

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2002



PEDRO MIGUEL BENTO GALVEIAS DE SOUSA LOPES

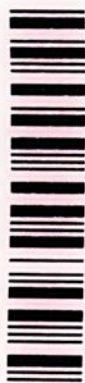
**CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO**

**PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO
DE EQUIPAMENTOS HIDROMECAÑICOS
EM ELEMENTOS FINITOS**

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

Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini

1110000481



481

Guaratinguetá
2002



481

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ

BIBLIOTECA

24/04/02

R\$ 20,00

①

Lopes, Pedro Miguel Bento Galveias de Sousa
L864p Parametrização e otimização de equipamentos hidromecânicos
em elementos finitos / Pedro Miguel B. G. de Sousa Lopes.-
Guaratinguetá : [s.n.], 2002
140f. : il.

Bibliografia: f. 126-127
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2002
Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini

1. Otimização I. Título

CDU 519.863

**“PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS
HIDROMECÂNICOS EM ELEMENTOS FINITOS”**

PEDRO MIGUEL BENTO GALVEIAS DE SOUSA LOPES

**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

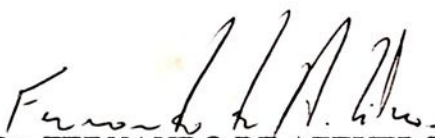


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Unesp-Feg



Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ GRANDINETTI
UNITAU

Fevereiro de 2002

DADOS CURRICULARES

PEDRO MIGUEL BENTO GALVEIAS DE SOUSA LOPES

NASCIMENTO 17.04.1971 – CALDAS DA RAINHA / PORTUGAL

FILIAÇÃO Duarte de Sousa Lopes
Ana Maria Galveias Lopes

1992/1996 Curso de Graduação
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá
da UNESP



Lopes, P.M.B.G.S. *Parametrização e otimização de equipamentos hidromecânicos em elementos finitos*. 2002. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

RESUMO

O maior desafio do engenheiro é realizar um projeto com desempenho ótimo e com a menor quantidade de recursos. Neste trabalho são criadas ferramentas de engenharia capazes de reduzir tempo, custo de projeto e fabricação de equipamentos hidromecânicos.

Estas ferramentas consistem em programas que viabilizam a parametrização e otimização de modelos de equipamentos em elementos finitos. Parametrizar um projeto é equacionar a sua geometria de forma que esta varie em função de parâmetros independentes. Otimizar um projeto significa manipular suas variáveis independentes com o objetivo de alcançar o máximo desempenho.

Os programas são elaborados em linguagem FORTRAN/APDL (ANSYS PARAMETRIC DESIGNER LANGUAGE) e executados dentro do ambiente do programa ANSYS.

Neste trabalho são demonstrados conceitos teóricos e práticos necessários para a construção dos programas de parametrização e otimização. Três casos são elaborados no intuito de demonstrar a construção dos programas e as vantagens da parametrização e otimização em elementos finitos frente a outros métodos.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização, parametrização , elementos finitos



Lopes, P.M.B.G.S. *Parameterization and Optimization of hydromechanical equipment in finite elements*. 2002. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

The engineer's largest challenge is to accomplish a project with optima performance and with the smallest amount of resources. In this work engineering tools are created capable to reduce time, project cost and production of hydromechanical equipments. These tools consist of programs that make possible the parameterization and optimization of models of equipments in finite elements. The parameterization of a project means to equate its geometry so that this varies in function of independent parameters. Optimise a project means to manipulate their independent variables with the objective of reaching the maximum performance.

The programs are elaborated in FORTRAN/APDL (ANSYS PARAMETRIC DESIGNER LANGUAGE) and executed inside of the environment of the ANSYS program.

In this work theoretical and practical concepts necessary for the construction of the parameterization and optimization programs are demonstrated. Three examples are elaborated with the intention to show the construction of the programs and the advantages of the parameterization and optimization in finite elements in comparison to others methods.

KEYWORDS: Optimization, parameterization, finite elements.



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO TRABALHO	18
1.3	ELEMENTOS FINITOS EM PROBLEMAS DE ENGENHARIA	19
1.4	UMA BREVE HISTÓRIA DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E DO “SOFTWARE” ANSYS	22
2	CAPÍTULO II - PARAMETRIZAÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANSYS	25
2.1	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO E FERRAMENTAS DE PROJETO	31
2.1.1	Método de Aproximação Subproblema	34
2.1.1.1	Conversão para problema irrestrito	37
2.1.1.2	Verificação de convergência	40
2.1.1.3	Considerações especiais para Aproximação Subproblema	42
2.1.2	Método de Primeira Ordem	43
2.1.2.1	Direção de procura	45
2.1.2.2	Verificação de convergência	47
2.1.2.3	Considerações especiais a respeito do Método de Primeira Ordem	48
2.1.3	Geração de projeto aleatório	49
2.1.4	Ferramenta de Varredura	50
2.1.5	Ferramenta Fatorial	51
2.1.6	Ferramenta Gradiente	52
2.2	OTIMIZAÇÃO DE UMA VIGA ENGASTADA	54
2.3	CONCLUSÕES	66

3	CAPÍTULO III - PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA BLINDAGEM.....	67
3.1	BLINDAGEM.....	67
3.2	CÁLCULO ANALÍTICO.....	71
3.3	ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS.....	81
3.3.1	Descrição da análise.....	81
3.3.1.1	Elemento utilizado no modelo	81
3.3.1.2	Geometria do modelo.....	82
3.3.1.3	Condições de contorno	83
3.3.1.4	Resultados	84
3.4	OTIMIZAÇÃO DA BLINDAGEM.....	86
3.4.1	Elaboração dos programas	86
3.4.2	Resultados da otimização.....	91
3.4.3	Análise dos resultados preliminares da otimização	95
3.4.4	Resultados do Modelo Final com espessuras comerciais	97
3.4.5	Conclusões finais dos resultados da otimização da blindagem.....	98
4	CAPÍTULO IV - PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA BIFURCAÇÃO.....	99
4.1	BIFURCAÇÃO.....	99
4.2	DESENVOLVIMENTO DE UMA GEOMETRIA ÓTIMA.....	102
4.3	OTIMIZAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO APLICADA A UMA BIFURCAÇÃO.....	106
4.3.1	Análise em elementos finitos do “Projeto 1”	107
4.3.2	Elaboração do programa de parametrização e otimização	111
4.3.3	Resultados obtidos da parametrização e otimização (Projeto2)	115
4.3.4	Conclusões.....	121
5	CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	123
	REFERÊNCIAS.....	126
	ANEXO A	
	ANEXO B	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Procedimento de otimização de projeto	16
FIGURA 2.1 – Estrutura a ser otimizada	26
FIGURA 2.2 – Demonstração gráfica de região realizável e irrealizável em um processo de otimização.....	28
FIGURA 2.3 – Fluxo de dados durante a otimização	30
FIGURA 2.4 – Função de Penalidade interior no espaço da variável de estado	39
FIGURA 2.5 – Geometria do modelo	54
FIGURA 2.6 – Gráfico de (tensão/flecha/volume x X_2	56
FIGURA 2.7 – Fluxograma do programa do modelo paramétrico da viga	58
FIGURA 2.8 – Fluxograma do programa de otimização do modelo da viga.....	60
FIGURA 2.9 – Gráfico de Peso x set number (projeto)	63
FIGURA 2.10 – Gráfico de X_1 e X_2 x set number (projeto)	63
FIGURA 2.11 – Gráfico de tensão de Von Mises x set number (projeto)	64
FIGURA 2.12 – Tensão de Von Mises	65
FIGURA 2.13 – Deformação em “Y”	65
FIGURA 3.1 – Blindagem	67
FIGURA 3.2 – Túnel de descarga	69
FIGURA 3.3 – Câmara de Eclusa	70
FIGURA 3.4 – Túnel de Adução	70
FIGURA 3.5 – Geometria da blindagem	71
FIGURA 3.6 – Elemento do tipo Shell 63	81
FIGURA 3.7 – Formação do modelo (pontos e linhas)	82
FIGURA 3.8 – Formação do modelo (áreas)	83
FIGURA 3.9 – Condições de contorno do modelo	84
FIGURA 3.10 – Tensões de Von Mises	84
FIGURA 3.11 – Visualização dos reforços para dissipação de tensões	86
FIGURA 3.12 – Fluxograma do programa do modelo paramétrico da blindagem.....	89

FIGURA 4.17 – Gráfico da altura dos reforços x set number (Projeto)..... 118

FIGURA 4.18 – Tensões de Von Mises (Projeto 2)..... 119

FIGURA 4.19 – Tensões de Von Mises (Projeto 2) 119

FIGURA 4.20 – Tensões de Von Mises (Projeto 2 com espessuras
padronizadas)..... 120

FIGURA 4.21 – Tensões de Von Mises (Projeto 2 com espessuras
padronizadas)..... 121

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Tensões admissíveis segundo norma DIN 19704 de 1976	72
TABELA 3.2 – Tabela de comparativo entre carregamento e tensão admissível	73
TABELA 3.3 – Largura colaborante da viga 1	74
TABELA 3.4 – Tensões de placa	77
TABELA 3.5 – Tensões no reforço	78
TABELA 3.6 – Tensões combinadas (Von Mises) de placa e de reforço	79
TABELA 3.7 – Tensões combinadas (Von Mises) no reforço	80
TABELA 3.8 – Comparativo entre cálculo analítico e análise em elementos finitos.	85



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DV	- Design Variables
SV	- State Variables
APDL	- ANSYS Parametric Designer Language
CAE	- Computer Aided Engineering
CAD	- Computer Aided Designing
CAM	- Computer Aided Manufacturing

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão	Kgf/cm^2
δ	Deflexão	cm
h	Altura	cm
b	Largura	cm
q	Carga distribuída	Kgf/cm^2
F	Força	kgf
L	Comprimento	cm
X_1	Largura	cm
X_2	Altura	cm
M_f	Momento fletor	kgf.cm
W	Módulo de resistência a flexão	cm^3
f	Flecha	cm
E	Módulo de Elasticidade	kgf/cm^2
I	Inércia	cm^4
Lap	Comprimento	cm
Li	Comprimento	cm
Hab	Comprimento	cm
Href	Comprimento	cm
Hi	Comprimento	cm
Lh	Comprimento	cm
σ_{esc}	Tensão de escoamento	kgf/cm^2
ν_a	Coefficiente de Poisson do aço	[l]
Ho	Nível ocasional da água	m
Hn	Nível normal da água	m
Hcl	Nível do eixo da blindagem	m
H	Coluna de água	mca
Ycg	Posição do cg no eixo Y	cm
MS	Momento estático	cm^3
P	Pressão	kgf/cm^2
k	Coefficiente de tensão de placa	[l]
t	espessura	cmt
τ	Tensão de cisalhamento	kgf/cm^2
LBLIN	Comprimento	cm
HBLIN	Comprimento	cm
CBLIM	Comprimento	cm
HALMA	Comprimento	cm
HREF	Comprimento	cm
LABA	Comprimento	cm
TC	Espessura	cm
TALAMA	Espessura	cm
TABA	Espessura	cm
LTOT	Comprimento	cm

PR	Pressão	kgf/cm^2
α_i	Ângulo	$^\circ$
α_{int}	Ângulo	$^\circ$
α_s	Ângulo	$^\circ$
ANG	Ângulo	$^\circ$
DE	Diâmetro	cm
DC	Diâmetro	cm
DS	Diâmetro	cm
α_1	Ângulo	$^\circ$
α_{con}	Ângulo	$^\circ$
X_1	Comprimento	cm
LS	Comprimento	cm
TC	Espessura	cm
TR	Espessura	cm
TR1	Espessura	cm
TCOE	Espessura	cm
TCOS	Espessura	cm
HRE	Altura	cm
HRI	Altura	cm
HRES	Altura	cm
HRESI	Altura	cm
HRES1	Altura	cm

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

O maior desafio do engenheiro é realizar um projeto de desempenho ótimo com a menor quantidade de recursos. O mercado é cada dia mais competitivo exigindo que os projetos sejam executados em um espaço de tempo curto a um custo mínimo.

As empresas que conseguirem vencer este desafio vão sobreviver. Foi este desafio que inspirou este trabalho. Para parametrizar e otimizar em elementos finitos, foi necessário não somente o estudo da ferramenta dos elementos finitos (CAE), mas também sua utilização aliada a parametrização e otimização.

A utilização desta ferramenta, aliada ao CAD e CAM torna todo o processo de projeto e fabricação automatizado e portanto muito mais competitivo.

Parametrizar um projeto é equacionar a sua geometria de forma que esta varie em função de parâmetros independentes.

Otimizar um projeto, significa manipular suas variáveis independentes, com o objetivo de alcançar o máximo desempenho. Para se obter máximo desempenho deve-se minimizar ou maximizar grandezas. Existem dois tipos de projeto: o projeto funcional e o projeto otimizado. O projeto funcional é aquele em que se encontram todos os requerimentos de projeto pré-estabelecidos, mas permite melhorias a serem feitas em certas áreas do projeto.

Antes de otimizar um projeto deve-se perguntar qual o principal objetivo, muitas das vezes o alvo é o mínimo custo, mas isto é muito subjetivo. Não se pode pensar unilateralmente quando se está otimizando um projeto. Otimização de projetos é sempre baseado em critérios como custo, energia, dimensões, peso, confiança, ruído ou performance. Outro importante fato que se deve ter em mente é que ao otimizar um componente de um sistema não significa obrigatoriamente que se está otimizando o sistema, muitas vezes

pode-se até mesmo estar caminhando em sentido contrário (MOAVENI, 1999).

Neste trabalho serão dados casos nos quais o objetivo é reduzir peso, normalmente este é o principal objetivo em estruturas. Em uma melhoria de projeto, inicia-se com a análise do projeto inicial, os resultados são avaliados e verificando se o projeto pode ou não ser melhorado, se a resposta for sim, o projeto é alterado e uma nova avaliação é realizada, o processo se repete até que chegar a um projeto ótimo dentro dos parâmetros preestabelecidos. Este procedimento pode ser visto na Figura 1.1.

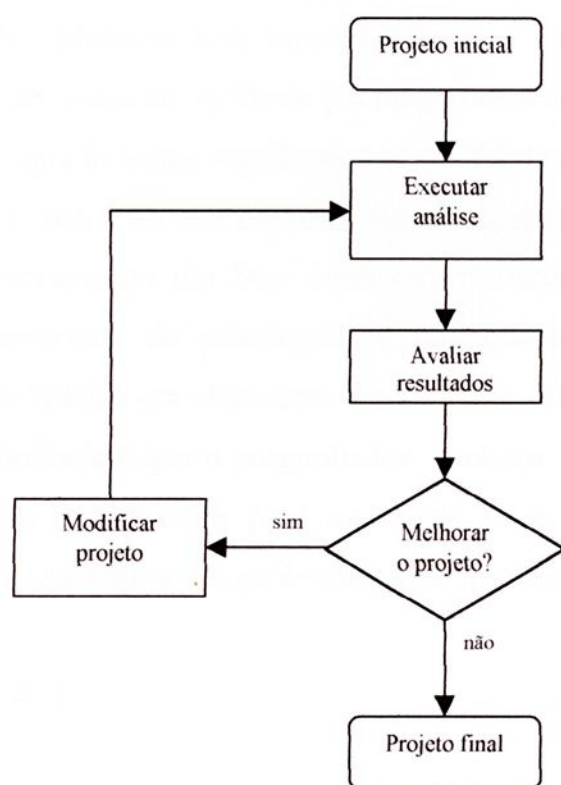


Figura 1.1- Procedimento de otimização de projeto

O enfoque deste trabalho vai ser dado ao projeto de equipamentos hidromecânicos, usados em plantas de geração de energia hidroelétrica, irrigação e estações de bombeamento, mas ficará claro que a parametrização e otimização em elementos finitos traz grandes ganhos em outras áreas, como indústria de construção naval, automobilística, aeroespacial e etc...

Somente há poucos anos atrás é que começou a ficar viável a utilização desta ferramenta, devido ao desenvolvimento dos computadores, por este motivo existem pouquíssimos profissionais no Brasil nesta área.

Este trabalho, não tem enfoque no equacionamento de elementos finitos e otimização, pois já existe uma literatura muito vasta nesta área, no entanto existe pouca literatura a respeito da execução de programas de parametrização e otimização que rodam em softwares de análise em elementos finitos como NASTRAN, ANSYS, COSMOS e etc..

Este trabalho, portanto tem aspecto prático e aborda a elaboração de programas que executam modelos parametrizados e otimizados a fim de obter projetos de equipamentos rapidamente e de mínimo custo tanto do ponto de vista da sua construção mas como de sua concepção. Para a elaboração destes programas deve-se ter um bom conhecimento teórico de elementos finitos, métodos numéricos de otimização e um grande conhecimento sobre o programa de análise em elementos finitos a ser utilizado. Outro requisito de grande importância é que o programador conheça muito bem o produto a ser parametrizado e otimizado pois não deve haver dúvidas na seleção das condições de contorno e dos parâmetros que irão ser variáveis.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é criar uma ferramenta de engenharia capaz de reduzir tempo e custo de projeto e fabricação de equipamentos hidromecânicos.

Esta ferramenta consiste em programas que viabilizam a parametrização e otimização em elementos finitos de modelos. Os programas deverão criar a geometria do modelo parametrizado com sua malha de elementos finitos também parametrizada, aplicar as condições de contorno, solucionar o modelo, definir variáveis de avaliação com suas limitações, definir o objetivo a ser

alcançado na otimização do modelo e o método matemático de otimização a ser utilizado.

Os programas são elaborados em linguagem FORTRAN/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.

A partir de parâmetros iniciais da geometria de um modelo o programa irá variar parâmetros livres dentro de uma faixa preestabelecida com o objetivo de alcançar o peso mínimo sem ultrapassar as tensões admissíveis.

Ao fim deste trabalho será obtido conhecimento suficiente para elaborar programas para parametrização e otimização em ambiente CAE dando base suficiente para o desenvolvimento de novos programas.

1.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em 4 capítulos.

O capítulo 1, ao qual pertence este item, explica o objetivo, que é em resumo otimizar projetos e como este vai ser alcançado utilizando a ferramenta de elementos finito aliada à parametrização e otimização. Neste capítulo é contada resumidamente, a história dos elementos finitos e sua aplicação na solução de problemas de engenharia.

O capítulo 2, descreve a parametrização e otimização dentro do ambiente do programa ANSYS, programa este no qual vão ser executados os programas que criam e otimizam os modelos em elementos finitos. Este capítulo mostra de forma superficial os métodos disponíveis de otimização no programa ANSYS e as ferramentas que podem ser utilizadas para auxiliar a encontrar o projeto ótimo, não houve preocupação em estudar a fundo os métodos e as ferramentas de otimização mas sim dar subsídios para que se possa fazer a melhor escolha para o problema a ser resolvido.



Um caso muito simples de parametrização e otimização é executado, tanto graficamente como através dos programas de parametrização e otimização. Todas as principais partes de um programa de parametrização e otimização são detalhadas, mostrando a concepção básica de um programa para este fim. Com este caso, apesar de ser um caso simples, vão ficar claros os benefícios da parametrização e otimização aliada a análise de elementos finitos.

O capítulo 3, contém um caso de geometria simples ao ponto de poder ser calculada analiticamente, os passos básicos da modelagem desta geometria são mostrados, o cálculo analítico é executado e confrontado com a análise em elementos finitos. Após o confronto entre cálculo analítico e análise em elementos finitos são definidos os cuidados básicos que devem preceder a elaboração dos programas de parametrização e otimização. A otimização é realizada utilizando os programas executados no ambiente do programa ANSYS e a avaliação dos resultados é feita.

O capítulo 4, contém o caso de outra estrutura a ser otimizada, só que a grande diferença desta estrutura para o caso do capítulo 3 é a complexibilidade de sua geometria, não existindo cálculo analítico confiável, onde pequenas alterações em sua geometria causam grandes variações de tensões tornando qualquer tentativa “manual” de otimização um trabalho com poucos lucros. Em contrapartida a utilização da parametrização e otimização aliada a análise em elementos vai se mostrar altamente frutífera.

1.3 ELEMENTOS FINITOS EM PROBLEMAS DE ENGENHARIA

Antes de começar a atacar o objetivo principal deste trabalho, será dada uma síntese sobre elementos finitos, análise numérica, e sobre o software.

Em geral problemas de engenharia são estudados via modelos matemáticos de situações físicas. Modelos matemáticos são representados por equações



diferenciais que traduzem uma série de condições de contorno e condições iniciais. As equações diferenciais são derivadas para por em aplicação as leis fundamentais e princípios da natureza para um sistema ou volume de controle.

Estas equações são obtidas do balanço de massa, força e energia. Quando é possível, a solução exata dessas equações traduz detalhadamente o comportamento de um sistema sobre um dado conjunto de condições. A solução da equação é composta de duas partes: (1) Parte homogênea e (2) Parte particular. Em alguns problemas de engenharia, existem dois tipos de parâmetros que influenciam o caminho no qual o sistema se comporta. Primeiro, existem aqueles parâmetros que provem de informações que consideram o comportamento natural de um dado sistema. Estes parâmetros incluem propriedades como módulo de elasticidade, condutividade térmica e viscosidade. Por outro lado, existem parâmetros que produzem distúrbios em um sistema. Casos desses parâmetros incluem forças externas, momentos, diferença de temperatura através de um meio e diferença de pressão no fluxo de um fluido.

As características que ditam o comportamento natural do sistema sempre aparecem na parte homogênea da solução da equação diferencial. Em contraste, os parâmetros que causam distúrbios aparecem na solução particular. É importante entender todos estes parâmetros em modelamento em elementos finitos em termos de seu respectivo aparecimento em matrizes de rigidez ou condutividade e matriz de cargas ou forças. As características sempre aparecerão na matriz de rigidez, matriz de condutividade ou resistência enquanto os parâmetros de distúrbio aparecerão na matriz de cargas.

Existem muitos problemas práticos de engenharia para os quais não se pode obter solução exata. Esta impossibilidade para obter uma solução exata pode ser atribuída para ambos, a natureza complexa da equação diferencial ou as



dificuldades originadas do comportamento com as condições iniciais e de contorno. Para tratamento de tais problemas recorre-se a aproximações numéricas.

Contrária a solução analítica, que mostra o comportamento exato do sistema em qualquer ponto dentro deste, a solução numérica se aproxima da solução exata somente em pontos discretos, chamados Nós. O primeiro passo de qualquer procedimento numérico é a discretização. Este procedimento divide o meio de interesse em um número de pequenas sub-regiões e nós. Existem duas classes comuns de métodos numéricos: (1) método das diferenças finitas e (2) método dos elementos finitos. Com método das diferenças finitas, a equação diferencial é escrita para cada nó, e as derivadas são repetidas para cada equação diferencial. Isto aproxima os resultados em uma série simultânea de equações lineares. Embora o método de diferenças finitas seja fácil de entender e empregar em problemas simples, ele se torna difícil de aplicar para problemas com geometria complexa ou condições de contorno complexas. Esta situação é também verdadeira para problemas com materiais de propriedades anisotrópicas.

Em contraste, o método de elementos finitos usa formulação integral ao invés de equações diferenciais para criar um sistema algébrico de equações. Além disso, uma função de aproximação contínua é assumida para representar a solução para cada elemento. A solução completa é então gerada pela conexão ou montagem da solução individual, possibilitando a continuidade entre os elementos (MOAVENI, 1999).



1.4 UMA BREVE HISTÓRIA DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E DO “SOFTWARE” ANSYS

O método dos elementos finitos é um procedimento numérico que pode ser aplicado para obter soluções de uma variedade de problemas de engenharia. Problemas de solução permanente, transiente, linear, ou não lineares em análise de tensões, transferência de calor, fluxo de fluido e problemas de eletromagnetismo podem ser analisados com o método de elementos finitos. A origem do método dos elementos finitos moderno pode ter sido traçado em meados de 1900, quando alguns investigadores aproximaram e modelaram um elástico contínuo usando discretização equivalente de barras elásticas. Entretanto, segundo MOAVENI (1999), Courant obteve todos os créditos por ter sido a primeira pessoa a desenvolver o método dos elementos finitos. Em um artigo publicado em meados de 1940, Courant usou interpolação polinomial sobre sub-regiões triangulares para investigar problemas de torção. O próximo passo significativo na utilização do método dos elementos finitos foi dado pela Boeing, 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. Segundo MOAVENI (1999), Zienkiewicz e Cheung escreveram o primeiro livro inteiramente desenvolvido para o método de elementos finitos. Em 1971 foi lançada a primeira versão do “software” ANSYS.

ANSYS é um programa completo de análise em elementos finitos que contém mais de 100.000 linhas de código. O programa é capaz de executar análise estática, dinâmica, transferência de calor, escoamento de fluidos e eletromagnetismo. Tem sido o líder no segmento de programas de análise em



elementos finitos. Atualmente, podemos encontrá-lo em uso por muitos campos da engenharia, incluindo aeroespacial, automotivo, eletrônico e nuclear. A fim de usar ANSYS ou um outro programa de análise de elementos finitos, é imprescindível primeiro uma compreensão dos conceitos básicos e limitações do método dos elementos finitos.

O programa de análise em elementos finitos é uma ferramenta poderosa de engenharia que pode ser usada para resolver uma grande variedade de problemas. No entanto, usá-lo sem um conhecimento básico do método dos elementos finitos é se colocar em sério risco. Seria como um técnico de computadores com acesso aos mais impressionantes instrumentos e ferramentas que não consegue consertar um computador porque não conhece os princípios de funcionamento deste (MOAVENI, 1999).

Entre as muitas publicações já feitas sobre otimização em elementos finitos podem-se realçar:

- TAVARES, S.A. (1974), a publicação aborda a otimização em elementos finitos por análise gráfica e numérica.
- ZHAO, Z.(1991), uma publicação que aborda a otimização numérica em elementos finitos.
- BROUSSE, P.(1988), a publicação demonstra vários métodos numéricos de otimização
- MOAVENI, (1999), este é um livro que além de abordar a teoria dos elementos finitos, contém uma quantidade grande e variada, no que tange as áreas da engenharia, de casos resolvidos tanto pelo método analítico como pelo programa ANSYS. O último capítulo deste livro é destinado a otimização em elementos finitos, mostrando sucintamente esta ferramenta.
- MAHMOUND, K.G. (1997), apresenta um caso de otimização em elementos finitos, demonstrando os métodos numéricos utilizados para otimização e os resultados obtidos desta.

- BORLASE e VLAHOPOULOS (2000), demonstra a aplicação da otimização em elementos finitos na otimização de grandes estruturas sujeitas a vibrações aleatórias como navios, aviões e carros.
- ANNICCHIARICO e CERROLAZA (1999), mostra um algoritmo genérico de otimização e um caso de otimização de geometria utilizando de β -splines, que nada mais são do que curvas de 3º grau.
- CHONGBIN; STEVEN e XIE (1998) A Generalized Evolutionary Method for Natural Frequency Optimization of Membrane Vibration Problems in Finite Element Analysis, neste artigo é apresentado a otimização em elementos finitos de uma membrana onde o limite é a sua frequência natural.
- HERNÁNDEZ (1998), Optimum Design of Steel Structures, o artigo apresenta os conceitos básicos de otimização como: nomenclatura, algoritmo de otimização de um projeto e um caso gráfico de otimização.



CAPÍTULO II - PARAMETRIZAÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANSYS

Será utilizado o programa ANSYS como programa de análise de elementos finitos para executar os programas de parametrização e otimização, portanto, a maioria das informações que constam neste capítulo podem ser encontradas no Manual do Usuário do ANSYS (ANSYS USER'S MANUAL, 1993).

O programa ANSYS oferece dois métodos de otimização para resolver uma larga faixa de problemas de otimização. O método de Aproximação Subproblema é um método de ordem zero que pode ser eficientemente aplicado na maioria dos problemas de engenharia. O método de Primeira Ordem é mais aplicado a projetos mais sensíveis que requerem alta exatidão. Para ambos os métodos Aproximação Subproblema e de Primeira Ordem, o programa ANSYS executa ciclos de análises, sendo que cada ciclo é seguido de avaliações e modificações de parâmetros.

A análise do projeto inicial é executada, o resultado é avaliado e confrontado com os critérios e modificado se necessário. O processo é repetido até que todos os critérios especificados sejam alcançados.

Em adição as duas técnicas disponíveis, o programa ANSYS oferece ferramentas estratégicas que podem ser usadas para aumentar a eficiência do processo de projeto.

Por exemplo o número de iterações da otimização pode ser controlado e os dados iniciais de cálculo de um projeto aleatório pode servir de ponto de partida para alimentar o método de otimização.

Antes de proceder à otimização de projetos, será definido uma terminologia: variável de projeto, variável de estado, função objetivo, projeto realizável e irrealizável, arquivo de análise, iteração, ciclo etc.

Para introduzir esta terminologia será usado um caso:



O objetivo é alcançar o projeto de peso mínimo de uma viga de seção retangular sujeita as seguintes restrições:

A tensão total não deve exceder $\sigma_{\max}$ [$\sigma \leq \sigma_{\max}$]

A deflexão não deve exceder $\delta_{\max}$ [$\delta \leq \delta_{\max}$]

A altura não deve exceder $h_{\max}$ [$h \leq h_{\max}$]

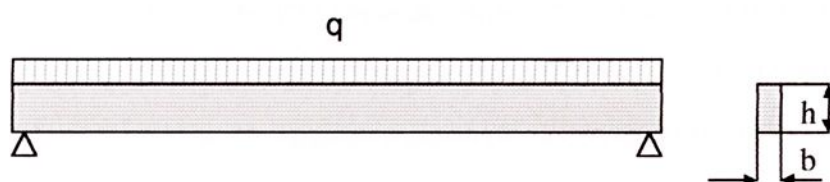


Figura 2.1 - Estrutura a ser otimizada

Variáveis de projeto (DV) são quantidades independentes que são variadas para alcançar o projeto ótimo. Limites superiores e inferiores são especificados para servir de restrições das variáveis de projeto. Estes limites definem a faixa de variação para as variáveis de projeto. No caso acima, a largura “b” e a altura “h” são candidatas naturais para variáveis de projeto. Ambos, b e h não podem ser zero ou negativos, portanto seu limite inferior seria b e $h > 0$, além disso “h” tem um limite superior de “ $h_{\max}$ ”. O programa ANSYS permite que sejam definidas mais de 60 variáveis de projeto em um problema de otimização.

Variáveis de estado (SV) são quantidades que restringem o projeto. Elas são também chamadas de variáveis dependentes e seus valores variam em função das variáveis de projeto. As variáveis de estado podem ter limite máximo e mínimo, ou ter um limite unilateral. A viga por exemplo tem duas variáveis de estado, σ (tensão total) e δ (deflexão total). Pode-se definir mais de 100 variáveis de estado em um problema de otimização no ANSYS.

