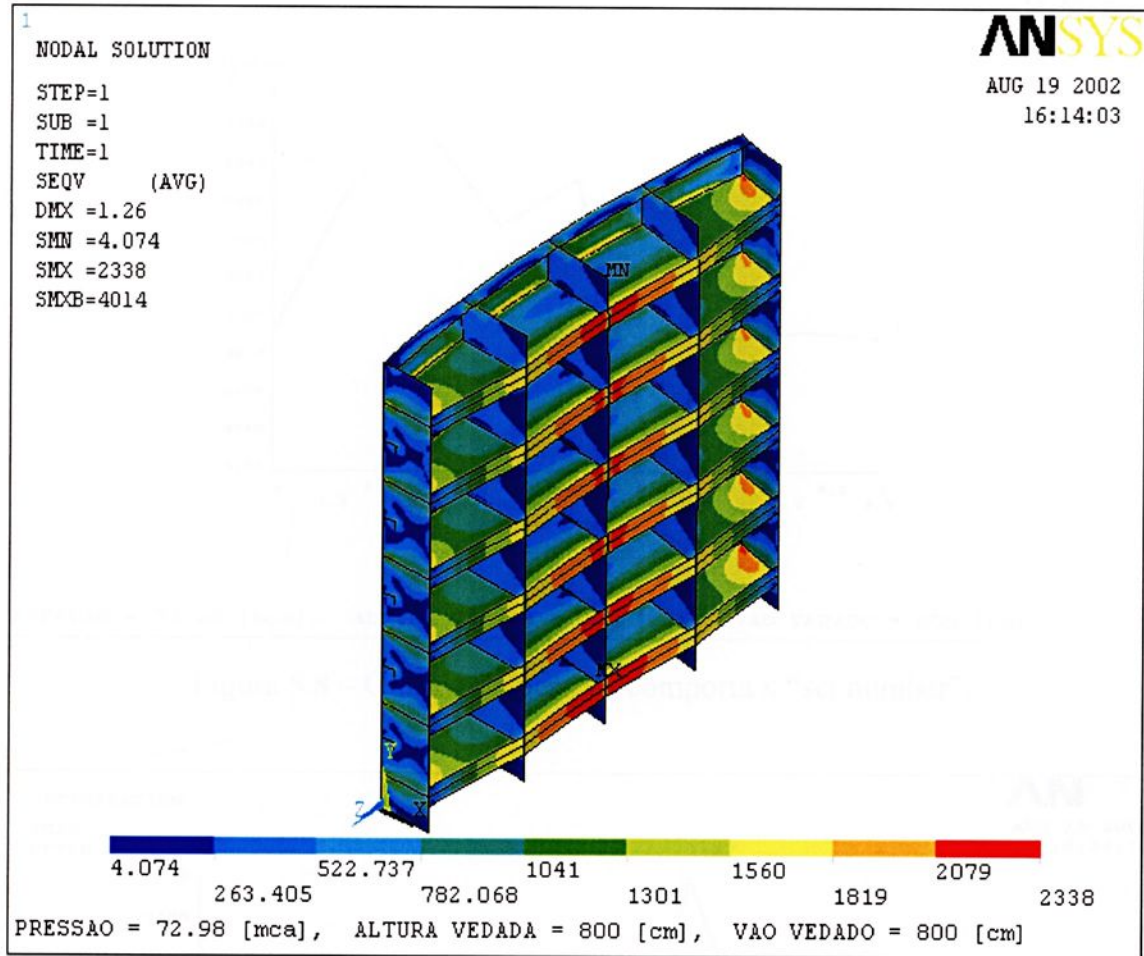


Figura 5.7 – Tensão de von Mises do projeto otimizado.

A variação do peso da comporta (função objetiva), para cada “set number” ou seja cada passo da otimização pode ser vista a seguir:

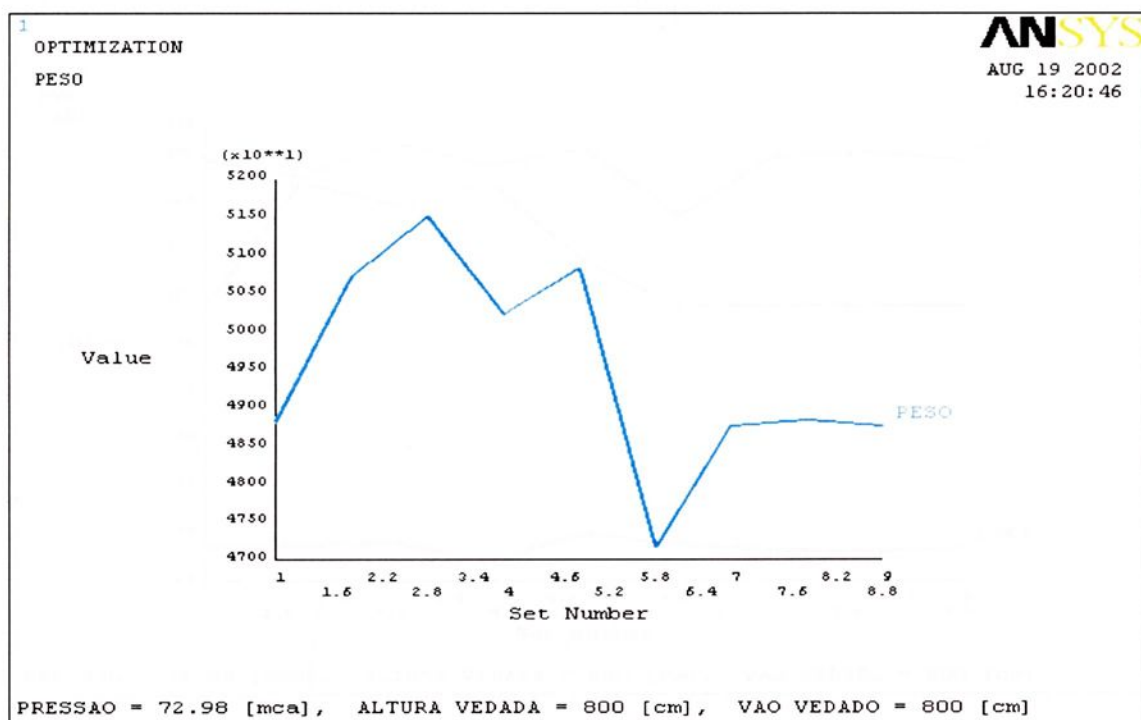


Figura 5.8 – Gráfico do peso da comporta x “set number”.

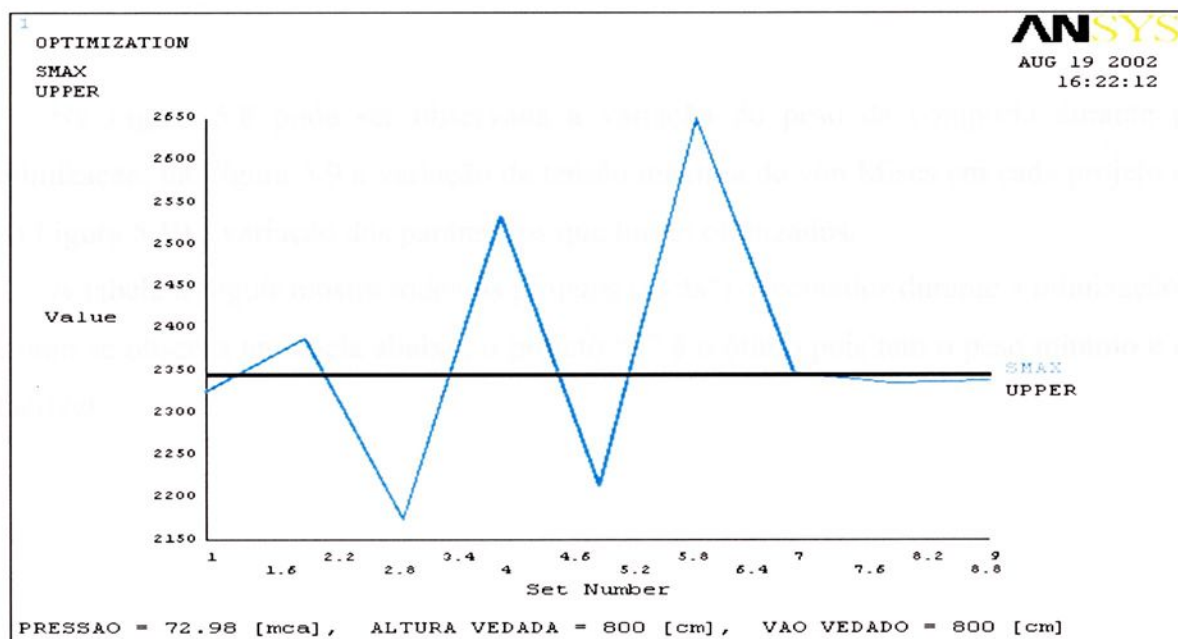


Figura 5.9 – Gráfico de tensão máxima de von Mises x “set number”.

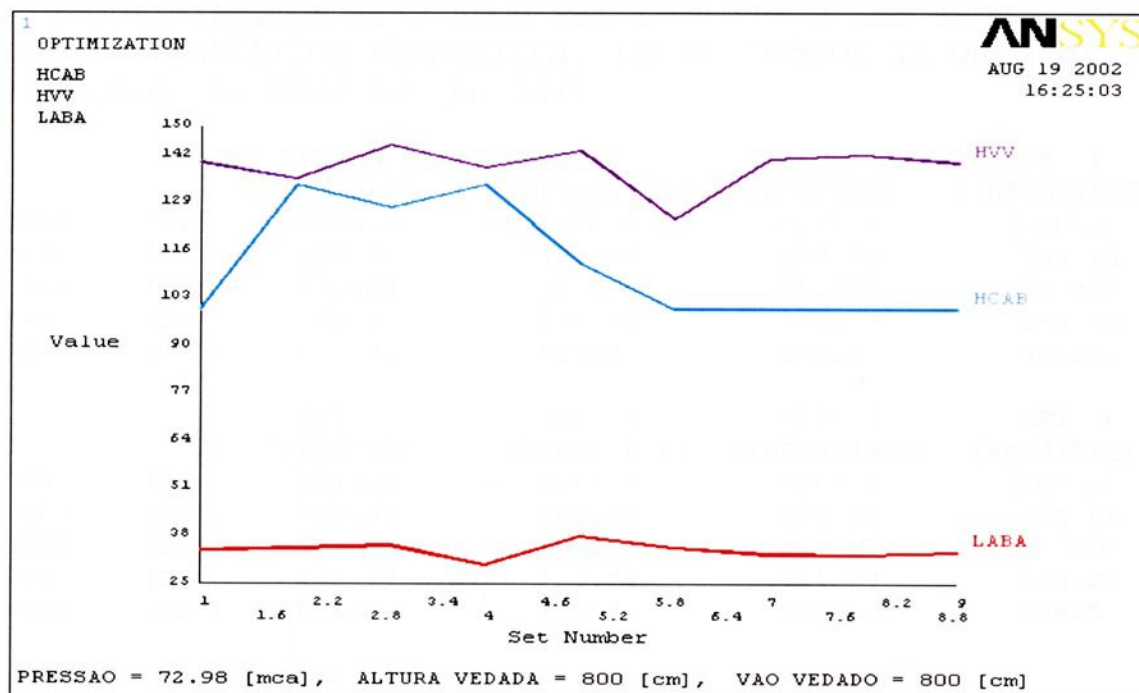


Figura 5.10 – Gráfico dos parâmetros x “set number”.

Na Figura 5.8 pode ser observada a variação do peso da comporta durante a otimização, na Figura 5.9 a variação da tensão máxima de von Mises em cada projeto e na Figura 5.10 a variação dos parâmetros que foram otimizados.

A tabela a seguir mostra todos os projetos (“sets”) executados durante a otimização. Como se observa na tabela abaixo, o projeto “9” é o ótimo pois tem o peso mínimo e é factível.

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 9 AND SHOW ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS. (A "*" SYMBOL IS USED TO INDICATE THE BEST LISTED SET)

		SET 1 (FEASIBLE)	SET 2 (INFEASIBLE)	SET 3 (FEASIBLE)	SET 4 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	2283.8	> 2386.9	2173.7	> 2533.8
HCAB	(DV)	120.00	133.89	127.69	133.91
LABA	(DV)	35.000	34.572	35.376	30.033
HVV	(DV)	140.00	135.52	144.72	138.76
PESO	(OBJ)	50367.	50727.	51514.	50225.

		SET 5 (FEASIBLE)	SET 6 (INFEASIBLE)	SET 7 (INFEASIBLE)	SET 8 (FEASIBLE)
SMAX	(SV)	2212.5	> 2649.3	> 2347.1	2335.2
HCAB	(DV)	112.81	100.06	100.03	100.06
LABA	(DV)	37.927	34.656	33.035	32.770
HVV	(DV)	143.29	124.76	141.07	142.22
PESO	(OBJ)	50829.	47168.	48759.	48845.

		SET 9 (FEASIBLE)
SMAX	(SV)	2338.1
HCAB	(DV)	100.06
LABA	(DV)	33.721
HVV	(DV)	140.00
PESO	(OBJ)	48770.

Tabela 5.2 – Lista dos projetos otimizados da comporta.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA COMPORTA

Como pode ser observada na Figura 5.9 a tensão máxima de von Mises ficou abaixo da tensão "SMÁX" que é de 2345 [kgf/cm²].

A Figura 5.10 mostra a variação dos parâmetros a cada projeto.

Comparando o projeto inicial 1 ("set 1") e o projeto otimizado 9 ("set 9") nota-se que o peso de 50367 [kgf] foi reduzido para 48770 [kgf], isto significa uma redução de 1597 [kgf], ou seja, aproximadamente 3,2%.

	Altura da cabeceira [cm]	Altura da alma [cm]	Largura da aba [cm]	Tensão máxima [kgf/cm ²]	Peso do equipamento [kgf]
Projeto inicial	120	140	35	2284	50367
Projeto otimizado	100	140	33,7	2338	48770

Tabela 5.3 – Tabela comparativa dos projetos inicial e otimizado.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo criar uma ferramenta de engenharia capaz de reduzir tempo e custo de projeto, fabricação e transporte de equipamentos hidromecânicos. De acordo com os resultados obtidos pode-se verificar que os objetivos foram atendidos.

O trabalho foi iniciado desenvolvendo um programa para cálculo de uma viga bi-apoiada a fim de se criar uma geometria que apresenta a mesma concepção básica de uma comporta e cujos resultados podem ser verificados de forma analítica. A apresentação desta etapa visa introduzir o leitor que queira desenvolver um programa nos mesmos moldes já que o programa da parametrização e otimização da comporta é extremamente longo e de difícil compreensão.

Em relação ao exemplo apresentado da comporta, os resultados obtidos em Ansys foram muito próximos do cálculo analítico o que era previsto já que a forma estrutural e o carregamento adotado tornam o cálculo estrutural de fácil determinação. Entretanto, para posicionamento de vigas que não sejam igualmente carregadas não se consegue executar um cálculo analítico eficaz além de não se conseguir identificar pontos de concentração de tensões. Neste caso a otimização da estrutura através do cálculo analítico não se apresenta eficaz e o coeficiente de segurança normalmente adotado é mais alto o que implica em não se obter o peso ótimo da estrutura.

Os resultados do cálculo analítico da comporta comparados com a análise em elementos finitos, demonstram que os resultados estão muito próximos em todas as seções apresentadas embora a análise em elementos finitos mostre alguns pontos de concentração de tensões. Esta capacidade da análise em elementos finitos identificar regiões de concentração de tensões, permite ao engenheiro calculista reforçar ou alterar as reais constantes (espessuras, qualidade do material) para minimizar essas concentrações.

Os programas de parametrização e de otimização da comporta foram executados a partir de uma geometria projetada pelo engenheiro calculista e em aproximadamente



uma hora obteve-se uma redução de 3,2% em peso. A utilização do cálculo analítico como uma ferramenta capaz de determinar uma geometria próxima de uma solução ideal, permite que os programas em elementos finitos mais rapidamente encontrem o projeto ótimo e diminui a possibilidade de se encontrar um mínimo local da função objetivo.

Para se realizar uma análise em elementos finitos sem utilizar o programa paramétrico, além de despender muito tempo, torna a possibilidade de se cometer erros muito grande 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 e otimização em elementos finitos permite:

- 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;
- 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, este trabalho 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.

Este trabalho aborda o equipamento comportas planas e a dissertação citada na segunda referência do anexo “REFERÊNCIAS” 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 e otimização expostos neste trabalho 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.

TABELA - Lista de Materiais com Tensões de Escoamento e Dureza Brinell

Tabela de Materiais utilizados em tabuleiro de comportas			
Materiais	Tensão de escoamento	Tensão de ruptura mínima	Dureza Brinell
	[MPa]	[MPa]	[HB]
ASTM A 283 gr C	205	380	114
ASTM A 285 gr D	230	415	124
ASTM A 285 gr B	185	345	103
ASTM A 285 gr C	205	380	114
ASTM A 516 gr 380	205	380	114
ASTM A 516 gr 415	220	415	124
ASTM A 516 gr 450	240	450	135
ASTM A 516 gr 485	260	485	145
ASTM A 517 gr 70	247	460	138
ASTM A-36	250	400	120
NTU SAR 50	330	500	150
NTU SAR 55	385	520	156
RRst 37.2N	235	340	102
RRst 44.2N	275	410	123
RRst 44.3N	275	410	123
RRst 52.3N até 16 [mm]	353	490	147
RRst 52.3N de 16 a 30 [mm]	343	490	147
RRst 52.3N de 30 a 50 [mm]	334	490	147
ASTM A 572 grau 60	415	520	153

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Steel – structures, reinforcing, pressure vessel, railway** vol.01.04, 2002.

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 de comportas hidráulicas**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 11p.

DESAI, C.S. **Elementary finite element method**, Prentice-Hall, 1979.

DEUTSCHE INSTITUTE NORMEN. **DIN 19704: Hydraulic Steel Structures - Criteria for Design and Calculation**. Berlim, 1976. 16p.

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

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

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.