A função objetivo é a variável dependente que deve ser minimizada. Ela é função das variáveis de projeto, ou seja, mudando os valores das variáveis de projeto se altera o valor da função objetivo. No caso da viga, o peso total da viga pode ser a função objetivo a ser minimizada. Só se pode definir um objetivo em um problema de otimização no ANSYS.

As variáveis de projeto, variáveis de estado e função objetivo são coletivamente referidas como variáveis de otimização. Em uma otimização em ANSYS, as variáveis são representadas por parâmetros. O usuário deve identificar qual parâmetro no modelo é variável de projeto ou estado e qual é o objetivo.

Um projeto é simplesmente um conjunto único de valores de parâmetros que representa uma configuração particular do modelo. Tipicamente, um projeto é caracterizado por parâmetros variáveis para otimização, no entanto, todos os parâmetros do modelo (incluindo aqueles que não são variáveis de otimização) são incluídas neste conjunto.

Um projeto realizável, como pode ser visto na Figura 2.2, é aquele que satisfaz todas as restrições especificadas para as variáveis de projeto e variáveis de estado. Se qualquer uma das restrições não for satisfeita o projeto é considerado irrealizável. O melhor projeto é aquele que satisfaz todas as restrições e produz o valor mínimo da função objetivo.

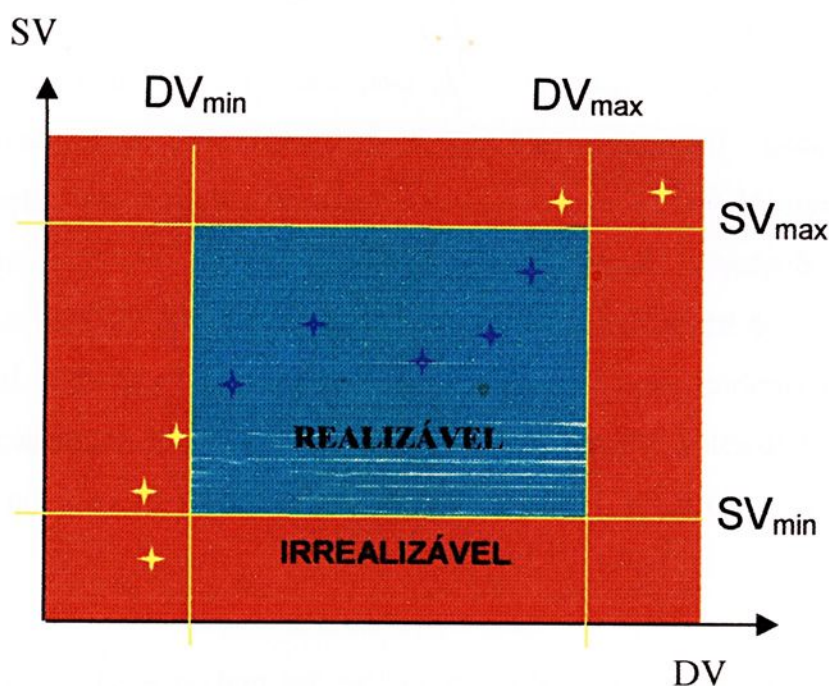


Figura 2.2 - Demonstração gráfica de região realizável e irrealizável em um processo de otimização de projeto.

Antes de continuar a descrever mais sobre criação de programas para parametrização e otimização no ANSYS, é de vital importância entender os principais passos de uma análise em elementos finitos.

Os passos básicos em qualquer análise em elementos finitos consistem em:

1) Fase de Pré-processamento:

a- Cria e discretiza o domínio de solução em elementos finitos, isto é, subdivide o problema em nós e elementos.

b- Assume a função de forma para representar o comportamento físico de um elemento, isto é, uma função de aproximação contínua é assumida para representar a solução do elemento.

Um ciclo é uma passagem através de uma análise (pré-processamento, solução e pós-processamento) ou seja, uma passagem através do Arquivo de Análise. O resultado do último ciclo é salvo no arquivo **"jobname.opo"**. Uma iteração de otimização (ou simples iteração) é um ou mais ciclos de análise. No entanto, para o método de primeira ordem, uma iteração representa mais de um ciclo. A base de dados de otimização contém o ambiente da otimização atual, a qual inclui a definição das variáveis de otimização, parâmetros, todas as especificações de otimização, e os projetos acumulados. Estes dados podem ser salvos no arquivo jobname.opt ou recuperados a qualquer momento da otimização.

Todos estes conceitos podem ser melhor entendidos através da Figura 2.3 a qual mostra o fluxo de informações durante uma análise de otimização. O Arquivo de Análise deve existir como uma entidade separada, e a base de dados de otimização não é parte da base de dados do modelo do ANSYS.

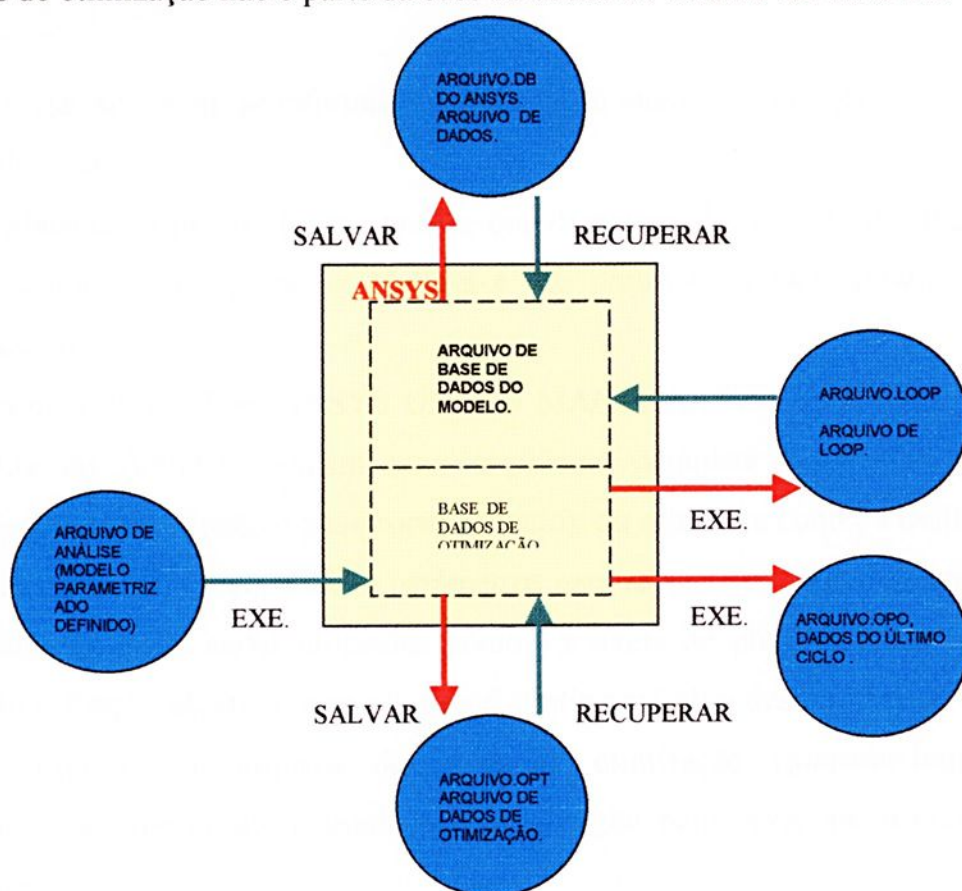


Figura 2.3 - Fluxo de dados durante a otimização

c- Desenvolve equações para um elemento.

d- Monta os elementos para apresentar o problema inteiro e forma a matriz de rigidez global.

e- Aplica as condições de contorno, condições iniciais e carregamento.

2) Fase de Solução:

Resolve o sistema de equações algébricas lineares ou não lineares simultaneamente para obter os resultados nodais, os quais são valores de deslocamento entre nós ou diferenças de temperatura entre nós em um problema de transferência de calor.

3) Fase de Pós-processamento:

Nesta fase, se obtém as informações as quais há interesse como tensões, fluxo de calor e etc...

Já explicados os passos de uma análise em elementos finitos, será detalhado o funcionamento do programa ANSYS e dos arquivos criados durante uma otimização.

O Arquivo de Análise (ANSYS USER'S MANUAL,1993) é um arquivo de entrada do ANSYS, contém uma seqüência completa de análise (pré-processamento, solução e pós-processamento), ou seja deve conter a definição do modelo paramétrico, usando parâmetros para representar todas as entradas e saídas as quais serão utilizadas como variáveis de projeto, variáveis de estado e função objetivo, este arquivo é o principal alvo deste trabalho. Com este arquivo, um arquivo de ciclo de otimização (jobname.loop) é automaticamente criado e usado pela otimização para executar o ciclo da análise.

Como pode ser visto na Figura 2.3, o arquivo de análise é o principal arquivo, nele está a definição de todo o modelo parametrizado, suas variáveis de projeto, variáveis de estado, função objetivo e o método de otimização a ser utilizado. Neste trabalho será estudada a elaboração deste arquivo, mas antes de entrar em detalhes sobre a programação, que serão dados em casos práticos em capítulos futuros, é importante entender o equacionamento que envolve a otimização, os métodos de otimização e as ferramentas disponíveis para encontrar uma solução ótima.

2.1 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO E FERRAMENTAS DE PROJETO

As variáveis independentes em uma análise de otimização são as variáveis de projeto (ANSYS USER'S MANUAL, 1993). O vetor das variáveis de projeto é indicado por:

$$X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \dots X_n] \quad (2.1)$$

No projeto de uma estrutura uma variável de projeto poderia ser qualquer grandeza geométrica como espessura, altura ou comprimento.

Variáveis de projeto estão sujeitas a “n” restrições com limite superior e inferior, as quais são:

$$\underline{X}_i \leq X_i \leq \overline{X}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.2)$$

onde: n = número de variáveis de projeto

As restrições das variáveis de projeto são freqüentemente referidas como restrições laterais e definem o espaço de projeto, a barra inferior indica o limite inferior e a barra superior indica o limite superior.

A função objetivo a ser minimizada é:

$$f = f(x) \quad (2.3)$$

No caso de uma estrutura a função objetivo é o peso e o objetivo é minimizar esta função.

A função objetivo está sujeita a limites:

$$g_i(x) \leq \bar{g}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_1) \quad (2.4)$$

$$\underline{h}_i(x) \leq h_i(x) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_2) \quad (2.5)$$

$$\underline{w}_i \leq w_i(x) \leq \bar{w}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_3) \quad (2.6)$$

onde :

g_i , h_i , w_i são variáveis de estado contendo o projeto, com barras superiores e barras inferiores representando os limites superiores e inferiores respectivamente.

Variável de estado podem ser tensões e deformações.

$m_1 + m_2 + m_3 =$ número total de variáveis de estado restringidas com vários limites superiores e inferiores.

As variáveis de estado podem também ser referidas como variáveis dependentes as quais variam com o vetor “ x ” das variáveis de projeto.

As equações de 2.3 a 2.6 representam um problema de minimização com restrições as quais direcionam a minimização da função objetivo “ f ” sob as restrições impostas pelas equações 2.2, 2.4, 2.5 e 2.6.

Como já foi visto, configurações de projeto que satisfazem todas as restrições são chamados como projetos realizáveis.

Configurações de projeto com uma ou mais violações são chamados de projetos irrealizáveis .

Em um espaço definido de projeto realizável, é adicionada uma tolerância para cada limite da variável de estado. Então se x^* é um dado projeto definido como:

$$x^* = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ \dots \ x_n^*] \quad (2.7)$$

O projeto é realizável somente se:

$$g_i^* = g_i(x^*) \leq \overline{g_i} + \alpha_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_1) \quad (2.8)$$

$$\underline{h_i} - \beta_i \leq h_i^* = h_i(x^*) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_2) \quad (2.9)$$

$$\underline{w_i} - \gamma_i \leq w_i^* = w_i(x^*) \leq \overline{w_i} + \gamma_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_3) \quad (2.10)$$

onde:

α_i , β_i , e γ_i são tolerâncias.

e:

$$\underline{x_i} \leq x_i^* \leq \overline{x_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.11)$$

(desde que nenhuma tolerância seja somada a variável de restrição de projeto)

As equações de (2.8) a (2.11) definem as regras de um projeto realizável nas rotinas de otimização do ANSYS.

Os projetos são gerados por métodos ou ferramentas e se uma função objetivo é definida, o melhor projeto é computado e seu número é guardado. O melhor projeto é determinado sobre uma das seguintes condições:

1. Se um ou mais projetos realizáveis existirem, o melhor projeto é o projeto realizável com o valor da função objetivo mais baixo.
2. Se todos os projetos forem irrealizáveis, o melhor projeto é aquele que estiver mais próximo de ser realizável, sem considerar o valor da função objetivo.

Métodos de otimização são técnicas que convergem para minimização de uma função singular (função objetivo, equação 2.3) sujeita a restrições. Como já mencionado, são disponíveis dois métodos: Método de Aproximação Subproblema e Método de Primeira Ordem. O programa permite ainda que o usuário utilize um algoritmo externo de otimização no lugar dos algoritmos disponíveis no ANSYS. Ferramentas de projeto, por outro lado, não executam a otimização. O uso de ferramentas oferece meios para entender o espaço de projeto e o comportamento das variáveis dependentes. Os métodos e as ferramentas serão vistas a seguir.

2.1.1 Método de Aproximação Subproblema

É um método avançado de ordem zero, que usa aproximações (curvas de ajuste) para todas as variáveis dependentes (variáveis de estado e função objetivo). É um método que pode geralmente ser aplicado eficientemente para uma ampla faixa de problemas de engenharia.

Este método requer somente o valor das variáveis dependentes, e não das suas derivadas.

Existem dois conceitos que fazem o papel fundamental do Método de Aproximação Subproblema; o uso de aproximações para a função objetivo e variáveis de estado, e conversão de problema de otimização restrito para um problema irrestrito usando funções de penalidade.

Para este método, o programa estabelece relações entre a função objetivo e as variáveis de estado por uma curva de ajuste. Isto é feito calculando a função objetivo para vários projetos e executando a aproximação dos mínimos quadrados entre os pontos de dados. A curva resultante (ou superfície) é chamada de aproximação. Cada ciclo de otimização gera um novo ponto de dados, e a aproximação da função objetivo é atualizada.

As variáveis de estado são controladas da mesma maneira. Uma aproximação é gerada para cada variável de estado e atualizada no fim de cada ciclo.

É possível controlar a curva de ajuste para a aproximação de otimização. Pode-se usar um ajuste linear, quadrático ou quadrático com cruzamento de termos.

O primeiro passo da minimização de um problema restrito expresso pelas equações (2.2) e (2.3) é representar cada variável dependente por uma aproximação, representada pela notação $\hat{}$. Para a função objetivo ,

$$\hat{f}(x) = f(x) + \text{erro} \quad (2.12)$$

E similarmente para as variáveis de estado,

$$\hat{g}(x) = g(x) + \text{erro} \quad (2.13)$$

$$\hat{h}(x) = h(x) + \text{erro} \quad (2.14)$$

$$\hat{w}(x) = w(x) + \text{erro} \quad (2.15)$$

A forma mais complexa de aproximação que se pode ter é uma representação quadrática completa com cruzamento de termos. Usando o exemplo da função objetivo,

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i^n a_i x_i + \sum_i^n \sum_j^n b_{ij} x_i x_j \quad (2.16)$$

A forma real de cada ajuste varia de iteração para iteração e é determinada pelo programa. Alguns controles no entanto estão disponíveis no programa. Uma técnica dos mínimos quadrados ponderada é usada para determinar coeficientes, a_i e b_j na equação (2.16). Por exemplo, a norma do erro dos coeficientes mínimos quadrados para a função objetivo tem a forma:

$$E^2 = \sum_{j=1}^{n_d} \phi^{(j)} (f^{(j)} - \hat{f}^{(j)})^2 \quad (2.17)$$

onde: $\phi^{(j)}$ = coeficiente ponderador associado com o projeto "j"

n_d = número do projeto corrente

Normas similares E^2 são formadas para cada variável de estado.

Um certo número de projetos deve existir para formar as aproximações, caso contrário projetos aleatórios devem ser gerados até que um requerido número seja obtido. Isto pode ser definido como:

$$n_d < n+2 \rightarrow \text{gerar projetos aleatórios} \quad (2.18)$$

$$n_d \geq n+2 \rightarrow \text{formar aproximações}$$

onde:

n = número de variáveis de projeto

n_d = número de projetos

Quanto mais dados ou seja projetos forem gerados, os termos incluídos na equação (2.16) são acrescentados.

2.1.1.1 Conversão para problema irrestrito

Variáveis de estado e limites das variáveis de projeto são usadas para restringir o projeto e tornar o problema de otimização em um problema restrito .

O programa ANSYS converte este problema para um problema irrestrito de otimização, porque as técnicas de minimização são mais eficientes para estes casos. A conversão é feita adicionando penalidades para a aproximação da função objetivo para levar em conta a imposição das restrições.

O problema de minimização restrito é alterado como é mostrado a seguir:

Minimizar:

$$\hat{f} = \hat{f}(x) \quad (2.19)$$

Sujeito a:

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.20)$$

$$\hat{g}_i(x) \leq \bar{g}_i + a_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_1) \quad (2.21)$$

$$\underline{h}_i - \beta_i \leq \hat{h}_i(x) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_2) \quad (2.22)$$

$$\underline{w}_i - \gamma_i \leq \hat{w}_i(x) \leq w_i + \gamma_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_3) \quad (2.23)$$

O próximo passo é a conversão da equação (2.19) a (2.23) de um problema restrito para um problema irrestrito. Isto é realizado pelo meio de funções de penalidade, como pode ser visto a seguir:

Minimizar:

$$F(x, p_k) = \hat{f} + f_0 \cdot p_k \left[\sum_{i=1}^n X(x_i) + \sum_{i=1}^{m_1} G(\hat{g}_i) + \sum_{i=1}^{m_2} H(\hat{h}_i) + \sum_{i=1}^{m_3} W(\hat{w}_i) \right] \quad (2.24)$$

na qual X é a função penalidade usada para forçar as restrições das variáveis de projeto, e G , H e W são funções de penalidade para as restrições das variáveis de estado. O valor de referência da função objetivo, f_0 , é introduzido em ordem para alcançar unidades consistentes. Notar que a função objetivo irrestrita (também chamada de resposta de superfície), $F(x, p_k)$, é vista variando com as variáveis de projeto e o valor de p_k , o qual é um parâmetro da superfície de resposta. Uma técnica seqüencial de minimização irrestrita é usada para resolver a equação (2.24) a cada iteração de projeto.

O subscrito k acima reflete o uso de sub-iterações executadas durante a solução subproblema, por meio do qual um parâmetro de resposta de superfície é aumentado em valor ($p_1 < p_2 < p_3 < \text{etc.}$) em ordem para alcançar precisão e convergência de resultados.

Todas funções de penalidade usadas são do tipo interior estendido. Por exemplo, perto do limite superior, função de penalidade de variável de projeto é formada como:

$$X(x) = \begin{cases} c_1 + c_2/(\bar{x} - x_i) & \text{se } x_i < \bar{x} - \varepsilon (\bar{x} - \underline{x}) \\ c_3 + c_4 \cdot (x_i - \bar{x}) & \text{se } x_i \geq \bar{x} - \varepsilon (\bar{x} - \underline{x}) \end{cases} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (2.25)$$

onde:

c_1, c_2, c_3 e c_4 = constantes que são internamente calculados pelo programa.

Penalidades de variável de estado tem forma similar. Por exemplo, novamente perto do limite superior,

$$W(w) = \begin{cases} d_1 + d_2/(\bar{w} - \hat{w}_i) & \text{se } \hat{w}_i < \bar{w} - \varepsilon (\bar{w} - \underline{w}_i) \\ d_3 + d_4 \cdot (\hat{w}_i - \bar{w}) & \text{se } \hat{w}_i \geq \bar{w} - \varepsilon (\bar{w} - \underline{w}_i) \end{cases} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (2.26)$$

onde:

d_1, d_2, d_3 e d_4 = constantes que são internamente calculados .

e é similarmente obtido para G e H. Ver Figura 2.4.

ε = número muito pequeno positivo.

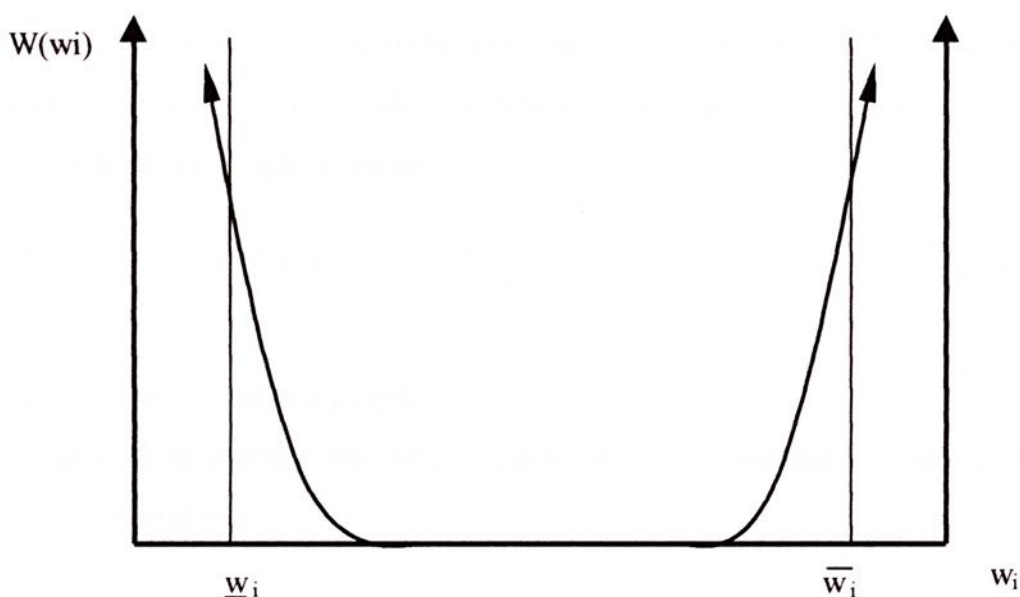


Figura 2.4- Função de Penalidade interior estendida no espaço da variável de estado.

A Figura 2.4 demonstra o funcionamento da função penalidade a qual é um termo da função objetivo, próximo dos limites superior e inferior o valor proveniente da função de penalidade tende para o infinito fazendo com que o resultado da função objetivo seja alto próximo dos limites das variáveis de estado e projeto, com isto para obter o mínimo da função objetivo vão ser utilizados valores dentro dos limites das variáveis de projeto e estado.

O algoritmo é empregado para alcançar o mínimo da função objetivo irrestrita,

$\tilde{F}^{(j)}$, na iteração do projeto j tem-se:

$$x^{(j)} \rightarrow \tilde{x}^{(j)} \text{ como } F^{(j)} \rightarrow \tilde{F}^{(j)} \quad (2.27)$$

onde: $\tilde{x}^{(j)}$ é o vetor da variável de projeto correspondente a $\tilde{F}^{(j)}$

O passo final executado em cada iteração é a determinação do vetor da variável de projeto a ser usado na próxima iteração ($j+1$). Vetor $x^{(j+1)}$ é determinado pela equação a seguir.

$$x^{(j+1)} = x^{(b)} + C(\tilde{x}^{(j)} - x^{(b)}) \quad (2.28)$$

onde:

$x^{(b)}$ = constantes do melhor projeto.

C = variável de escolha interna que varia de 0 a 1, baseado no número de soluções irrealizáveis.

A procura por um mínimo da função irrestrita de aproximação do objetivo é então levada a cabo aplicando uma técnica seqüencial de minimizações irrestritas para cada iteração.

2.1.1.2 Verificação de convergência

As iterações da Aproximação Sub-problema continua até qualquer convergência ser alcançada ou o término ocorrer. Estes dois eventos são checados somente quando o número corrente de projetos, nd , for igual ou exceder o número de aproximações requeridas ver equação (2.18).

No fim de cada ciclo, uma verificação para convergência (ou terminação) é feito. O problema é dito convergido se o projeto corrente $x^{(j)}$, anterior $x^{(j-1)}$, ou o melhor projeto $x^{(b)}$ é realizável e quaisquer das condições seguintes são satisfeitas

- A alteração na função objetivo do melhor projeto realizável para o corrente projeto é menor que a tolerância da função objetivo.

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \tau \quad (2.29)$$

- A alteração na função objetivo entre os dois últimos projetos é menor que a tolerância da função objetivo.

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \tau \quad (2.30)$$

- As alterações em todas as variáveis de projeto do corrente projeto para o melhor projeto realizável são menores do que suas respectivas tolerâncias.

$$|x_i^{(j)} - x_i^{(b)}| \leq \rho_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.31)$$

- As alterações em todas as variáveis de projeto entre os dois últimos projetos é menor que suas respectivas tolerâncias.

$$|x_i^{(j)} - x_i^{(j-1)}| \leq \rho_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.32)$$

onde: τ e ρ_i = tolerâncias da função objetivo e das variáveis de projeto

Convergência não necessariamente indica que o mínimo global tenha sido obtido. Somente significa que um dos quatro critérios mencionados anteriormente foi obtido. No entanto é de responsabilidade do engenheiro determinar se o projeto foi suficientemente otimizado, se não foi, pode-se executar análises de otimização adicionais.

Algumas vezes a solução pode terminar antes da convergência ser alcançada. Isto acontece se uma das seguintes condições for verdadeira.

- O número de ciclos especificados for executado.
- O número de projetos irrealizáveis consecutivos alcançar um limite especificado.

2.1.1.3 Considerações especiais para Aproximação Subproblema.

Por causa das aproximações serem usadas para a função objetivo e variáveis de estado, o projeto ótimo será somente tão bom quanto as aproximações. Diretrizes para ajudar a estabelecer uma boa aproximação são apresentadas a seguir.

Para a Aproximação Subproblema, a otimização se inicializa gerando um projeto aleatório para estabelecer aproximações das variáveis de estado e função objetivo. Por causa destes projetos aleatórios, a convergência pode ser lenta. Pode-se algumas vezes aumentar a velocidade de convergência pelo fornecimento de mais de um projeto inicial realizável. Simplesmente rodando um número de projetos aleatórios e descartando todos os projetos irrealizáveis.

Periodicamente, deve-se selecionar os melhores projetos entre cada rodada do método de Aproximação Subproblema para forçar um melhor ajuste da curva de aproximação.

2.1.2 Método de Primeira Ordem

Como o Método de Aproximação Subproblema (ANSYS USER'S MANUAL, 1993), o método de Primeira Ordem converte o problema restrito em um problema irrestrito pela adição de funções de penalidade para a função objetivo. Porém, diferente do método Aproximação Subproblema, a representação em elementos finitos real é minimizada, não por aproximação.

O Método de Primeira Ordem usa gradientes das variáveis dependentes em relação as variáveis de projeto. Para cada iteração, o cálculo de gradiente (o qual pode empregar um decréscimo mais íngreme ou método da direção conjugada) é executado em ordem para determinar uma direção de procura, e uma linha de estratégia é adotada para minimizar o problema irrestrito.

Assim, cada iteração é composta de um número de sub-iterações que inclui direção de procura e cálculo de gradiente. Isto é o porque uma iteração de Método de Primeira Ordem executa muitos ciclos de análise.

Comparado com o Método de Aproximação Subproblema, este método exige maior demanda de processamento, no entanto é mais preciso.

A versão irrestrita do problema é formulada a seguir:

$$Q(x,q) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \left[\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) + \sum_{i=1}^{m_3} P_w(w_i) \right] \quad (2.33)$$

onde:

Q = função objetivo irrestrita adimensional

P_x, P_g, P_h , e P_w = funções penalidade aplicadas para restringir o projeto e variáveis de estado.

f_0 = valor da função objetivo de referência selecionado do grupo corrente de projetos.

A restrição é controlada por uma resposta do parâmetro de superfície, q .

Funções exteriores de penalidade (P_x) são aplicadas para as variáveis de projeto. As restrições das variáveis de estado são representadas pelas funções de penalidade (P_g, P_h, P_w). Por exemplo, para restringir a variável de estado por um limite superior a função penalidade é escrita como:

$$P_g(g_i) = \left(\frac{g_i}{g_i + a_i} \right)^{2\lambda} \quad (2.34)$$

onde:

λ = inteiro de forma que a função será muito grande quando a restrição for violada e muito pequena quando isto não ocorrer.

As funções usadas para as penalidades restantes são de forma similar.

Como as direções de procura são criadas, uma certa vantagem computacional pode ser obtida se a função Q for reescrita como a soma de duas funções.

Definindo como:

$$Q_f(x) = \frac{f}{f_0} \quad (2.35)$$

e

$$Q_P(x, q) = \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \left[\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) + \sum_{i=1}^{m_3} P_w(w_i) \right] \quad (2.36)$$

então a equação (2.33) toma a forma:

$$Q(x, q) = Qf(x) + Qp(x, q) \quad (2.37)$$

As funções Qf e Qp descrevem respectivamente a função objetivo e penalidades de restrição.

2.1.2.1 Direção de procura

Para cada iteração de otimização (j) um vetor de direção de procura, $d(j)$, é criado. A próxima iteração ($j+1$) é obtida da seguinte equação:

$$x^{j+1} = x^{(j)} + s_j d^{(j)} \quad (2.38)$$

Medido de $x^{(j)}$, o parâmetro de linha de procura, s_j , corresponde ao valor mínimo de Q na direção $d^{(j)}$. Uma solução para s_j usa uma combinação de algoritmo de “golden-section” e uma técnica de ajuste quadrático local. A faixa de s_j é limitada em:

$$0 \leq s_j \leq \frac{S_{\max}}{100} s_j^* \quad (2.39)$$

onde:

s_j^* = maior tamanho possível de passo para linha de procura da iteração corrente (este valor é calculado internamente pelo programa).

$S_{\max}$ = máxima tamanho do passo da linha de procura.