WICKERT, C., SCHMAUßER, G. **Stahlwasserbau**. Berlim: Springer-Verlag 1971.

BIBLIOGRÁFICA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024**: Numeração progressiva das seções de um documento. Rio de Janeiro: ABNT, Agosto/1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, Agosto/2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sumário. **NBR 6027**: Rio de Janeiro: ABNT, Agosto/1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: Resumos. Rio de Janeiro: ABNT, Maio/1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro: ABNT, Agosto/2002.

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.

BATOZ, J. L., BATHE, K. J., Ho, L. W. **A study of three-node triangular plate bending elements**. International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, pp. 1771-1812, 1980.

BENDSOE, M. P., KIKUCKI, N. **Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp.197-224, 1988.

DEAN, R. G. **Evaluation and development of water wave theories for engineering application**. Prepared for U. S. Army Corp of Engineers, Coastal Engineering Research Center, November, 1974.

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

DVORKIN, E. N., BATHE, K. J. **A continuum mechanics based four-node shell element for general nonlinear analysis**. Engineering Computations, Vol. 1, pp. 77-88, 1984.



DVORKIN, E. N. **On nonlinear finite element analysis of shell structures.** Ph. D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1984.

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

FERREIRA, S. M. S. P., KROEFF, M. S. **Referências bibliográficas de documentos eletrônicos.** Ensaios APB, n.26, 1996.

KISIL, R. **Manual de elaboração de projetos e propostas.** Piracicaba: USP/ESALQ / Fundação W. K. Kellogg, 1995. 110p.

LEITE, J.A. **Metodologia de elaboração de teses.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 122p.

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.

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

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

ROARK, R. J., YOUNG, W. C. **Formulas for stress and strain.** McGraw-Hill, New York, 1975.

SHANES I.H. **Introdução à Mecânica dos Sólidos.** Prentice-Hall, 1975.

TOPPING, B. H. V., ROBINSON, D. J., **Selecting non-linear optimization techniques for structural design.** Eng. Comput., 1984.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Coordenadoria Geral de Biblioteca. Ed. UNESP. **Normas para publicações da UNESP: dissertações e teses.** São Paulo: Ed. UNESP, 1994. v.4

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca. **Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC/USP.** 2. ed. São Carlos: SVBIBL, 1996.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Coordenadoria Geral de Biblioteca. Ed. UNESP. **Normas para publicações da UNESP: referências bibliográficas**. São Paulo: Ed. UNESP, 1994. v.2

VANDERPLAATS, G.N. **Numerical optimization techniques for engineering design with applications**. McGraw Hill Book Co., 1984.

VOGEL, F. **Topological optimization of linear-elastic structures with ANSYS 5.4**. NAFEMS Conference on Topological Optimization, 1997.



ANEXOS

ANEXO A - CÁLCULO ANALÍTICO DE UMA COMPORTA PLANA

ÍNDICE

- A.1 CONDIÇÃO DE CÁLCULO
- A.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS
- A.3 MATERIAIS E TENSÕES ADMISSÍVEIS
- A.4 CÁLCULO DO CARREGAMENTO DEVIDO AO SISMO
- A.5 SELEÇÃO DO CASO DE CARGA DE CÁLCULO
- A.6 DISTRIBUIÇÃO DE VIGAS PARA IGUAL CARREGAMENTO HIDROSTÁTICO
- A.7 CÁLCULO DA LARGURA COLABORANTE - VIGA INFERIOR
- A.8 PROPRIEDADE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA
- A.9 TENSÕES DE PLACA
- A.10 TENSÕES NA VIGA INFERIOR OU VIGA 1
- A.11 TENSÕES NOS REFORÇOS HORIZONTAIS
- A.12 TENSÕES DE COMPARAÇÃO
- A.13 FLECHA NO CENTRO DA VIGA



ESTRUTURA

Referência: EXEMPLO - Cálculo Analítico
 DISSERTAÇÃO PARA MESTRADO
 MEMORIAL DE CÁLCULO ANALÍTICO
 BL x HL x Hs - 7,8 [m] x 7,9 [m] x 74,6 [m.c.a.]

A.1 CONDIÇÃO DE CÁLCULO

A favor da segurança foi adotado a seguinte consideração :

No cálculo das tensões de comparação no paramento foram usadas as tensões de placa máx. combinadas com as tensões de flexão na viga mais solicitada (viga 1 ou viga inferior).

A.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Local de instalação

Equipamento

Elevação do nível d'água excepcional a montante

Elevação do nível d'água máximo maximorum a montante

Elevação do nível d'água normal a montante

Elevação do nível d'água a jusante

Elevação da soleira

Vão livre

Altura livre

Vão vedado

Altura vedada

Distância entre apoios

Viga Vertical afastada do paramento? [S] ou [N]

Largura da placa central

CONSIDERAÇÃO

Deve-se observar no cálculo que a largura da placa central deve ser sempre maior ou igual a largura das outras placas.

Nº de vigas horizontais

Nº de vigas verticais

Paramento a : [M]ontante ou [J]usante

Tem reforços entre as vigas horizontais [S] ou [N]

Tem reforços externamente às vigas horizontais [S] ou [N]

Existe Sismo? [S] ou [N]

Westergard [W] ou Chile [C]

Coefficiente sísmico

DESCARGA DE FONDO

COMPORTA ENSECADEIRA

NA _{máx}	60,0	[m]
NA _{oca}	60,0	[m]
NA _{nor}	58,7	[m]
NA _{jus}	0,00	[m]
NA _{sol}	0,00	[m]
BL	7840,0	[mm]
HL	7930,0	[mm]
Lv	8000,0	[mm]
Hv	8000,0	[mm]
Lap	8200,0	[mm]
Afas	N	
Lc	2050,0	[mm]

Nh	6
Nv	3
Fp	J
Reforços	S
Ref_Ext	S
Sismo	S
Fórmula	W
a/g	0,278

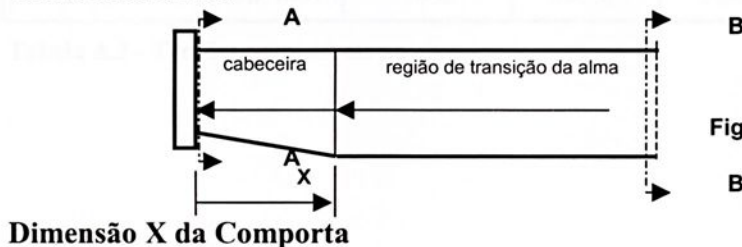


Figura A.1 - Seção transversal da comporta

X **2050,0** [mm]

A.3 MATERIAIS E TENSÕES ADMISSÍVEIS

Chapas	Aço carbono ASTM A-36
Perfis	Aço carbono ASTM A-36
Eixo	Aço inóx AISI 410-T

Tabela A.1 - Materiais utilizados na comporta

Segundo a Norma ABNT - NBR 8883 (1996)

Chapas Material : Aço carbono ASTM A-36 [MPa]

Tensão de escoamento σ_{esc} 2549 [kgf/cm²] 250,0

Elemento Estrutural	Normal		Ocasional		Excepcional	
Casos de carga	Normal		Ocasional		Excepcional	
Unidades	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
tensão de comparação	1937	190,0	2090	205,0	2345	230,0
tensão de comparação no paramento	2218	217,5	2218	217,5	2345	230,0
peças essencialmente comprimidas	1504	147,5	1734	170,0	2014	197,5

Tabela A.2 - Tensões admissíveis nas chapas

Eixo Material : Aço inóx AISI 410-T

Tensão de escoamento σ_{esc} 5608 [kgf/cm²] 550,0 [MPa]

Elemento Mecânico	Normal		Ocasional		Excepcional	
Casos de carga	Normal		Ocasional		Excepcional	
Unidades	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
tensão de comparação	2804	275,0	3533	346,5	5048	495,0
tensão de comparação em olhais	2243	220,0	2827	277,2	4038	396,0
pressão de contato com movir	3085	302,5	3085	302,5	3085	302,5
pressão de contato sem movir	5048	495,0	5048	495,0	5048	495,0

Tabela A.3 - Tensões admissíveis no eixo



A.4 CÁLCULO DO CARREGAMENTO DEVIDO AO SISMO

(Ref. de cálculo : Westergard fórmula)

Nível d'água normal a montante	NAn	60,000	[m]
Elevação da soleira	EL_s	0,000	[m]
Elevação da Frontal	EL_f	8,000	[m]
Elevação do Nível inferior d'água (fundo do lago)	EL_a	0,000	[m]

Coluna d'água máxima no fundo	$H = NAn - EL_a$ (A.1)		
	H	60,000	[mca]

Densidade adotada para a água	δ	1,00	[kg/dm ³]
Coefficiente sísmico	a/g	0,278	

CARGA NA SOLEIRA

Coluna d'água no ponto estudado (soleira)	zs	60,000	[mca]
---	----	--------	-------

Coluna d'água adicional no ponto considerado (soleira):

$$dHs = \frac{7}{8} \cdot \delta \cdot \frac{a}{g} \cdot \sqrt{H \cdot zs} \quad (\text{A.2})$$

Westergard

$$dHs = 1,25 \cdot \delta \cdot \frac{a}{g} \cdot H \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{2H} \cdot zs \right) (\text{A.3})$$

Norma chilena

dHs	14,595	[mca]
-----	--------	-------

Carga hidrostática total devido ao sismo na soleira:

$$Hts = \delta \cdot zs + dHs \quad (\text{A.4})$$

Hts	74,595	[mca]
-----	---------------	-------

Nível de cálculo a montante

$$NAs = EL_s + Hts \quad (\text{A.5})$$

NAs	74,595	[m]
-----	---------------	-----

CARGA NA FRONTAL

Coluna d'água no ponto estudado (frontal)	zf	52,000	[mca]
---	----	--------	-------

Coluna d'água adicional no ponto considerado (frontal):

$$dHf = \frac{7}{8} \cdot \delta \cdot \frac{a}{g} \cdot \sqrt{H \cdot zf} \quad (\text{A.6})$$

Westergard

$$dHf = 1,25 \cdot \delta \cdot \frac{a}{g} \cdot H \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{2H} \cdot zf \right) (\text{A.7})$$

Norma chilena

dHf	13,587	[mca]
-----	---------------	-------

Carga hidrostática total devido ao sismo na frontal:

$$Htf = \delta \cdot zf + dHf$$

Htf	65,587	[mca]
-----	---------------	-------

Nível de cálculo a montante

$$NAf = EL_f + Htf \quad (\text{A.8})$$

Naf	73,587	[m]
-----	---------------	-----

A.5 SELEÇÃO DO CASO DE CARGA DE CÁLCULO

CONSIDERAÇÃO

Foi dividida a tensão em cada caso pela respectiva altura de coluna da água e selecionado o caso com o menor valor como caso determinante para o dimensionamento do equipamento.

Escolhendo-se o caso de carga normal, deve-se atentar para o fato de que o caso crítico de carga para o parâmetro pode ser o ocasional. Deve-se entrar manualmente com o caso de carga adotado e a coluna de água de cálculo.

Caso	Carga Hidráulica na Soleira a montante Hm [mca]	Carga Hidráulica na Frontal a montante Hmf [mca]	Carga Hidráulica na Soleira a jusante Hj [mca]	Carga Hidráulica na Frontal a jusante Hjf [mca]	Carga Hidráulica na comporta a montante Qm [kgf]	Carga Hidráulica na comporta a jusante Qj [kgf]
Normal	58,700	50,700	0,000	0,000	3500800	0
Ocasional	60,000	52,000	0,000	0,000	3584000	0
Excepcional	74,595	65,587	0,000	0,000	4485831	0

Tabela A.4 - Carga hidráulica na comporta

$$\text{onde: } H_m = N_{Anor} - N_{Asol} + P_s' \text{ (A.9)}$$

$$H_{mf} = N_{Anor} - N_{Asol} + P_s' - H_v \text{ (A.10)}$$

$$H_j = N_{Ajus} - N_{Asol} \text{ (A.11)}$$

$$H_{jf} = N_{Ajus} - N_{Asol} - H_v \text{ (A.12)}$$

$$Q_m = (H_m + H_{mf})/2 * H_v * L_v \text{ (A.13)}$$

$$Q_j = (H_j + H_{jf})/2 * H_v * L_v \text{ (A.14)}$$

Caso	Carga total na comporta Qt [kgf]	Carga total na comporta Qt [kN]	Tensão admissível σ	
			[kgf/cm ²]	[MPa]
Normal	3500800	34331	1937	190,0
Ocasional	3584000	35147	2090	205,0
Excepcional	4485831	43991	2345	230,0

Tabela A.5 - Carga total na comporta

$$\text{onde: } \sigma \equiv \text{Tensão admissível de acordo com Tabela A.2 e } Q_t = Q_m - Q_j \text{ (A.15)}$$

CONSIDERAÇÃO

O caso crítico para dimensionamento é o que possuir maior relação de carga em relação à maior tensão admissível.

Q_{to}/Q_{tn}	1,02	<	σ_o/σ_n	1,08	O caso crítico para o dimensionamento é o caso, Excepcional
Q_{te}/Q_{tn}	1,28	>	σ_e/σ_n	1,21	
Q_{te}/Q_{to}	1,25	>	σ_e/σ_o	1,12	

$$\text{portanto: } H_s = 74,595 \text{ [mca]}$$



A.6 DISTRIBUIÇÃO DE VIGAS PARA IGUAL CARREGAMENTO HIDROSTÁTICO

Coluna d'água sobre a soleira para posicionamento das vigas H_p 74,595 [mca]

coeficiente

$$\beta = \frac{n \cdot (H_p - H_{vert})^2}{H_p^2 - (H_p - H_{vert})^2} \quad (\text{A.16})$$

β 23,558

Altura do posicionamento de cada viga em relação à soleira

$$Y_k = H_p - \frac{2H_p}{3\sqrt{n + \beta}} \left\{ [n + (1 - k) + \beta]^{1,5} - (n - k + \beta)^{1,5} \right\} \quad \text{com } k = [1, n] \quad (\text{A.17})$$

Nº da viga	Distância da soleira (na vertical) [mm]	Distância entre vigas (na vertical) [mm]	Distância da soleira (na inclinação) [mm]	Distância entre vigas (na inclinação) [mm]
1	634,5	634,5	634,5	634,5
2	1918,4	1-2 1283,8	1918,4	1-2 1283,8
3	3225,3	2-3 1306,9	3225,3	2-3 1306,9
4	4556,6	3-4 1331,3	4556,6	3-4 1331,3
5	5913,7	4-5 1357,1	5913,7	4-5 1357,1
6	7298,2	5-6 1384,5	7298,2	5-6 1384,5
até a frontal	8000,0	701,8	8000,0	701,8

Tabela A.6 - Posicionamento das vigas na comporta



A.7 CÁLCULO DA LARGURA COLABORANTE - VIGA INFERIOR

Segundo a Norma NBR 8883 -1996

- B ou 2B = Altura da placa
- L = Distância entre pontos de momentos nulos
- λ = Coeficiente de redução
- $\lambda \cdot B$ = Largura colaborante

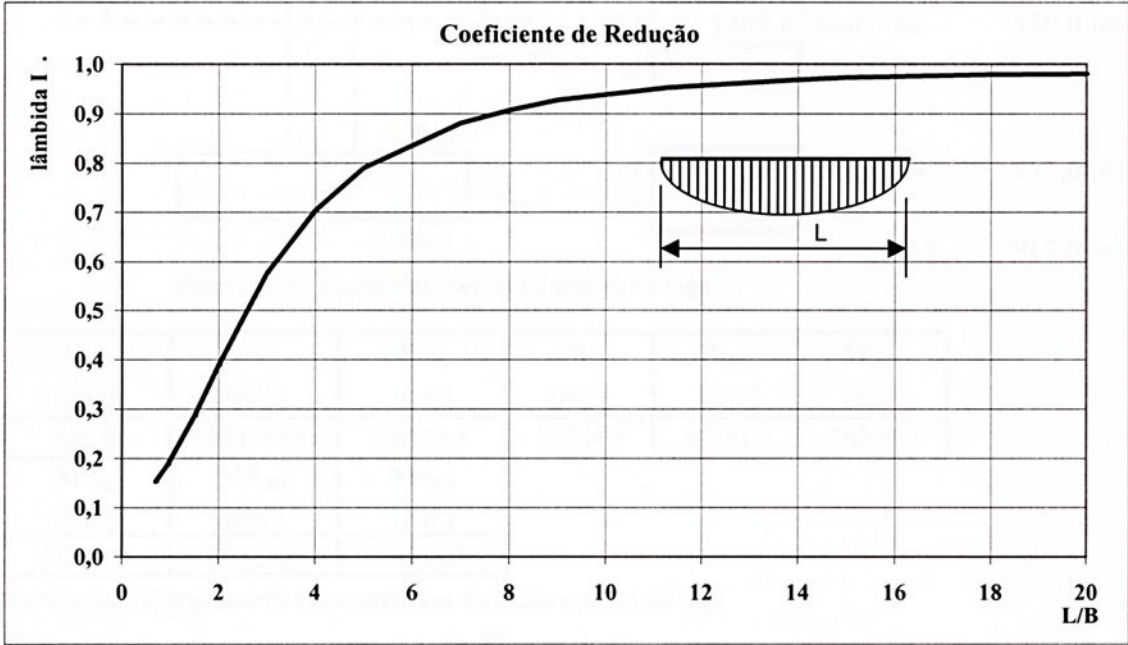


Gráfico A.1 - Coeficiente de redução do paramento como aba para momentos positivos

Plc	B [mm]	L/B	λ_1	Largura colaborante [mm]
1	634,5	12,9	0,96	611,0
2	641,9	12,8	0,96	617,6
Largura Colaborante total				1229