A chave para a solução da minimização global da equação (2.37) é baseada na geração seqüencial da direção de procura e ajustes internos do parâmetro de resposta de superfície q . Para a iteração inicial ($j=0$), a direção de procura é assumida como negativa do gradiente da função objetivo irrestrita.

$$d^{(0)} = -\nabla f(x^{(0)}) \quad (2.40)$$

na qual $q = 1$, e

$$d_f^{(0)} = -\nabla Q_f(x^{(0)}) \quad \text{e} \quad d_p^{(0)} = -\nabla Q_p(x^{(0)}) \quad (2.41)$$

Claramente para a iteração inicial o método de procura é o de descida mais íngreme. Para as iterações subseqüentes ($j > 0$), direções conjugadas são formadas pela formula:

$$d^{(j)} = -\nabla Q(x^{(j)}, q_k) + r_{j-1} d^{(j-1)} \quad (2.42)$$

$$r_{j-1} = \frac{[\nabla Q(x^{(j)}, q) - \nabla Q(x^{(j-1)}, q)]^T \nabla Q(x^{(j)}, q)}{|\nabla Q(x^{(j-1)}, q)|^2} \quad (2.43)$$

Observe que quando todas as restrições de variáveis de projeto são satisfeitos $P(x_i) = 0$. Isto significa q pode ser fatorado fora de Q_p , e pode ser escrito como:

$$Q_p(x^{(j)}, q) = q \cdot Q_p(x^{(j)}) \quad \text{se} \quad \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.44)$$

Se correções adequadas são feitas, q pode ser alterado de iteração para iteração sem destruição da conjugação natural da equação (2.42). O Ajuste de q providencia controle interno das restrições das variáveis de projeto, empurrando restrições para seus valores limites quanto necessário for para que a convergência seja alcançada. A justificativa para isto torna-se mais evidente uma vez que a equação (2.42) é separada em dois vetores de direção:

$$d^{(j)} = d_f^{(j)} + d_p^{(j)} \quad (2.45)$$

onde cada direção tem uma relação separa,

$$d_f^{(j)} = -\nabla Q_f(x^{(j)}) + r_{j-1} d_f^{(j-1)} \quad (2.46)$$

$$\mathbf{d}_p^{(j)} = -q \nabla Q_p(\mathbf{x}^{(j)}) + \mathbf{r}_{j-1} \mathbf{d}_p^{(j-1)} \quad (2.47)$$

O algoritmo é ocasionalmente reiniciado impondo $\mathbf{r}_{j-1} = 0$, forçando uma iteração de decréscimo mais íngreme. O reinício, é empregado sempre que condições desfavoráveis são detectadas, convergência está próxima de ser alcançada, ou satisfação da restrição de variável de estado crítica é muito conservativa.

Até agora tem sido assumido que o vetor gradiente está disponível. O vetor gradiente é computado usando uma aproximação como segue:

$$\frac{\partial Q(\mathbf{x}^{(j)})}{\partial x_i} \approx \frac{Q(\mathbf{x}^{(j)} + \Delta x_i \cdot \mathbf{e}) - Q(\mathbf{x}^{(j)})}{\Delta x_i} \quad (2.48)$$

onde:

$\mathbf{e}$ = vetor com 1 em sua i -ésima componente e 0 para todas as outras componentes.

$$\Delta x_i = \frac{\Delta D}{100} (\bar{x}_i - \underline{x}_i) \quad (2.49)$$

ΔD = diferença (em porcentagem) do tamanho de passo a frente (este valor pode ser controlado pelo usuário).

2.1.2.2 Verificação de convergência

As iterações do Método de primeira ordem continuam até que a convergência seja alcançada ou o término ocorra. Esses dois eventos são checados no fim de cada iteração de otimização. O problema é dito convergido se, quando

comparando a iteração do projeto corrente com o anterior e os melhores, uma das seguintes condições é satisfeita:

- A alteração na função objetivo do melhor projeto para o corrente projeto é menor do que a tolerância da função objetivo.

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \tau \quad (2.50)$$

- A alteração na função objetivo do projeto anterior para o corrente projeto é menor do que a tolerância da função objetivo.

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \tau \quad (2.51)$$

onde: τ = tolerância da função objetivo

É também, um requisito essencial, que a iteração final use um decréscimo mais íngreme de procura, ou de outra forma iterações adicionais são executadas.

O problema pode terminar antes da convergência ser alcançada, se o número de iterações previamente especificado for alcançado.

2.1.2.3 Considerações especiais a respeito do Método de Primeira Ordem

Comparado com o Método de Aproximação Subproblema, o Método de Primeira Ordem parece ter muito mais demanda computacional e muito mais precisão. No entanto, alta precisão não significa sempre garantia de melhor solução. A seguir temos algumas situações a observar:

- É possível para o Método de Primeira Ordem convergir para um projeto irrealizável. Neste caso, existe a probabilidade de encontrar um mínimo

local, ou não existir uma região de projeto realizável. Se isto ocorrer, pode ser útil rodar uma análise pelo Método de Aproximação Subproblema, o qual é melhor para análise de um grande espaço de projeto. Também pode-se tentar gerar projetos aleatórios para tentar localizar um espaço de projeto realizável e então utilizar o Método de Primeira Ordem usando um projeto realizável como ponto de partida.

- O Método de Primeira Ordem tem mais probabilidade para encontrar um mínimo local. Isto é porque o Método de Primeira Ordem inicia a partir de um ponto existente no espaço de projeto e trabalha no caminho para o mínimo. Se o ponto de partida é muito próximo de um mínimo local, pode-se encontrar este ponto ao invés do mínimo global. Se houver suspeita de ter como resultado um mínimo local pode-se tentar usar o Método de Aproximação Subproblema ou geração de projeto aleatório como já descrito anteriormente.
- Uma tolerância de função objetivo muito apertada pode causar um alto número de iterações a serem executadas. Por causa deste método resolver a representação atual de elementos finitos (não uma aproximação), ele irá se esforçar para encontrar uma solução exata baseada em uma dada tolerância.

2.1.3 Geração de projeto aleatório

Para geração de projeto aleatório, (ANSYS USER'S MANUAL,1993) o programa executa um especificado número de ciclos de análise usando variáveis de projeto aleatório para cada ciclo.

$x = x^*$ = vetor gerado aleatoriamente

em cada caso f^* , g_i^* , h_i^* , e w_i^* ; ira pegar valores correspondendo a x^* .

Cada iteração de projeto aleatório é equivalente a um completo ciclo de análise.



O número de ciclos é especificado e pode ser ainda usado um controle adicional especificando, o número de projetos factíveis que se deseja alcançar, portanto o que acontecer primeiro termina a geração de projetos aleatórios.

$$n_r = N_r \quad (2.52)$$

$$n_f = N_f \quad \text{se} \quad N_f \geq 1 \quad (2.53)$$

onde:

- n_r = número de iterações aleatórias executadas.
- n_f = número de projetos realizáveis.
- N_r = número máximo de iterações.
- N_f = número de máximo de projetos realizáveis desejado.

Geração de projetos aleatórios é freqüentemente usado como um precursor para uma otimização usando Aproximação Subproblema. Pode ser também ser usado para desenvolver tentativas de projeto para uma variedade de propósitos. Por exemplo, um número de projetos aleatórios pode ser gerado, e então revistos em ordem para julgar a validade do espaço de projeto corrente.

2.1.4 Ferramenta de Varredura

A ferramenta de varredura (ANSYS USER'S MANUAL,1993) é usada para executar uma varredura global do espaço de projeto. Exatamente $n.N_s$ projetos são gerados, onde n é o número de variáveis de projeto e N_s é o número de pontos de avaliação por varredura. Para cada variável de projeto, a gama de variáveis é dividida em N_s-1 incrementos iguais, e N_s ciclos são executados. A variável de projeto em questão é incrementada para cada ciclo, enquanto as variáveis de projeto remanescentes são fixadas em seus valores referentes .Os

valores referentes das variáveis de projeto correspondem ao projeto usado como base.

Por exemplo, considere uma porção de uma varredura que é executada para variável de projeto k . Para simplificar, deixa-se o número dos projetos resultantes como $m+1, m+2, \text{etc.}$, onde m é a quantidade de todos os projetos antes existentes para esta parte da varredura.

As variáveis de um dado projeto $m+i$ podem ser expressadas como:

$$x^{(m+i)} = x^{(r)} + (i-1) \cdot \Delta x_k e^{(k)} \quad (i=1,2,3,\dots,N_s) \quad (2.54)$$

onde:

$x^{(r)}$ = variáveis de projeto de referência, com a variável $\underline{X}_k$ na k -enésima componente fixa, e com valores de referência em todas as outras componentes fixos.

$e^{(k)}$ = vetor com 1 em sua k -enésima componente e 0 para todas as outras componentes

O incremento de varredura para variável de projeto k é:

$$\Delta x_k = \frac{(\bar{x}_k - \underline{x}_k)}{(N_s - 1)} \quad (2.55)$$

2.1.5 Ferramenta Fatorial

A Ferramenta Fatorial (ANSYS USER'S MANUAL, 1993) emprega técnicas para gerar resultados de projetos em todos os pontos extremos (ou cantos) do espaço de projeto. Com esta ferramenta podemos gerar gráficos que mostram a influência de cada variável de projeto na função objetivo.

Uma avaliação total fatorial de n variáveis de projetos criará n_f projetos, onde:

$$n_f = 2^n \quad (2.56)$$

Todos os componentes de um vetor de variáveis de projeto terão dois valores extremos, os quais são:

$$x_i = \overline{x}_i \text{ ou } \underline{x}_i \quad (2.57)$$

Portanto, em uma avaliação fatorial, todas as combinações dos valores extremos das variáveis de projeto são considerados em um n-dimensional espaço de projeto.

O número gerado de projetos associado com uma avaliação fatorial fracionária é expressada como:

$$n_f = \frac{2^n}{M} \quad (M = 2, 4, 8 \dots) \quad (2.58)$$

Conseqüentemente, uma avaliação fatorial de fração $\frac{1}{2}$ ($M=2$) renderá metade de uma avaliação total.

2.1.6 Ferramenta Gradiente

A Ferramenta Gradiente (ANSYS USER'S MANUAL,1993), armazena um gradiente em um ponto do espaço de projeto.

Os resultados obtidos são muito úteis para estudar a sensibilidade da função objetivo perante a variação das variáveis de projeto entre -1% e $+1\%$.

Os resultados podem ser mostrados em forma gráfica.

A função objetivo pode ser denotada com

$$f_r(x) = f(x^{(n)}) \quad (2.59)$$

O gradiente da função objetivo é simplesmente expressado como:

$$\nabla f_r(x) = \left[\frac{\partial f_r}{\partial x_1}, \frac{\partial f_r}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_r}{\partial x_n} \right] \quad (2.60)$$

Para cada variável de projeto, o gradiente é aproximado para a diferença:

$$\frac{\partial f_r}{\partial x_i} = \frac{f_r(x + \Delta x_i(e)) - f_r(x)}{\Delta x_i} \quad (2.61)$$

onde:

e = vetor com 1 em seu i -ésimo componente e 0 para todas as outras componentes.

$$\Delta x_i = \frac{\Delta D}{100} (\bar{x}_i - \underline{x}_i)$$

ΔD = diferença entre a variável de projeto atual e o posterior (em %) (este valor é dado pelo usuário ou o programa usa um valor pré-definido)

2.2 OTIMIZAÇÃO DE UMA VIGA ENGASTADA

Este caso, de geometria do modelo simples, visa introduzir os conceitos básicos da elaboração de um programa de parametrização e otimização.

O modelo consiste em uma viga de aço carbono de comprimento $L=200$ cm de seção retangular, engastada em uma de suas extremidades e com uma carga concentrada $F = 2000$ kgf aplicada na outra extremidade, como é mostrado na Figura 2.5.

Deve-se dimensionar a viga para que esta tenha o mínimo peso, levando em conta as seguintes considerações:

- A deformação na extremidade da viga ou seja a flecha máxima não deve ultrapassar $1,5$ cm ($f \leq 1,5$ cm).
- A tensão de flexão não deve ultrapassar 1700 kgf/cm² ($\sigma \leq 1700$ kgf/cm²).
- As dimensões da seção são limitadas:
 $2\text{cm} \leq x_1 \leq 6\text{cm}$ e $2\text{cm} \leq x_2 \leq 18\text{cm}$

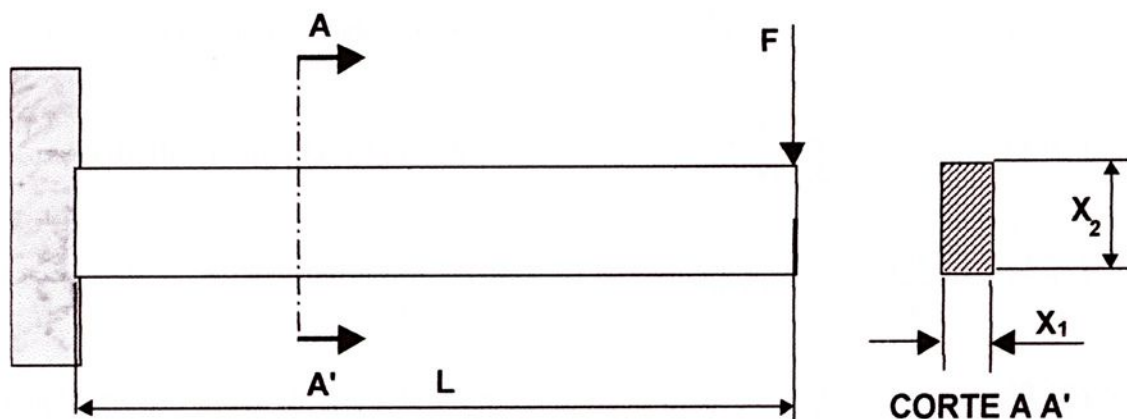


Figura 2.5- Geometria do modelo

Usando a terminologia da área de otimização temos :

O **objetivo** é minimizar peso.

As **variáveis de projeto** são X_1 e X_2 .

As **variáveis de estado** são deformação f e tensão σ .

Sendo que as variáveis de projeto são independentes e as variáveis de estado e a função objetivo são dependentes

Para otimização de estruturas de cálculo analítico simples com poucos parâmetros pode ser utilizado o método gráfico, este método era muito utilizado com grande sucesso quando não havia acesso a computadores. Um exemplo de trabalho publicado de otimização utilizando o método gráfico é a tese de doutorado de Tavares (1974).

A seguir será aplicado o método gráfico de otimização para a viga engastada:

Solução:

Momento fletor no engastamento	$M_f = F.L$	(2.62)
--------------------------------	-------------	--------

Tensão de flexão no engastamento	$\sigma = \frac{M_f}{W_{xx}}$	(2.63)
----------------------------------	-------------------------------	--------

Módulo de resistência à flexão	$W_{xx} = \frac{x_1 \cdot x_2^2}{6}$	(2.64)
--------------------------------	--------------------------------------	--------

Flecha na extremidade livre da viga	$f = \frac{F.L^3}{3.E.I}$	(2.65)
-------------------------------------	---------------------------	--------

onde: EI é a rigidez flexional da viga.

O gráfico da Figura 2.6, mostra curvas de tensão, volume e flecha para alguns valores de X_1 e X_2 .

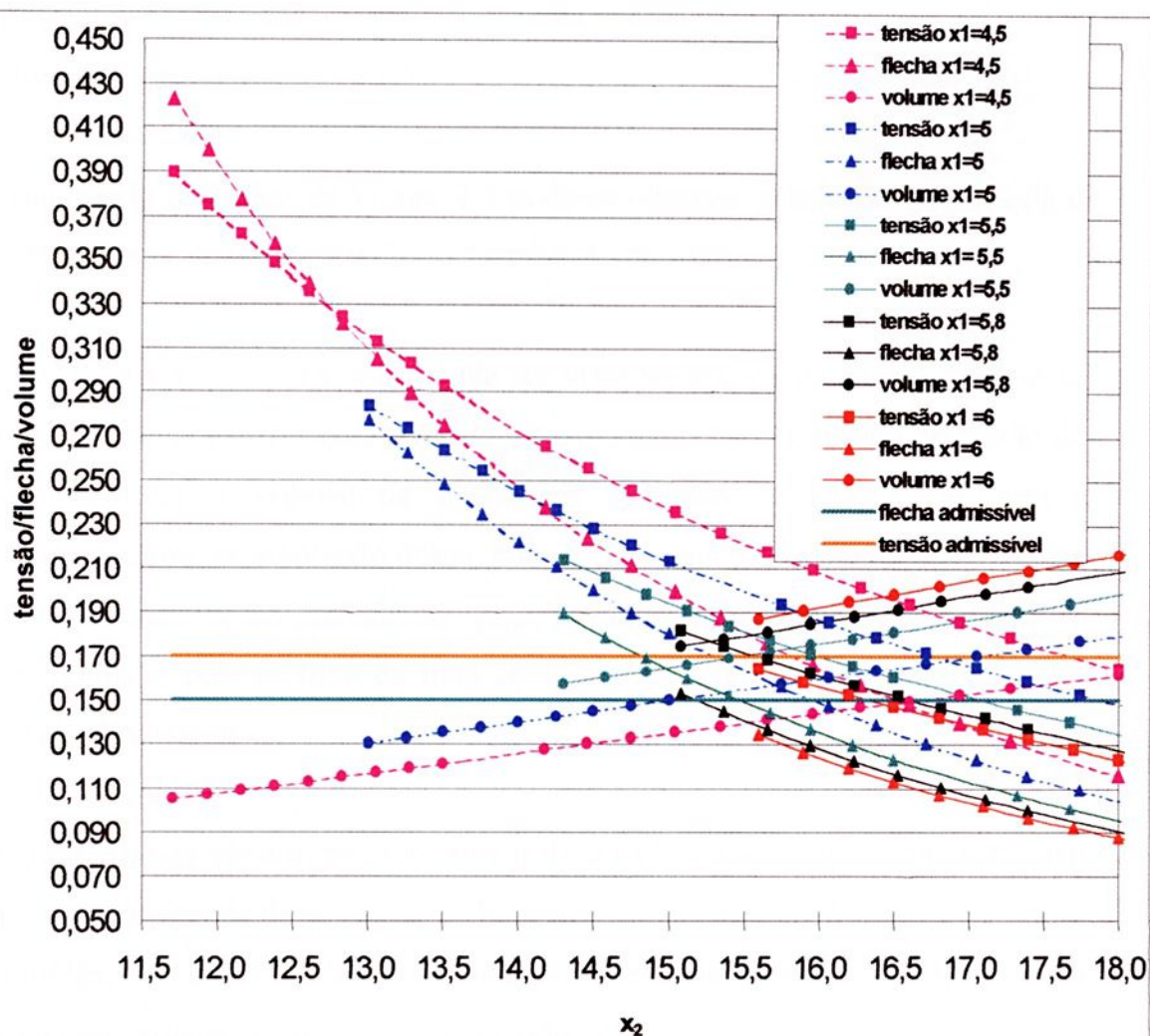


Figura 2.6 - Gráfico de (tensão/flecha/volume x X_2)

Os valores obtidos no gráfico acima tiveram sua escala reduzida para que fosse possível a análise de todas as grandezas em um único gráfico, portanto para obter os valores corretos devemos multiplicar cada grandeza por um fator como visto a seguir:

Tensão (kgf/cm ²):	1 E4
Flecha (cm):	1 E1
Volume (cm ³):	1 E5

Analizando o gráfico da Figura 2.6 pode-se observar a solução que nos dá o mínimo peso e satisfaz a todas as restrições impostas.

Para $x_1 = 4,5$ e $x_2 = 18$ como pode ser visto no gráfico da Figura 2.6 tem-se uma flecha na extremidade livre da viga igual a 1.16 cm, tensão de flexão de 1650 kgf/cm² e volume de 16200 cm³ ou peso de 127.17 kgf, esta é aproximadamente a solução ótima, pois é a que nos dá o mínimo peso e todas as restrições estão satisfeitas, pode-se dizer apenas que a solução é aproximada, pois se trata de uma análise gráfica onde não é possível obter resultados exatos.

Como pode-se ver a otimização apesar de trabalhosa, é simples para este caso pois temos apenas duas variáveis de projeto e a geometria do modelo é muito simples, mas seria impraticável tentar otimizar uma geometria complexa com diversas variáveis de projeto pelo método gráfico.

Utilizando o mesmo caso, serão criados os programas de parametrização e otimização para o modelo e executaremos estes no programa ANSYS.

O fluxograma do programa e o programa da parametrização do modelo são vistos a seguir:



Figura 2.7 - Fluxograma do programa do modelo paramétrico da viga.

```

=====
!*** PROGRAMA DE CONSTRUÇÃO DO MODELO PARAMETRIZADO VIGA*****
!*** ARQUIVO - VIGA.TXT*****
!*** CRIADO POR - PEDRO MIGUEL B. GALVEIAS S. LOPES*****
!=====
!*** 10 AGOSTO 2001*****
!=====
!*** ENTRADA DADOS DA GEOMETRIA DA VIGA*****
!=====

```

```

/PREP7                                !ACesso AO PRÉ-PROCESSADOR DO PROGRAMA

```

```

X1=6                                !VALOR INICIAL DA BASE X1
X2=18                               !VALOR INICIAL DA ALTURA X2
L=200                               !COMPRIMENTO DA VIGA
ET,1,BEAM189                        !DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO
MP,EX,1,2.1E6                       !MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL

```

```

=====
!***PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS*****
!=====

```

```

SECTYPE, 1, BEAM, RECT,VIGA !DEFINE QUE A SEÇÃO DA VIGA É RETANGULAR
SECDATA,X1,X2,,,,,,,,,      !DEFINE AS DIMENSÕES DA SEÇÃO

```

```

=====
!***CRIAÇÃO DA GEOMETRIA DA VIGA*****
!=====

```

```

K, ,,,                               !PONTO 1 NA ORIGEM
K, ,L,,                               !PONTO 2 A DIST. L NA DIR. X
K, ,L/2,,                             !PONTO 3 A DIST. L/2 NA DIR Y
LSTR,1,2                             !LINHA 1 ENTRE O PONTO 1 E 2
LATT,1,,1,0,3, ,1                   !DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DA LINHA
LMESH, 1                             !CRIAÇÃO DO ELEMENTO
FINISH
/SOLU                                !ACesso A SOLVER DO PROGRAMA
DK,1,,,,,0,ALL,,,,,                !RESTRINGE O NÓ 1 EM TODAS AS DIREÇÕES
FK,2,FY,2000                        !APLICA 2000 KGF NO NÓ 2 NA DIREÇÃO Y
SOLVE                                !SOLUÇÃO
FINISH

```

```

=====
!***ENTRADA NO PÓS-PROCESSADOR PARA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA OTIMIZAÇÃO*
!=====

```

```

/POST1                                !ACesso AO PÓS-PROCESSADOR
/ESHAPE,1.0                          !PLOTAR TENSÃO DE VON MISES
PLNSOL,S,EQV,0,1                    !ACesso AO PÓS-PROCESSADOR
/POST1                                !ORGANIZA OS NÓS EM FUNÇÃO DE DESL. EM Y
NSORT,U,Y,,1                         !CAPTURA O MAIOR DESLOCAMENTO EM Y
*GET,UYMAX,SORT,,MAX                 !CRIA TABELA COM VOLUME DO ELEMENTO
ETABLE,VOL,VOLU                      !CRIA TABELA COM TENSÃO MÁXIMA
ETABLE,SMAX,LS,1                     !SOMA OS VALORES DAS TABELAS
SSUM                                  !GUARDA O VOLUME TOTAL NO PARAMETRO VTOT
*GET,VTOT,SSUM,,ITEM,VOL             !CALCULA O PESO DA VIGA
PEO=VTOT*7.85E-3                     !ORGANIZA OS ELEM. EM FUNÇÃO DA TENSÃO SMAX
ESORT,ETAB,SMAX,,1                  !GUARDA A TENSÃO NO PARM. SMAX
*GET,SMAX,SORT,,MAX

```

```

=====
!***FIM DO PROGRAMA*****
!=====

```

O fluxograma do programa e o programa de otimização do modelo são vistos a seguir:



Figura 2.8 - Fluxograma do programa de otimização do modelo da viga.


```

=====
!*** PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DO MODELO PARAMETRIZADO VIGA*****
!*** ARQUIVO - VIGA_OPT.TXT*****
!*** CRIADO POR - PEDRO MIGUEL B. GALVEIAS S. LOPES*****
=====
!*** 10 AGOSTO 2001*****
=====

!***IDENTIFICAÇÃO DO ARQUIVO DE ANÁLISE*****
/OPT                ! ENTRA NO MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO DO ANSYS
OPANL,VIGA,TXT,C:\VIGA    ! DÁ O CAMINHO DO ARQUIVO DO MOD. PARAMETR.

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

OPVAR,X1,DV,2,6          ! VAR. DE PROJ. X1 LIMITADA EM:  $2 < X1 < 6$ 
OPVAR,X2,DV,2,18         ! VAR. DE PROJ. X2 LIMITADA EM:  $2 < X2 < 18$ 

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

OPVAR,UYMAX,SV,0,1.5,0.01 ! VAR. DE ESTADO UYMAX LIMITADA EM  $2 < UY < 1.5$ 
OPVAR,SMAX,SV,0,1700,0.01 ! VAR. DE ESTADO UYMAX LIMITADA EM  $2 < UY < 1700$ 

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

OPVAR,PESO,OBJ,0.01       ! OBJETIVO DA FUNÇÃO OBJETIVO É MIN. PESO

!***IDENTIFICAÇÃO DA METODO DE OTIMIZAÇÃO*****

OPTYPE,SUBP              ! ESCOLHE O MÉTODO DE APROXIMAÇÃO SUBPROBLEMA
OPSUBP,100,40,0.1        ! LIMITA O NÚMERO DE ITERAÇÕES EM 100 OU 40
                          ! IRREALIZÁVEIS
OPKEEP,ON                ! GUARDA OS RESULTADOS DO MELHOR PROJETO
OPSAVE,VIGA,OPTO         ! CRIA UM ARQUIVO COM RESULTADOS DA OTIM.

!***EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO*****

OPEXE                    ! EXECUTAR OTIMIZAÇÃO

!***TRATAMENTO DOS RESULTADOS*****

OPLIST                   ! LISTA TODAS AS VARIÁVEIS DE PROJETO
PLVAROPT,PESO            ! GRÁFICO DO VOLUME TOTAL X PROJETO

FINISH

=====
!***FIM DO PROGRAMA*****
=====

```



A seguir podem ser vistos os resultados da otimização do modelo.

Os projetos criados durante a otimização tiveram as variáveis vistas a seguir:

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 7 AND SHOW
ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS

		SET 1 (FEASIBLE)	SET 2 (INFEASIBLE)	SET 3 (INFEASIBLE)	SET 4 (INFEASIBLE)
UYMAX	(SV)	0.87634	> 7.0090	> 3.8486	> 4.3840
SMAX	(SV)	1234.5	> 5132.8	> 3950.6	> 4092.6
X1	(DV)	6.0000	5.3887	3.5520	4.1502
X2	(DV)	18.000	9.3150	13.078	11.887
PESO	(OBJ)	169.56	78.807	72.930	77.452
		SET 5 (FEASIBLE)	SET 6 (FEASIBLE)	SET 7 (FEASIBLE)	
UYMAX	(SV)	1.1745	1.2086	1.2081	
SMAX	(SV)	1652.2	1699.7	1699.0	
X1	(DV)	4.4961	4.3731	4.3755	
X2	(DV)	17.974	17.969	17.968	
PESO	(OBJ)	126.88	123.37	123.43	

Pode-se observar que existem projetos com a notação “infeasible” estes projeto são irrealizáveis, pois ultrapassaram os limites das variáveis de estado, em contrapartida, os projetos com a notação “feasible” são realizáveis pois atendem todas as restrições impostas. Dos projetos realizáveis o que teve menor peso foi o 6 com 123.37 kgf, tensão máxima de 1699.7 kgf/cm² e flecha de 1.2 cm, portanto este é o projeto ótimo. Pode-se observar que este resultado é bem próximo do obtido no cálculo analítico.

A seguir são mostrados resultados gráficos do modelo, neles é possível observar o comportamento das variáveis de estado, variáveis de projeto, tensões e peso em cada projeto executado. Além disso, vão ser mostradas as tensões e deformações do modelo ótimo.