Tabela A.7 - Largura colaborante da viga 1

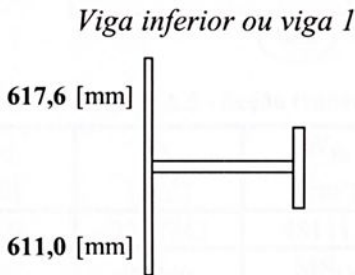


Figura A.2 - Lagura da aba superior da viga

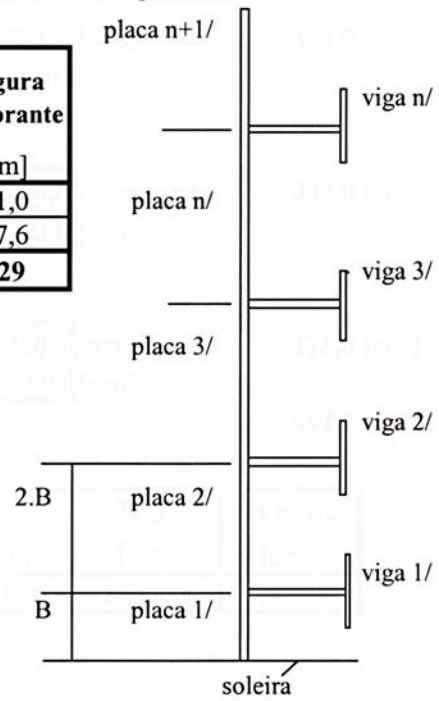


Figura A.3 - Distribuição das vigas



A.8 PROPRIEDADE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA

A.8 .1 Região central (corte BB da Figura A.1)

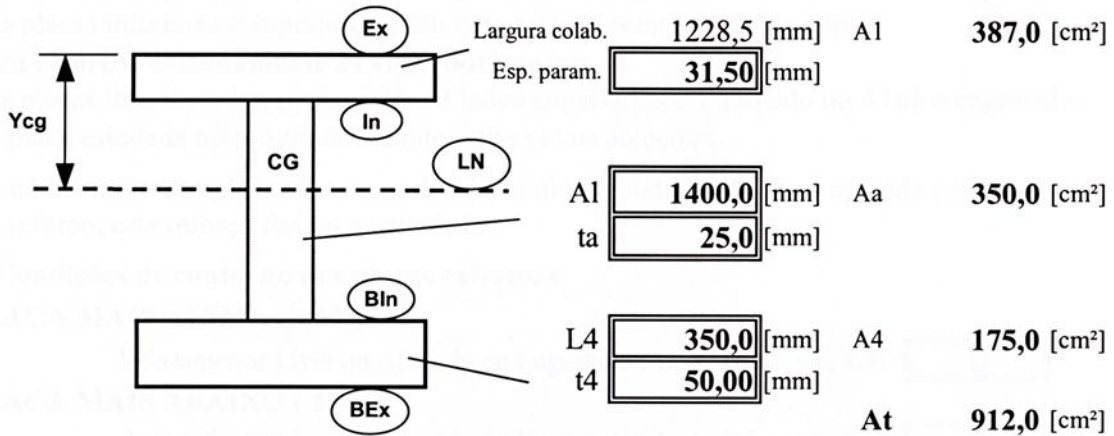


Figura A.4 - Seção transversal no centro da viga

Y _{CG} [mm]	I _x [cm ⁴]	W _{Ex} [cm ³]	W _{In} [cm ³]	W _{BIn} [cm ³]	W _{BEx} [cm ³]
566,9	3227645	56934,8	60284,5	37331,2	35290,3
MS _{In} [cm ³]	MS _{BIn} [cm ³]	MS _{LN} [cm ³]			
21328,9	15568,0	24912,1			

Tabela A.8 - Características geométricas da seção central da viga

A.8 .2 Região da cabeceira (corte AA da Figura A.1)

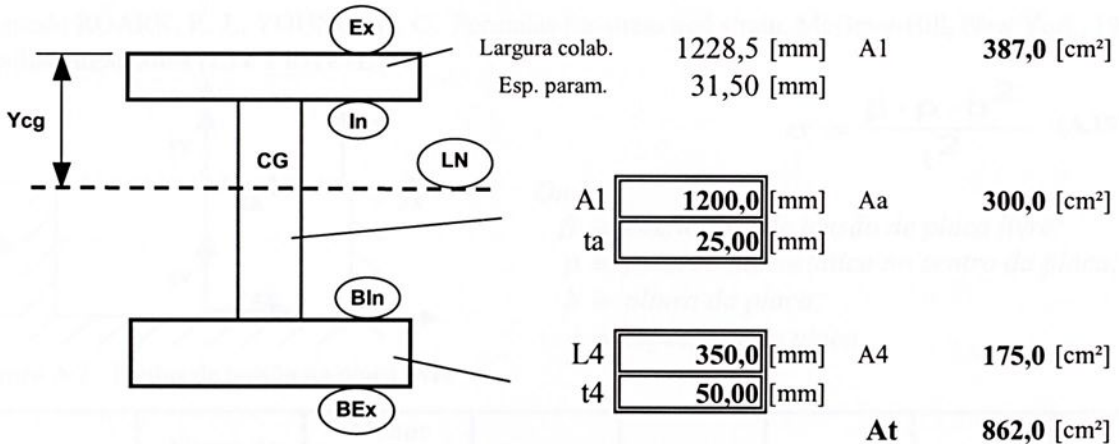


Figura A.5 - Seção transversal na extremidade da viga

Y _{CG} [mm]	I _x [cm ⁴]	W _{Ex} [cm ³]	W _{In} [cm ³]	W _{BIn} [cm ³]	W _{BEx} [cm ³]	I _x a X/2 [cm ⁴]
481,9	2318742	48111,9	51476,4	30935,0	29000,5	2751520
MS _{In} [cm ³]	MS _{BIn} [cm ³]	MS _{LN} [cm ³]				
18041,3	13554,7	20577,5				

Tabela A.9 - Características geométricas da seção da cabeceira da viga

A.9 TENSÕES DE PLACA

CONSIDERAÇÕES

Para sem reforços externamente às vigas horizontais

*As placas inferiores e superiores estão com três lados engastados e 1 livre

Para reforços externamente às vigas horizontais

*As placas inferiores e superiores têm 3 lados engastados e 1 apoiado ou 4 lados engastados

*A placa estudada no programa é a que estiver mais ao centro.

Se no contorno das placas extremas deseja-se obter condição de placa apoiada com o uso de reforço, este reforço deve ser calculado.

A.9 .1 Condições de contorno das placas extremas

PLACA MAIS ACIMA (n+1)

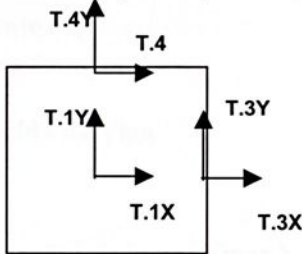
lado superior Livre ou Apoiado ou Engastado (L, A, E) < L, A, E > E

PLACA MAIS ABAIXO (1)

lado inferior Livre ou Apoiado ou Engastado (L, A, E) < L, A, E > E

Segundo a Norma ABNT - NBR 8883 (1996)

3 lados engastados (E) e 1 apoiado (A) ou 4 lados engastados (E)



$$\sigma = \frac{k \cdot p \cdot a^2}{100 \cdot t^2} \quad (\text{A.18})$$

Onde:

k \equiv coeficiente de tensão de placa engastada;

p \equiv pressão hidrostática no centro da placa;

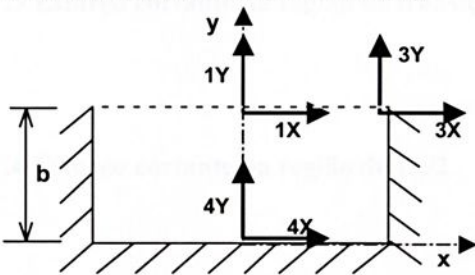
a \equiv menor dimensão da placa;

t \equiv espessura da placa.

Figura A.6 - Pontos de tensão na placa engastada

Segundo ROARK, R. J., YOUNG, W. C. Formulas for stress and strain. McGraw-Hill, New York, 1975.

3 lados engastados (E) e 1 livre (L)



$$\sigma = \frac{\beta \cdot p \cdot b^2}{t^2} \quad (\text{A.19})$$

Onde:

β \equiv coeficiente de tensão de placa livre;

p \equiv pressão hidrostática no centro da placa;

b \equiv altura da placa;

t \equiv espessura da placa.

Figura A.7 - Pontos de tensão na placa livre

Placa	Altura da placa [mm]	Menor dimensão da placa [mm]	b/a ou a/b	k_{1x} / β_{1x}	k_{1y} / β_{1y}	k_{3x} / β_{3x}	k_{4y} / β_{4y}
1	558	558	3,68	7,45	25,00	34,21	50,00
2	642	642	3,19	7,38	25,00	34,28	50,00
3	653	653	3,14	7,41	25,00	34,29	50,00
4	666	666	3,08	7,45	25,00	34,29	50,00
5	679	679	3,02	7,48	25,00	34,30	50,00
6	692	692	2,96	7,52	25,00	34,30	50,00
até a frontal	702	702	2,92	7,55	25,00	34,30	50,00

Tabela A.10 - Coeficientes de tensão de placa

Placa	Pressão [kgf/cm ²]	Tensão 1x [kgf/cm ²]	Tensão 1y [kgf/cm ²]	Tensão 3x [kgf/cm ²]	Tensão 3y [kgf/cm ²]	Tensão 4x [kgf/cm ²]	Tensão 4y [kgf/cm ²]
1	7,424	173	581	795	239	349	1163
2	7,364	226	765	1048	315	459	1529
3	7,235	231	778	1068	320	467	1557
4	7,104	236	793	1088	326	476	1586
5	6,970	242	809	1109	333	485	1617
6	6,834	248	825	1132	340	495	1650
até a frontal	6,695	251	831	1140	342	498	1661

Tabela A.11 - Tensões de placa

A.9 .2 Tensões máximas de placa nos pontos 1,3 e 4

	Tensão 1x	Tensão 1y	Tensão 3x	Tensão 3y	Tensão 4x	Tensão 4y
[kgf/cm ²]	251	831	1140	342	498	1661
[MPa]	24,6	81,5	111,8	33,5	48,9	162,9

Tabela A.12 - Tensões máximas de placa

A.10 TENSÕES NA VIGA INFERIOR OU VIGA 1

A.10 .1 Carregamento (Q)

Carga Total na Comporta Q_t 4485831 [kgf] 43990970 [N]

Carga distribuída na Viga $Q = \frac{Q_t}{(L_v \cdot N_h)}$ (A.20)

Q 934,5 [kgf/cm] 916479 [N/m]

A.10 .2 Esforço cortante máximo (V_{\max})

$$V_{\max} = Q \cdot \left(\frac{L_v}{2} \right) \quad (\text{A.21})$$

V_{\max} 373819 [kgf] 3665914 [N]

A.10 .3 Esforço cortante na região de transição da alma (V_x)

$$V_x = V_{\max} - Q \cdot \left(X - \left(\frac{L_{ap} - L_v}{2} \right) \right) \quad (\text{A.22})$$

V_x 191582 [kgf] 1878781 [N]

A.10 .4 Esforço cortante na região de $L_c/2$

$$(V_{(L_c/2)})$$

$$V_{(L_c/2)} = V_{\max} - Q \cdot \left(\frac{L_{ap} - L_c}{2} \right) \quad (\text{A.23})$$

$V_{(L_c/2)}$ 86446 [kgf] 1878781 [N]

A.10 .5 Momento fletor máximo (M_{\max})

$$M_{\max} = \left(\frac{Q}{8} \right) \cdot L_v^2 + \frac{Q \cdot L_v}{2} \cdot \left(\frac{L_{ap} - L_v}{2} \right) \quad (\text{A.24})$$

M_{\max} 78502035 [kgf.cm] 7698420 [N.m]

A.10 .5.1 Momento fletor a $L_c/2$ do centro

$$(M_{(L_c/2)})$$

$$M_{(L_c/2)} = M_{\max} - V_{\max} \cdot \frac{L_c^2}{4 \cdot L_v} \quad (\text{A.25})$$

$M_{(L_c/2)}$ 73592737 [kgf.cm] 7216982 [N.m]

A.10 .5.2 Momento fletor na região de transição da alma [Mx]

$$M_x = M_{\max} - \frac{V_x}{2} \cdot \left(\frac{L_{ap}}{2} - X \right) \quad (\text{A.26})$$

M_x 58864844 [kgf.cm] 5772669 [N.m]



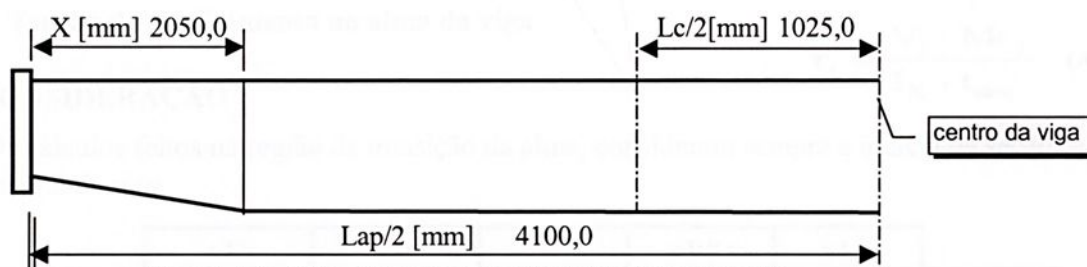


Figura A.8 - Dimensões da seção transversal da comporta

A.10 .6 Diagrama de esforço cortante e momento fletor

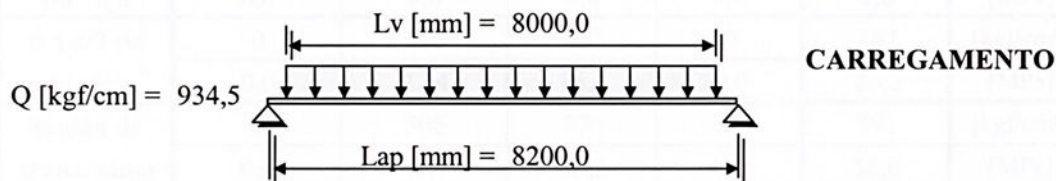


Figura A.9 - Diagrama de carregamento da viga

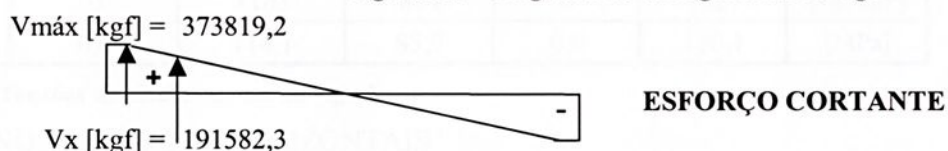


Figura A.10 - Diagrama de esforço cortante da viga

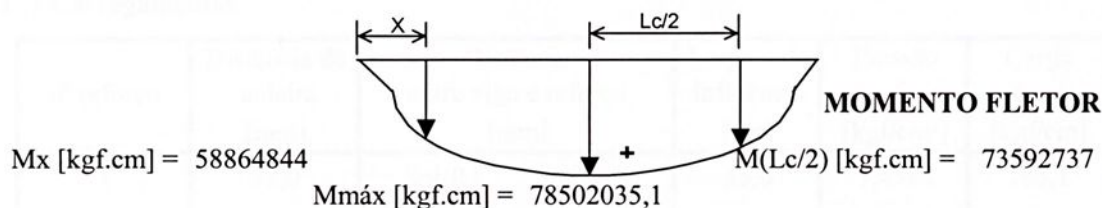


Figura A.11 - Diagrama de momento fletor da viga

A.10 .7 Tensão de flexão

$$\sigma_{fl} = \frac{M \cdot y}{I_x} = \frac{M}{W} \quad (\text{A.27})$$

Onde: W = módulo resistente nos pontos Ex, In, BIn e BEx; [cm³].
(ver item A.8)

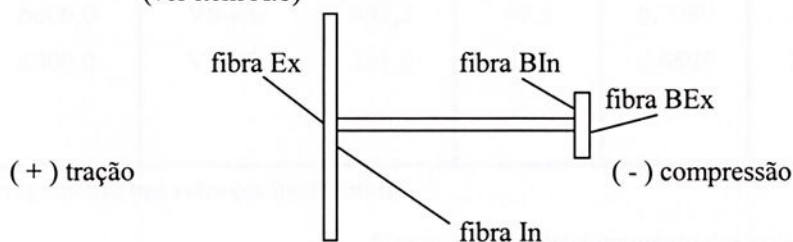


Figura A.12 - Pontos de cálculo da viga

Tensão máxima de flexão nas fibras Ex, In, BIn e BEx da viga 1 ou inferior.

	$\sigma_{fl} \text{ Ex}$	$\sigma_{fl} \text{ In}$	$\sigma_{fl} \text{ BIn}$	$\sigma_{fl} \text{ BEx}$	$\sigma_{fl} \text{ LN}$	
No centro da viga	1379	1302	-2103	-2224	0	[kgf/cm ²]
	135,2	127,7	-206,2	-218,1	0,0	[MPa]
A Lc/2 do da viga	1293	1221	-1971	-2085	0	[kgf/cm ²]
	126,8	119,7	-193,3	-204,5	0,0	[MPa]
Região de trans. alma	1034	976	-1577	-1668	0	[kgf/cm ²]
	101,4	95,8	-154,6	-163,6	0,0	[MPa]
Região de cabeceira	0	0	0	0	0	[kgf/cm ²]
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	[MPa]

Tabela A.13 - Tensões de flexão na viga 1

A.10 .8 Tensão de cisalhamento na alma da viga

$$\tau_i = \frac{V_j \cdot M E_j}{I_x \cdot t_{\text{alma}}} \quad (\text{A.28})$$

CONSIDERAÇÃO

Os cálculos feitos na região de transição da alma, consideram sempre a inércia da seção central da viga.