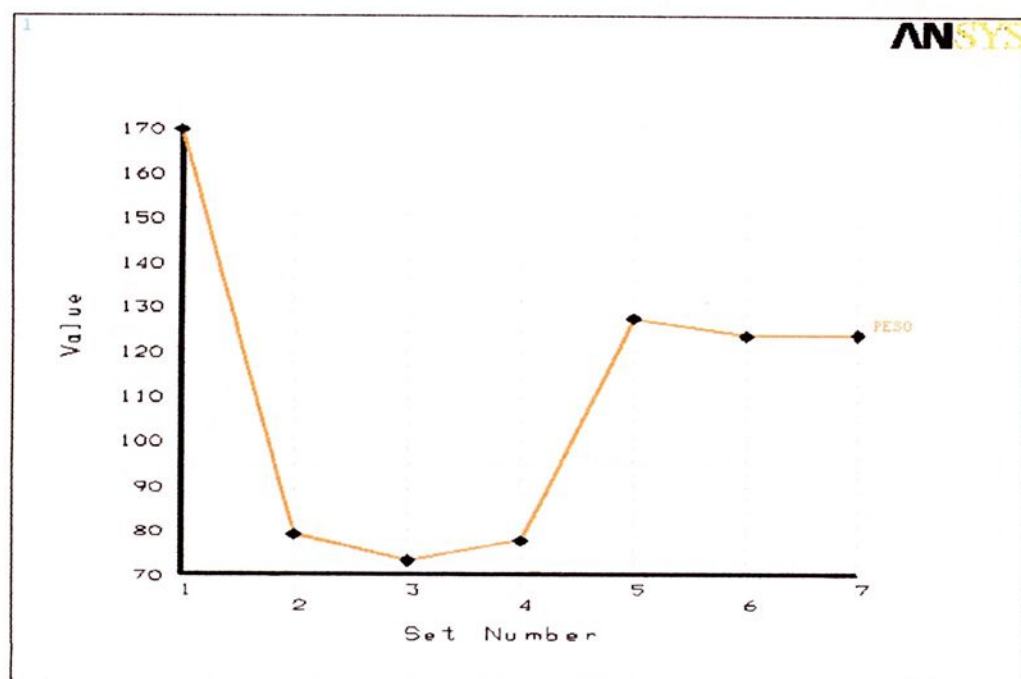
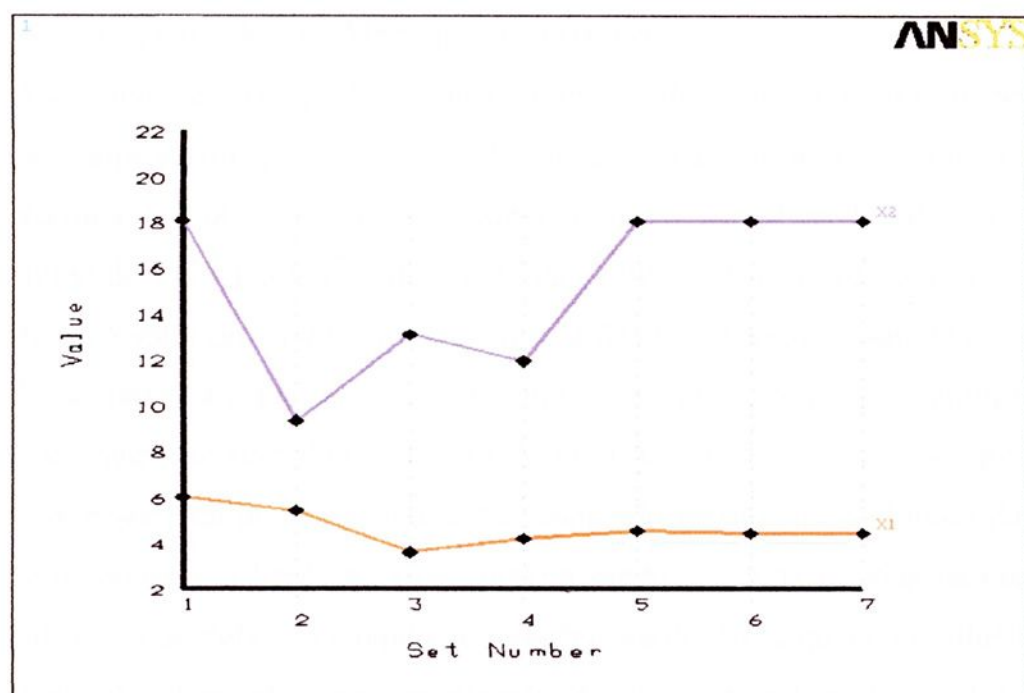


Figura 2.9 – Gráfico de Peso x “Set Number” (Projeto)

Figura 2.10 – Gráfico de X_1 e X_2 x “Set Number” (Projeto)

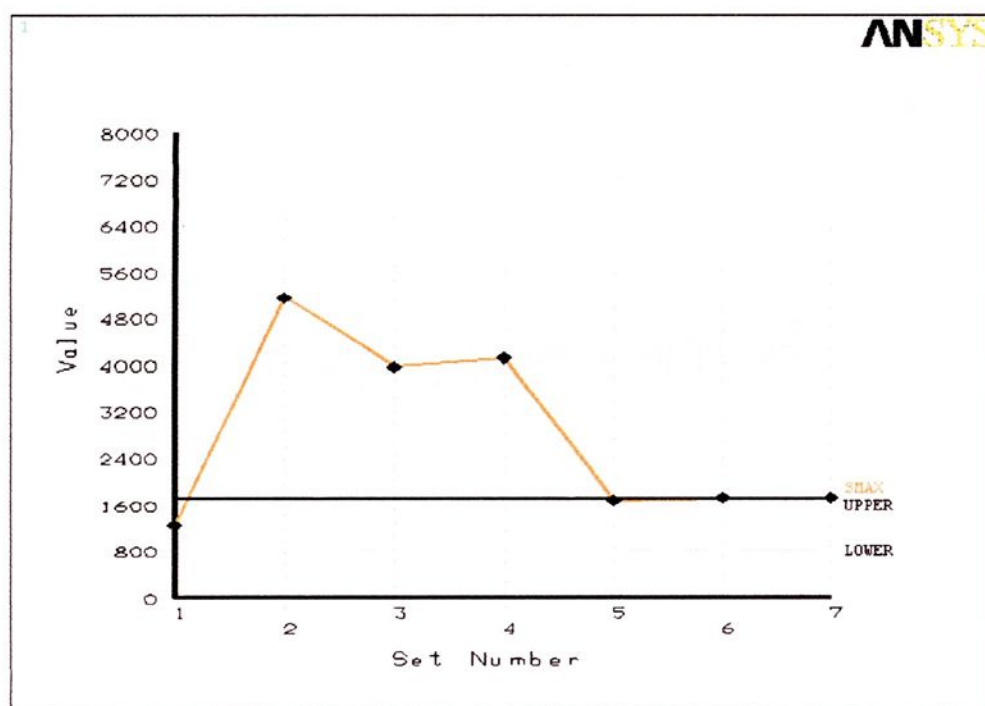


Figura 2.11 – Gráfico de Tensão de Von Mises x “Set Number” (Projeto).

A Figura 2.9, mostra o peso da estrutura para cada projeto realizado durante a otimização, a Figura 2.10 o valor de X_1 e X_2 em cada projeto e a Figura 2.11 a tensão máxima de Von Mises para cada projeto.

Analizando os três gráficos em conjunto pode-se observar que o peso cai bruscamente nos projetos 2, 3 e 4 com uma redução de X_2 , só que a tensão máxima de Von Mises aumenta também bruscamente ficando muito acima do limite de 1700 kgf/cm^2 , isto é perfeitamente explicável pois com a redução de X_2 o valor do módulo de resistência a flexão cai ao quadrado. No projeto 5 X_2 aumenta até próximo do seu limite (18 cm) e permanece praticamente constante até o final da otimização. A otimização se mostra coerente, para uma viga engastada de seção retangular mantendo o valor de X_2 (altura da viga) próximo do seu limite máximo, maximizando a inércia da viga na qual tem influência ao cubo e o módulo de resistência a flexão na qual tem influência ao quadrado, deixando para ser alterado X_1 que tem influência igual a X_2 na redução de peso mas relação linear em relação ao módulo de resistência à flexão e inércia da viga.

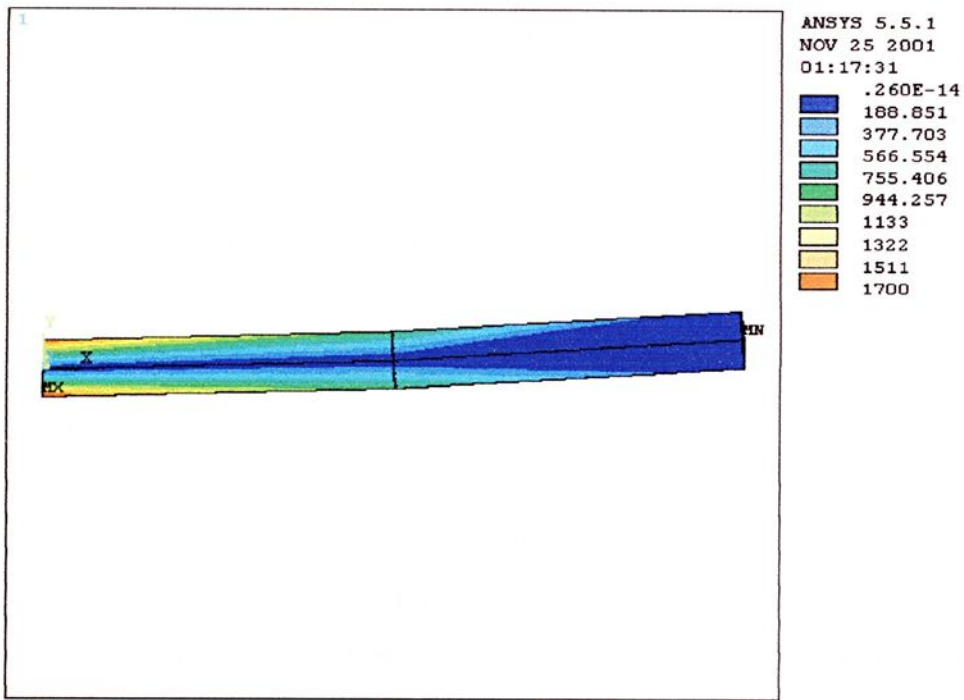


Figura 2.12 – Tensão de Von Mises.

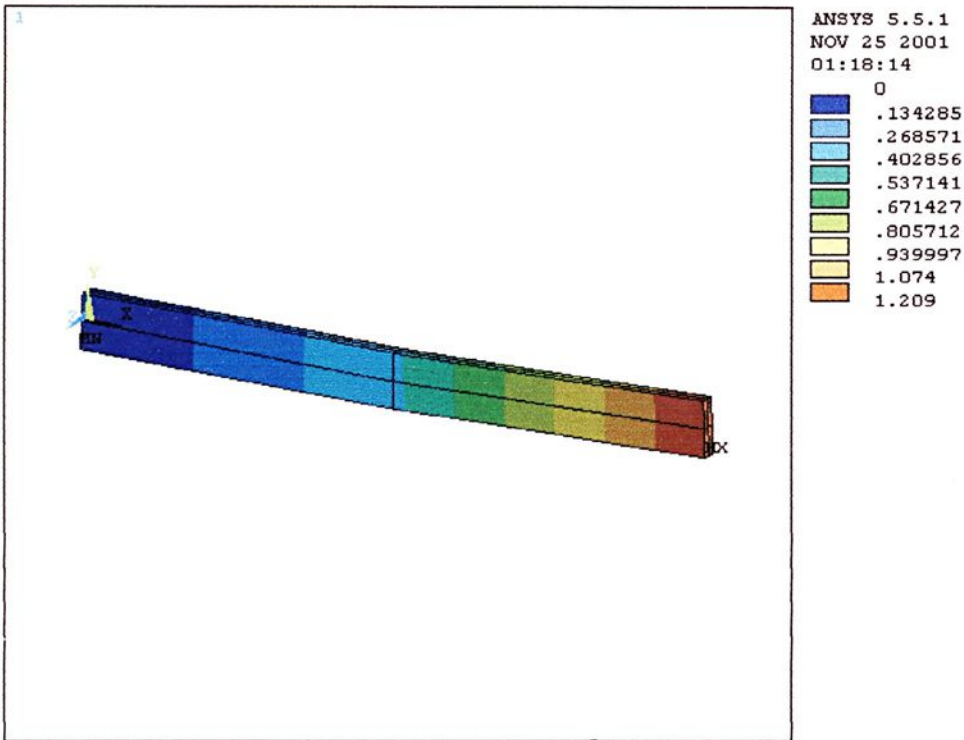


Figura 2.13 – Deformação em “Y”

2.3 CONCLUSÕES

Este caso mostra a eficiência da parametrização e otimização em elementos finitos, os resultados da otimização pelo processo gráfico (ver Figura 2.6) foram praticamente os mesmos da otimização em elementos finitos (ver Figuras 2.12 e 2.13), mas ficou claro que:

O método da parametrização e otimização em elementos finitos é muito mais rápido e eficaz.

Se a seção da viga fosse um perfil “I” ou “U”, ou seja uma geometria mais complexa ficaria inviável utilizar o método gráfico para otimizar a viga, já para o método da parametrização e otimização em elementos finitos isto se tornaria uma tarefa simples e rápida.



CAPÍTULO III - PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA
BLINDAGEM

3.1 BLINDAGEM

O primeiro exemplo de parametrização e otimização de equipamento hidromecânico é de geometria relativamente simples, trata-se de uma Blindagem de Túnel. A blindagem em questão é um equipamento utilizado para reforçar túneis para escoamento de água. É uma estrutura internamente hiperestática e auto portante (não está sujeita a nenhuma ação externa) mesmo sendo embutida em concreto, é formada por uma parede de revestimento formando uma seção retangular e reforços ao redor destas paredes. Estes reforços junto com as paredes formam uma seção resistente “I”, cujos detalhes podem se vistos na Figura 3.1.

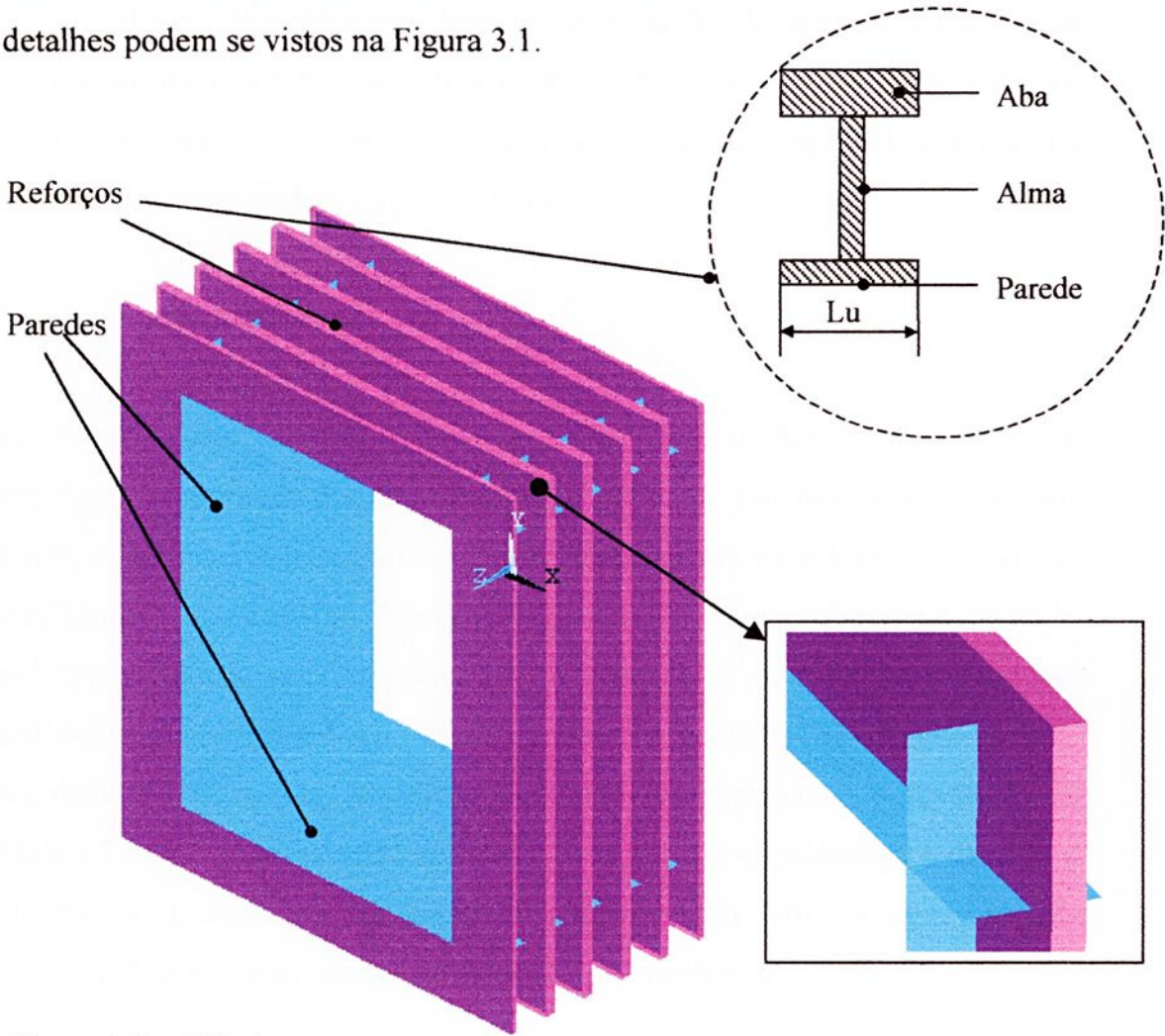


Figura 3.1 – Blindagem

A largura útil “Lu” é a largura da parede que efetivamente resiste, junto com a alma e aba, a carga de pressão interna que é calculada segundo a norma DIN/19704(1976).

Este tipo de equipamento é utilizado em regiões de alta pressão sujeitas a restrição de fluxo causada pela movimentação de comportas. Esta restrição de fluxo aliada a alta pressão resulta em um jato de água de alta intensidade, que desgastaria túneis simplesmente revestidos por concreto causando desmoronamento.

Os casos mais comuns em que encontram-se blindagens são:

a) Túnel de Descarga .

É utilizado em hidroelétricas para livrar a região da tomada d’água e ou vertedouro de detritos como areia pedras e rejeitos, e além disso pode ser usado para garantir a vazão ecológica de um rio com a adoção de uma Válvula Dispersora, como pode ser visto na Figura 3.2.

b) Aquedutos de Eclusas

A eclusa é uma câmara formada por um canal e duas comportas (uma localizada a montante e outra a jusante) utilizada por navios para transpor um desnível em um percurso de um rio. Uma câmara de eclusa com uma das comportas é mostrada na Figura 3.3. Este desnível normalmente é causado pela instalação de uma hidroelétrica. Para encher e esvaziar as eclusas são utilizados túneis chamados de Túneis de Adução, os quais tem a vazão de água regulada por comportas segmento de fundo invertida como é mostrado na Figura 3.4. Estes túneis estão sujeitos a uma pressão considerável e durante a abertura e fechamento da comporta segmento um jato de água de alta intensidade é formado, necessitando assim de blindagem.



Antes de apresentar a parametrização e otimização de uma blindagem será realizado o cálculo analítico deste equipamento. Com os resultados deste cálculo analítico será feita uma rápida análise em elementos finitos usando o programa do modelo paramétrico executado no programa ANSYS. Confrontando os resultados por ambos os métodos, ficará clara a eficiência do programa quanto aos resultados obtidos, e além disso serão usados estes mesmos resultados como ponto inicial para a otimização da estrutura.

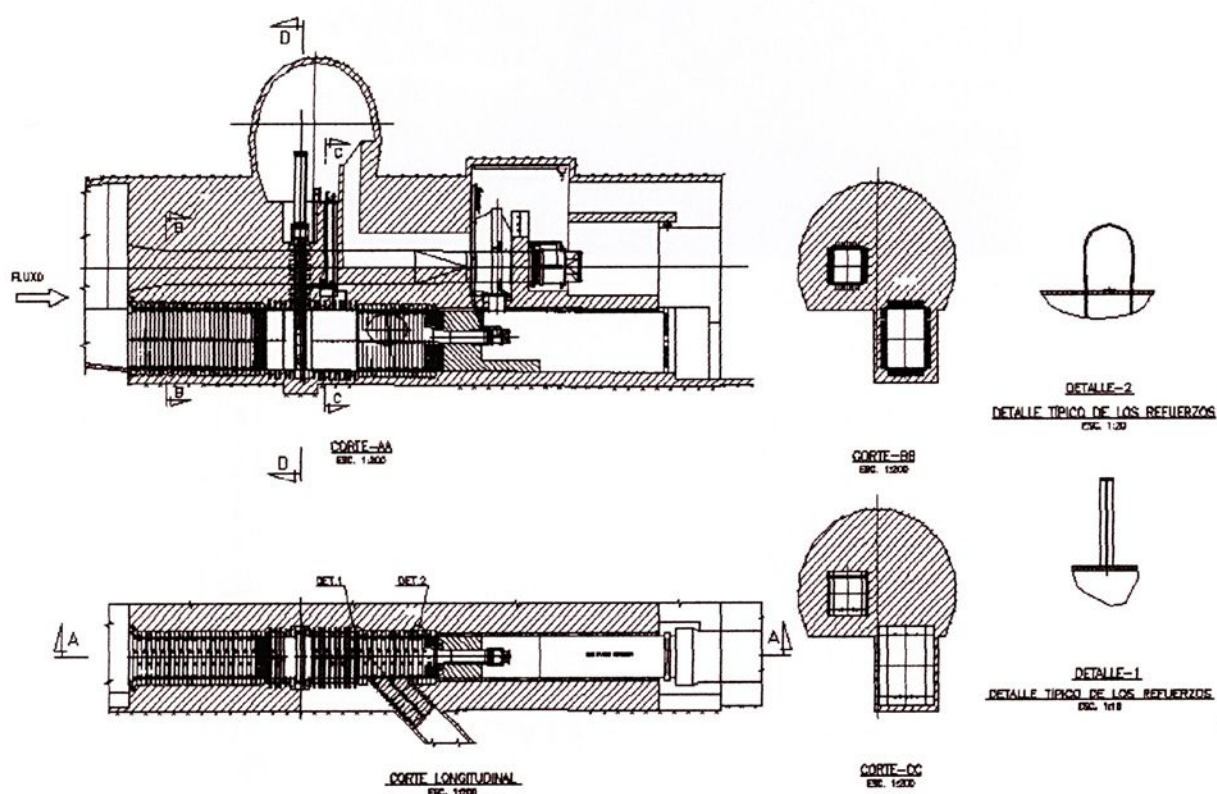


Figura 3.2– Túnel de descarga

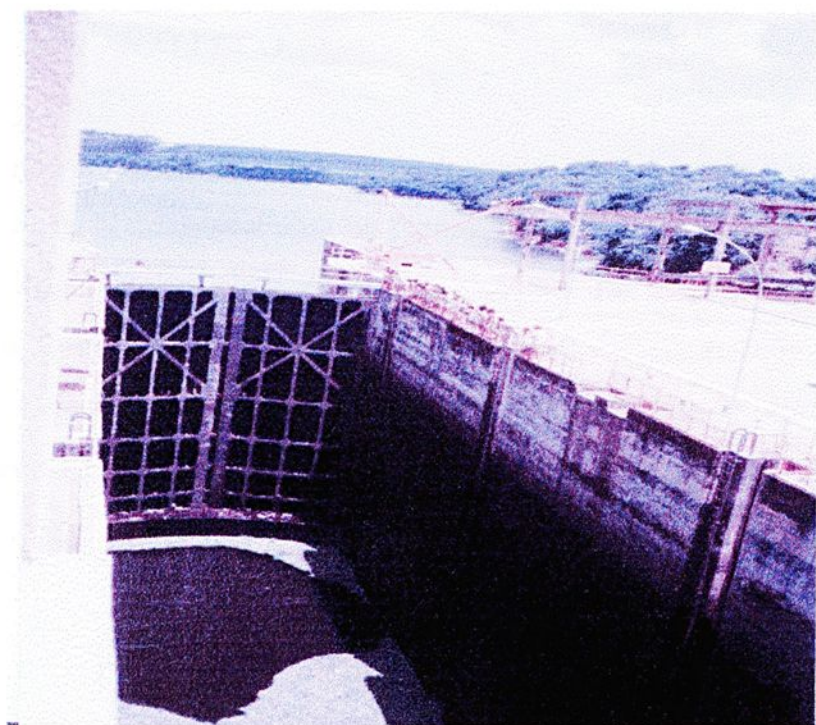


Figura 3.3 – Câmara de Eclusa

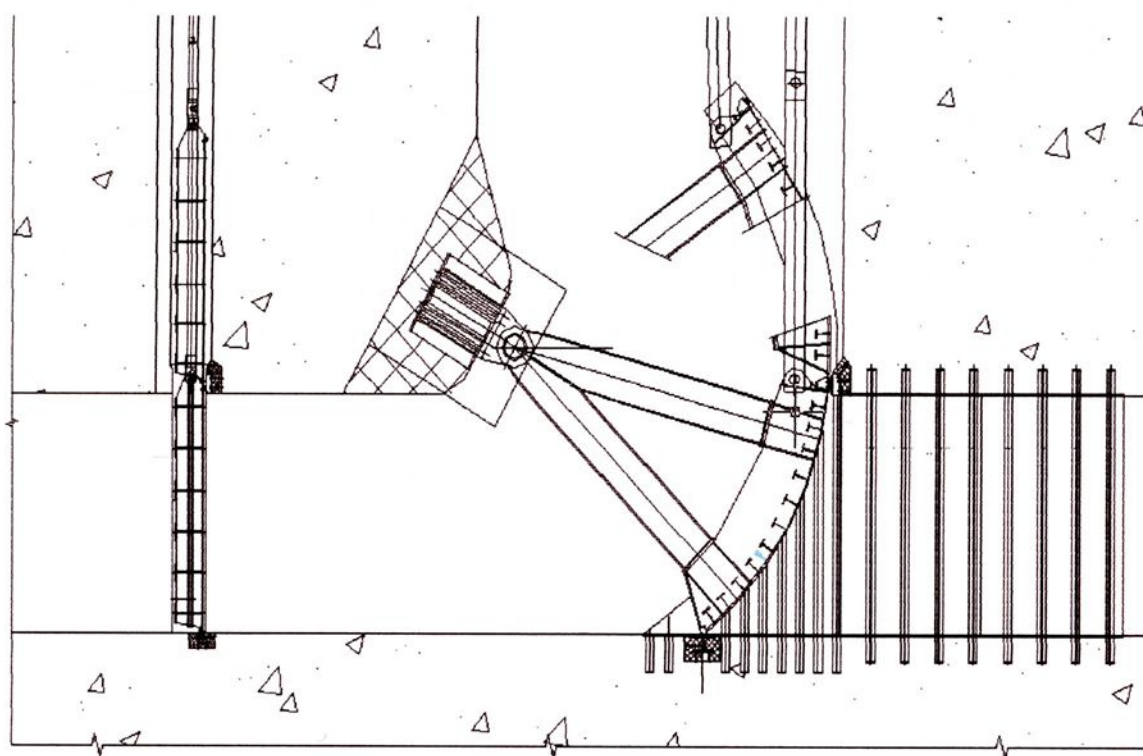


Figura 3.4 – Túnel de adução

3.2 CÁLCULO ANALÍTICO

Será utilizado como estudo um túnel de descarga, como visto na Figura 3.2.

A geometria da blindagem é vista na Figura 3.5

A metodologia de cálculo e equacionamento foi desenvolvida pelos fabricantes deste tipo de equipamento e além disso recebeu aprovação de consultores contratados por clientes para vistoriar toda a documentação técnica das obras.

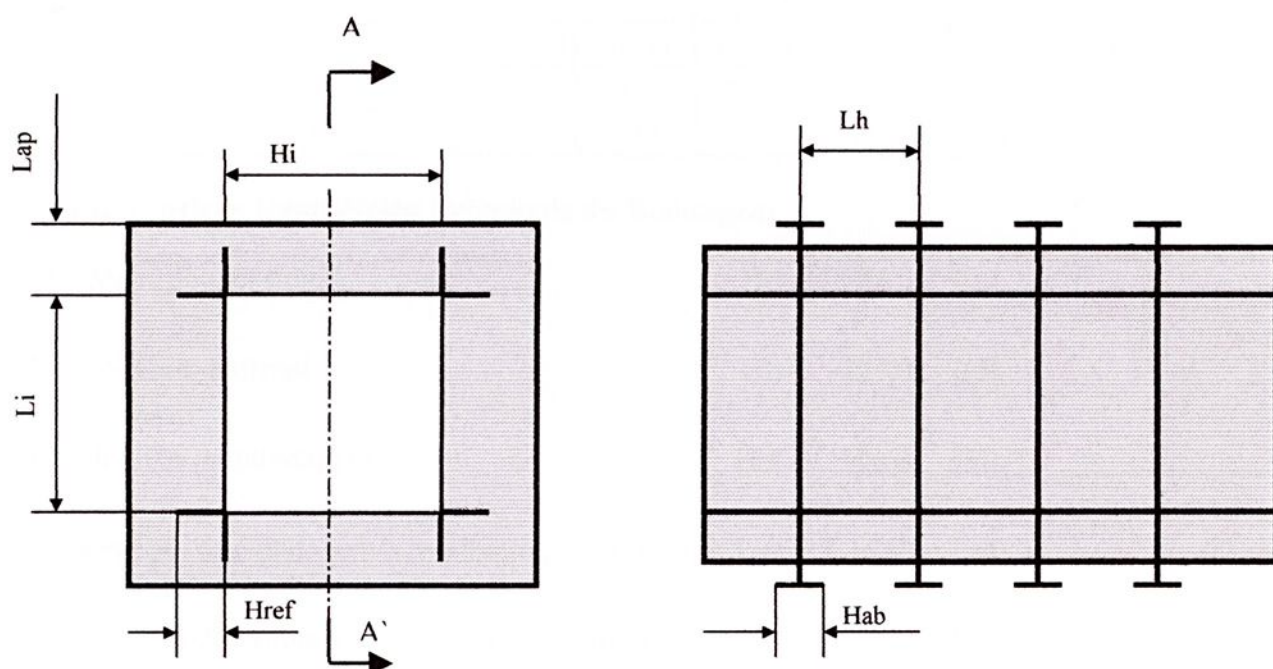


Figura 3.5 – Geometria da blindagem

3.2.1 Dados de entrada principais

Materiais e Tensões Admissíveis

Propriedades do aço

Material Aço carbono RRst 52.3N

Tensão de escoamento $\sigma_{esc} = 3518 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 345,0 \text{ [MPa]}$

Coefficiente de Poisson do aço $\mu_a = 0,3$

Tabela 3.1 - Tensões admissíveis segundo norma DIN/19704 (1976)

Casos de carga	Normal		Ocasional		Excepcional	
Unidades	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]	[kgf/cm ²]	[MPa]
Tensão de Von Mises nos reforços	2639	258,8	2814	276,0	3166	310,5
Tensão de Von Mises na parede	2990	293,3	2990	293,3	3166	310,5

3.2.2 Características Geométrica Principais da Blindagem

Nível Máximo Ocasional $H_o = 727,0 \text{ [m]}$

Nível Máximo Normal $H_n = 725,0 \text{ [m]}$

Nível do eixo da blindagem $H_{cl} = 596,3 \text{ [m]}$

Comprimento da blindagem a montante da comport $L_m = 15,0 \text{ [m]}$

Comprimento da blindagem a jusante da comporta $L_j = 12,0 \text{ [m]}$

Largura interior da blindagem $H_i = 3,3 \text{ [m]}$

Altura interior da blindagem $L_i = 5,0 \text{ [m]}$

3.2.3 Seleção do caso de carga de cálculo

A seleção de carga é feita primeiro obtendo a razão entre cargas para o caso normal e ocasional, o mesmo é feito para as tensões admissíveis. Com a razão de cargas e tensões é feita a comparação entre estas .

No caso abaixo a razão entre cargas é menor que a razão entre tensões admissíveis, isto comprova que o caso normal é o preponderante.

Este tipo de seleção só é possível enquanto se trabalha no regime elastico, ou seja em regime linear de tensão versus deformação.



Tabela 3.2 - Tabela de comparativo entre carregamento e tensão admissível

Caso	Pressão máx. no eixo [mca]	Tensão admissível	
		[kgf/cm²]	[MPa]
Normal	128,750	2638,5	258,8
Ocasional	130,750	2814,4	276,0

$H_o/H_n = 1,02 < \sigma_o/\sigma_n = 1,07$

O caso crítico para o dimensionamento é o caso normal, portanto : $H = 128,8 \text{ [mca]}$

3.2.4 Propriedades geométricas

a) Placa das paredes

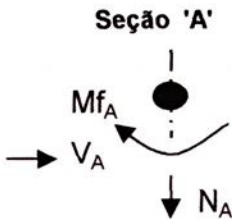
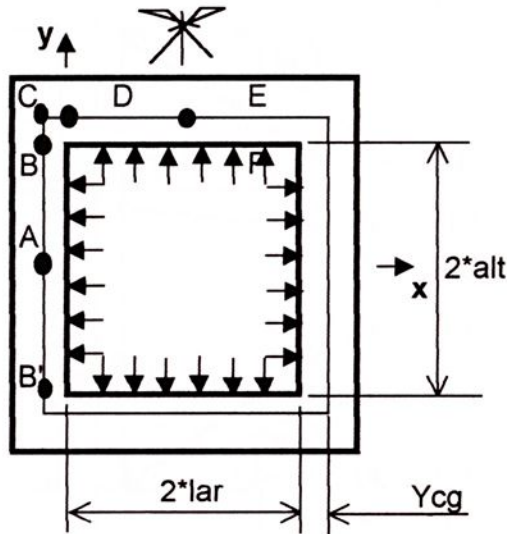
Espessura bruta da chapa da parede da blindagem	$t_b = 3,15 \text{ [cm]}$	$0,032 \text{ [m]}$
Distância entre reforços	$L_h = 45,0 \text{ [cm]}$	$0,450 \text{ [m]}$

b) Reforço

Espessura da alma	$t_a = 1,6 \text{ [cm]}$	$0,016 \text{ [m]}$
Altura da alma	$l_{ap} = 71,0 \text{ [cm]}$	$0,710 \text{ [m]}$
Espessura da aba	$e_a = 3,75 \text{ [cm]}$	$0,038 \text{ [m]}$
Altura da aba	$h_{ab} = 12,0 \text{ [cm]}$	$0,120 \text{ [m]}$

c) Quadro

Meia largura	$l_{ar} = 165,0 \text{ [cm]}$	$1,650 \text{ [m]}$
Meia altura	$alt = 250,0 \text{ [cm]}$	$2,5 \text{ [m]}$



3.2.5 Características geométricas

a) Parede + Reforço

Cálculo da largura colaborante da placa da parede segundo a norma DIN/19704 (1976).

B ou 2B : Altura da placa

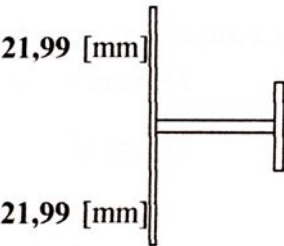
l = Coeficiente de redução

l.B = Largura colaborante

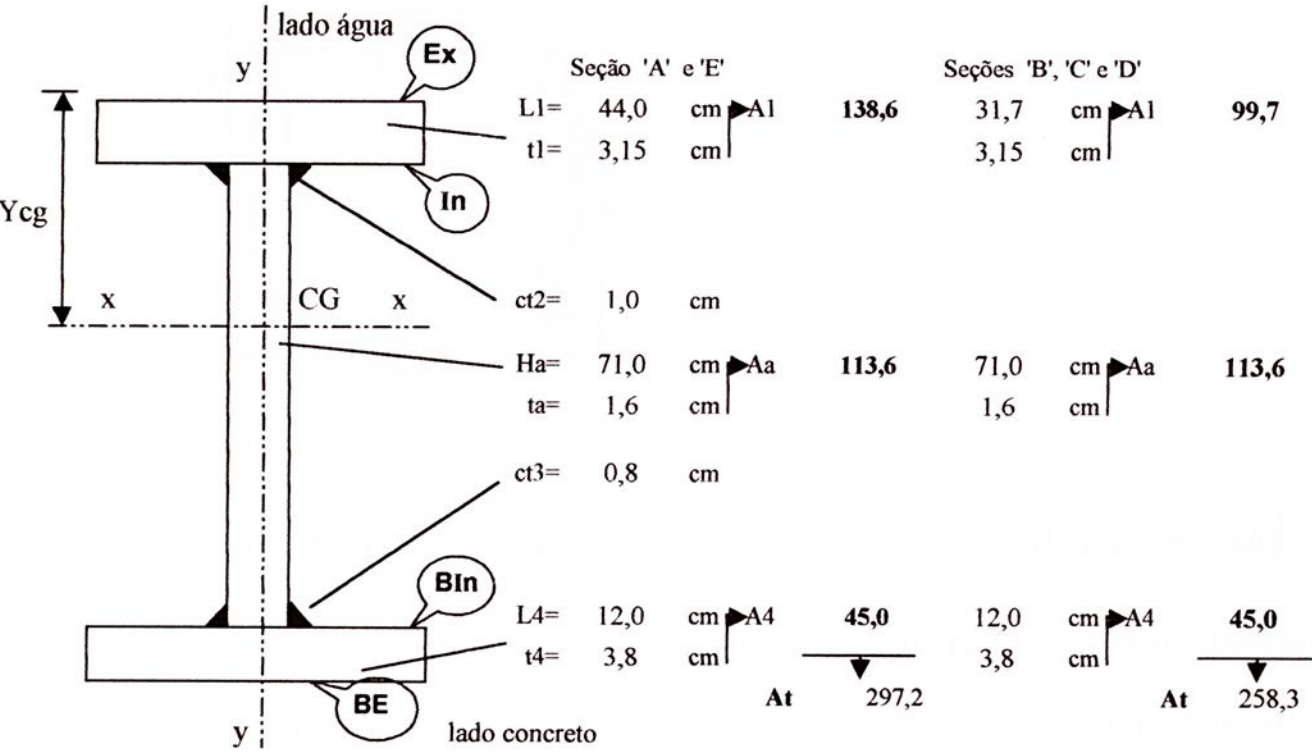
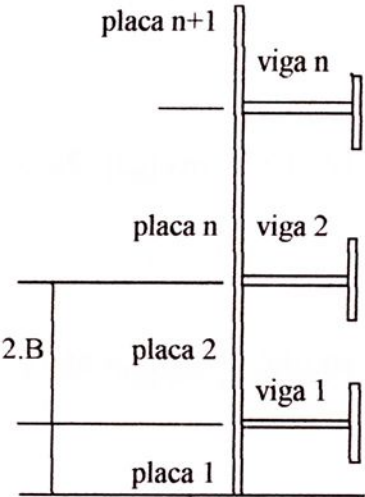
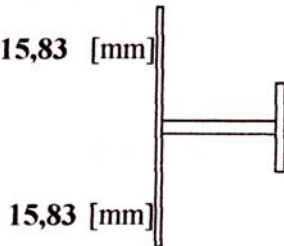
Tabela 3.3 -Largura colaborante da viga l

Plc	B [cm]	L/B	l	larg.colab. [cm]
I	22,5	17,0	0,98	44,0
II	22,5	7,7	0,7	31,7

Seções 'A' e 'E'



Seções 'B', 'C' e 'D'



Seção 'A' e 'E'								
Ycg	Ix	W _{Ex}	W _{In}	W _{BIn}	W _{BEx}	MS _{In}	MS _{BIn}	MS _{LN}
[cm]	[cm4]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]
27,0	261036	9660	10935	5539	5131	3526	2205	3982

Seção 'B', 'C' e 'D'								
Ycg	Ix	W _{Ex}	W _{In}	W _{BIn}	W _{BEx}	MS _{In}	MS _{BIn}	MS _{LN}
[cm]	[cm4]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]
30,847	232082	7524	8379	5359	4932	2920	2033	3533

Área total da seção transversal

$$St = Lh.t1 + Ha.ta + L4.t4 = St = 300,4 \text{ [cm}^2\text{]} \quad 3,00\text{E-02 [m}^2\text{]}$$

3.2.6 Esforços solicitantes externos

Pressão Interior

$$Pi = 12,88 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 1,263 \text{ [MPa]}$$

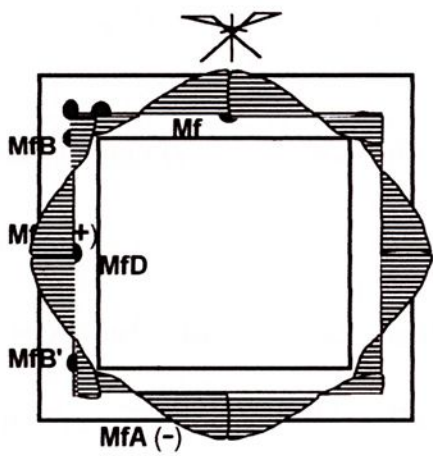
3.2.7 Esforços solicitantes internos

a) Placa das paredes

Esforço de placa

$$P = Pi = P = 12,88 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad 1,26\text{E-04 [MPa]}$$

b) Reforço



Momento fletor no ponto A:

$$Mf_A = [P.Lh/(2(lar + alt + 2.Ycg))][2lar^3/3 - alt^3/3 - lar.alt^2 + 2Ycg.(lar^2 - alt^2 - lar.alt) + Ycg^2.(lar - 3alt)]$$
$$Mf_A = -1\text{E+07 [kgf.cm]} \quad -1,0\text{E+00 [MN.m]}$$

Força Normal no Ponto A

$$N_A = P.Lh.lar \quad N_A = 95597 \text{ [kgf]} \quad 9,37\text{E-01 [MN]}$$

Esforço cortante no ponto A

$V_A = 0$ (simetria e Mf_A é máximo) $V_A = 0$ [kgf] 0E+00 [MN]

Momento fletor no ponto B $Mf_B = Mf_A + P.Lh.alt^2/2$ $Mf_B = 7,6E+06$ [kgf.cm] 7,41E-01 [MN.m]

Força Normal no Ponto B $N_B = P.Lh.lar$ $N_B = 95597$ [kgf] 9,37E-01 [MN]

Esforço cortante no ponto B $V_B = P.Lh.alt$ $V_B = 144844$ [kgf] 1E+00 [MN]

Momento fletor no ponto C

$Mf_C = Mf_A + P.Lh.alt(alt/2 + Ycg)$ $Mf_C = 1,1E+07$ [kgf.cm] 1,1E+00 [MN.m]

Força Normal no Ponto C $N_C = P.Lh.(lar^2 + alt^2)^{1/2}$ $N_C = 173547$ [kgf] 1,7E+00 [MN]

Esforço cortante no ponto C $VC = 0$ (simetria) $V_C = 0$ [kgf] 0,0E+00 [MN]

Momento fletor no ponto D

$Mf_D = Mf_A + P.Lh(alt^2/2 + (alt - lar).Ycg)$ $Mf_D = 8,9E+06$ [kgf.cm] 8,71E-01 [MN.m]

Força Normal no Ponto D $N_D = P.Lh.alt$ $N_D = 144844$ [kgf] 1,4 [MN]

Esforço cortante no ponto D $V_D = P.Lh.lar$ $V_D = 95597$ [kgf] 9,37E-01 [MN]

Momento fletor no ponto E

$Mf_E = Mf_A + P.Lh((alt^2 - lar^2)/2 + (alt - lar).Ycg)$ $Mf_E = 995120$ [kgf.cm] 9,76E-02 [MN.m]

Força Normal no Ponto E $N_E = P.Lh.alt$ $N_E = 144844$ [kgf] 1,4 [MN]

Esforço cortante no ponto E

$VE = 0$ (simetria e Mf_E é máximo) $V_E = 0$ [kgf] 0,0 [MN]

Assim, as seções a verificar por serem as mais solicitadas serão:

Seção A: maior valor de Momento Negativo

Seção B: maior valor de Esforço Cortante

Seção C: maior valor de Momento Positivo e do Esforço Normal

Pontos de Momento Fletor Nulo

Trecho AB $y_o = \sqrt{-2.Mf_A / (P.Lh)}$ $y_o = 190,9 \text{ [cm]}$

Trecho DE $x_o = lar - \sqrt{\Delta} / 2; x_o' = lar + \sqrt{\Delta} / 2$ com $\Delta = -4(2.Mf_A / ((P.Lh) - lar^2 + alt^2 - 2.(lar - alt)Y_{cg}))$

Comprimentos de vigas com Momentos:

Negativo: Trecho BB' $L_I = 2 \cdot y_o = L_I = 381,8 \text{ [cm]}$

Positivo: Trecho AB $L_{II} = 2 \cdot ((alt + Y_{cg}) - y_o) = L_{II} = 172,3 \text{ [cm]}$

Negativo: Trecho DD' $L_I = 2 \cdot lar - 2 \cdot x_o = L_I = 0,0 \text{ [cm]}$

Positivo: Trecho DE $L_{II} = 2 \cdot (x_o + Y_{cg}) = L_{II} = 384,0 \text{ [cm]}$

3.2.8 Esforços resistentes internos (tensões)

a) Tensão nas Placa das paredes segundo a norma DIN/19704 (1976).

$$\sigma = \frac{k \cdot p \cdot a^2}{100 \cdot t^2}$$

Onde:

k = coeficiente de tensão de placa;

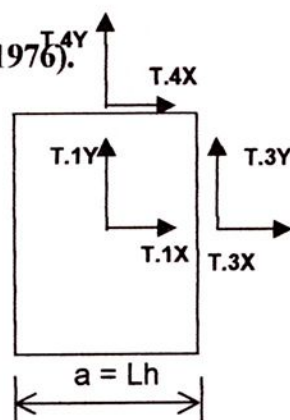
p = pressão hidrostática no centro da placa;

a = menor dimensão da placa;

t = espessura da placa.

Tabela 3.4 - Tensões de placa

Plc	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	656,9	197,1	1313,8	394,1	270,4	901,3



b) Reforço

Flexão

Tração

Cisalhamento

Combinada de Von Misses

$\sigma_f = Mf / W$

$\sigma_t = N / St$

$\tau = V \cdot MS / (ta \cdot Ix)$

$\sigma^b = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau^2)^{1/2}$

Tabela 3.5 - Tensões no reforço

Seção			A	B	C
Flexão	σ_f^y [kgf/cm ²]	Ex	-1093	1004	1524
		In	-965	901	1368
		BIn	1906	-1409	-2139
		BEx	2057	-1531	-2324
Tração	σ_t^y [kgf/cm ²]	todos	318	318	578
Cisalh. m.	τ^{xy} [kgf/cm ²]	In	0	1139	0
		BIn	0	793	0
		LN	0	1378	0
Unidireci onal máx.	σ_{UNI} [kgf/cm ²]		2375	1322	2102

Tabela 3.6 - Tensões combinadas (Von Mises) de placa e de reforço

Seção		A		B		C		
Pontos		Ex	In	Ex	In	Ex	In	
Flexão		σ_f^y	-1093	-965	1004	901	1524	1368
Tração		σ_t^y	318	318	318	318	578	578
Efeito de Poisson		σ^x	-232	-194	397	366	630	584
P L A C A S	Eixo y	σ_1^y	-197	197				
		σ_3^y	394	-394				
		σ_4^y			901	-901	901	-901
	Eixo x	σ_1^x	-657	657				
		σ_3^x	1314	-1314				
		σ_4^x			270	-270	270	-270
$\sigma \sigma^y$		1	-971	-450				
		3	-380	-1041				
		4			2223	318	3003	1045
$\sigma \sigma^x$		1	-889	463				
		3	1081	-1508				
		4			667	95	901	313
Cisalh. τ^{xy}		0	0	0	1139	0	0	
Tensões combinadas [kgf/cm ²]		σ_1^b	933	790				
		σ_3^b	1313	1337				
		σ_4^b			1976	1993	2669	929
Tensões combinadas [MPa]		σ_1^b	91,5	77,5				
		σ_3^b	128,8	131,1				
		σ_4^b			193,8	195,4	261,7	91,1

Tabela 3.7 - Tensões combinadas (Von Mises) no reforço

Seção		A		B			C	
Pontos		BIn	BEx	BIn	BEx	LN	BIn	BEx
Flexão	σ_f^y [kgf/cm ²]	1906	2057	-1409	-1531	0	-2139	-2324
Tração	σ_t^y [kgf/cm ²]	318	318	318	318	318	578	578
Cisalham.	τ^{xy} [kgf/cm ²]	0	0	793	0	1378	0	0
Tensões combinadas	σ^b [kgf/cm ²]	2224	2375	1754	1213	2408	1561	1747
Tensões combinadas	σ^b [MPa]	218,1	232,9	172,0	118,9	236,2	153,1	171,3

3.3 ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS

Antes da otimização da blindagem, será realizada a análise em elementos finitos da geometria já calculada anteriormente no cálculo analítico.

3.3.1 Descrição da análise

3.3.1.1 Elemento utilizado no modelo

Será realizada uma análise em elementos finitos utilizando elemento tipo casca, isto é indicado quando a relação entre a largura e a espessura for maior que dez. Foi selecionado o elemento Shell 63 (ver Figura 3.6), indicado para análise estrutural. Este elemento é formado por 4 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 .

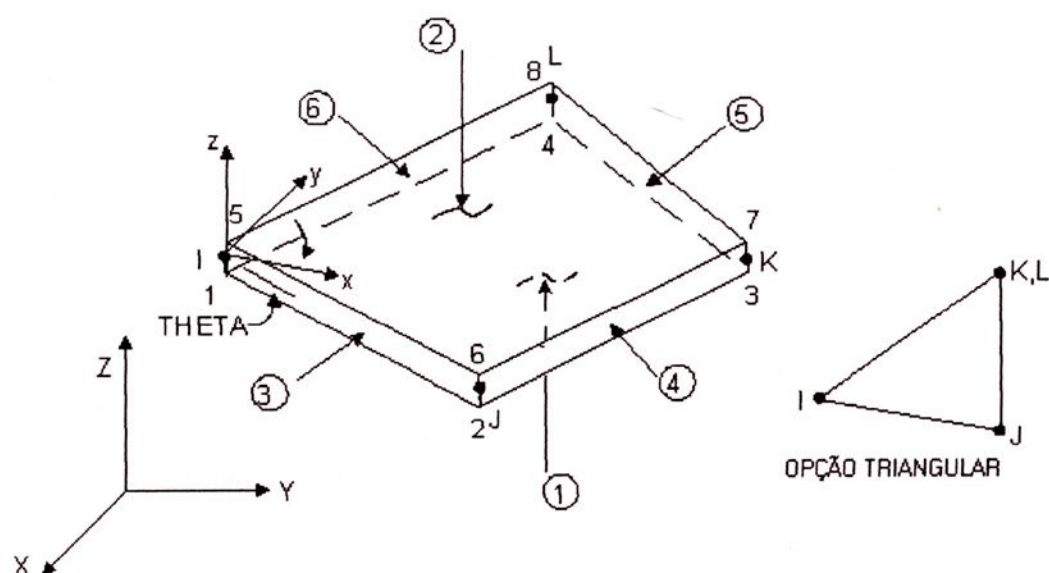


Figura 3.6 – Elemento do tipo Shell 63

3.3.1.2 Geometria do modelo

A geometria básica do modelo já foi descrita no cálculo analítico. A geometria do modelo é formada por pontos, linhas e áreas, como mostrado nas Figuras 3.7 e 3.8, sendo utilizado elementos do tipo casca para a análise em elementos finitos.

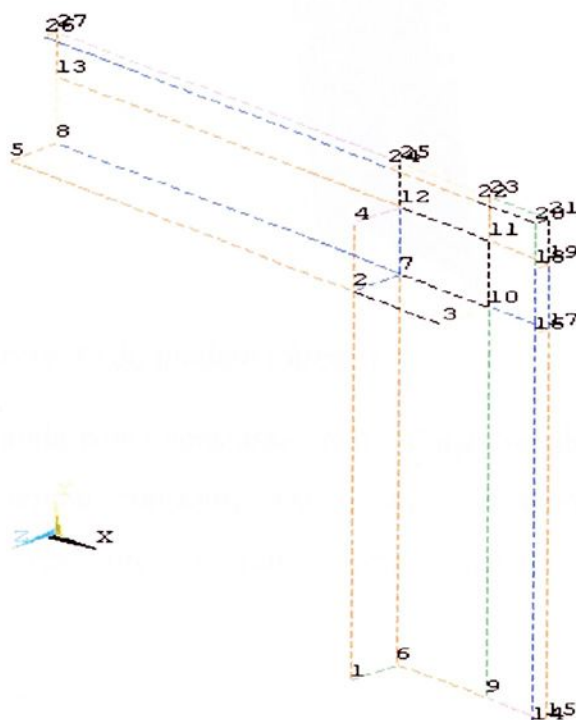


Figura 3.7 – Formação do modelo (pontos e linhas)

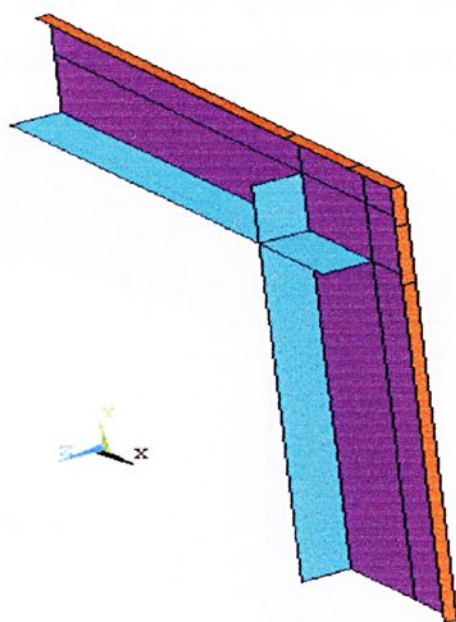


Figura 3.8 – Formação do modelo (áreas)

A espessura é definida pelas constantes reais. Cada cor observada na Figura 3.8 define uma diferente constante real ou seja, espessura. Como pode ser observado tem-se três cores diferentes neste modelo, o que indica três diferentes espessuras.

	3.75 cm - Aba
	1.6 cm - Alma
	3.15 cm - Parede

3.3.1.3 Condições de contorno

Foi aplicada uma pressão interna de $12,88 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$ (ver Figura 3.9).

Devido a geometria do modelo foi aplicada simetria nos planos xy, xz e yz como mostrado na Figura 3.9. 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 yz se está restringindo a translação no eixo x e a

rotação nos planos xy e xz. Ao utilizar este artifício se está diminuindo significativamente o esforço computacional para resolver este modelo.

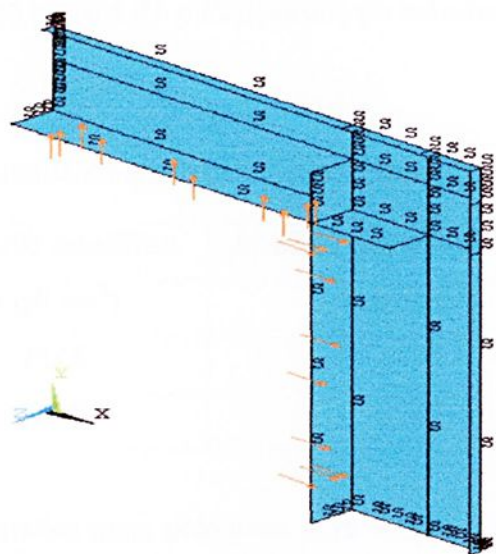


Figura 3.9 – Condições de contorno do modelo

3.3.1.4 Resultados

O resultado desejado deste tipo de análise é a Tensão de Comparação (Tensão de Von Mises) ver Figura 3.10.

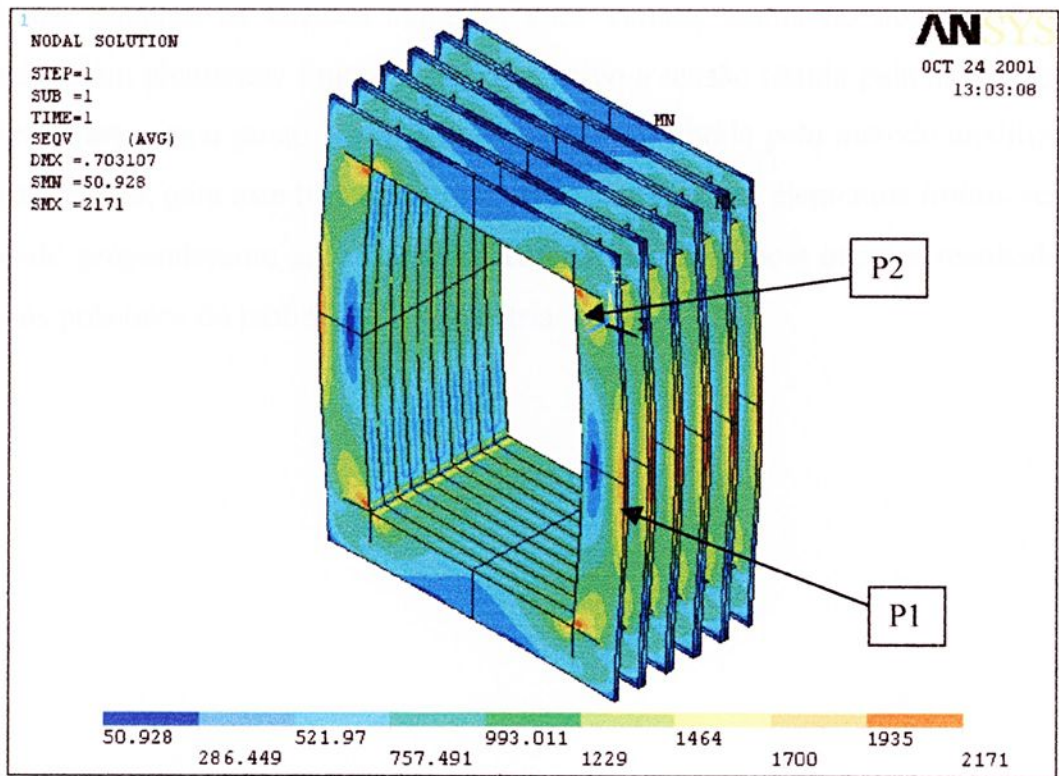


Figura 3.10 – Tensões de Von Mises

Para comparar os resultados do cálculo analítico e a análise em elementos finitos foi montada uma tabela comparativa (Tabela 3.8). Nesta tabela comparam-se dois pontos P1 e P2 (pontos de máxima tensão) indicados na Figura 3.10.

Tabela 3.8 – Comparativo entre cálculo analítico e análise em elementos finitos.

	Cálculo analítico	Análise em elem. finitos	Diferença
PONTOS	(kgf/cm²)	(kgf/cm²)	%
P1	2375	2171	8,5
P2	2669	2171	18,6

O ponto 1 tem tensões mais próximas para os dois métodos que o ponto 2, isto é perfeitamente explicável devido a existência de reforços nos cantos da blindagem (ponto 2) que como pode ser visto na Figura 3.11 são na realidade continuações das paredes. Estes reforços são utilizados para dissipar as tensões nos cantos da blindagem, eliminando pontos de concentração de tensão, os quais não são possíveis de calcular pelo método analítico. Sem a existência destes reforços as tensões subiriam para valores acima do admissível na análise em elementos finitos. Por este motivo a tensão obtida pela análise em elementos para o ponto 2 é menor que a tensão obtida pelo método analítico. Atualmente, para este tipo de equipamento a análise em elementos finitos vem sendo preponderante em relação ao cálculo analítico pois oferece resultados mais próximos da realidade da geometria.

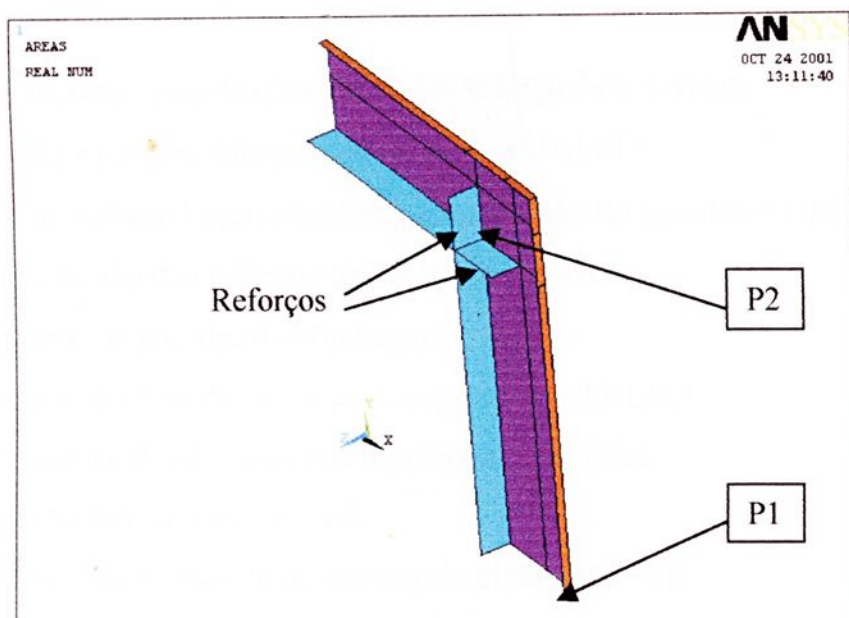


Figura 3.11 – Visualização dos reforços para dissipação de tensões

3.4 OTIMIZAÇÃO DA BLINDAGEM

3.4.1 Elaboração dos programas

Da mesma forma do caso da viga em balanço, foram montados dois programas:

- 1) Um programa para construir e resolver o modelo paramétrico ou seja, construir a geometria, a malha, aplicar as condições de contorno e resolver o modelo.
- 2) Outro para executar o modelo paramétrico e otimizá-lo (mínimo peso) dentro de limites das variáveis de projeto e da variável de estado tensão.

O primeiro passo para montar o programa de construção e solução do modelo foi definir os parâmetros de projeto as quais são:

Largura da seção transversal da blindagem = LBLIN

Altura da seção transversal da blindagem = HBLIN

Distância entre o centro das almas dos reforços transversais = CBLIN

Altura da alma dos reforços transversais = HALMA

Altura do reforço longitudinal de continuidade das paredes = HREF

Largura da aba dos reforços transversais = LABA

Espessura das paredes da blindagem = TC

Espessura da alma dos reforços transversais = TALMA

Espessura da aba dos reforços transversais = TABA

Dimensão dos elementos = TE

Pressão interna aplicada no interior da blindagem = PR

Comprimento total da blindagem = LTOT

Estes parâmetros são divididos em duas famílias bem distintas, parâmetros dependentes e parâmetros independentes.

Os parâmetros independentes são:

LBLIN, HBLIN, CBLIN, HALMA, HREF, LABA, TC, TALMA, TABA, LTOT e PR.

Os parâmetros dependentes são TE e HREF.

O parâmetro “TE” é de extrema importância, pois dele dependem todos os resultados do modelo, quanto maior o valor de TE menos preciso serão os resultados obtidos pois a interpolação entre os nós do elemento será feita considerando uma maior distância na superfície do modelo . Deve ser muito bem escolhida a relação entre este parâmetro e um parâmetro independente de forma que quando houver variação da geometria, TE tome uma dimensão satisfatória em relação ao modelo.

A escolha de tornar “HREF” dependente foi para evitar que ele ficasse maior que HALMA, o que tornaria o modelo irreal, foi escolhida uma proporção em relação a HALMA para que a altura do reforço longitudinal ultrapassa-se a linha neutra do reforço transversal.

Após definição dos parâmetros , é só fazer o programa para construir o modelo paramétrico e solucioná-lo.

O segundo programa utilizado para realizar a otimização do modelo paramétrico é simples mas muito minucioso nele estão definidas as variáveis de projeto com seus limites, variáveis de estado com seus limites e a função objetivo. É muito importante definir bem os limites das variáveis de projeto, ou seja limitar o espaço livre para o projeto, evitando assim mínimos locais da função objetivo e reduzindo o tempo total do processo de otimização.

As variáveis de projeto são:

CBLIN, HALMA, LABA, TC, TALMA e TABA

A variável de estado é:

$S_{m\acute{a}x}$ – Tensão de Von Misses máxima.

A tensão de Von Mises foi limitada em 2400 kgf/cm^2 apesar da tensão admissível ser de 2639 kgf/cm^2 foi assim adotado, pois após a otimização obtemos como resultados espessuras fora de padrão comercial sendo necessário aproximá-las ao padrão para tornar o equipamento viável (espessuras fora de padrão são extremamente onerosas).