	τ_{Ex}	τ_{In}	τ_{BIn}	τ_{BEx}	τ_{LN}	
No centro da viga	0	0	0	0	0	[kgf/cm ²]
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	[MPa]
A Lc/2 do da viga	0	228	167	0	267	[kgf/cm ²]
	0,0	22,4	16,4	0,0	26,2	[MPa]
Região de trans. alma	0	506	370	0	591	[kgf/cm ²]
	0,0	49,7	36,2	0,0	58,0	[MPa]
Região de cabeceira	0	1163	874	0	1327	[kgf/cm ²]
	0,0	114,1	85,7	0,0	130,1	[MPa]

Tabela A.14 - Tensões de cisalhamento na viga 1

A.11 TENSÕES NOS REFORÇOS HORIZONTAIS

A.11 .1 Carregamentos

n° reforço	Distância da soleira [mm]	Distância entre viga e reforço [mm]	Largura de Influência [cm]	Pressão no reforço [kgf/cm ²]	Carga por cm [kgf/cm]
1	77,0	Sol-R1 77,0	35,6	7,4518	265,1
2	1276,4	V1-R2 641,9	64,2	7,3319	470,6
3	2571,8	V3-R3 653,5	65,3	7,2023	470,6
4	3890,9	V4-R4 665,7	66,6	7,0704	470,6
5	5235,2	V5-R5 678,6	67,9	6,9360	470,6
6	6606,0	V6-R6 692,2	69,2	6,7989	470,6
7	8000,0	V7-R7 701,8	35,1	6,6595	233,7

Tabela A.15 - Carregamento nos reforços horizontais

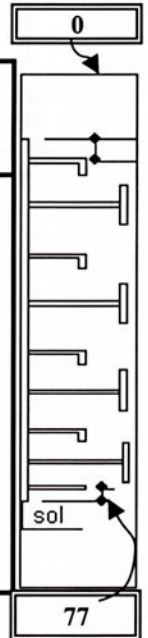


Figura A.13 - Posicionamento das vigas e reforços

Carga adotada para os reforços horizontais externos

que **265,1** [kgf/cm] **26,0** [N/m]

Carga adotada para os reforços horizontais internos

qri **470,6** [kgf/cm] **46,2** [N/m]

A.11 .2 Cálculo da largura colaborante dos reforços

Segundo a Norma ABNT - NBR 8883 (1996)

B ou 2B = Altura da placa

L = Distância entre pontos de momentos nulos

λ = Coeficiente de redução

$\lambda \cdot B$ = Largura colaborante

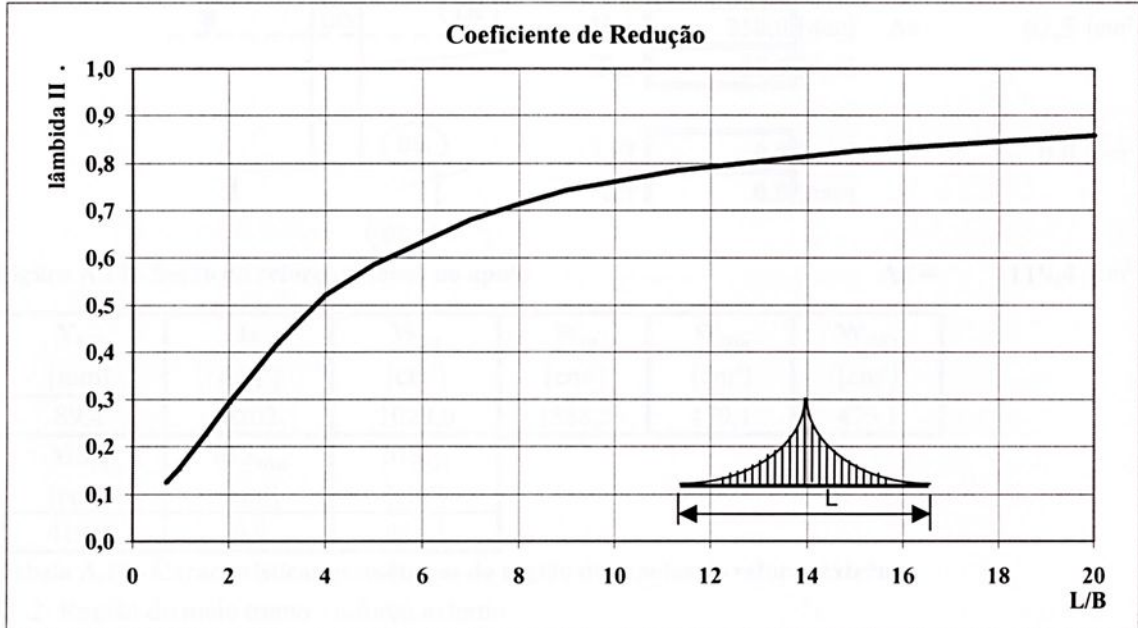


Gráfico A.2 - Coeficiente de redução do paramento como aba para momentos negativos

Reforço externo 1					
Região	B [mm]	L/B	λ	Largura colaborante [mm]	Largura colaborante total [mm]
II (Apoios)	77,0	11,3	0,79	60,5	180,6
	278,8	3,1	0,43	120,2	
I (Trazos)	77,0	15,4	0,97	75,0	277,8
	278,8	4,2	0,73	202,9	

Tabela A.16 - Largura colaborante do reforço externo

Reforço interno 6					
Região	B [mm]	L/B	λ	Largura colaborante [mm]	Largura colaborante total [mm]
II (Apoios)	346,1	2,5	0,36	123,6	247,3
	346,1	2,5	0,36	123,6	
I (Trazos)	346,1	3,4	0,64	220,7	441,4
	346,1	3,4	0,64	220,7	

Tabela A.17 - Largura colaborante do reforço interno

A.11 .3 Propriedades da seção transversal

A.11 .3 .1 Região dos apoios - reforço externo

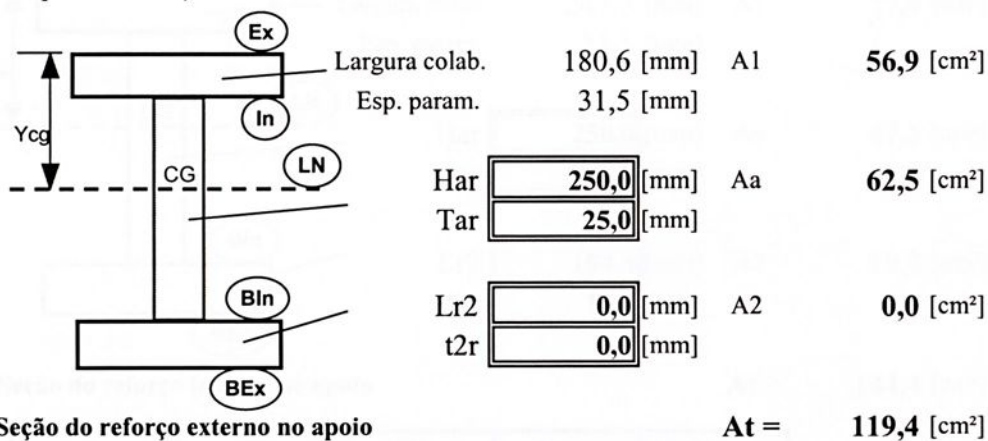


Figura A.14 - Seção do reforço externo no apoio

Y_{LN} [mm]	I_x [cm ⁴]	W_{Ex} [cm ³]	W_{In} [cm ³]	W_{Bin} [cm ³]	W_{BEx} [cm ³]
89,4	9202	1029,0	1588,5	479,1	479,1
MS_{In} [cm ³]	MS_{Bin} [cm ³]	MS_{LN} [cm ³]			
419,2	0,0	461,1			

Tabela A.18 - Características geométricas da região dos apoios do reforço externo

A.11 .3 .2 Região do meio tramo - reforço externo

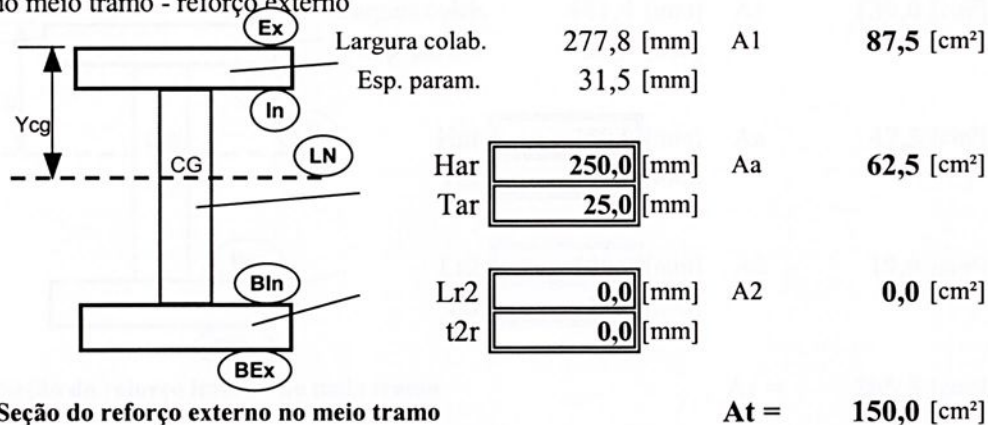


Figura A.15 - Seção do reforço externo no meio tramo

Y_{LN} [mm]	I_x [cm ⁴]	W_{Ex} [cm ³]	W_{In} [cm ³]	W_{Bin} [cm ³]	W_{BEx} [cm ³]
74,4	10551	1418,4	2460,2	509,4	509,4
MS_{In} [cm ³]	MS_{Bin} [cm ³]	MS_{LN} [cm ³]			
513,2	0,0	536,2			

Tabela A.19 - Características geométricas da região do meio tramo do reforço externo

A.11 .3 .3 Região dos apoios - reforço interno

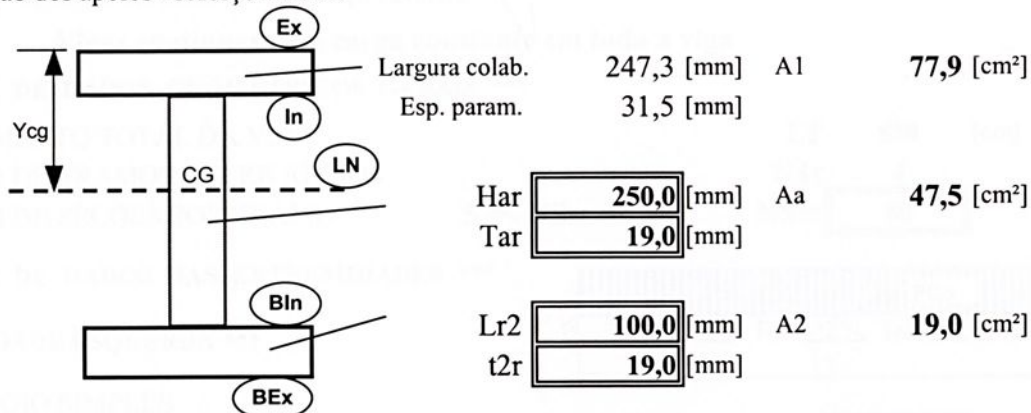


Figura A.16 - Seção do reforço interno no apoio

At = 144,4 [cm²]

Y _{LN} [mm]	I _x [cm ⁴]	W _{Ex} [cm ³]	W _{In} [cm ³]	W _{BIn} [cm ³]	W _{BEx} [cm ³]
98,3	16516	1680,6	2473,4	901,4	816,7
MS _{In} [cm ³]	MS _{BIn} [cm ³]	MS _{LN} [cm ³]			
642,7	366,2	685,1			

Tabela A.20 - Características geométricas da região dos apoios do reforço interno

A.11 .3 .4 Região do meio tramo - reforço interno

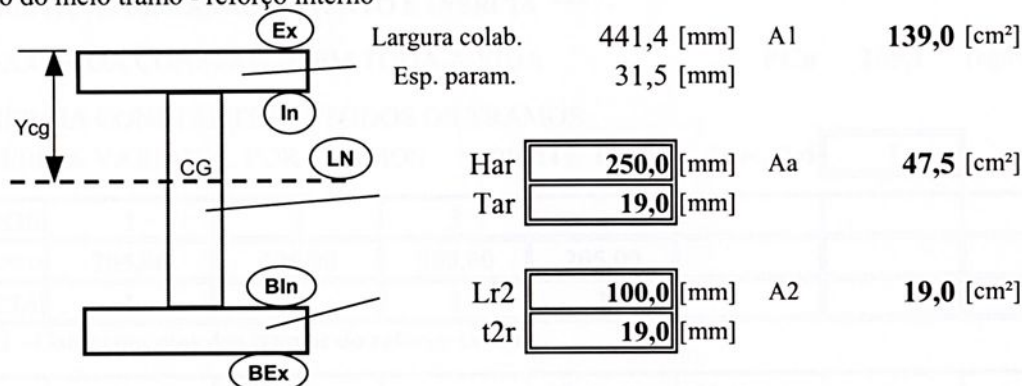


Figura A.17 - Seção do reforço interno no meio tramo

At = 205,5 [cm²]

Y _{LN} [mm]	I _x [cm ⁴]	W _{Ex} [cm ³]	W _{In} [cm ³]	W _{BIn} [cm ³]	W _{BEx} [cm ³]
73,7	19492	2644,0	4616,6	938,1	859,5
MS _{In} [cm ³]	MS _{BIn} [cm ³]	MS _{LN} [cm ³]			
806,0	412,8	823,0			

Tabela A.21 - Características geométricas da região do meio tramo do reforço interno

A.11 .4 Esforços solicitantes internos - reforço externo

Vigas contínuas com carga constante em toda a viga

*** ENTRADA DE DADOS GEOMÉTRICOS GERAIS ***

COMPRIMENTO TOTAL DA VIGA LT 820 [cm]
 NÚMERO DE TRAMOS ENTRE APOIOS NTr 4
 NÚMERO DE SEÇÕES POR TRAMO 5 =< NSec =< 50 NSec

*** ENTRADA DE DADOS DAS EXTREMIDADES ***

*** EXTREMIDADE ESQUERDA ***

- < A > APOIO SIMPLES
 < B > BALANÇO
 < E > ENGASTAMENTO

DIGITE A, B ou E

Es\$

*** EXTREMIDADE DIREITA ***

- < A > APOIO SIMPLES
 < B > BALANÇO
 < E > ENGASTAMENTO

DIGITE A, B ou E

Di\$

*** ENTRADA DE TIPOS DE CARREGAMENTOS ***

*** CARACTERÍSTICAS DE CARREGAMENTO E INÉRCIA ***

VALOR DA CARGA CONSTANTE EM TODA A VIGA PCo 265,1 [kgf/cm]
 < I > INÉRCIA CONSTANTE EM TODOS OS TRAMOS
 < V > INÉRCIA VARIÁVEL POR TRAMOS DIGITE I ou V InerciaTr\$

TRAMOS	1	2	3	4			
COMPRIMENTO	205,00	205,00	205,00	205,00			
INÉRCIA	1	1	1	1			

Tabela A.22 - Comprimentos dos tramos do reforço externo

Apoios	V. Esq. [kgf]	V. Dir. [kgf]	Reações [kgf]	Mom. nos Apoios [kgf/cm]	Mom. nos Tramos [kgf/cm]	L II (À ESQ) [cm]	L I [cm]
0		27173	27173	-928423		87	
1	27173	27173	54347	-928423	464211	87	118
2	27173	27173	54347	-928423	464211	87	118
3	27173	27173	54347	-928423	464211	87	118
4	27173		27173	-928423	464211	87	118

Tabela A.23 - Esforços solicitantes internos do reforço externo

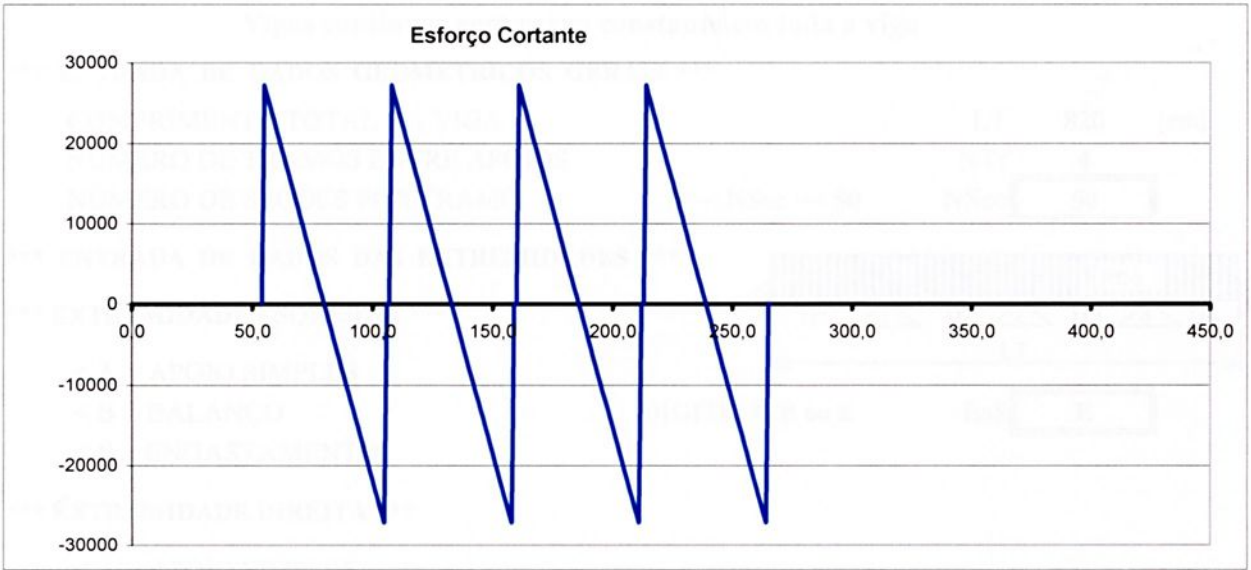


Figura A.18 - Diagrama de esforço cortante do reforço externo

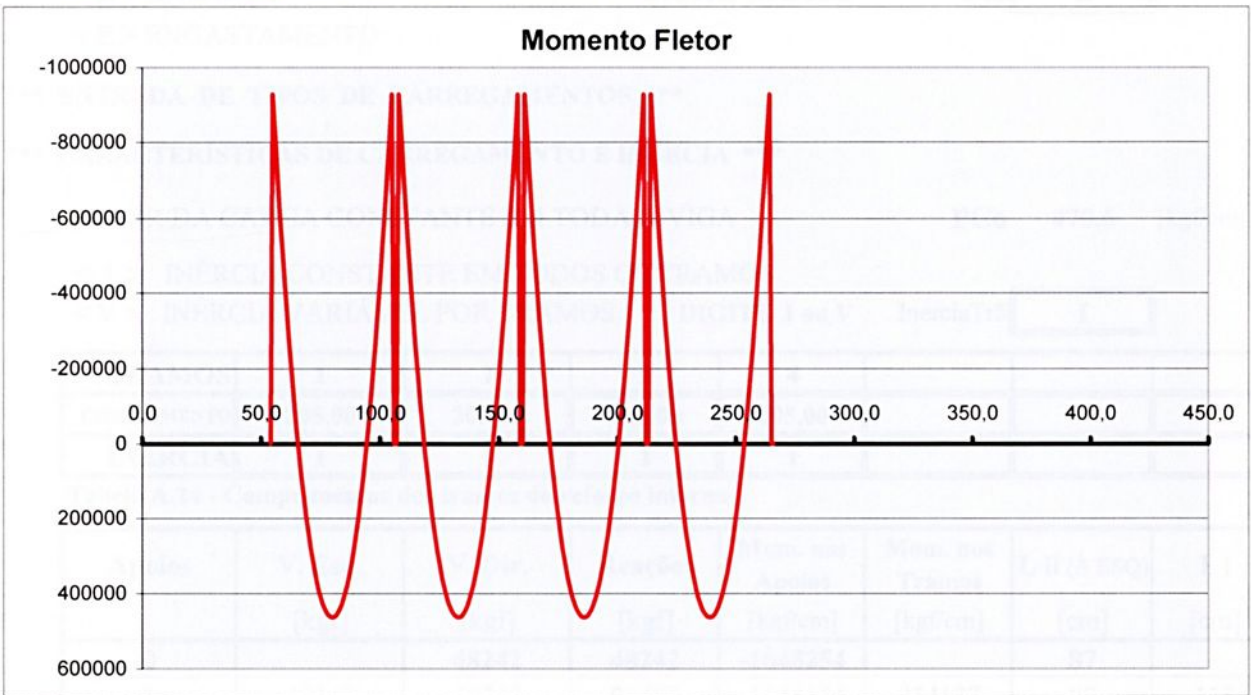


Figura A.19 - Diagrama de momento fletor do reforço externo

Cortante máximo nos apoios	V_x	27173,3 [kgf]	266479 [N]
Momento máximo nos apoios	$M_{\text{máx ap}}$	-928423 [kgf.cm]	-91047 [N.m]
Momento máximo nos tramos	$M_{\text{máx tr}}$	464211 [kgf.cm]	45524 [N.m]