Os programas, para construção e solução do modelo paramétrico da blindagem e otimização são vistos no “ANEXO A” e os seus fluxogramas podem ser vistos a seguir nas Figuras 3.12 e 3.13:



Figura 3.12 - Fluxograma do programa do modelo paramétrico da blindagem.

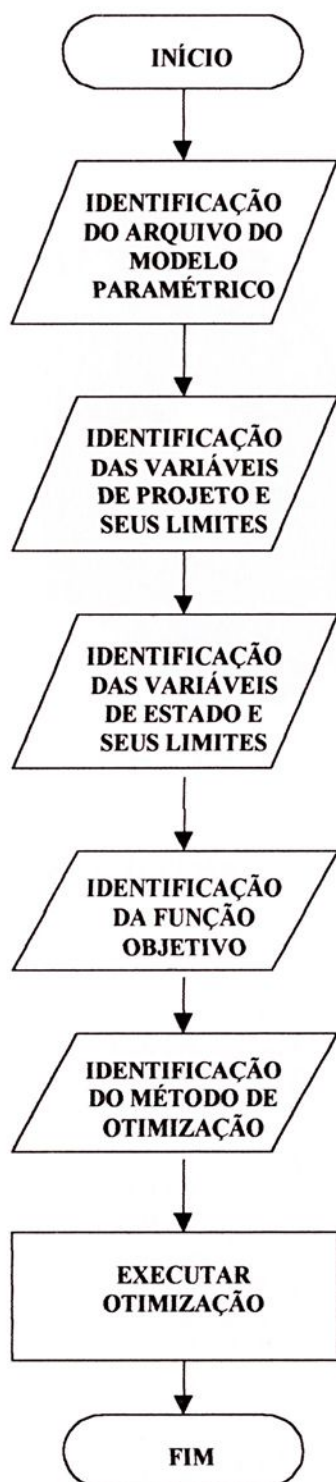


Figura 3.13 - Fluxograma do programa de otimização do modelo da blindagem.

3.4.2 Resultados da otimização

Após processo de otimização obtemos os seguintes tensões de Von Mises:

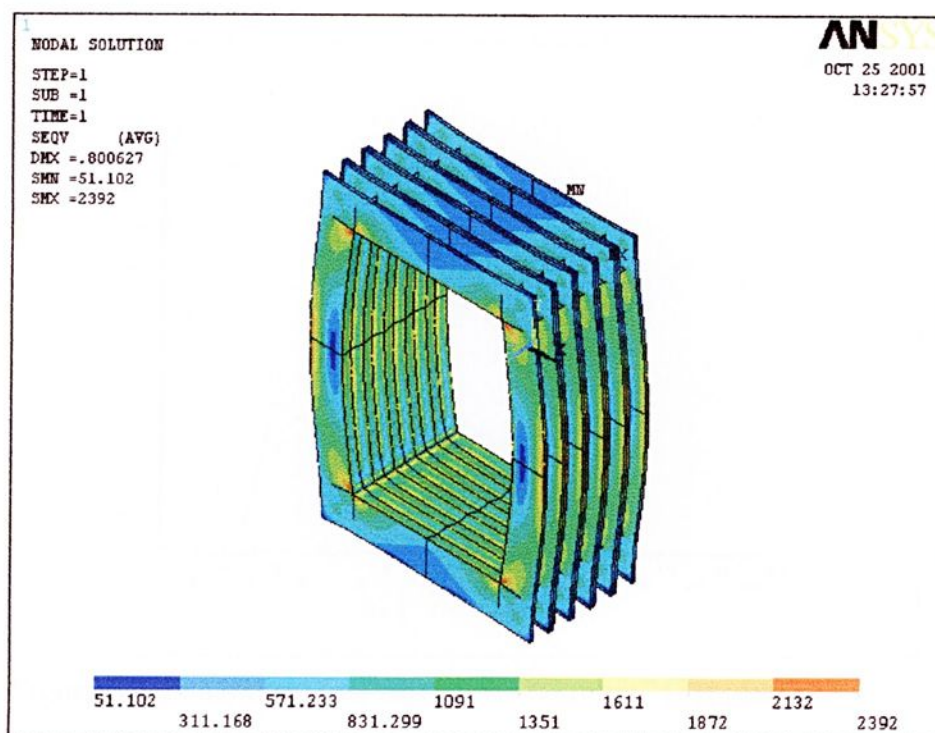


Figura 3.14 – Tensão de Von Mises do projeto otimizado.

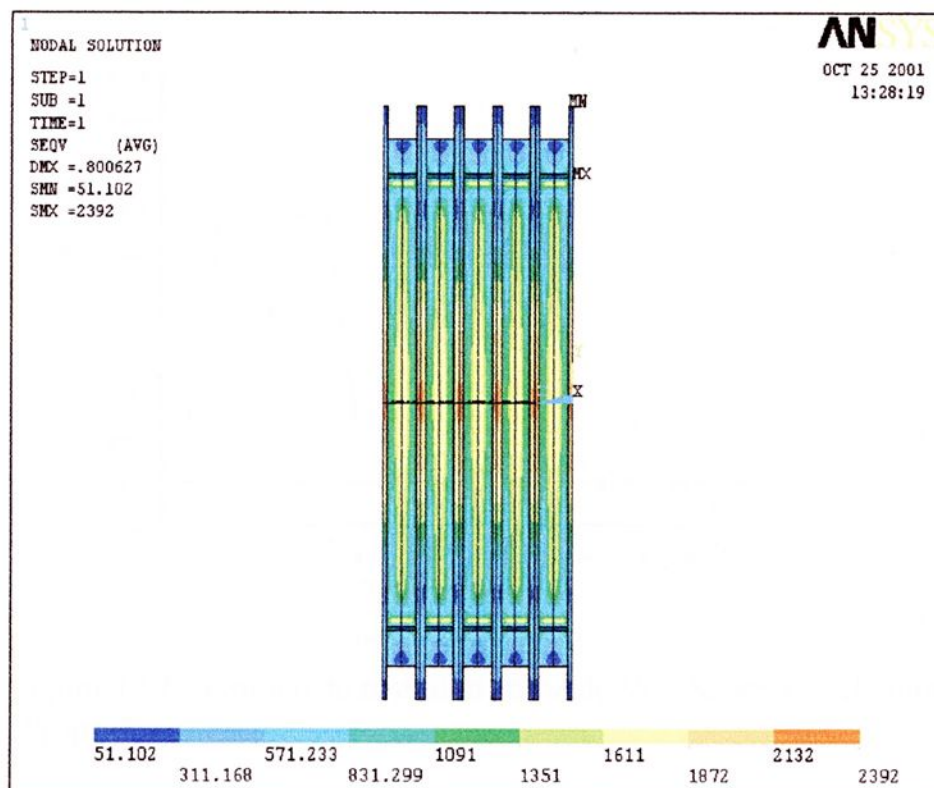


Figura 3.15 – Tensão de Von Mises do projeto otimizado.

A seguir pode ser visto o comportamento do peso da blindagem, tensão máxima de Von Mises (variável de estado) e suas espessuras (variáveis de projeto) para cada “set number” ou seja projeto executado durante a otimização:

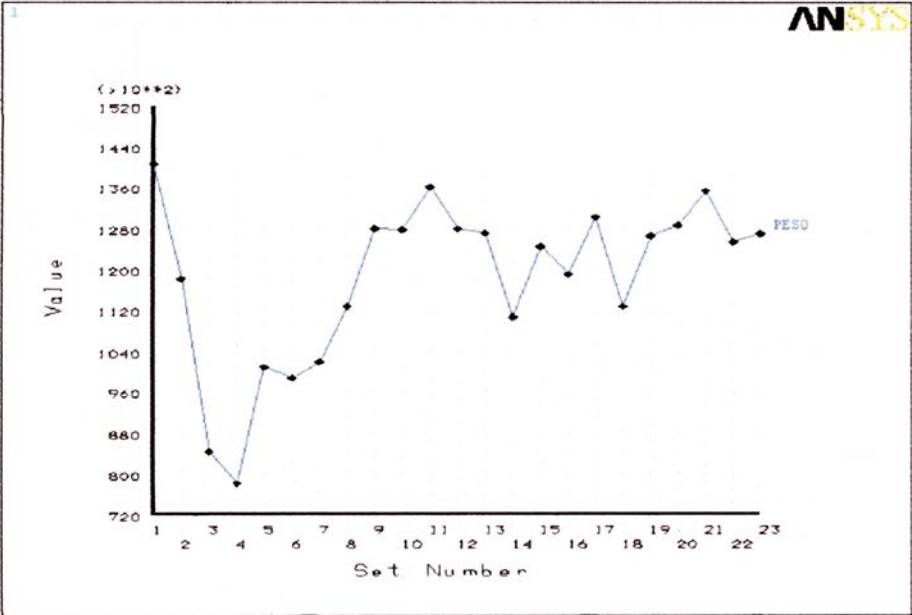


Figura 3.16 – Gráfico de Peso x “Set Number” (Projeto).

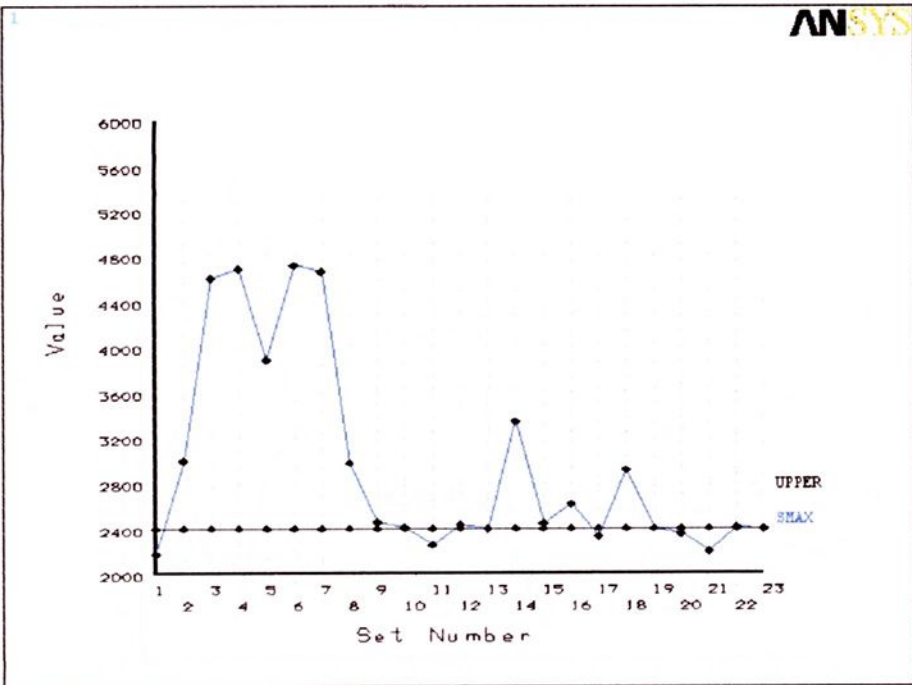


Figura 3.17 – Gráfico de tensão máxima de Von Mises x “Set Number” (Projeto).

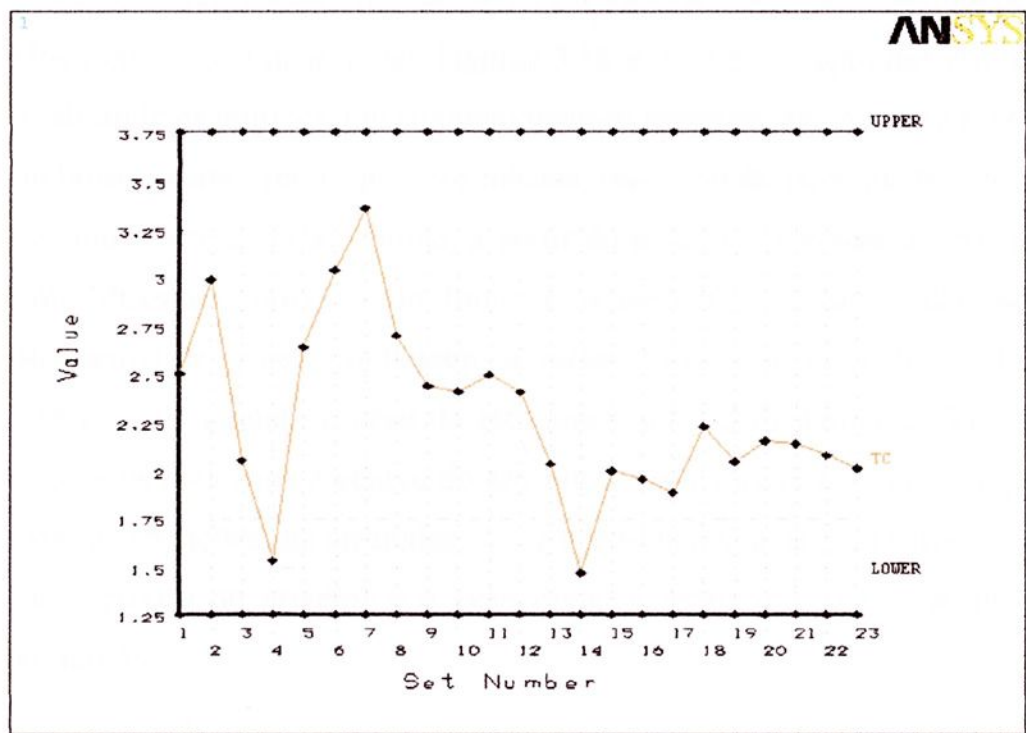


Figura 3.18 – Gráfico de espessura da parede x “Set Number” (Projeto).

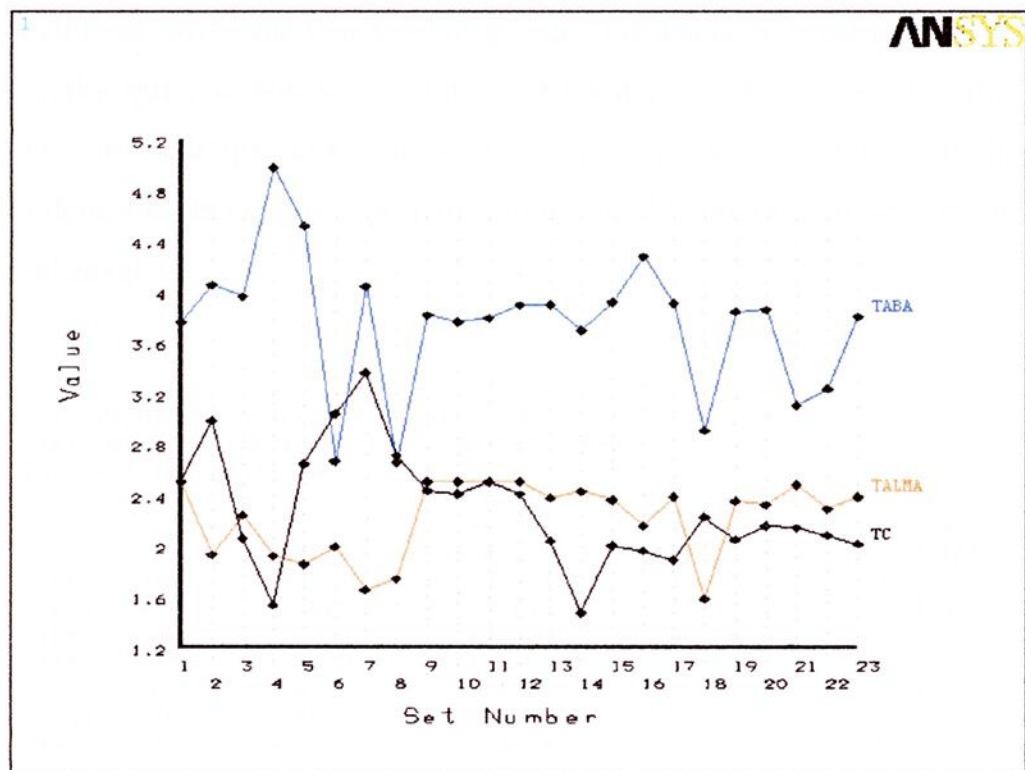


Figura 3.19 – Gráfico de espessuras x “Set Number” (Projeto).

Na Figura 3.16 pode ser observado a variação do peso da estrutura durante o processo de otimização, na Figura 3.17 a variação da tensão máxima de Von Mises em cada projeto e nas Figuras 3.18 e 3.19 a variação das espessuras. Analisando os gráficos em conjunto pode-se observar que o peso da estrutura cai bruscamente para os projetos iniciais, mas a tensão máxima de Von Mises está muito acima do seu limite, a partir do projeto 9 a tensão de máxima de Von Mises se aproxima do limite e o peso da estrutura aumenta. Os parâmetros de projeto continuam a variar como pode ser visto nas Figuras 3.18 e 3.19 variando o peso da estrutura e a tensão máxima de Von Mises sensivelmente acima e abaixo do seu limite, esta variação só termina quando todas as restrições são atendidas (tensão máxima de Von Mises e limites das variáveis de projeto) e o peso ótimo é alcançado, o que acontece no projeto 23.

Além dos resultados gráficos acima obtém-se uma tabela com todos os projetos ou seja “sets” executados durante a otimização como pode ser visto a seguir, os “sets” que tem a denotação de “infeasible” ou seja irrealizável, são aqueles que ultrapassaram o limite da variável de estado SMÁX, por outro lado, os “sets” que tem a denotação “feasible” são os projetos realizáveis. Podemos observar que o projeto ótimo é o “23” pois tem o peso mínimo e é realizável.

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 23 AND SHOW ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS. (A "*" SYMBOL IS USED TO INDICATE THE BEST LISTED SET)

		SET 1		SET 2		SET 3		SET 4
		(FEASIBLE)		(INFEASIBLE)		(INFEASIBLE)		(INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	2170.6	>	2988.9	>	4601.1	>	4677.5
CBLIN	(DV)	45.000		49.236		49.239		48.476
HALMA	(DV)	71.000		62.859		40.166		43.500
LABA	(DV)	12.000		11.164		11.407		11.042
TC	(DV)	2.5000		2.9809		2.0507		1.5311
TALMA	(DV)	2.5000		1.9219		2.2409		1.9122
TABA	(DV)	3.7500		4.0448		3.9553		4.9737
PESO	(OBJ)	0.14034E+06		0.11795E+06		84246.		78028.

		SET 5 (INFEASIBLE)	SET 6 (INFEASIBLE)	SET 7 (INFEASIBLE)	SET 8 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	> 3880.4	> 4709.3	> 4657.4	> 2972.7
CBLIN	(DV)	48.158	49.182	46.839	48.876
HALMA	(DV)	47.545	45.912	41.099	75.371
LABA	(DV)	12.316	12.277	11.359	10.290
TC	(DV)	2.6366	3.0341	3.3573	2.6983
TALMA	(DV)	1.8470	1.9885	1.6476	1.7294
TABA	(DV)	4.5106	2.6584	4.0354	2.6490
PESO	(OBJ)	0.10085E+06	98654.	0.10192E+06	0.11256E+06

		SET 9 (INFEASIBLE)	SET 10 (INFEASIBLE)	SET 11 (FEASIBLE)	SET 12 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	> 2451.2	> 2409.6	2251.2	> 2428.2
CBLIN	(DV)	48.981	48.471	46.245	48.977
HALMA	(DV)	67.917	69.438	70.315	69.215
LABA	(DV)	11.997	10.628	11.385	11.061
TC	(DV)	2.4339	2.4067	2.4929	2.4013
TALMA	(DV)	2.4980	2.4978	2.4993	2.4979
TABA	(DV)	3.8058	3.7532	3.7836	3.8852
PESO	(OBJ)	0.12791E+06	0.12768E+06	0.13590E+06	0.12777E+06

		SET 13 (FEASIBLE)	SET 14 (INFEASIBLE)	SET 15 (INFEASIBLE)	SET 16 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	2396.2	> 3340.0	> 2446.7	> 2609.1
CBLIN	(DV)	47.005	46.996	47.908	48.966
HALMA	(DV)	73.566	69.819	74.133	76.266
LABA	(DV)	11.375	10.414	11.035	10.457
TC	(DV)	2.0347	1.4684	1.9977	1.9531
TALMA	(DV)	2.3772	2.4261	2.3611	2.1544
TABA	(DV)	3.8924	3.6863	3.9154	4.2633
PESO	(OBJ)	0.12703E+06	0.11051E+06	0.12441E+06	0.11886E+06

		SET 17 (FEASIBLE)	SET 18 (INFEASIBLE)	SET 19 (INFEASIBLE)	SET 20 (FEASIBLE)
SMAX	(SV)	2329.8	> 2907.2	> 2402.1	2350.3
CBLIN	(DV)	46.397	45.604	47.619	45.466
HALMA	(DV)	77.796	81.797	74.923	73.586
LABA	(DV)	10.963	11.990	11.173	10.324
TC	(DV)	1.8840	2.2276	2.0462	2.1535
TALMA	(DV)	2.3824	1.5768	2.3536	2.3231
TABA	(DV)	3.9040	2.9004	3.8389	3.8526
PESO	(OBJ)	0.13009E+06	0.11264E+06	0.12646E+06	0.12859E+06

		SET 21 (FEASIBLE)	SET 22 (INFEASIBLE)	*SET 23* (FEASIBLE)
SMAX	(SV)	2190.0	> 2410.6	2391.7
CBLIN	(DV)	45.566	47.297	47.077
HALMA	(DV)	78.188	78.034	73.891
LABA	(DV)	10.384	10.406	11.626
TC	(DV)	2.1393	2.0802	2.0100
TALMA	(DV)	2.4728	2.2893	2.3852
TABA	(DV)	3.1019	3.2334	3.7954
PESO	(OBJ)	0.13509E+06	0.12534E+06	0.12699E+06

3.4.3 Análise dos resultados preliminares da otimização

Como pode ser observado nas Figuras 3.14 e 3.15 as tensão de Von Mises máxima ficou abaixo da tensão “SMÁX” que é de 2400 kgf/cm².

As Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 mostram a variação das espessuras a cada “set” ou seja projeto. Pode ser verificado que as espessuras variaram dentro dos limites especificados e que houve redução das espessuras.

Comparando o projeto 1 (“set 1”) o qual é o projeto inicial e o projeto ótimo 23 (“set 23”) pode-se observar que houve uma redução de peso de 140340 kgf para 126990 kgf, isto significa uma redução de 13350 kgf ou seja, aproximadamente 9,5%.

O problema não está totalmente resolvido, pois obteve-se como resultado espessuras fora de padrão comercial brasileiro para este tipo de material os quais são em ordem crescente e em mm:

6.3, 12.5, 16, 19, 22.4, 25, 31.5, 37.5, 44.5, 50, 75, 89.5 e 100.

Sendo assim se faz necessário aproximar as espessuras obtidas para estes padrões lembrado que pode-se chegar a uma tensão de Von Mises de 2639 kgf/cm².

TC = 20.1 mm	para	19.0 mm
TALMA = 23.85 mm	para	22.4 mm
TABA = 37.95 mm	para	37.5 mm

Após estas alterações de espessuras é necessária realizar nova análise.



3.4.4 Resultados do modelo final com espessuras comerciais.

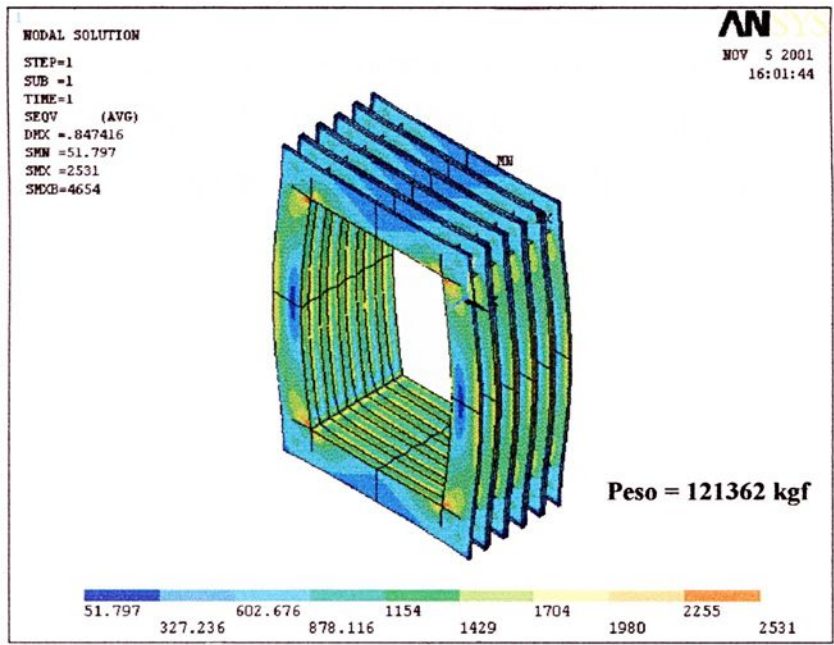


Figura 3.20 – Tensões de Von Mises de modelo com espessuras comerciais.

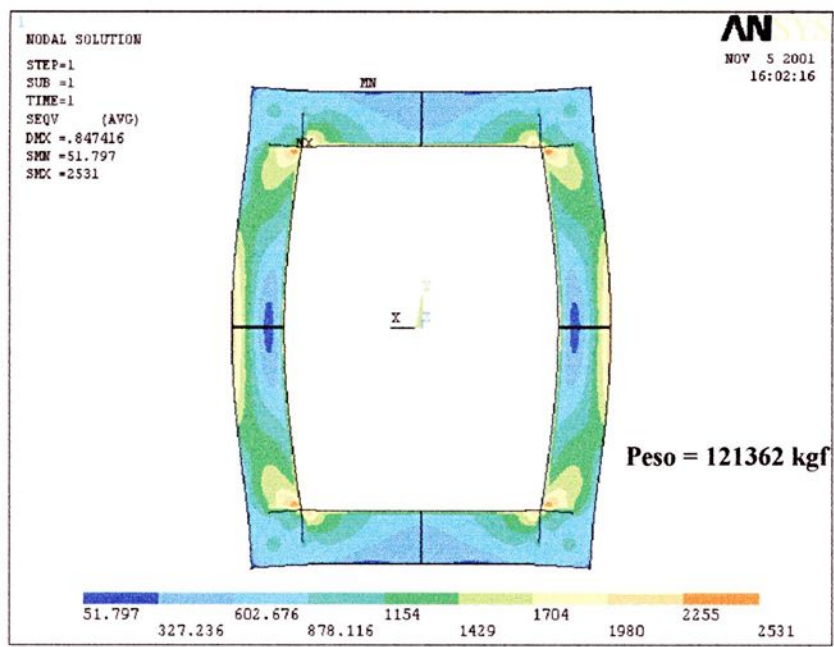


Figura 3.21 – Tensões de Von Mises de modelo com espessuras comerciais.

3.4.5 Conclusões finais dos resultados da otimização da blindagem

As tensões do modelo com espessuras comerciais estão dentro do admissível e o peso é de 121362 kgf o que significa um ganho em peso em relação ao projeto inicial de 18978 kgf, ou seja 13.5% de ganho no peso total da blindagem.



CAPÍTULO IV - PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA BIFURCAÇÃO

4.1 BIFURCAÇÃO

Uma Bifurcação consiste em um dispositivo utilizado para dividir o fluxo de água proveniente de um conduto em dois. É muito utilizada em plantas de geração de energia hidroelétrica quando se tem um conduto principal que capta a água da tomada d'água e duas ou mais turbinas como pode ser visto na Figura 4.1.

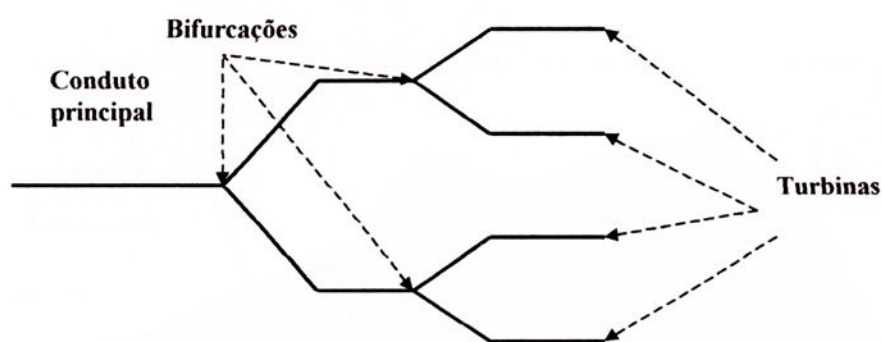


Figura 4.1 – Instalação com bifurcações

É uma estrutura que tem como carga preponderante a pressão interna, mas não é rara a existência de pressão externa devido a infiltração de água na rocha e ou pressão externa devido a injeção de concreto entre a face externa da bifurcação e a rocha. Apesar de ser calculada na maioria das vezes como auto portante ela sempre recebe concretagem ao seu redor.

Tem uma geometria complexa difícil de ser definida como pode ser visto nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Demanda grande número de horas de engenharia, se forem utilizados meios normais de cálculo e projeto. Não existem cálculos analíticos confiáveis, eles são imprecisos e não levam em consideração pontos de alta concentração de tensões. A análise em elementos finitos partindo da

modelagem direta é extremamente trabalhosa e qualquer alteração no intuito de melhorar o modelo requer nova modelagem. Além disso, pequenas variações na geometria causam grandes variações nas tensões, o que torna este modelo não só complexo mas também muito sensível. Por estes motivos, fica impraticável chegar a uma solução ótima (mínimo peso sem ultrapassar as tensões limites) utilizando os meios “normais”. Os motivos acima descritos incentivaram a utilização da parametrização e otimização em elementos finitos nesta estrutura. Na Figura 4.2 pode-se observar o modelo de uma bifurcação com os elementos e a nomenclatura adotada nesta dissertação para as partes de uma bifurcação.

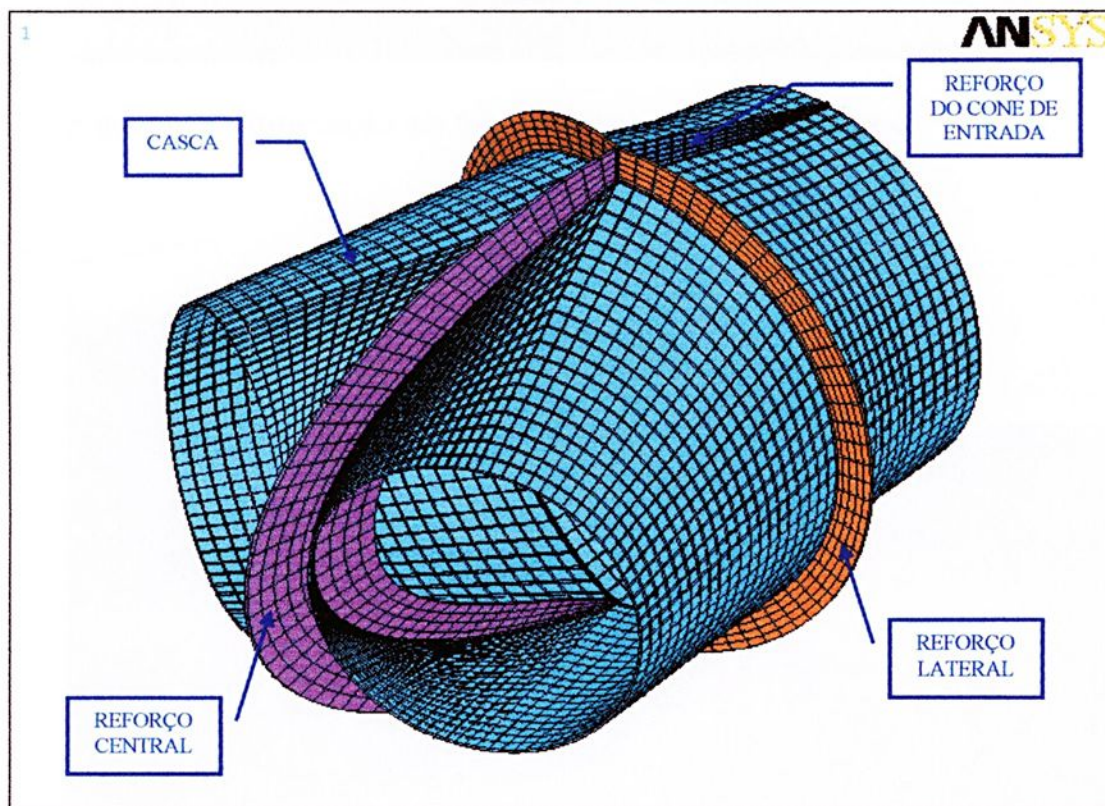


Figura 4.2 – Modelo de uma bifurcação

Na Figura 4.3 pode-se observar, a pré-montagem de uma bifurcação na fábrica e na Figura 4.4 tem-se a montagem das bifurcações na obra.



Figura 4.3 – Bifurcação em fase de pré - montagem na fábrica



Figura 4.4 – Bifurcação em fase de montagem em obra

4.2 DESENVOLVIMENTO DE UMA GEOMETRIA ÓTIMA

Antes de se pensar na elaboração do programa, é necessário desenvolver uma geometria ótima, não só quanto a eliminação de pontos de concentração de tensões, mas também que tenha o mínimo de perda de carga, pois quanto maior a perda de carga nos componentes antes da turbina hidráulica, menor é o rendimento desta.

Sabe-se que a geometria ótima para resistir a pressão interna é uma superfície de seção cilíndrica, portanto a bifurcação deveria ser formada por superfícies cônicas perfeitas. Outro ponto a observar é o ângulo entre a superfície cônica de entrada e o cone de saída. Ele não podem ser muito acentuado pois causaria concentrações de tensões e descolamento das linhas de fluxo das paredes da bifurcação, o que causa pontos de baixa pressão, podendo levar ao fenômeno da aeração, que desgastaria as paredes internas da bifurcação, e também levam a grandes perdas de carga.

De acordo com a norma Technical Standards for Gates and Penstocks da “Hydraulic Gate and Penstock Association” a geometria ótima do ponto de vista de menor perda de carga é a representada nas Figuras 4.5 a e b. Por ter um ângulo de 180 graus entre a superfície do cone na entrada e na saída está também livre de pontos de grande concentração de tensões.



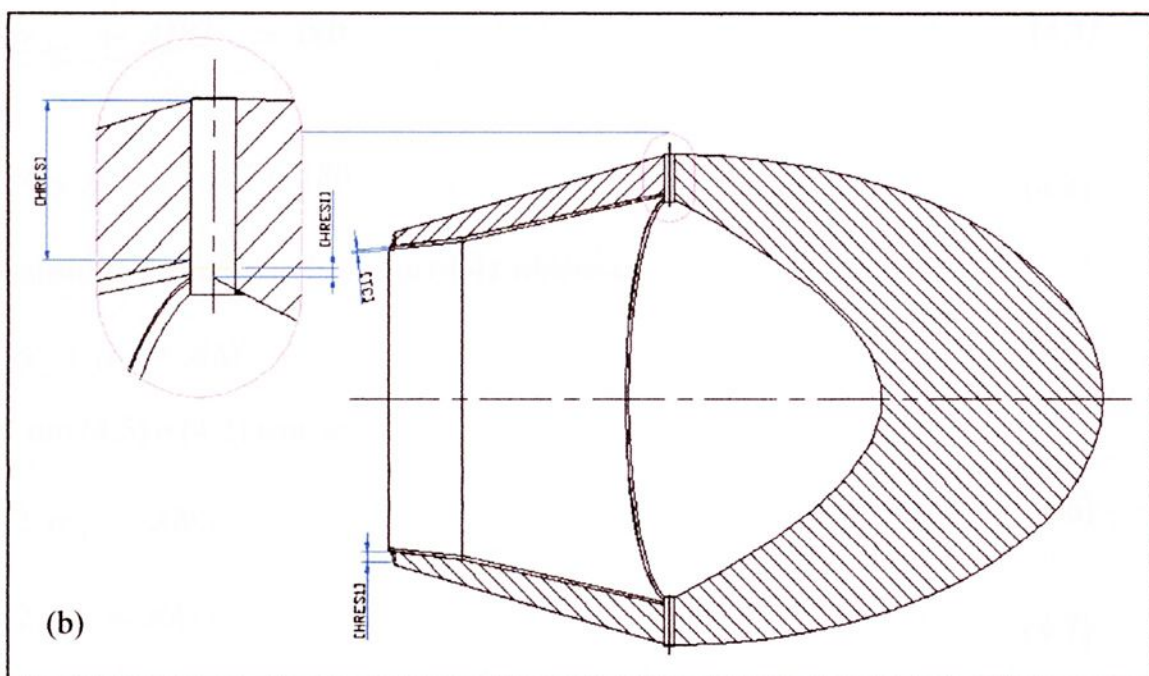
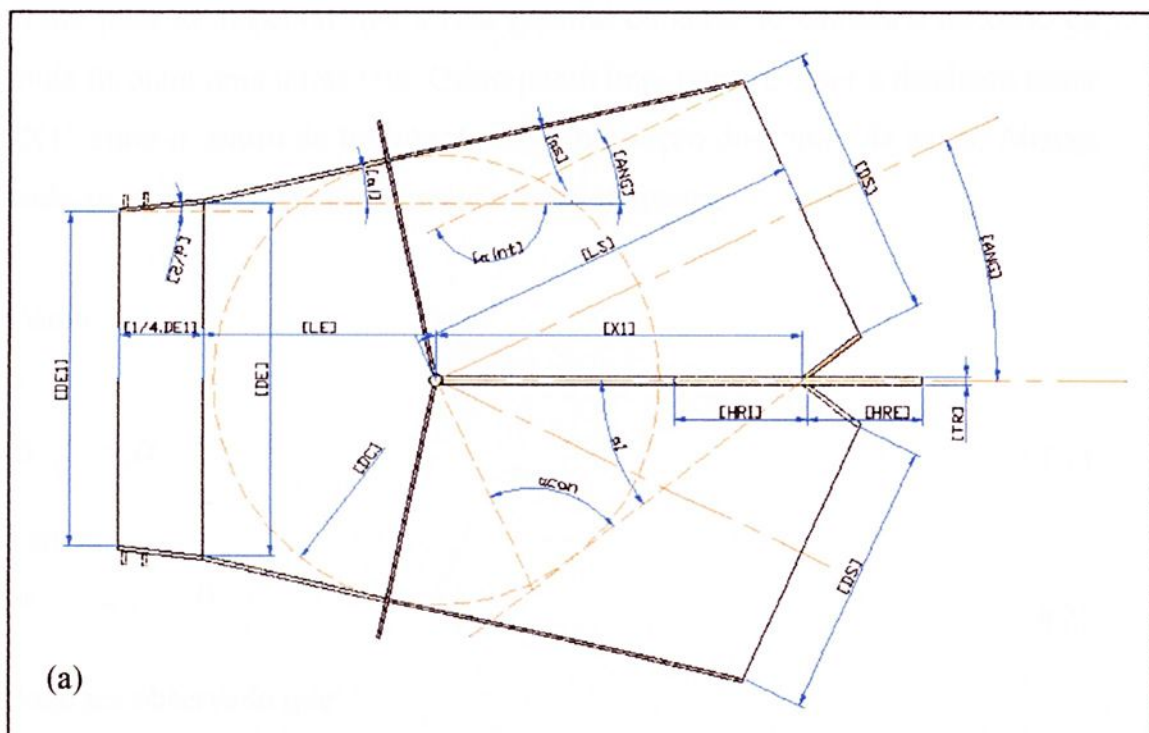


Figura 4.5 (a) e (b) – Geometria ótima da bifurcação

O passo seguinte foi equacionar esta geometria. Como já foi descrito uma bifurcação é formada pela interseção de três superfícies cônicas, sendo que

todos os três tem em sua base uma circunferência de diâmetro “DC”, além disso, pode-se observar que a reta geratriz do cone de entrada e do cone de saída formam uma única reta. Outro ponto importante é obter a distância exata “X1” entre o centro da bifurcação e da interseção dos cones de saída. Abaixo pode-se observar o equacionamento desta geometria.

Como:

$$\alpha_i = \alpha_s \quad (4.1)$$

Temos:

$$\alpha_i - \alpha_s = 0 \quad (4.2)$$

Pode ser observado que:

$$\alpha_{int} + ANG = 180 \quad (4.3)$$

e

$$\alpha_{int} + \alpha_s + \alpha_i = 180 \quad (4.4)$$

substituindo equação (4.3) em (4.4) obtém-se:

$$\alpha_i + \alpha_s = ANG \quad (4.5)$$

Com (4.5) e (4.2) tem-se:

$$2.\alpha_i = ANG \quad (4.6)$$

$$2.\alpha_s = ANG \quad (4.7)$$

O próximo passo é obter α_i e α_s .

Tem-se que:

$$\alpha_s = ATAN\left(\frac{DC - DS}{2.LS}\right) \quad (4.8)$$

$$\alpha_i = ATAN \left(\frac{DC - DE}{2 \cdot LE} \right) \quad (4.9)$$

Das equações 4.9 e 4.6 tem-se:

$$DC = 2 \cdot LE \cdot TAN \left(\frac{ANG}{2} \right) + DE \quad (4.10)$$

Das equações 4.8 e 4.7 tem-se:

$$LS = \frac{(DS - DC)}{-2 \cdot TAN \left(\frac{ANG}{2} \right)} \quad (4.11)$$

Como pode ser observado a equação (4.10) define o diâmetro da base dos três cones “DC” em função do comprimento do cone de entrada “LE”, diâmetro menor do cone de entrada “DE” e do ângulo entre o eixo do cone de saída e a linha de centro da bifurcação “ANG”.

A equação (4.11) define o comprimento do cone de saída “LS” em função do diâmetro de saída “DS”, do diâmetro central “DC” e do ângulo “ANG”.

O próximo passo é obter “X1”, que como pode ser visto na Figura 4.5(a) representa a distância entre o centro da circunferência central da bifurcação de diâmetro “DC” e a interseção dos cones de saída :

Tem-se que:

$$\alpha_1 + \alpha_{con} + (90 - ANG) = 180 \quad (4.12)$$

sendo que:

$$\alpha_{con} = ATAN \frac{LS}{\frac{DC - DS}{2}} \quad (4.13)$$

Portanto:

$$\alpha_1 = 90 - \alpha_{con} + ANG \quad (4.14)$$

Obtendo α_1 , pode-se obter facilmente X_1 :

$$X_1 = \frac{DC \cdot \sin \alpha_{con}}{2 \cdot \sin \alpha_1} \quad (4.15)$$

Uma característica importante desta geometria ótima é a inserção de um tronco de cone na entrada da bifurcação com ângulo de inclinação $\alpha_i/2$ e altura adotada de $DE/4$, este cone é de vital importância para garantir que não haja um descolamento das linhas de fluxo da parede da bifurcação evitando a aeração e reduzindo perda de carga.

4.3 OTIMIZAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO APLICADA A UMA BIFURCAÇÃO

Para avaliar a performance da parametrização e otimização aplicada a este tipo de equipamento foi escolhido um projeto de uma bifurcação já projetada e fabricada.

Será apresentada a análise em elementos finitos feita na época de seu projeto (chamado de “Projeto 1”).

Outro projeto será realizado (“Projeto 2”) fazendo a análise em elementos finitos utilizando o programa de parametrização e otimização com a geometria otimizada. Com os resultados obtidos das duas análises, será feita uma comparação.

4.3.1 Análise em elementos finitos do “Projeto 1”

A norma utilizada para o cálculo não só deste equipamento mas também do conduto forçado é a COMITÉ EUROPÉEN DE LA CHAUDRONNERIE ET LA TOLERIE - CECT (1975).

A bifurcação em questão se encontra embutida na rocha com uma camada de concreto entre a rocha e a face externa da bifurcação, para estas condições a CECT (1975) recomenda um fator de segurança em relação a tensão de escoamento do material de “1,8” para o caso normal (somente a pressão interna estática) e “1” para o caso excepcional (pressão interna estática mais pressão devido a golpe recorrente do corte brusco do fluxo).

O material utilizado na construção da bifurcação foi o RRst 52.3N, apresentando uma tensão de escoamento de aproximadamente 3600 kgf/cm^2 ou 353 MPa podendo variar com a espessura da chapa conforme indicado na norma DIN ou catálogos dos fabricantes.

As tensões admissíveis ficam portanto com os seguintes valores:

Caso normal = 2000 kgf/cm^2 ou 196,2 MPa

Caso excepcional = 3600 kgf/cm^2 ou 353 MPa

O carregamento é de uma pressão interna de 200,3 mca ou $20,03 \text{ kgf/cm}^2$ para o caso normal e 280,4 mca ou $28,04 \text{ kgf/cm}^2$ para o caso excepcional devido a uma sobre pressão de 40% .

A razão entre cargas excepcional e normal é de 1,4 e a razão entre tensões admissíveis excepcional e normal é de 1,8 portanto o caso normal é preponderante.

O diâmetro de entrada da bifurcação “DE” é de 4000 mm e o diâmetro das saídas “DS” é de 3300 mm.



O elemento utilizado foi o Shell 63, o mesmo utilizado na análise da blindagem e já descrito no capítulo anterior.

As espessuras utilizadas são as mostradas na Figura 4.6:

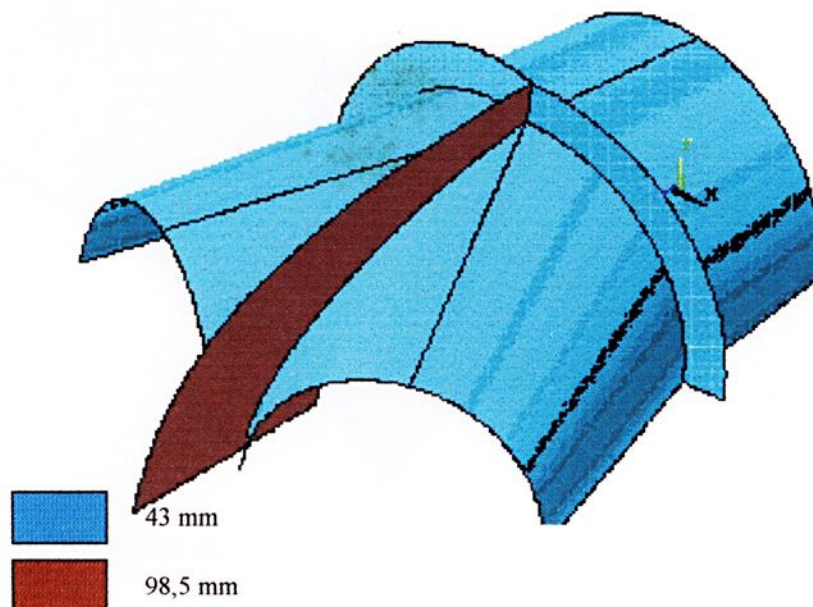


Figura 4.6 – Espessuras utilizadas na bifurcação (Projeto 1)

As espessuras vistas na Figura 4.6 contemplam uma redução de 1,5 mm devido a segurança contra a corrosão. Assim 43 mm refere-se a uma chapa de espessura de 44,5 mm e 98,5 mm a uma chapa de espessura de 100 mm. Estas são espessuras padrão encontradas no mercado brasileiro, podendo variar em outros países, espessuras fora de padrão recebem um adicional de custo e só são utilizadas em condutos de grande comprimento onde a quantidade de chapa ou seja de peso de chapa compensa uma corrida especial da usina siderúrgica reduzindo o custo. Foram consideradas as condições de contorno vistas na Figura 4.7.

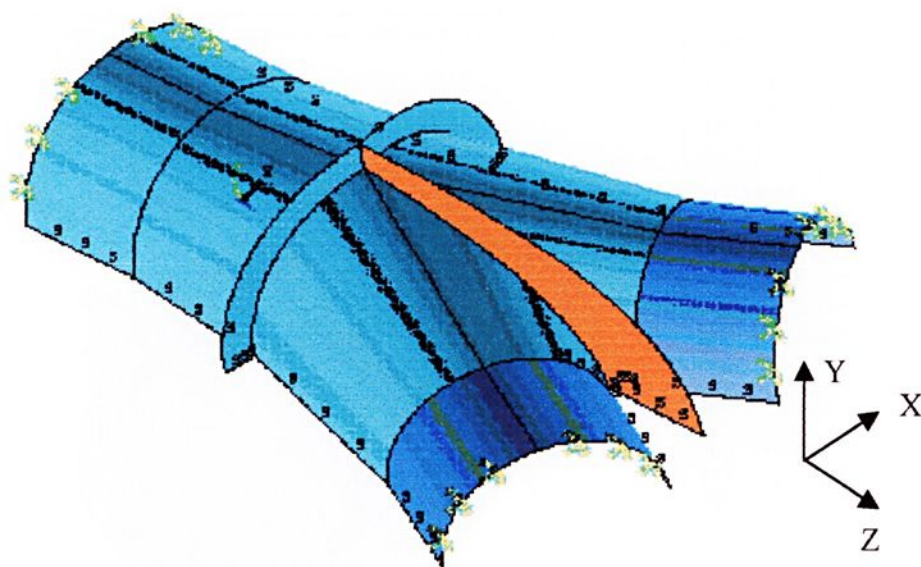


Figura 4.7 – Condições de contorno (Projeto 1)

Como pode ser observado foi aplicada simetria no plano "xz".

Pela Figura 4.7 observa-se que além da bifurcação foi considerado um comprimento de conduto em cada extremidade, de forma que o engastamento (feito em cada extremidade) não tenha influência nos resultados obtidos na bifurcação. Na Figura 4.8 pode ser observado o carregamento aplicado (pressão interna de 200,3 mca).

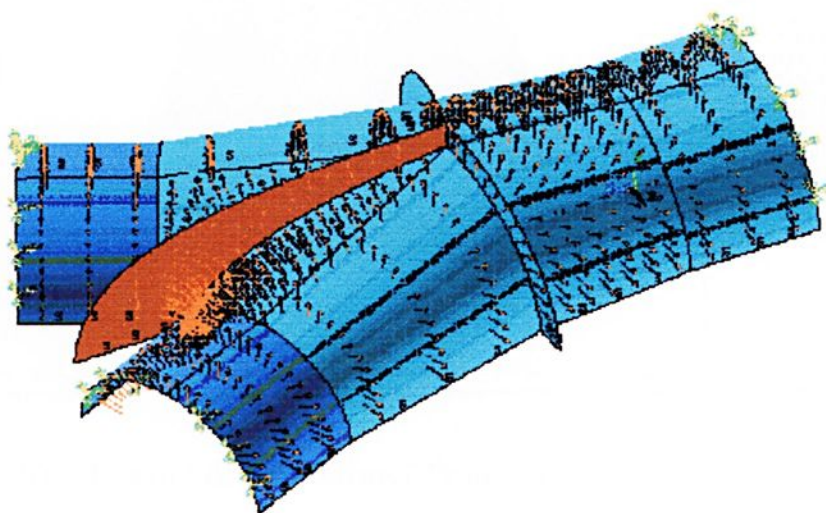
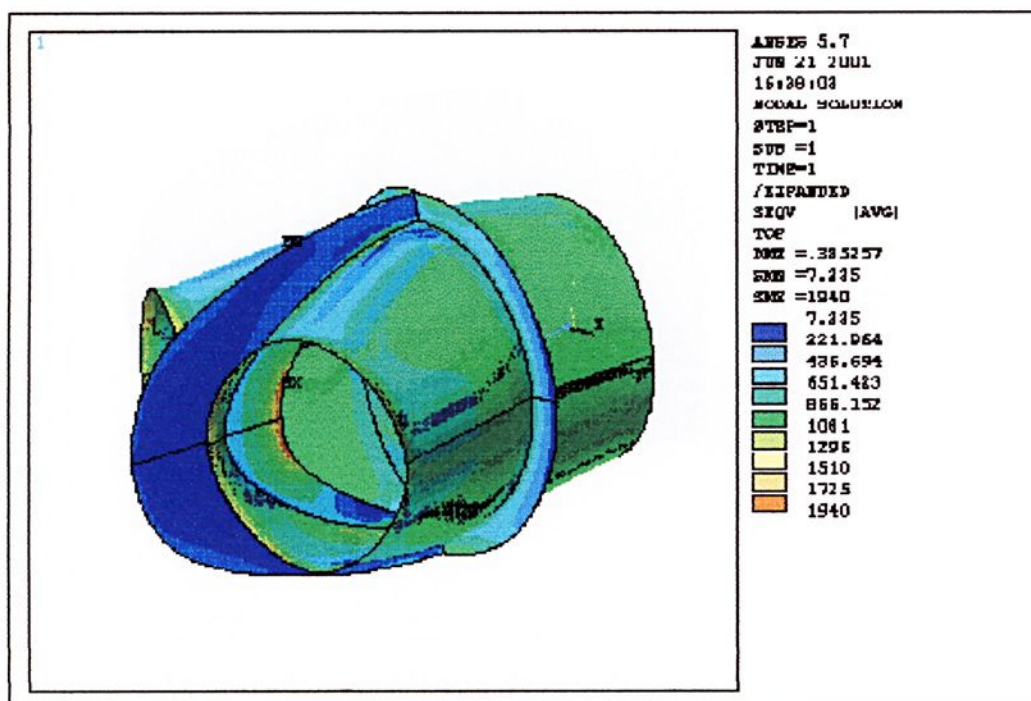
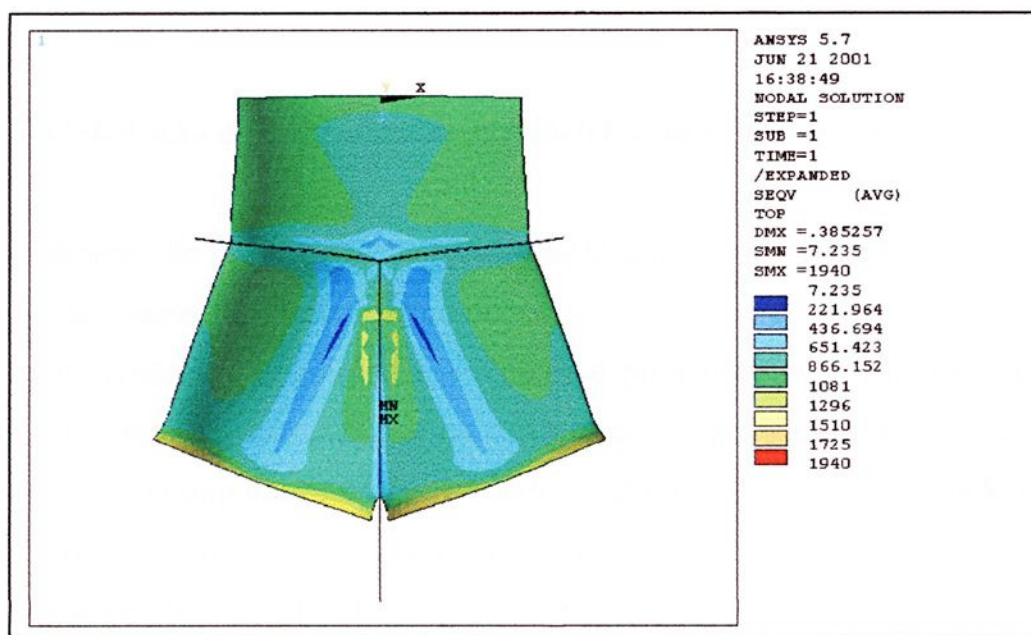


Figura 4.8 – Carregamento (Projeto 1)

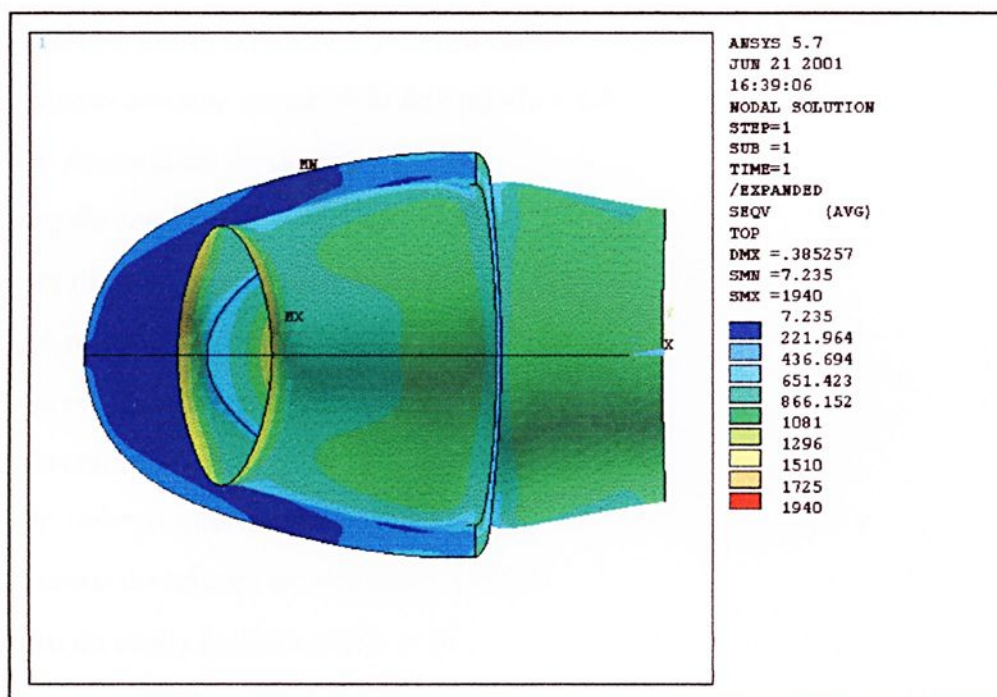
Os resultados obtidos na análise do projeto 1 podem ser vistos nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11.



4.9 – Tensões de Von Mises (Projeto 1)



4.10 – Tensões de Von Mises (Projeto 1)



4.11 – Tensões de Von Mises (Projeto 1)

O peso total do “Projeto 1” da bifurcação ficou em 54000 kgf

4.3.2 Elaboração do programa de parametrização e otimização.

Os programas de parametrização e otimização foram elaborados com base no estudo da geometria apresentada no item 4.1.

Antes de iniciar a elaboração do programa é primordial definir as variáveis independentes e dependentes e dentre estas, quais são as variáveis de projeto.

Outra variável importante é a variável de estado que neste caso é a tensão de Von Mises máxima “SMAX” limitada a 2000 kgf/cm².

A função objetivo é o “PESO”.

As variáveis independentes são:

Diâmetro do conduto de entrada = $DE1$

Ângulo entre a perna de saída e o centro da bifurcação = ANG

Comprimento do cone secundário de entrada = LE

Diâmetro do conduto de saída = DS

Espessura do conduto de entrada = $TCOE$

Espessura do conduto de saída = $TCOS$

Altura do reforço externo = HRE

Altura do reforço interno = HRI

Altura do reforço lateral = $HRES$

Altura do reforço interno superior = $HRESI$

Altura menor do reforço de entrada = $HRES1$

Espessura da casca da bifurcação = TC

Espessura do reforço central = TR

Espessura do reforço lateral e de entrada = $TR1$

Pressão interna = PR

As variáveis dependentes são:

Diâmetro central = DC

Comprimento das pernas de saída = LS

Dimensão do elemento = TE

Entre as variáveis independentes foram escolhidas as seguintes para variáveis de projeto com seus respectivos limites, ou seja variáveis livres durante a otimização (as unidades estão em cm):

$TC \quad 2.5 \leq TC \leq 5$

$TR \quad 2.5 \leq TR \leq 10$

$TR1 \quad 2.5 \leq TR1 \leq 7.5$

$HRE \quad 50 \leq HRE \leq 200$

$HRI \quad 50 \leq HRI \leq 100$

HRES $15 < \text{HRES} < 50$

Os programas, para construção e solução do modelo paramétrico da blindagem e otimização são vistos no “ANEXO B” e os seus fluxogramas podem ser vistos a seguir nas Figuras 4.12 e 4.13:



Figura 4.12 - Fluxograma do programa do modelo paramétrico da bifurcação.



Figura 4.13 - Fluxograma do programa de otimização do modelo da bifurcação.

4.3.3 Resultados obtidos da parametrização e otimização (Projeto2).

Durante a otimização foram executados 17 projetos até encontrar um projeto ótimo, as variáveis de projeto e estado e o peso de cada projeto executado pode ser visto a seguir:

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 17 AND SHOW
ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS

		SET 1 (INFEASIBLE)	SET 2 (FEASIBLE)	SET 3 (INFEASIBLE)	SET 4 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	1494.9	1804.5	> 2107.9	> 2099.6
TR	(DV)	9.8500	8.8538	8.8589	7.7136
TC	(DV)	4.3000	3.6430	2.5083	2.6750
TR1	(DV)	4.3000	4.4400	4.8455	4.2364
HRE	(DV)	180.00	153.86	98.043	66.867
HRI	(DV)	> 111.50	76.878	89.636	76.487
HRES	(DV)	50.000	36.627	35.375	49.632
PESO	(OBJ)	50324.	40576.	30525.	30863.

		SET 5 (INFEASIBLE)	SET 6 (INFEASIBLE)	SET 7 (INFEASIBLE)	SET 8 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	> 2184.8	> 2091.8	> 3128.4	> 2392.0
TR	(DV)	7.2375	8.7733	5.2585	8.3138
TC	(DV)	2.8772	2.7956	2.5549	4.2685
TR1	(DV)	6.3602	6.2946	4.7657	2.9837
HRE	(DV)	133.19	157.04	176.44	136.90
HRI	(DV)	73.878	79.540	65.904	69.176
HRES	(DV)	43.148	17.218	36.496	17.086
PESO	(OBJ)	34431.	32182.	28615.	41214.