A.11 .5 Esforços solicitantes internos - reforço interno

Vigas contínuas com carga constante em toda a viga

*** ENTRADA DE DADOS GEOMÉTRICOS GERAIS ***

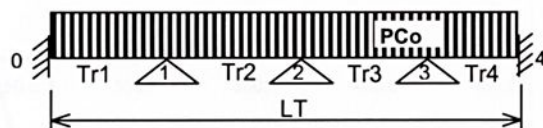
COMPRIMENTO TOTAL DA VIGA LT 820 [cm]
 NÚMERO DE TRAMOS ENTRE APOIOS NTr 4
 NÚMERO DE SEÇÕES POR TRAMO 5 ≤ NSec ≤ 50 NSec

*** ENTRADA DE DADOS DAS EXTREMIDADES ***

*** EXTREMIDADE ESQUERDA ***

< A > APOIO SIMPLES
 < B > BALANÇO
 < E > ENGASTAMENTO

DIGITE A, B ou E

Es\$ 

*** EXTREMIDADE DIREITA ***

< A > APOIO SIMPLES
 < B > BALANÇO
 < E > ENGASTAMENTO

DIGITE A, B ou E

Di\$

*** ENTRADA DE TIPOS DE CARREGAMENTOS ***

*** CARACTERÍSTICAS DE CARREGAMENTO E INÉRCIA ***

VALOR DA CARGA CONSTANTE EM TODA A VIGA PCo 470,6 [kgf/cm]

< I > INÉRCIA CONSTANTE EM TODOS OS TRAMOS
 < V > INÉRCIA VARIÁVEL POR TRAMOS DIGITE I ou V InerciaTr\$

TRAMOS	1	2	3	4			
COMPRIMENTO	205,00	205,00	205,00	205,00			
INÉRCIA	1	1	1	1			

Tabela A.24 - Comprimentos dos tramos do reforço interno

Apoios	V. Esq. [kgf]	V. Dir. [kgf]	Reações [kgf]	Mom. nos Apoios [kgf/cm]	Mom. nos Tramos [kgf/cm]	L II (À ESQ) [cm]	L I [cm]
0		48242	48242	-1648254		87	
1	48242	48242	96483	-1648254	824127	87	118
2	48242	48242	96483	-1648254	824127	87	118
3	48242	48242	96483	-1648254	824127	87	118
4	48242		48242	-1648254	824127	87	118

Tabela A.25 - Esforços solicitantes internos do reforço interno



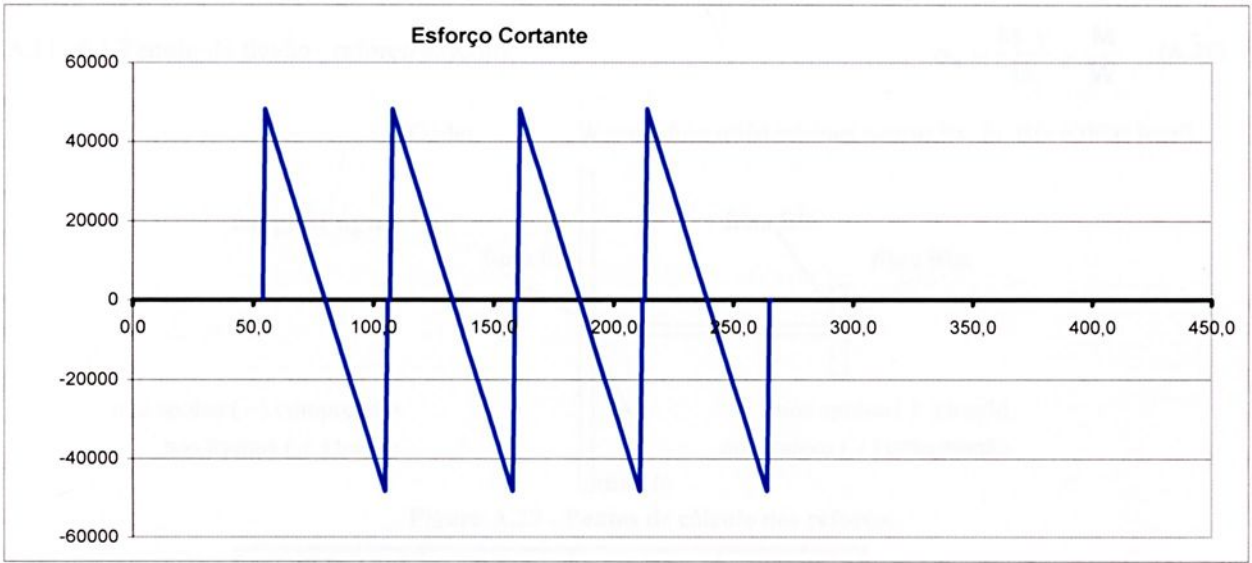


Figura A.20 - Diagrama de esforço cortante do reforço interno

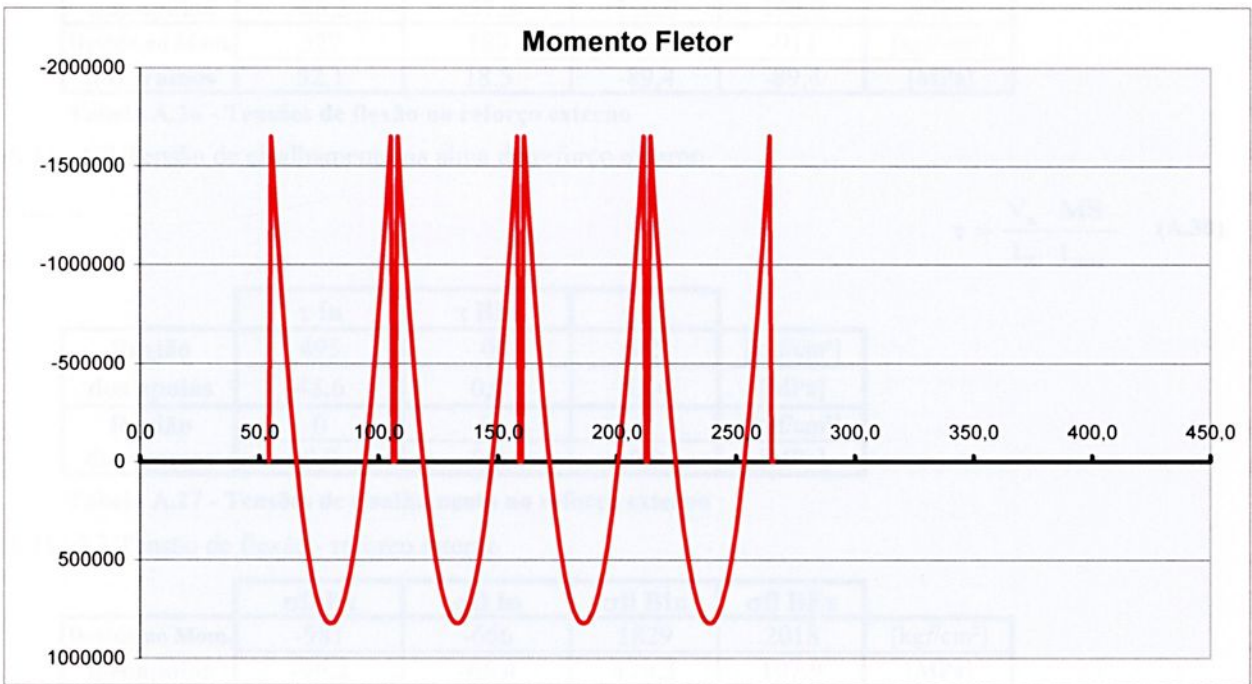


Figura A.21 - Diagrama de momento fletor do reforço interno

Cortante máximo nos apoios	V_x	48241,6 [kgf]	473088 [N]
Momento máximo nos apoios	$M_{\text{máx ap}}$	-1648254 [kgf.cm]	-161639 [N.m]
Momento máximo nos tramos	$M_{\text{máx tr}}$	824127 [kgf.cm]	80819 [N.m]

A.11 .6 Tensões nos reforços

A.11 .6.1 Tensão de flexão - reforço externo

$$\sigma_{fl} = \frac{M \cdot y}{I_x} = \frac{M}{W} \quad (\text{A.29})$$

Onde: W = módulo resistente nos pontos Ex, In, BIn e BEx; [cm³].

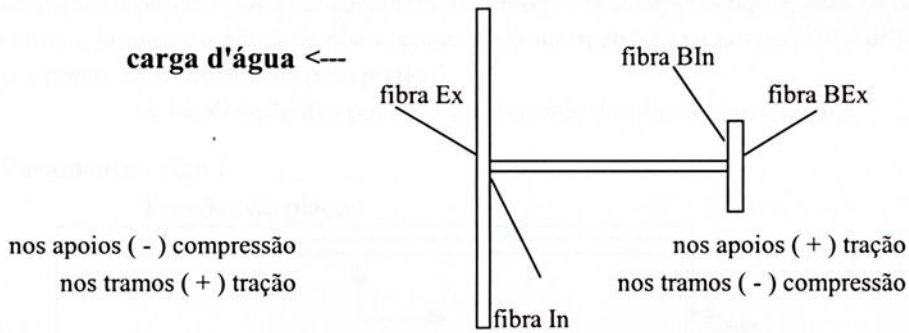


Figura A.22 - Pontos de cálculo dos reforços

	$\sigma_{fl} \text{ Ex}$	$\sigma_{fl} \text{ In}$	$\sigma_{fl} \text{ BIn}$	$\sigma_{fl} \text{ BEx}$	
Devido ao Mom.	-902	-584	1938	1938	[kgf/cm ²]
nos apoios	-88,5	-57,3	190,0	190,0	[MPa]
Devido ao Mom.	327	189	-911	-911	[kgf/cm ²]
nos tramos	32,1	18,5	-89,4	-89,4	[MPa]

Tabela A.26 - Tensões de flexão no reforço externo

A.11 .6.2 Tensão de cisalhamento na alma do reforço externo

$$\tau = \frac{V_x \cdot MS}{I_x \cdot t_{alma}} \quad (\text{A.30})$$

	$\tau \text{ In}$	$\tau \text{ BIn}$	$\tau \text{ LN}$	
Região dos apoios	495	0	545	[kgf/cm ²]
	48,6	0,0	53,4	[MPa]
Região dos tramos	0	0	0	[kgf/cm ²]
	0,0	0,0	0,0	[MPa]

Tabela A.27 - Tensões de cisalhamento no reforço externo

A.11 .6.3 Tensão de flexão - reforço interno

	$\sigma_{fl} \text{ Ex}$	$\sigma_{fl} \text{ In}$	$\sigma_{fl} \text{ BIn}$	$\sigma_{fl} \text{ BEx}$	
Devido ao Mom.	-981	-666	1829	2018	[kgf/cm ²]
nos apoios	-96,2	-65,4	179,3	197,9	[MPa]
Devido ao Mom.	312	179	-878	-959	[kgf/cm ²]
nos tramos	30,6	17,5	-86,2	-94,0	[MPa]

Tabela A.28 - Tensões de flexão no reforço interno

A.11 .6.4 Tensão de cisalhamento na alma do reforço interno

	$\tau \text{ In}$	$\tau \text{ BIn}$	$\tau \text{ LN}$	
Região dos apoios	988	563	1053	[kgf/cm ²]
	96,9	55,2	103,3	[MPa]
Região dos tramos	0	0	0	[kgf/cm ²]
	0,0	0,0	0,0	[MPa]

Tabela A.29 - Tensões de cisalhamento no reforço interno

A.12 TENSÕES DE COMPARAÇÃO

Segundo a Norma ABNT - NBR 8883 (1996)

CONSIDERAÇÃO

O cálculo das tensões de comparação foi feito com as tensões máximas de placa (nos eixos x e y, e nos pontos 1, 3 e 4) combinando-as com as tensões de flexão na viga inferior. Observação: o ponto 3 pode ser considerado como ponto 2 dependendo apenas da relação entre a largura e a altura da placa, como pode ser observado na norma NBR8883/1985, logo o ponto 2 foi substituído pelo ponto 3.

A localização dos pontos 3 e 4 depende das dimensões da placa.

A.12 . 1 Paramento - viga 1

Tensões de placa :

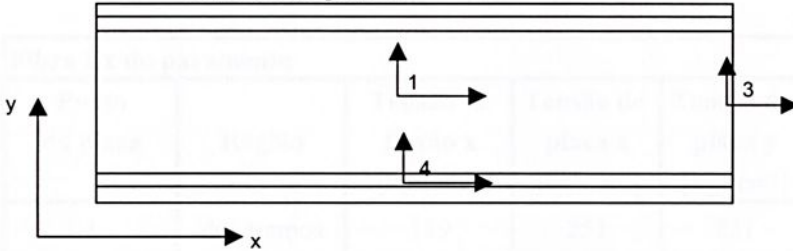


Figura A.23 - Pontos de cálculo de tensões no paramento

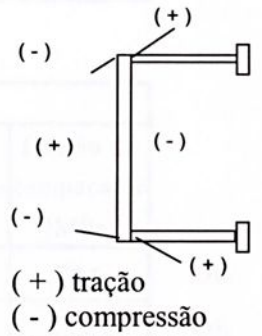


Figura A.24 - Sinal das tensões de placa

A tensão de comparação no paramento é calculada pela fórmula :

$$\sigma_{comp} = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2)} \quad (A.31)$$

Onde:

- σ_{comp} = tensão de comparação no estado biaxial de tensões
- σ_x = soma das tensões no eixo x;
- σ_y = soma das tensões no eixo y;
- τ_{xy} = tensão de cisalhamento atuando no plano normal ao eixo x ou eixo y (= 0, no paramento)

Fibra In do paramento					
Ponto da placa	Tensão de flexão x [kgf/cm ²]	Tensão de placa x [kgf/cm ²]	Tensão de placa y [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [MPa]
1	1221	-251	-831	1561	153,1
3	1302	1140	342	2290	224,6
4	1221	498	1661	1691	165,8

OK
OK
OK

Tabela A.30 - Tensões de comparação na fibra In do paramento - viga 1

Fibra Ex do paramento					
Ponto da placa	Tensão de flexão x [kgf/cm ²]	Tensão de placa x [kgf/cm ²]	Tensão de placa y [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [MPa]
1	1293	251	831	1338	131,2
3	1379	-1140	-342	506	49,6
4	1293	-498	-1661	2170	212,8

OK
OK
OK

Tabela A.31 - Tensões de comparação na fibra Ex do paramento - viga 1



A.12 . 2 Paramento - reforço externo

Fibra In do paramento							
Ponto da placa	Região	Tensão de flexão x [kgf/cm ²]	Tensão de placa x [kgf/cm ²]	Tensão de placa y [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [MPa]	
1	dos tramos	327	-251	-831	871	85,5	OK
3	dos apoios	-902	1140	342	304	29,8	OK
4	dos tramos	327	498	1661	1439	141,1	OK

Tabela A.32 - Tensões de comparação na fibra In do paramento - reforço externo

Fibra Ex do paramento							
Ponto da placa	Região	Tensão de flexão x [kgf/cm ²]	Tensão de placa x [kgf/cm ²]	Tensão de placa y [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [MPa]	
1	dos tramos	189	251	831	720	70,6	OK
3	dos apoios	-584	-1140	-342	1581	155,1	OK
4	dos tramos	189	-498	-1661	1530	150,1	OK

Tabela A.33 - Tensões de comparação na fibra Ex do paramento - reforço externo

A.12 . 3 Paramento - reforço interno

Fibra In do paramento							
Ponto da placa	Região	Tensão de flexão x [kgf/cm ²]	Tensão de placa x [kgf/cm ²]	Tensão de placa y [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [MPa]	
1	dos tramos	312	-251	-831	863	84,6	OK
3	dos apoios	-981	1140	342	296	29,1	OK
4	dos tramos	312	498	1661	1439	141,1	OK

Tabela A.34 - Tensões de comparação na fibra In do paramento - reforço interno

Fibra Ex do paramento							
Ponto da placa	Região	Tensão de flexão x [kgf/cm ²]	Tensão de placa x [kgf/cm ²]	Tensão de placa y [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [kgf/cm ²]	Tensão de comparação [MPa]	
1	dos tramos	179	251	831	720	70,6	OK
3	dos apoios	-666	-1140	-342	1662	163,0	OK
4	dos tramos	179	-498	-1661	1527	149,7	OK

Tabela A.35 - Tensões de comparação na fibra Ex do paramento - reforço interno



A.12 . 4 Alma da viga 1

A tensão de comparação nas almas, abas da viga e reforços e na cabeceira é calculada pela fórmula :

$$\sigma_{\text{comp}} = \sqrt{(\sigma_{\text{fl}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{cis}}^2)} \quad (\text{A.32})$$

Onde:

- σ_{comp} = tensão de comparação no estado biaxial de tensões
 σ_{fl} = tensão de flexão na alma ou aba ou cabeceira em x;
 τ_{cis} = tensão de cisalhamento atuando no plano normal ao eixo x ou eixo y

(fibra "LN")	σ_{fl}	τ_{cis}	σ_{comp}	
No centro da viga	0	0	0	[kgf/cm ²]
	0	0	0	[MPa]
A Lc/2 do da viga	0	267	462	[kgf/cm ²]
	0	26	45,3	[MPa]
Região de trans. alma	0	591	1024	[kgf/cm ²]
	0	58	100,5	[MPa]
Região da Cabeceira	0	1327	2298	[kgf/cm ²]
	0	130	225,4	[MPa]

Tabela A.36 - Tensões de comparação na fibra LN da alma - viga 1

(fibra "In")	σ_{fl}	τ_{cis}	σ_{comp}	
No centro da viga	1302	0	1302	[kgf/cm ²]
	128	0	127,7	[MPa]
A Lc/2 do da viga	1221	228	1283	[kgf/cm ²]
	120	22	125,8	[MPa]
Região de trans. alma	976	506	1313	[kgf/cm ²]
	96	50	128,7	[MPa]
Região da Cabeceira	0	1163	2015	[kgf/cm ²]
	0	114	197,6	[MPa]

Tabela A.37 - Tensões de comparação na fibra In da alma - viga 1

(fibra "BIn")	σ_{fl}	τ_{cis}	σ_{comp}	
No centro da viga	-2103	0	2103	[kgf/cm ²]
	-206	0	206,2	[MPa]
A Lc/2 do da viga	-1971	167	1992	[kgf/cm ²]
	-193	16	195,4	[MPa]
Região de trans. alma	-1577	370	1702	[kgf/cm ²]
	-155	36	166,9	[MPa]
Região da Cabeceira	0	874	1514	[kgf/cm ²]
	0	86	148,5	[MPa]

Tabela A.38 - Tensões de comparação na fibra BIn da alma - viga 1

A.12 . 5 Aba da viga 1

(fibra "BEx")	σ_{fl}	τ_{cis}	σ_{comp}		
No centro da viga	-2224	0	2224	[kgf/cm ²]	OK
	-218	0	218,1	[MPa]	
A Lc/2 do da viga	-2085	0	2085	[kgf/cm ²]	OK
	-205	0	204,5	[MPa]	
Região de trans. alma	-1668	0	1668	[kgf/cm ²]	OK
	-164	0	163,6	[MPa]	

Tabela A.39 - Tensões de comparação na fibra BEx da aba - viga 1

A.12 . 6 Aba do reforço externo

(fibra "BEx")	σ_{fl}	τ_{cis}	σ_{comp}		
Região dos apoios	1938	0	1938	[kgf/cm ²]	OK
	190	0	190,0	[MPa]	
Região dos tramos	-911	0	911	[kgf/cm ²]	OK
	-89	0	89,4	[MPa]	

Tabela A.40 - Tensões de comparação na fibra BEx da aba - reforço externo

A.12 . 7 Aba do reforço interno

(fibra "BEx")	σ_{fl}	τ_{cis}	σ_{comp}		
Região dos apoios	2018	0	2018	[kgf/cm ²]	OK
	198	0	197,9	[MPa]	
Região dos tramos	-959	0	959	[kgf/cm ²]	OK
	-94	0	94,0	[MPa]	

Tabela A.41 - Tensões de comparação na fibra BEx da aba - reforço interno

A.12 . 8 Cabeceira

	σ_{fl}	τ_{cis}	σ_{comp}		
Linha neutra	0	1327	2298	[kgf/cm ²]	OK
	0	130	225,4	[MPa]	

Tabela A.42 - Tensões de comparação na cabeceira



A.13 FLECHA NO CENTRO DA VIGA

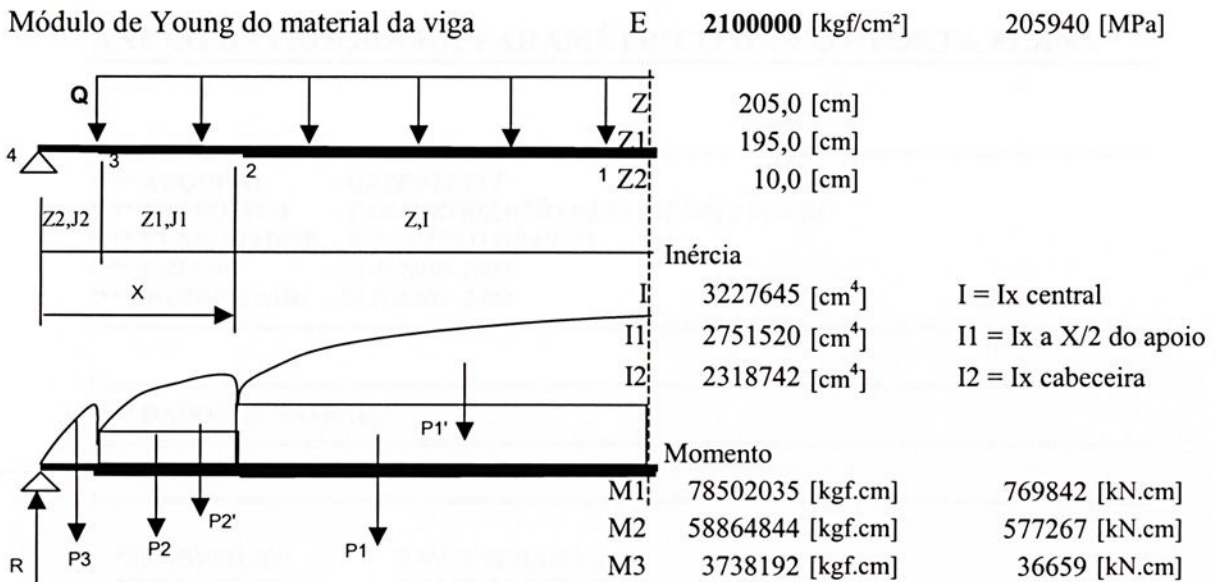


Figura A.25 - Seções de cálculo da flecha

$$\begin{aligned}
 C_1 &= M_1 & C_1 &= 78502035 \text{ [kgf.cm]} & 769842 \text{ [kN.cm]} \\
 C_{2d} &= M_2 & C_{2d} &= 58864844 \text{ [kgf.cm]} & 577267 \text{ [kN.cm]} \\
 C_{2e} &= M_2 \cdot I/I_1 & C_{2e} &= 69050847 \text{ [kgf.cm]} & 677157 \text{ [kN.cm]} \\
 C_{3d} &= M_3 \cdot I/I_1 & C_{3d} &= 4385051 \text{ [kgf.cm]} & 43003 \text{ [kN.cm]} \\
 C_{3e} &= M_3 \cdot I/I_2 & C_{3e} &= 5203492 \text{ [kgf.cm]} & 51029 \text{ [kN.cm]} \\
 P_1 &= C_{2d} \cdot Z & P_1 &= 1,207E+10 \text{ [kgf.cm}^2\text{]} & 118339720 \text{ [kN.cm}^2\text{]} \\
 P_2 &= C_{3d} \cdot Z_1 & P_2 &= 8,551E+08 \text{ [kgf.cm}^2\text{]} & 8385518 \text{ [kN.cm}^2\text{]} \\
 P_3 &= C_{3e} \cdot \frac{Z_2}{2} & P_3 &= 2,602E+07 \text{ [kgf.cm}^2\text{]} & 255144 \text{ [kN.cm}^2\text{]} \\
 P'_1 &= \frac{2}{3} \cdot Z \cdot (C_1 - C_{2d}) & P'_1 &= 2,684E+09 \text{ [kgf.cm}^2\text{]} & 26318591 \text{ [kN.cm}^2\text{]} \\
 P'_2 &= \frac{2}{3} \cdot Z_1 \cdot (C_{2e} - C_{3d}) & P'_2 &= 8,407E+09 \text{ [kgf.cm}^2\text{]} & 82440128 \text{ [kN.cm}^2\text{]} \\
 R &= \sum (R + P_i) & R &= 2,404E+10 \text{ [kgf.cm}^2\text{]} & 235739102 \text{ [kN.cm}^2\text{]} \\
 M_R &= R \cdot (Z + Z_1 + Z_2) - P_3 \cdot \left(\frac{Z_2}{2} + Z_1 + Z \right) - P_2 \cdot \left(Z + \frac{Z_1}{2} \right) - P_1 \cdot \frac{Z}{2} - P'_2 \cdot \left(Z + \frac{3}{8} Z_1 \right) - P'_1 \cdot \frac{3}{8} Z & \text{A.33} \\
 M_R &= 5,805E+12 \text{ [kgf.cm}^3\text{]} & & & 5,693E+10 \text{ [kN.cm}^3\text{]}
 \end{aligned}$$

$$f_{\text{máx}} = \frac{M_R}{E \cdot I_x} \quad (\text{A.34})$$

$$f_{\text{máx}} \quad 8,57 \quad [\text{mm}] \quad \quad \quad 0,857 \quad [\text{cm}]$$

f recomendável

$$\frac{f_{\text{máx}}}{L_{\text{ap}}} = 1 / 957 \quad \text{OK} \quad 1 / 750$$

ANEXO B - PROGRAMA PARAMÉTRICO DA COMPORTA PLANA

```

=====
!*** ARQUIVO      - GATEOT2.TXT
!*** PROPÓSITO   - PARAMETRIZAÇÃO DE COMPORTA PLANA
!*** ELABORADOR  - JOSÉ PAULO GRANDO
!*** CRIADO      - 15 JUNHO 2002
!*** MODIFICADO  - 24 JULHO 2002
=====

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

*SET,BVED,800      !2 VÃO VEDADO [cm]
*SET,HVED,800     !2 ALTURA VEDADA
*SET,BAP,820      !2 VÃO ENTRE APOIOS (CABECEIRAS)

!
=====
!*** GEOMETRIA DA CABECEIRA
!
=====

*SET,HCAB,100     !2 ALTURA DA CABECEIRA
*SET,TCAB,3.15   !2 ESPESSURA DA CABECEIRA

!
=====
!*** GEOMETRIA DO PARAMENTO
!
=====

*SET,PAR,2        !2 PARAMENTO A MONTANTE <1> JUSANTE <2>
*SET,TP,3.15     !2 ESPESSURA DO PARAMENTO

!
=====
!*** GEOMETRIA DAS VIGAS HORIZONTAIS
!
=====

*SET,NHBEAM,6    !2 NÚMERO DE VIGAS HORIZONTAIS
*SET,TH,2.5      !2 ESPESSURA DA ALMA INTERMEDIÁRIA DA VIGA HORIZ.
*SET,THCAB,3.15 !2 ESPESSURA DA ALMA LATERAL DA VIGA HORIZ.
*SET,LABA,35     !2 LARGURA DA ABA DA VIGA HORIZONTAL
*SET,TABA,5.0    !2 ESPESSURA DA ABA DA VIGA HORIZONTAL

!
=====
!*** EXISTÊNCIA DE SISMO
!
=====

*SET,SISMO,1     !"EXISTE SISMO <1>SIM <2>NAO

*IF,SISMO,EQ,1,THEN

*SET,TSISMO,1    ! TIPO SISMO <1>WESTERDARD <2>CHILE

*ENDIF

```



```

=====
!*** EXISTÊNCIA DE SEDIMENTO
=====
!
*SET,SED,2      ! EXISTE SEDIM <1>SIM <2>NAO
!
=====
!*** CARREGAMENTO (COLUNA D'ÁGUA)
=====
!
*SET,HM,58.7    !2 CARGA DE ÁGUA NA SOLEIRA A MONTANTE [mca]
*SET,HJ,0       !2 CARGA DE ÁGUA NA SOLEIRA A JUSANTE [mca]
!
=====
!*** CARREGAMENTO DEVIDO AO SISMO
=====
!
*IF,SISMO,EQ,1,THEN
!
*SET,Ha,58.7    !2 COLUNA D'ÁGUA MÁXIMA DO LAGO
!
=====
!*** CÁLCULO PELA FÓRMULA DE WESTERGARD
=====
!
*SET,apog,.278  ! COEFICIENTE SISMICO
*SET,DH2O,1.00  ! DENSIDADE D'AGUA [kg/dm3]
!
*IF,TSISMO,EQ,1,THEN
!
dHs=(7*DH2O*apog*(Ha*HM)**.5)/8
! COLUNA D'ÁGUA ADICIONAL NO PONTO ESTUDADO (SOLEIRA)
!
ZF=HM-HVED     ! COLUNA D'ÁGUA NO PONTO ESTUDADO (FRONTAL)
!
dHf=0
*IF,ZF,GT,0,THEN
!
dHf=(7*DH2O*apog*(Ha*zf)**.5)/8
! COLUNA D'ÁGUA ADICIONAL NO PONTO ESTUDADO (FRONTAL)
!
*ENDIF
!
=====
!*** CÁLCULO PELA NORMA DO CHILE
=====
!
*ELSEIF,TSISMO,EQ,2
!
dHs=(1.25*DH2O*apog*Ha*SIN((3.14159*HM)/(2*Ha)))
!INCREMENTO DE PRESSÃO NA SOLEIRA
!
zf=HM-HVED     !COLUNA D'ÁGUA NO PONTO ESTUDADO (FRONTAL)
dHf=(1.25*DH2O*apog*Ha*SIN((3.1415*zf)/(2*Ha)))
!INCREMENTO DE PRESSÃO NA FRONTAL
!
*ENDIF
*ENDIF

```



```
!=====
!*** CARREGAMENTO DEVIDO AO SEDIMENTO
!=====
```

```
*IF,SED,EQ,1,THEN
```

```
*SET,Ds,1.00           !ALTURA DE SEDIMENTO [m]
*SET,Ce,0.500         !FATOR PRESSAO DO SEDIMENTO
*SET,NI,0.400         !FATOR DE COMPACTACAO
*SET,Wd,1650          !DENSIDADE SEDIMENTO [kg/m³]
*SET,DH2O,1.00        !DENSIDADE D`AGUA [kg/dm³]
```

```
Dsa=Ds*100             !uniformizando as unidades (cm)
```

```
  *IF,Dsa,LE,HVED,THEN
```

```
    DF=0
```

```
  *ELSE
```

```
    Df=Dsa-HVED
```

```
  *ENDIF
```

```
W1=(Wd*1e-6)-(1-NI)*DH2O*1e-3  !uniformizando as unidades (kg/cm³)
```

```
PeF=Ce*W1*Df           !3 PeF=PRESSÃO NA FRONTAL DEVIDO SEDIMENTO
```

```
PeS=Ce*W1*Dsa          !3 PeS=PRESSÃO NA SOLEIRA DEVIDO SEDIMENTO
```

```
*ENDIF
```

```
!=====
!*** GEOMETRIA DAS VIGAS VERTICAIS
!=====
```

```
*SET,AFAST,2
```

```
!2 VIGA VERTICAL AFASTADA DO PARMAMENTO <1>SIM <2>NÃO
```

```
*IF,AFAST,EQ,1,THEN
```

```
  *SET,GAPPLATE,0
```

```
  !2 DISTÂNCIA ENTRE PARAMENTO E VIGA VERTICAL
```

```
*ENDIF
```

```
*SET,NVBEAM,3
```

```
!2 NÚMERO DE VIGAS VERTICAIS
```

```
*SET,HVV,140
```

```
!2 ALTURA DA ALMA DA VIGA VERTICAL
```

```
*SET,TV,1.90
```

```
!2 ESPESSURA DAS VIGAS VERTICAIS
```

```
!=====
!*** GEOMETRIA DOS REFORÇOS
!=====
```

```
*SET,REF,1             !2 REFORÇO ENTRE VIGAS HORIZONTAIS <1>SIM <2>NÃO
```

```
*IF,REF,EQ,1,THEN     !3
```

```
  *SET,AREF,1          !2 REFORÇOS INTERMED. <1>COM ABA <2>SEM ABA
```

```
  *IF,AREF,EQ,1,THEN  !3
```

```
    *SET,HAREF,10      !2 ALTURA DA ABA DOS REF. INTERMEDIÁRIOS
```



```

*ENDIF

*SET,TREF,1.9      !2 ESPESSURA DO REFORÇO INTERMEDIÁRIO

*ENDIF

*SET,HREF,25      !2 ALTURA DOS REFORÇOS SUP./INF./INTERM.
*SET,TRSUP,2.5   !2 ESPESSURA DO REFORÇO SUPERIOR
*SET,TRINF,2.5   !2 ESPESSURA DO REFORÇO INFERIOR

!=====
!*** GEOMETRIA DA MALHA
!=====

*SET,TE,HCAB/15          !2 DIMENSÃO DO ELEMENTO

!=====
!** GERAÇÃO DA GEOMETRIA
!=====

NHB=NINT(NHBEAM)          !4
NVB=NINT(NVBEAM)          !4
HMSS=(HM+DHS+PeS)*100
HMSS=NINT(HMSS)/100

/PREP7                    !5
/TITLE,PRESSAO = %HMSS% [mca], ALTURA VEDADA = %HVED% [cm], VAO VEDADO =
%BVED% [cm]                !6

!=====
!*** POSICIONAMENTO DAS VIGAS HORIZONTAIS
!=====
!*** ESCOLHA DE TIPO DE POSICIONAMENTO
!=====

*SET,TIPO,1      !2 TIPO DE POSICIONAMENTO: <1>EQUI-SOLICITADAS <2>MANUAL
<3>EQUIDISTANTES

*DIM,AA,ARRAY,NHB

YV3=0

*IF,SISMO,EQ,1,THEN
  HM1 = HM + dHs
*ELSE
  HM1 = HM
*ENDIF

*IF,TIPO,EQ,1,THEN

  BETV=NHB*(HM1-HVED/100)**2/(HM1**2-(HM1-HVED/100)**2)

  *DO,KK,1,NHB          !13

  YV2=(HM1-(2*HM1/3/(NHB+BETV)**.5*((NHB+1-KK+BETV)**1.5-(NHB-
  KK+BETV)**1.5)))*100

  *IF,KK,NE,1,THEN      !3

```



```

      AA(KK) = YV2-YV1
*ELSE
      AA(KK) = YV2
*ENDIF

      YV1=YV2

*ENDDO
      YV3=YV2

*ELSEIF, TIPO, EQ, 2, THEN

*DO, KK, 1, NHB

      *MSG, UI, 'ESP', 'VIGA', KK, 'N'
      %C %C %I %C

      *ask, AA(KK), 'posicao viga',

      YV3=YV3+AA(KK)
*ENDDO

*ELSEIF, TIPO, EQ, 3, THEN

      BETV=NHB*(HM1-HVED/100)**2/(HM1**2-(HM1-HVED/100)**2)
      YV2=(HM1-(2*HM1/3/(NHB+BETV)**.5*((NHB+1-1+BETV)**1.5-(NHB-
1+BETV)**1.5)))*100
      AA(1)=YV2
      YV3=AA(1)

*DO, KK, 2, NHB

      AA(KK)=(HVED-2*YV2)/(NHB-1)
      YV3=YV3+AA(KK)

*ENDDO

*ENDIF

! =====
! *** GERAÇÃO DAS VIGAS HORIZONTAIS
! =====

/VIEW, 1, 1, 1, 1           !8
/ANG, 1                    !9
APLOT                      !10
CSYS, 4                    !11
WPROT, 90                  !12

*DO, KK, 1, NHB
      WPOFF, , , -(AA(KK))    !14
      RECT, , HVV, , -BAP/(NVBEAM+1) !15
      WPRO, , , -90.000000    !12

*IF, KK, NE, 1, THEN      !3

      RECT, LABA/2, AA(KK)-LABA/2, 0, -BAP/(NVBEAM+1), !15
      RECT, 0, LABA/2, 0, -BAP/(NVBEAM+1), !15
      RECT, 0, -LABA/2, 0, -BAP/(NVBEAM+1), !15

```

```

WPRO,,90.000000,          !12
RECT,0,LABA/2,0,-HVV,     !15
RECT,0,-LABA/2,0,-HVV,   !15
RECT,LABA/2,AA(KK)-LABA/2,0,-HVV, !15
WPRO,,-90.000000,        !12

*ELSE

RECT,LABA/2,AA(KK),0,-BAP/(NVBEAM+1), !15
RECT,0,LABA/2,0,-BAP/(NVBEAM+1),     !15
RECT,0,-LABA/2,0,-BAP/(NVBEAM+1),    !15
WPRO,,90.000000,                      !12
RECT,0,LABA/2,0,-HVV,                 !15
RECT,0,-LABA/2,0,-HVV,               !15
RECT,LABA/2,AA(KK),0,-HVV,           !15
WPRO,,-90.000000,                    !12

*ENDIF

WPOFF,,-(HVV)                       !14
RECTNG,0,LABA/2,0,-BAP/(NVBEAM+1),   !16
RECTNG,0,-LABA/2,0,-BAP/(NVBEAM+1),  !16
WPOFF,,(HVV)                         !14
WPRO,,+90.000000                     !12
NUMMRG,KP, , , ,LOW                  !17

*IF,KK,EQ,NHB,THEN                   !3

WPRO,,-90.000000                     !12
RECTNG,-LABA/2,-(HVED-YV3),0,-BAP/(NVBEAM+1), !16
WPRO,,+90.000000                     !12
WPRO,,90.000000,                     !12
RECTNG,0,HVV,-LABA/2,-(HVED-YV3)     !16
WPRO,,-90.000000,                    !12
NUMMRG,KP, , , ,LOW                  !17

*ENDIF

!=====  

!*** GERAÇÃO DOS REFORÇOS INTERMEDIÁRIOS  

!=====  

!*** GERAÇÃO DAS ALMAS DOS REFORÇOS INTERMEDIÁRIOS  

!=====

*IF,REF,EQ,1,THEN                     !3

*IF,KK,NE,1,THEN                       !3

WPOFF,,+(AA(KK))/2                    !14
ASBW,ALL                               !18
RECTNG,0,HREF,0,-BAP/(NVBEAM+1),     !16
WPOFF,,-(AA(KK))/2                    !14

*ENDIF

*ENDIF

*IF,KK,EQ,NHB,THEN                     !3

```



```

WPOFF,HREF,, !14
WPRO,,+90.000000 !12
ASBW,ALL !18
WPRO,,-90.000000 !12
WPOFF,-HREF,, !14

*ENDIF

*ENDDO

! =====
! *** GERAÇÃO DAS ABAS DOS REFORÇOS INTERMEDIÁRIOS
! =====

*IF,REF,EQ,1,THEN !3
  *IF,AREF,EQ,1,THEN !3

  WPCSYS,-1,0 !19
  CSYS,4 !11
  WPROT,,90 !12

  *DO,KK,1,NHB !13

  WPOFF,,-(AA(KK)) !14

  *IF,KK,NE,1,THEN !3

  WPOFF,,+(AA(KK))/2 !14
  WPOFF,HREF,, !14
  WPRO,,+90.000000 !12
  RECTNG,0,-HREF,0,-BAP/(NVBEAM+1), !16
  WPRO,,-90.000000 !12
  WPOFF,,HAREF !14
  ASBW,ALL !18
  WPOFF,,-HAREF !14

  WPOFF,-HREF,, !14
  WPOFF,,-(AA(KK))/2 !14
  *ENDIF

*ENDDO

  NUMMRG,KP, , , ,LOW !17
  *ENDIF
*ENDIF

! =====
! *** GERAÇÃO DO REFORÇO SUPERIOR E INFERIOR
! =====

WPCSYS,-1,0 !19
WPRO,,-90.000000, !12
RECTNG,0,HREF,0,BAP/(NVBEAM+1) !16
WPOFF,,(HVED) !14
RECTNG,0,HREF,0,BAP/(NVBEAM+1) !16
WPCSYS,-1,0 !19
ASEL,S,LOC,Z,-1,1 !20
WPOFF,,(-BAP/(NVBEAM+1))/2 !14

```

```

ARSYM,Z,ALL, , , ,0,0          !21

WPOFF,, ,(-BAP/(NVBEAM+1))/2    !14
ALLSEL                          !22
APLOT                            !10

```

```

=====
!*** INSERÇÃO DO AFASTAMENTO ENTRE VIGA VERTICAL E PARAMENTO
=====
!
```

```

*IF,AFAST,EQ,1,THEN              !3

  WPRO,, ,90.000000              !12
  WPOFF,0,0,GAPPLATE            !14
  ASBW,ALL                       !18
  ASEL,S,LOC,Z,0,-GAPPLATE-.1   !20
  ASEL,R,LOC,X,-.1,.1          !20
  ADEL,ALL,, ,1                 !23
  ALLSEL                         !22
  APLOT                           !10
  WPOFF,0,0,-GAPPLATE          !14
  WPRO,, , -90.000000          !12

```

```
*ELSE
```

```
*ENDIF
```

```

=====
!*** GERAÇÃO DAS VIGAS VERTICAIS
=====
!
```

```
AB=NVBEAM/2-NINT(NVBEAM/2)
```

```

*IF,AB,EQ,0,THEN                !3
  VR=0
*ELSE
  VR=1
*ENDIF

*DO,IA,1,((NVBEAM+1)/2)-VR      !13

  ALLSEL                          !22
  ASEL,S,LOC,Z,(BAP/(NVBEAM+1)),.1 !20
  ARSYM,Z,ALL, , , ,0,0          !21
  WPOFF,, ,(-BAP/(NVBEAM+1))    !14

  *IF,AFAST,EQ,1,THEN            !3

    WPRO,, ,90.000000            !12
    WPOFF,0,0,GAPPLATE          !14
    ASEL,S,LOC,Z,0,-GAPPLATE-.1 !20
    ASEL,R,LOC,X,-.1,.1        !20
    ADEL,ALL,, ,1               !23
    ALLSEL                       !22
    APLOT                         !10
    WPOFF,0,0,-GAPPLATE        !14
    WPRO,, , -90.000000        !12

  *ENDIF

```



```

NUMMRG,KP, , , ,LOW          !17

*ENDDO

WPCSYS,-1,0                   !19
ALLSEL                         !22
NUMMRG,KP, , , ,LOW          !17

*IF,AB,EQ,0,THEN              !3

WPOFF,0,0,-BAP/2              !14
ASBW,ALL                       !18
ASEL,S,LOC,Z,-BAP,.1         !20
ADEL,ALL,,1                   !23
ALLSEL                         !22

*ENDIF

WPCSYS,-1,0                   !19
ALLSEL                         !22
APLOT                          !10

!=====
!*** REDUÇÃO DA CABECEIRA
!=====

*IF,HVV,NE,HCAB,THEN          !3

WPRO,,90.000000               !12
WPOFF,0,0,HCAB                !14
*AFUN,DEG                     !24
ROTA=ATAN((HVV-HCAB)/(BAP/(NVBEAM+1)))
WPROT,0,0,-ROTA              !12
ASBW,ALL                       !18
ASEL,S,LOC,Z,.1,HVV          !20
ADEL,ALL,,1                   !23
LVV=(BAP/(NVBEAM+1))
CABA=LVV/(COS(ROTA))

ALLSEL                         !22

NUMMRG,KP, , , ,LOW          !17

*DO,KK,1,NHB                  !13

WPOFF,,(AA(KK)),              !14
RECT,,CABA,,LABA/2           !15
RECT,,CABA,,-LABA/2          !15

*ENDDO

*ENDIF

!=====
!*** CORTAR LARGURA VEDADA DA COMPORTA
!=====

ALLSEL                         !22

```

```

WPCSYS,-1,0          !19
NUMMRG,KP, , , ,LOW !17
WPOFF,0,0,-(BAP-BVED)/2 !14
ASBW,ALL             !18
WPCSYS,-1,0          !19
NUMMRG,KP, , , ,LOW !17
ALLSEL               !22

```

```

=====
!*** CRIAR ENTIDADE ÁREA DAS ABAS
=====
!
```

```

*IF,HVV,NE,HCAB,THEN      !3

  WPRO,,90.000000        !12
  WPOFF,0,0,HCAB         !14
  WPROT,0,0,-ROTA        !12

  ALLSEL                 !22
  ASEL,S,LOC,Z,-1..1     !20
  CM,ABACAB,AREA         !30
  WPCSYS,-1,0            !19
  ALLSEL                 !22
  NUMMRG,KP, , , ,LOW    !17
*ENDIF

WPCSYS,-1,0              !19
ALLSEL                   !22
NUMMRG,KP, , , ,LOW     !17

```

```

=====
!*** SE A COLUNA DE ÁGUA MONTANTE FOR MENOR QUE ALTURA
!   VEDADA CORTAR COMP. NO NÍVEL DA ÁGUA
=====
!
```

```

*IF,HM,LT,HVED,THEN      !3
  wpro,,90.000000,
  wpoff,0,0,-HM*100

  ASBW,ALL

*ENDIF

WPCSYS,-1,0

```

```

=====
!*** SE A COLUNA DE ÁGUA JUSANTE FOR MENOR QUE ALTURA VEDADA
!   CORTAR COMPORTA NO NÍVEL D'ÁGUA
=====
!
```

```

*IF,HJ,NE,0,THEN
  *IF,HJ,LT,HVED,THEN      !3
    wpro,,90.000000,
    wpoff,0,0,-HJ*100

    ASBW,ALL

  *ENDIF
*ENDIF

```

WPCSYS,-1,0

```
!=====
!*** SE A COLUNA DE SEDIMENTO FOR MENOR QUE ALTURA VEDADA
!   CORTAR COMPORTA NO NÍVEL DO SEDIMENTO
!=====
```

```
*IF,SED,EQ,1,THEN
*IF,Dsa,LT,HVED,THEN           !3
  wpro,,90.000000,
  wpoff,0,0,-DS*100
  ASBW,ALL
```

```
*ENDIF
*ENDIF
```

WPCSYS,-1,0

```
!=====
!*** CRIAÇÃO DE COMPONENTE VIGAS HORIZONTAIS PRÓXIMAS À CABECEIRA
!=====
```

```
ASEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,(AA(1))-5,(AA(1))+5
ASEL,R,LOC,Z,-((BAP-BVED)/4)+1,-((BAP-BVED)/4)-1
ASEL,R,LOC,X,(HREF/2)-.1,(HREF/2)+.1
```

AC=(AA(1))

*DO,KK,2,NHB

```
  AB=(AA(KK))+AC
  ASEL,A,LOC,Y,AB-5,AB+5
  ASEL,R,LOC,Z,-((BAP-BVED)/4)+1,-((BAP-BVED)/4)-1
  ASEL,R,LOC,X,(HREF/2)-.1,(HREF/2)+.1
  AC=AB
```

*ENDDO

CM,VHCAB1,AREA

```
ASEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,(AA(1))-5,(AA(1))+5
ASEL,R,LOC,Z,-((BAP-BVED)/4)+1,-((BAP-BVED)/4)-1
ASEL,R,LOC,X,HREF+((HCAB-HREF)/2)-5,HREF+((HCAB-HREF)/2)+5
```

AC=(AA(1))

*DO,KK,2,NHB

```
  AB=(AA(KK))+AC
  ASEL,A,LOC,Y,AB-5,AB+5
  ASEL,R,LOC,Z,-((BAP-BVED)/4)+1,-((BAP-BVED)/4)-1
  ASEL,R,LOC,X,HREF+((HCAB-HREF)/2)-5,HREF+((HCAB-HREF)/2)+5
  AC=AB
```

*ENDDO

CM,VHCAB2,AREA

ASEL,ALL
 ASEL,S,LOC,Y,(AA(1))-5,(AA(1))+5
 ASEL,R,LOC,Z,-10-((LVV-10)/2)+.1,-10-((LVV-10)/2)-.1
 ASEL,R,LOC,X,(HREF/2)-.1,(HREF/2)+.1
 AC=(AA(1))

*DO,KK,2,NHB

AB=(AA(KK))+AC
 ASEL,A,LOC,Y,AB-5,AB+5
 ASEL,R,LOC,Z,-10-((LVV-10)/2)+.1,-10-((LVV-10)/2)-.1
 ASEL,R,LOC,X,(HREF/2)-.1,(HREF/2)+.1
 AC=AB

*ENDDO

CM,VHCAB3,AREA

ASEL,ALL
 ASEL,S,LOC,Y,(AA(1))-5,(AA(1))+5
 ASEL,R,LOC,Z,-10-((LVV-10)/2)+.1,-10-(2*(LVV-10)/3)-.1
 ASEL,R,LOC,X,HREF+((HCAB-HREF)/2),HCAB+(HVV-HCAB)/3
 AC=(AA(1))

*DO,KK,2,NHB

AB=(AA(KK))+AC
 ASEL,A,LOC,Y,AB-5,AB+5
 ASEL,R,LOC,Z,-10-((LVV-10)/2)+.1,-10-(2*(LVV-10)/3)-.1
 ASEL,R,LOC,X,HREF+((HCAB-HREF)/2),HCAB+(HVV-HCAB)/3
 AC=AB

*ENDDO

CM,VHCAB4,AREA

CMSEL,S,VHCAB1
 CMSEL,A,VHCAB2
 CMSEL,A,VHCAB3
 CMSEL,A,VHCAB4
 CM,VHCAB,AREA

ASEL,ALL

!=====
 !*** SELEÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO E SUAS REAIS CONSTANTES
 !=====

ET,1,SHELL63	!25
R,1,TH, , , , ,	!26
R,2,TV, , , , ,	!26
R,3,TP, , , , ,	!26
R,4,TRSUP, , , , ,	!26
R,5,TRINF, , , , ,	!26
R,6,TCAB, , , , ,	!26
R,7,TV/2, , , , ,	!26
R,8,TABA, , , , ,	!26

R,9,TREF,,,,, !26
 R,10,THCAB,,,,, !26

!=====
 !*** PROPRIEDADES DO MATERIAL
 !=====

MPTEMP,,,,, !27
 MPTEMP,1,0 !27
 MPDATA,EX,1,,2.1E6 !28
 MPDATA,PRXY,1,,3 !28

!=====
 !*** MALHA DAS VIGAS VERTICAIS
 !=====

*DO,IC,1,(NVBEAM+1)/2-VR !13

 WPOFF,0,0,-(BAP)/(NVBEAM+1) !14
 ASEL,U,LOC,Z,-1,-1 !20

*ENDDO

ASEL,INVE !20 e 29
 WPCSYS,-1,0 !19

TYPE,1 !31
 MAT,1 !32
 REAL,2 !33
 ESYS,0 !34
 SECNUM, !35
 ESIZE,TE,0, !36
 AMESH,ALL !37
 ESLA,S !38
 CM,VVERT,ELEM !30

!=====
 !*** MALHA DA VIGA VERTICAL CENTRAL (se houver)
 !=====

*IF,VR,NE,0,THEN !3

 ALLSEL !22
 ASEL,U,LOC,Z,-BAP/2+.1,-BAP/2-.1 !20
 ASEL,INVE !20

TYPE,1 !31
 MAT,1 !32
 REAL,7 !33
 ESYS,0 !34
 SECNUM, !35
 ESIZE,TE,0, !36
 AMESH,ALL !37
 ESLA,S !38
 CM,VVERT1,ELEM !30

*ENDIF

WPCSYS,-1,0 !19
 ALLSEL !22



```

=====
!*** MALHA DA CABECEIRA
=====

```

```

ASEL,S,LOC,Z,+1,-1          !20

TYPE,1                       !31
MAT,1                        !32
REAL,6                       !33
ESYS,0                       !34
SECNUM,                      !35
ESIZE,TE,0,                 !36
AMESH,ALL                   !37
ESLA,S                       !38
CM,CABEC,ELEM              !30
ALLSEL                      !22

```

```

=====
!*** MALHA DO PARAMENTO
=====

```

```

ASEL,S,LOC,X,+1,-1          !20

TYPE,1                       !31
MAT,1                        !32
REAL,3                       !33
ESYS,0                       !34
SECNUM,                      !35
ESIZE,TE,0,                 !36
AMESH,ALL                   !37
ESLA,S                       !38
CM,PARM,ELEM              !30
ALLSEL                      !22

```

```

=====
!*** MALHA DAS ABAS
=====

```

```

ASEL,S,LOC,X,+HVV-.1,+HVV+.1  !20

TYPE,1                       !31
MAT,1                        !32
REAL,8                       !33
ESYS,0                       !34
SECNUM,                      !35
ESIZE,TE,0,                 !36
AMESH,ALL                   !37
ESLA,S                       !38
CM,ABAS,ELEM              !30
ALLSEL                      !22

```

```

=====
!*** MALHA DAS ABAS DA REGIÃO DE REDUÇÃO DAS CABECEIRAS
=====

```

```

*IF,HVV,NE,HCAB,THEN      !3

```

```

CMSEL,S,ABACAB          !39
TYPE,1                  !31
MAT,1                   !32
REAL,8                  !33
ESYS,0                  !34
SECNUM,                 !35
ESIZE,TE,0,            !36
AMESH,ALL               !37
ESLA,S                  !38
CM,ABAS,ELEM           !30
ALLSEL                  !22
*ENDIF

```

```

=====
!*** MALHA DO REFORÇO INFERIOR
=====

```

```

ASEL,S,LOC,Y,-.1,+.1   !20

TYPE,1                  !31
MAT,1                   !32
REAL,5                  !33
ESYS,0                  !34
SECNUM,                 !35
ESIZE,TE,0,            !36
AMESH,ALL               !37
ESLA,S                  !38
CM,REFINF,ELEM         !30
ALLSEL                  !22

```

```

=====
!*** MALHA DO REFORÇO SUPERIOR
=====

```

```

ASEL,S,LOC,Y,-.1+HVED,+.1+HVED !20

TYPE,1                  !31
MAT,1                   !32
REAL,4                  !33
ESYS,0                  !34
SECNUM,                 !35
ESIZE,TE,0,            !36
AMESH,ALL               !37
ESLA,S                  !38
CM,REFSUP,ELEM         !30
ALLSEL                  !22

```

```

=====
!*** MALHA DAS VIGAS HORIZONTAIS
=====

```

```

WPCSYS,-1,0            !19
CSYS,4                  !11

*DO,KK,1,NHB           !13

ASEL,U,REAL,,2,8       !20

```



```

WPOFF,,(AA(KK)),          !14

ASEL,R,LOC,Y,-.1,+.1     !20

TYPE, 1                   !31
MAT, 1                    !32
REAL, 1                   !33
ESYS, 0                   !34
SECNUM,                   !35
ESIZE,TE,0,              !36
AMESH,ALL                 !37
ESLA,S                    !38
CM,VHORZ,ELEM            !30

ALLSEL                    !22

*ENDDO

!=====
!*** MALHA DOS REFORÇOS INTERMEDIÁRIOS
!=====

*IF,REF,EQ,1,THEN        !3
ALLSEL                    !22
ASEL,U,REAL,,1,8        !20

TYPE,1                   !31
MAT, 1                   !32
REAL,9                   !33
ESYS,0                   !34
SECNUM,                  !35
ESIZE,TE,0,             !36
AMESH,ALL               !37
ESLA,S                  !38
CM,VHORZ,ELEM          !30
*ENDIF

ALLSEL                    !22

WPCSYS,-1,0              !19

FINISH                    !40

!=====
!*** CARGA NO PARAMENTO
!=====

/SOLU                    !41

SFCUM,PRES,ADD,1,1,      !Sobrepor pressões de origens diferentes (água, sedimento e sismo)

!=====
!*** CARGA D'AGUA A MONTANTE
!=====

ASEL,S,LOC,X,+.1,-.1     !20 SELECIONAR PARAMENTO
ASEL,R,LOC,Z,-(BAP-BVED)/2,-BVED/2 !20 MEIO PARAMENTO(REFLECT)
ASEL,R,LOC,Y,0,HM*100
ESLA,S                    !38

```

```

*IF,PAR,EQ,1,THEN                                !3
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,+0.001,                      !42
  SFE,ALL,1,PRES, ,-HM/10, , ,                  !43
*ELSE
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,-0.001,                      !42
  SFE,ALL,1,PRES, ,+HM/10, , ,                  !43
*ENDIF

!=====
!*** CARGA DEVIDO AO SISMO A MONTANTE
!=====

*IF,SISMO,EQ,1,THEN

  *IF,dHf,EQ,0,THEN
    HV1=HM*100
  *ELSE
    HV1=HVED*100
  *ENDIF

*IF,PAR,EQ,1,THEN                                !3
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,(dHs/10-dHf/10)/HV1,        !42
  SFE,ALL,1,PRES, ,-dHs/10, , ,                !43
*ELSE
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,-(dHs/10-dHf/10)/HV1,      !42
  SFE,ALL,1,PRES, ,+dHs/10, , ,                !43
*ENDIF

*ENDIF

ALLSEL

!=====
!*** CARGA DÁGUA A JUSANTE
!=====

*IF,HJ,GT,0,THEN

  ASEL,S,LOC,X,+1,-1                               !20 SELECIONAR PARAMENTO
  ASEL,R,LOC,Z,-(BAP-BVED)/2,-BVED/2            !20 MEIO PARAMENTO(REFLECT)
  ASEL,R,LOC,Y,0,HJ*100
  ESLA,S                                           !38

*IF,PAR,EQ,1,THEN                                !3
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,-0.001,                      !42
  SFE,ALL,1,PRES, ,+HJ/10, , ,                !43
*ELSE
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,+0.001,                      !42
  SFE,ALL,1,PRES, ,-HJ/10, , ,                !43
*ENDIF

*ENDIF

ALLSEL

!=====
!*** CARGA DEVIDO AO SEDIMENTO
!=====

```



```

*IF,SED,EQ,1,THEN

ASEL,S,LOC,X,+1,-1          !20 SELECIONAR PARAMENTO
ASEL,R,LOC,Z,-(BAP-BVED)/2,-BVED/2 !20 MEIO PARAMENTO (REFLECT)
ASEL,R,LOC,Y,0,Ds*100
ESLA,S                      !38

  *IF,PeF,EQ,0,THEN
    HV2=Ds*100
  *ELSE
    HV2=HVED
  *ENDIF

*IF,PAR,EQ,1,THEN          !3 PeS = PRESSÃO NA SOLEIRA
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,(PeS-PeF)/HV2, !42 PeF = PRESSÃO NA FRONTAL
  SFE,ALL,1,PRES, ,-PeS, , , !43
*ELSE
  SFGRAD,PRES, ,Y, ,-(PeS-PeF)/HV2, !42
  SFE,ALL,1,PRES, ,+PeS, , , !43
*ENDIF

ALLSEL                      !22

*ENDIF

!=====
!*** RESTRIÇÃO NA CABECEIRA
!=====

LSEL,S,LOC,X,-1,.1         !44
LSEL,R,LOC,Z,-1,.1         !44

DL,ALL,,UX,                !45

ALLSEL                      !22

!=====
!*** RESTRIÇÃO NA SOLEIRA
!=====

LSEL,S,LOC,X,-1,.1         !44
LSEL,R,LOC,Y,-1,.1         !44
DL,ALL,,UY,                !45
ALLSEL                      !22

!=====
!*** RESTRIÇÃO DEVIDA A SIMETRIA
!=====

ASEL,U,LOC,Z,-BAP/2+.1,-BAP/2-.1 !20
ASEL,INVE                   !20
DA,ALL,,SYMM                !46
ALLSEL                      !22

LSEL,U,LOC,Z,-BAP/2+.1,-BAP/2-.1 !44
LSEL,INVE                   !44
DL,ALL,,ROTY,               !45
DL,ALL,,ROTX,               !45

```



```

DL,ALL, ,UZ,                                !45
ALLSEL                                       !22

!=====
!*** SELEÇÃO DA EQUAÇÃO DE SOLUÇÃO
!=====

EQSLV,PCG,1E-7                               !47
ALLSEL                                       !22
SOLVE                                       !48

!=====
!*** VISUALIZAÇÃO DO MODELO NA TELA
!=====

/POST1                                       !49
/EFACE,4
/VIEW, 1 ,1,1,1                             !50
/ANG, 1
RSYS,0
CSYS,0                                       !11

/EXPAND,2,RECT,HALF,,,-BAP/2, ,RECT,FULL,,,, ,RECT,FULL,,,,      !51

!=====
!*** RESULTADOS
!=====

!=====
!*** PLOTA TENSÕES DE VON MISES
!=====

PLNSOL,S,EQV,0,1                             !52

!=====
!*** ARMAZENA RESULTADOS EM PARÂMETROS
!=====
!*** ARMAZENA A TENSÃO DE COMPARAÇÃO MÁX. NO PARÂMETRO SMAX
!=====

NSORT,S,EQV                                  !53
*GET,SMAX,SORT,,MAX                          !54

!=====
!*** ARMAZENA O VOLUME TOTAL DOS ELEMENTOS NO PARÂMETRO
! "VOLU" E CALCULA O PESO DO MODELO
!=====

ETABLE,EVOL,VOLU                             !55
SSUM                                          !56

*GET,VTOT,SSUM,,ITEM,EVOL                    !53 VTOT = VOLUME TOTAL
PESO=2*VTOT*0.00785

!=====
!*** CAPTURA DESLOCAMENTO EM X DO NÓ NO FRONTAL
!=====

```



```

NODEF=NODE(0,HVED,-BAP/2)      !NOMEANDO NÓ NO FRONTAL
*GET,DEFX,NODE,NODEF,U,X      !CAPTURA O DESLOCAMENTO EM X NO FRONTAL

```

```

!=====
!*** NOTA NA TELA MOSTRANDO O PESO DA COMPORTA
!=====

```

```

*MSG,UI,'PESO','TOTAL=',PESO,'[kgf]'    !57
%C %C %l %C

```

```

!=====
!*** FIM DO PROGRAMA DE PARAMETRIZAÇÃO DA COMPORTA PLANA.
!=====

```

```

!2  *SET commands to create the prompts as well as specify a default value for each prompt
!3  *IF, VAL1, Oper (EQ=; NE<>), VAL2, Funcion
!4  NINT (VFUN) - Nearest integer: 2.783 becomes 3.0, -1.75 becomes -2.0
!5  PREP7 Build the model
!6  /TITLE, Title -- Defines a main title
!7  /VIEW, WN, XV, YV, ZV -- Defines the viewing direction for the display
!8  Iso: The view of the top right of the model (x = 1,y = 1,z = 1)
!9  /ANGLE, WN, THETA, Axis, KINCR -- Rotates the display about an axis
!10 APLOT, NA1, NA2, NINC, DEGEN, SCALE -- Displays the selected areas
!11 CSYS, KCN 0 (Cartesian), 1 (cylindrical), 2 (spherical), 4 or WP
!12 WPROTA, THXY, THYZ, THZX, -- Rotates the WP
!13 *DO, PAR (parâmetro), IVAL (inicial), FVAL (final), INC (incremento)
!14 WPOFFS, XOFF, YOFF, ZOFF -- Offsets the WP
!15 RECTNG,X1,X2,Y1,Y2 Creates a rectangular area on WP
!16 RECTNG,X1,X2,Y1,Y2 Creates a rectangular area on WP
!17 NUMMRG,Label,TOLER,GTOLER,Action,Switch-Merges coincident defined items
!18 ASBW,NA,SEPO,KEEP - Subtracts the intersection of the WP from areas (divides areas)
!19 WN, KCN - Defines the WP location based on a coordinate system
!20 ASEL, Type, Item, Comp,VMIN, VMAX, VINC, KSWP - Selects a subset of area
!21 ARSYM,Ncomp,NA1,NA2,NINC,KINC,NOELEM,IMOVE-Generates areas by symmetry
! reflection
!22 ALLSEL, LabT, Entity -- Selects all entities with a single command
!23 ADELE, NA1, NA2, NINC, KSWP -- Deletes unmeshed areas
!24 *AFUN, Lab (DEG degrees)-Units for angular functions in parameter expressions
!25 ET, ITYPE, Ename - Defines element type. SHELL63 -- Elastic Shell
!26 R, NSET, R1, R2, R3, R4, R5, R6 -- Defines the element real constants
!27 MPTEMP,STLOC,T1,T2,T3,T4,T5,T6-Defines a temperature table for material propert
!28 MPDATA,Lab,MAT,STLOC,C1,C2,C3,C4,C5,C6-Defines property data associated w. temp.
!29 INVE - Invert the current set (selected becomes unselected and vice versa)
!30 CM, Cname, Entity -- Groups geometry items into a component
!31 TYPE, ITYPE -- Sets the element type attribute pointer
!32 MAT, MAT -- Sets the element material attribute pointer
!33 REAL, NSET -- Sets the element real constant set attribute pointer
!34 ESYS, KCN -- Sets the element coordinate system attribute pointer
!35 SECNUM, SECID -- Sets the element section attribute pointer
!36 ESIZE, SIZE, NDIV -- Specifies the default number of line divisions
!37 AMESH, NA1, NA2, NINC -- Generates nodes and area elements within areas
!38 ESLA, Type -- Selects those elements associated with the selected areas
!39 CMSEL,Type,Name - Selects a subset of components and assemblies
!40 FINISH -- Exits normally from a processor
!41 /SOLU -- Enters the solution processor
!42 SFGRAD,Lab,SLKCN,Sldir,SLZER,SLOPE- Gradient (slope) for surface loads
!43 SFE,ELEM,LKEY,Lab,KVAL,VAL1,VAL2,VAL3,VAL4 - Surface loads on elements

```

```
!44 LSEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC, KSWP -- Selects a subset of lines
!45 DL, LINE, AREA, Lab, Value1, Value2 -- Defines DOF constraints on lines
!46 DA, AREA, Lab, Value1, Value2 -- Defines DOF constraints on areas
!47 EQSLV, Lab (PCG-Pre-conditioned), TOLER, MULT - Specifies the type of equation solver
!48 SOLVE - Starts a Solution
!49 /POST1 -- Enters the database results postprocessor
!50 /VIEW, WN, XV, YV, ZV -- Defines the viewing direction for the display
!51 EXPAND, Nrepeat1, Type1, Method1, DX1, DY1, DZ1, Nrepeat2, Type2, Method2, DX2, DY2,
!   DZ2, Nrepeat3, Type3, Method3, DX3, DY3, DZ3 -- Allows the creation of a larger graphic
!   display than represented by the actual finite element analysis model
!52 PLNSOL, Item, Comp, KUND, Fact -- Displays results as continuous contours
!53 NSORT, Item, Comp, ORDER, KABS, NUMB, SEL - Sorts nodal data - SORT EQUIVALENT
!   STRESSES
!54 *GET SMAX = MAX. EQUIVALENT STRESS
!55 ELEMENT VOLUME
!56 SSUM - Calculates and prints the sum of element table items
!57 *MSG, Lab, VAL1, VAL2, VAL3, VAL4, VAL5, VAL6, VAL7, VAL8 - Writes an output message
!   via the ANSYS message.
```



ANEXO C - PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DA COMPORTA PLANA

```
!=====
!*** ARQUIVO      - GATEOT2_OPT.TXT
!*** PROPOSITO   - OTIMIZAÇÃO DE COMPORTA PLANA
!*** ELABORADOR  - JOSE PAULO GRANDO
!*** CRIADO      - 27 JULHO 2002
!*** MODIFICADO  - 12 AGOSTO 2002
!=====
```

```
!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DO ARQUIVO DE ANÁLISE
!=====
```

/OPT *****

OPANL,GATEOT2,TXT,C:\AnsysTemp

```
!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO
!=====
```

OPVAR,HCAB,DV,100,140
 OPVAR,TCAB,DV,2.5,3.15
 OPVAR,TP,DV,2.5,3.75
 OPVAR,TH,DV,2.5,3.15
 OPVAR,THCAB,DV,2.5,3.15
 OPVAR,LABA,DV,30,40
 OPVAR,TABA,DV,3.75,5.0
 OPVAR,HVV,DV,120,160
 OPVAR,TV,DV,,95,1.6
 OPVAR,HREF,DV,20,30
 OPVAR,HAREF,DV,5,15
 OPVAR,TREF,DV,1.25,1.9
 OPVAR,TRSUP,DV,2.24,3.15
 OPVAR,TRINF,DV,2.24,3.15

```
!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTADO
!=====
```

OPVAR,SMAX,SV,,2345,0.1
 OPVAR,DEFX,SV,,0.3,0.01

```
!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO
!=====
```

OPVAR,PESO,OBJ

```
!=====
!*** IDENTIFICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO
!=====
```

OPTYPE,SUBP
 OPSUBP,10,3
 OPKEEP,ON

```
!=====
```



!*** EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO

!=====

OPSAVE,GATE1,OPT0
OPEXE

!=====

!*** VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

!=====

OPLIST
PLVAROPT,SMAX
PLVAROPT,VTOT
FINISH

!=====

!*** FIM DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DA COMPORTA PLANA

!=====



GLOSSÁRIO

COMPONENTES DAS COMPORTAS

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.

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

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

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

Viga principal. Elemento principal do vigamento.

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

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

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

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

Mancal principal. Conjunto de articulação de comporta de rotação.

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

Viga pescadora. É um equipamento especial de levantamento de comportas ensecadeiras e grades, com engate e desengate automáticos, normalmente acoplada a um pórtico ou grua elétrica.





unesp



.1 12 13 14 15 16 17 18