		SET 9 (INFEASIBLE)	SET 10 (FEASIBLE)	SET 11 (INFEASIBLE)	SET 12 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	> 2639.0	1952.5	> 2165.5	> 2212.0
TR	(DV)	8.4699	8.6755	8.5747	8.4748
TC	(DV)	2.7856	2.7607	2.5598	2.7945
TR1	(DV)	4.8986	4.9037	5.3289	4.9224
HRE	(DV)	71.386	85.633	60.573	62.675
HRI	(DV)	55.587	81.960	70.010	71.474
HRES	(DV)	26.378	37.494	37.489	33.423
PESO	(OBJ)	29614.	32039.	29643.	30684.

		SET 13 (FEASIBLE)	SET 14 (INFEASIBLE)	SET 15 (INFEASIBLE)	SET 16 (INFEASIBLE)
SMAX	(SV)	1979.9	> 2078.4	> 2133.2	> 2807.1
TR	(DV)	8.6662	8.7266	8.5263	8.4956
TC	(DV)	2.6952	2.5462	2.6950	2.6928
TR1	(DV)	4.5177	4.7451	4.0189	3.1714
HRE	(DV)	93.016	88.942	81.429	56.700
HRI	(DV)	80.102	76.822	73.463	58.630
HRES	(DV)	37.510	37.525	32.101	20.959
PESO	(OBJ)	31482.	30341.	29923.	27289.

SET 17 (FEASIBLE)		
SMAX	(SV)	2000.1
TR	(DV)	8.7292
TC	(DV)	2.6460
TR1	(DV)	4.4987
HRE	(DV)	87.118
HRI	(DV)	79.987
HRES	(DV)	38.834
PESO	(OBJ)	31135.

Como pode ser observado o projeto ótimo é o 17, pois tem o menor peso (31135 kgf) e atende todos os limites impostos, ou seja o limite da variável de estado e das variáveis de projeto, o comportamento do peso em a cada projeto executado pode ser visto na Figura 4.14.

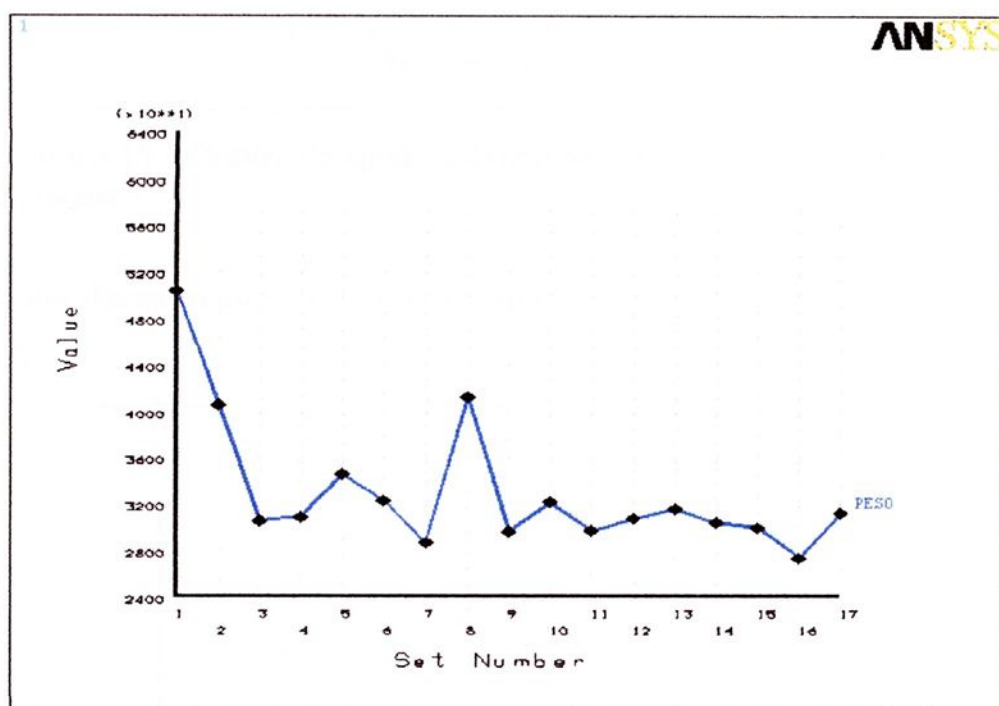


Figura 4.14 – Gráfico de Peso x “Set Number” (Projeto).

O valor tensão máxima de Von Mises (variável de estado) em cada projeto é visto na Figura 4.15:

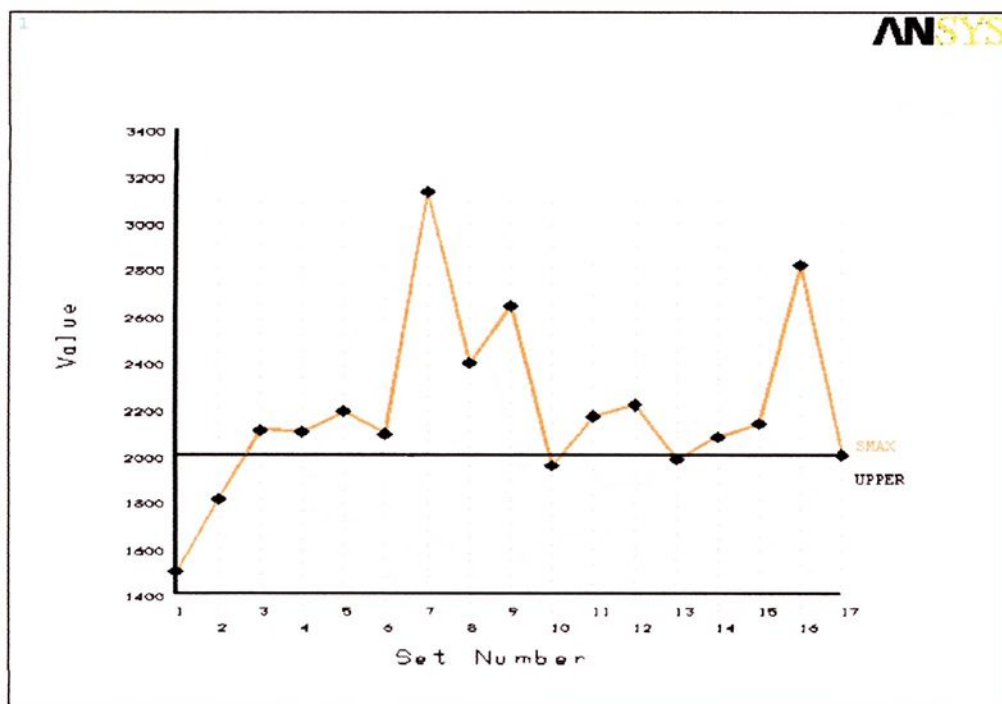


Figura 4.15 – Gráfico de tensão máxima de Von Mises x “Set Number” (Projeto).

O valor das espessuras (variáveis de projeto) em cada projeto é visto na Figura 4.16:

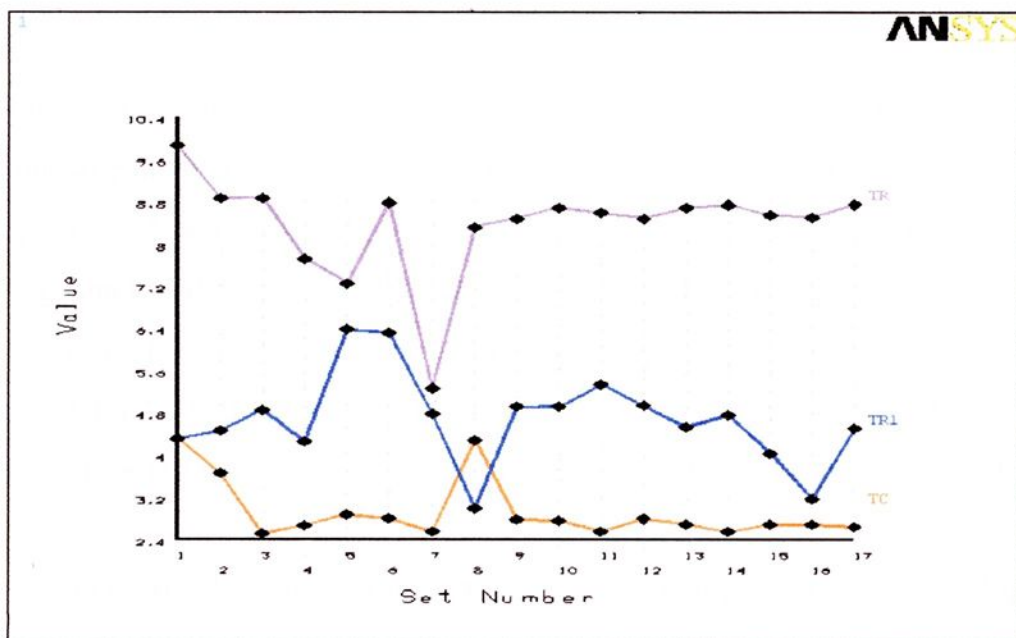


Figura 4.16 – Gráfico das espessuras x “Set Number” (Projeto).

O valor das altura dos reforços (variáveis de projeto) em cada projeto é visto na Figura 4.17:

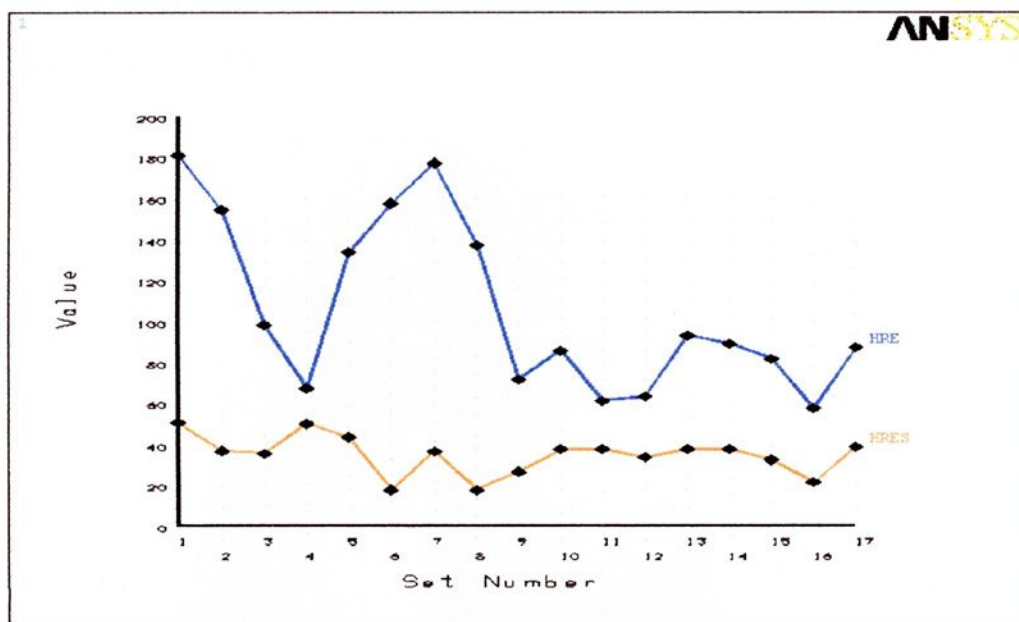


Figura 4.17 – Gráfico da altura dos reforços x “Set Number” (Projeto).

Analisando os gráficos em conjunto pode-se observar que o peso da estrutura cai bruscamente nos três projetos iniciais com a redução das espessuras TR (espessura do reforço central) e TC (espessura da casca).

A partir do projeto 3 a tensão máxima de Von Mises se mantém praticamente constante até o projeto 6, no projeto 7 ocorre um pico na tensão sem alteração significativa no peso e TC (espessura da casca), mas com uma grande variação na geometria dos reforços (TR (espessura do reforço central), TR1 (espessura do reforço lateral), HRE (altura do reforço central) e HRES (altura do reforço lateral)). Isto demonstra que a geometria da bifurcação é muito sensível no que tange a tensão máxima de Von Mises a alterações na geometria dos reforços.

Os parâmetros de projeto continuam a variar como pode ser visto nas Figuras 4.16 e 4.17, variando o peso da estrutura e a tensão máxima de Von Mises.

Esta variação só termina quando todas as restrições são atendidas (tensão máxima de Von Mises e limites das variáveis de projeto) e o peso ótimo é alcançado, o que acontece no projeto 17.

A distribuição das tensões de Von Mises no modelo, podem ser vistas nas Figuras 4.18 e 4.19:

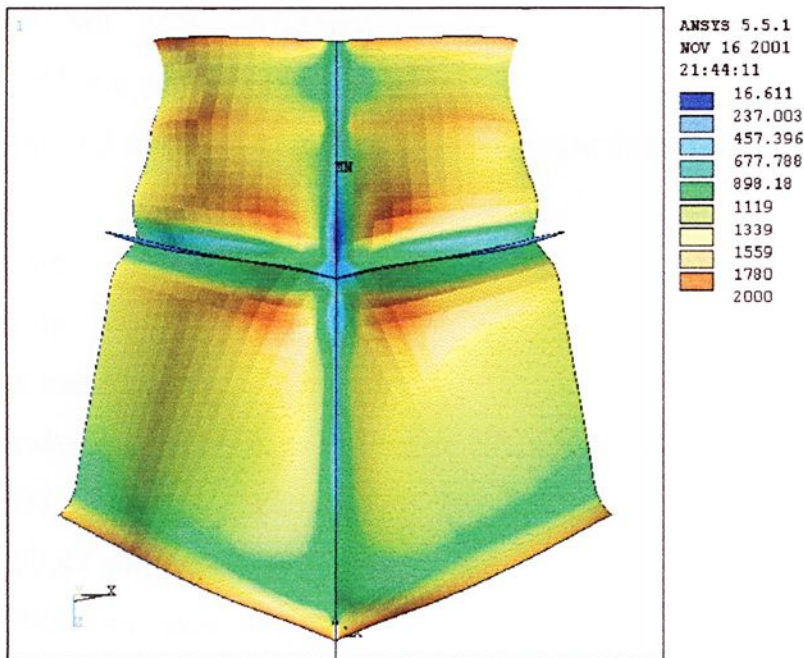


Figura 4.18 – Tensões de Von Mises (Projeto 2).

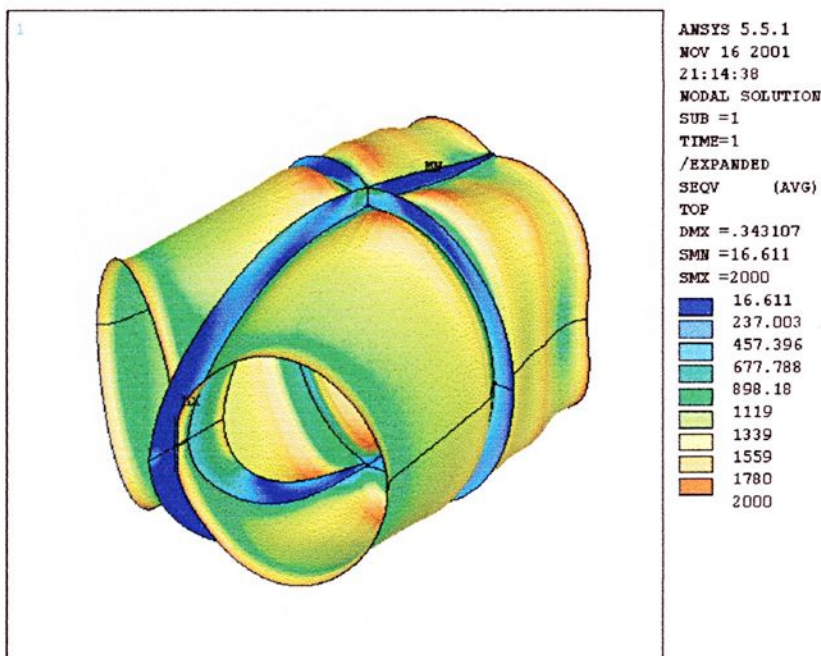


Figura 4.19 – Tensões de Von Mises (Projeto2).

Como pode ser observado as espessuras obtidas após otimização da bifurcação estão fora do padrão comercial fornecido por usinas siderúrgicas brasileiras, portanto deve ser feita a aproximação das espessuras obtidas para espessuras comerciais como pode ser visto abaixo:

TR = 87,292 mm para 89,5 mm

TC = 26,460 mm para 31,5 mm

TR1 = 44,987 mm para 50,0 mm

Considerando 1,5 mm de corrosão as espessuras que devem ser utilizadas na análise são:

TR = 88 mm

TC = 30 mm

TR1 = 48,5 mm

Foram também aproximados os valores de HRE, HRI e HRES:

HRE = 871,18 mm para 880 mm

HRI = 799,87 mm para 800 mm

HRES = 388,34 mm para 390 mm

Com a aproximação dos valores acima obteve-se os seguintes resultados:

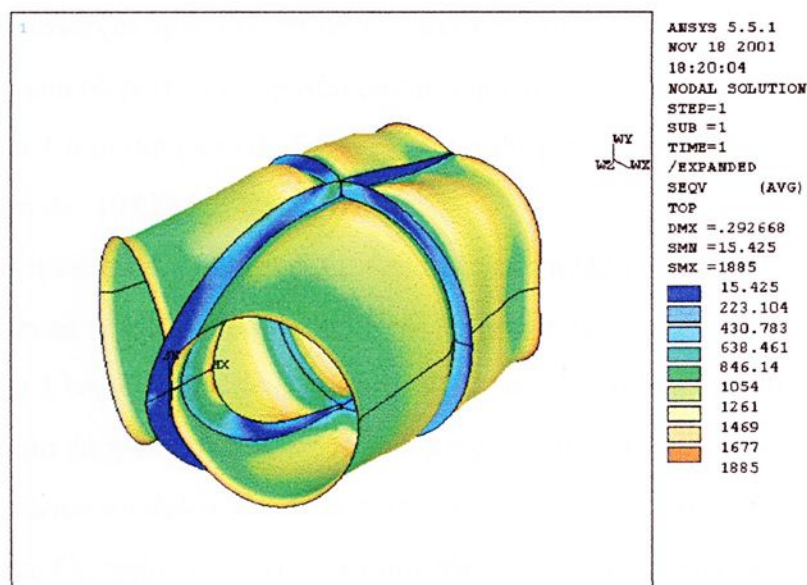


Figura 4.20 – Tensões de Von Mises (Projeto 2 com espessuras padronizadas).

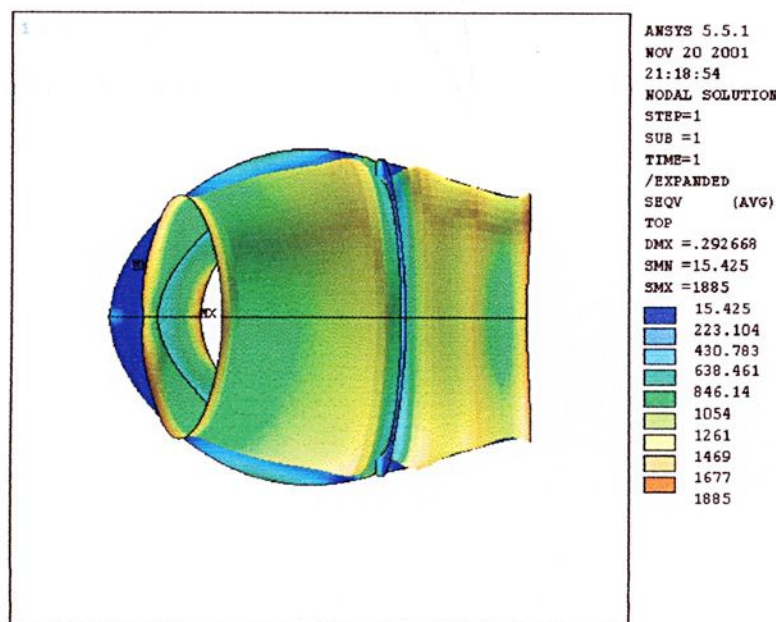


Figura 4.21 – Tensões de Von Mises (Projeto2 com espessuras padronizadas).

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram a distribuição das tensões de Von Mises na bifurcação e peso total da bifurcação ficou em 34178 kgf.

4.3.4 Conclusões

Comparando a distribuição de tensões no modelo do Projeto 1 e do Projeto 2, pode-se observar que no Projeto 2 existe uma melhor distribuição ou seja existem poucos pontos de tensão baixa o que resulta em menor peso.

O Projeto 1 tem um peso de 54000 kgf e o Projeto 2 34178 kgf o que significa um ganho de 19822 kgf ou 36,7 %.

O tempo levado para calcular a bifurcação otimizada (Projeto 2) foi cerca de 2 horas com os recursos computacionais disponíveis.

O projeto 1 levou cerca de 3 semanas para ser definido e envolveu 1 projetista para estudo da geometria e 1 engenheiro para construir o modelo. O resultado foi que vários modelos foram construídos sem obter “êxito” na otimização da geometria. Os resultados por si só mostram que a parametrização e otimização em elementos finitos é uma ferramenta poderosa que não só reduz o tempo de cálculo e projeto de um equipamento mas também encontra o seu peso ótimo ou melhor objetivo ótimo, evitando o desperdício. Outro ponto evidente é que

quanto mais complexa for a geometria mais expressivos são os resultados após a aplicação da parametrização e otimização em elementos finitos.

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Este trabalho tinha com objetivo criar uma ferramenta de engenharia capaz de reduzir tempo, custo de projeto e fabricação de equipamentos hidromecânicos.

De acordo com os resultados obtidos pode-se verificar que os objetivos foram atendidos.

No caso simples da viga engastada ficou clara a vantagem da parametrização e otimização em elementos finitos comparado ao método gráfico, mostrando-se um método rápido, versátil e eficiente, permitindo variar rapidamente de um problema de otimização de viga engastada de seção retangular para outro com extrema rapidez e eficiência nos resultados.

No caso da blindagem os resultados obtidos foram substanciais. O cálculo analítico desta estrutura é extremamente trabalhoso e não traduz a realidade, pois não consegue identificar pontos de concentração de tensões. A otimização da estrutura através do cálculo analítico é demorado e muitas vezes ineficaz, pois não se obtém o “peso ótimo” da estrutura.

Para demonstrar a rapidez e eficiência da parametrização e otimização em elementos finitos aplicada na blindagem foi escolhido, como caso, uma já fabricada. Os resultados do cálculo analítico da estrutura fabricada foram confrontados com a análise em elementos finitos, demonstrando que os resultados estão próximos em praticamente toda a estrutura sendo que em apenas alguns pontos de concentração de tensões a análise em elementos finitos obteve tensões superiores ao cálculo analítico. Esta capacidade de identificar pontos de concentração de tensões pela análise em elementos finitos, permite ao engenheiro reforçar ou alterar a geometria para eliminar estes pontos. O programa de otimização da blindagem foi executado tendo como ponto de partida a geometria da blindagem fabricada e em menos de uma hora (com os recursos computacionais disponíveis) obteve-se uma redução de 13.5% em peso. É importante ressaltar que quanto mais próxima estiver a geometria do projeto usado como ponto de partida da solução ótima, mais rapidamente se converge para o

projeto ótimo e menor é a chance de se deparar com um mínimo local da função objetivo. O cálculo analítico pode se tornar útil para encontrar um ponto de partida o mais próximo possível do ótimo reduzindo o tempo de otimização em elementos finitos.

O terceiro e último caso de geometria parametrizada e otimizada em elementos finitos foi o de uma bifurcação. Esta estrutura tem uma particularidade em relação aos casos anteriores, pois tem uma geometria complexa. Difícil de definir, demanda grande número de horas de engenharia, se fossem utilizados meios normais de cálculo em elementos finitos e projeto. Não existem cálculos analíticos confiáveis, eles são imprecisos e não levam em consideração pontos de alta concentração de tensões.

A análise em elementos finitos partindo da modelagem direta é extremamente trabalhosa e qualquer alteração no intuito de melhorar o modelo requer nova modelagem. Pequenas variações na geometria causam grandes variações nas tensões, o que torna este modelo não só complexo mas também muito sensível.

Novamente, para demonstrar a eficiência da parametrização e otimização em elementos finitos se usou como caso os dados de uma bifurcação já fabricada. Foi realizado um estudo prévio antes da elaboração dos programas de parametrização e otimização. Para evitar o aparecimento de concentração de tensões (que apareceriam inevitavelmente na análise em elementos finitos), foi idealizada uma geometria que tivesse o mínimo de cantos vivos. Houve ainda a preocupação de reduzir ao máximo a perda de carga na criação da geometria, pois quanto maior a perda de carga nos componentes antes da turbina hidráulica, menor é o rendimento desta.

Os resultados obtidos da otimização com os dados da bifurcação já fabricada e com a geometria alterada foram muito expressivos.



O peso da bifurcação fabricada é de 54000 kgf. Com a parametrização e otimização em elementos finitos aliada a modificação da geometria chegou-se a uma bifurcação de 34178 kgf, o que significa um ganho de 19822 kgf ou 36,7 % em peso.

O tempo levado para calcular a bifurcação otimizada foi cerca de 2 h com os recursos computacionais disponíveis (Computador com um processador AMD ATHLON de 700MHz com 512 MB de memória RAM). A bifurcação fabricada levou cerca de três semanas para ser definida e envolveu um projetista para estudo da geometria e um engenheiro para construir o modelo em elementos finitos. O resultado foi que vários modelos foram construídos sem obter “êxito” na otimização da geometria.

Os resultados por si só mostram que a parametrização e otimização em elementos finitos é uma ferramenta poderosa que:

- Reduz o tempo de cálculo e projeto de um equipamento
- Otimiza o equipamento.
- Quanto mais complexa for a geometria do equipamento mais expressivos são os ganhos na aplicação da parametrização e otimização em elementos finitos.
- Traz segurança na concepção do equipamento identificando pontos de concentração de tensões que passariam despercebidos por outro método de cálculo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8883:**

Cálculo de comportas hidráulicas. Rio de Janeiro, 1996.

DEUTSCHE NORMEN. **DIN 19704:** Hydraulic steel structures – criteria for design and calculation. Berlin, 1976.

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

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

ANSYS USER'S MANUAL: Ansys theory reference. **Introduction to design optimization**. Swanson Analysis Systems, Inc. cap.20, 1999, p.1-19.

ANSYS USER'S MANUAL. **Advanced Analysis Techniques** Swanson Analysis Systems, Inc. cap.1, 1993, p.1- 45.

COMITÉ EUROPÉEN DE LA CHAUDRONNERIE ET DE LA TOLERIE, **C.E.C.T:** Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded contructions for hydroelectric installations, Paris, 1975.

TAVARES, S.A. **Um método de direções viáveis para otimização com aplicação a pórticos e grelhas.**, 1974. 168f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ZHAO, Z. **Shape design sensitivity analysis and optimization using the boundary element method**. Berlin : Springer, 1991, 192 p.



BROUSSE, P. **Optimization in mechanics** : problems and methods
Amsterdam :Elsevier Science, 1988, 279 p.

STEUER, R. E. **Multiple criteria optimization** : theory, computation and application. New York : J. Wiley, 1986, 546 p.

MAHMOUD, K. G. An Efficient Approach to Structural Optimization,
Computers & Structures, Oxford, v.64 , n. 1-4, p 97-112,jul-aug 1997.

BORLASE, G. A.; VLAHOPOULOS , N. An energy finite element
optimization process for reducing high-frequency vibration in large-scale
structures: **Finite Element in Analysis and Design**, Amsterdam, v. 36, n.1,
p. 51- 67,Aug. 2000.

ANNICCHIARICO, W.; CERROLAZA, M. Finite elements, genetic
algorithms and β -splines: a combined technique for shape optimization.
Finite Elements in Analysis and Design, Amsterdam, v. 33, p. 125 - 141,
1999.

ZHAO, C.; STEVEN, G. P.; XIE, Y. M.. A generalized evolutionary method
for natural frequency optimization of membrane vibration problems in finite
element analysis. **Computers & Structures**, Oxford, v. 66 n. 2-3, p. 353-364,
1998.

HERNÁNDEZ S.. Optimization Design of steel structures. **J. Construct
Steel Res.**, La Coruña v. 46 n. 1-3, p. 374-378, 1998.

ANEXO A - PROGRAMAS DE PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA BLINDAGEM

```
!=====
!*** PROGRAMA PARA CONSTRUÇÃO DO MODELO PARAM. BLINDAGEM**
!*** ARQUIVO - BLINDAGEM.TXT*****
!*** CRIADO POR: PEDRO MIGUEL BENTO GALVEIAS DE S. LOPES *
!*** 27 SETEMBRO 2001 *****
!*****
!=====
```

```
!=====
!***ENTRADA DADOS DA GEOMETRIA DA BLINDAGEM*****
!=====
```

```
*SET,LBLIN,330
*SET,HBLIN,500
*SET,CBLIN,45
*SET,HALMA,71
*SET,HREF,.6*HALMA
*SET,LABA,12
*SET,TC,2.5
*SET,TALMA,2.5
*SET,TABA,3.75
*SET,TE,LBLIN/50
*SET,PR,12.88
*SET,LTOT,1200
*SET,NB,LTOT/(CBLIN)
```

```
!=====
!***CRIAÇÃO DA GEOMETRIA*****
!=====
```

/PREP7

```
!***CRIAÇÃO DOS PONTOS*****
/VIEW, 1,1,1,1
/ANG, 1
K,1,LBLIN/2,0,CBLIN/2,
K,2,LBLIN/2,HBLIN/2,CBLIN/2,
K,3,LBLIN/2+HREF,HBLIN/2,CBLIN/2,
K,4,LBLIN/2,HBLIN/2+HREF,CBLIN/2,
K,5,0,HBLIN/2,CBLIN/2,
K,6,LBLIN/2,0,0,
K,7,LBLIN/2,HBLIN/2,0,
K,8,0,HBLIN/2,0,
K,9,LBLIN/2+HREF,0,0,
K,10,LBLIN/2+HREF,HBLIN/2,0,
K,11,LBLIN/2+HREF,HBLIN/2+HREF,0,
K,12,LBLIN/2,HBLIN/2+HREF,0,
```

```

K,13,0,HBLIN/2+HREF,0,
K,14,LBLIN/2+HALMA,0,LABA/2,
K,15,LBLIN/2+HALMA,0,0,
K,16,LBLIN/2+HALMA,HBLIN/2,LABA/2,
K,17,LBLIN/2+HALMA,HBLIN/2,0,
K,18,LBLIN/2+HALMA,HBLIN/2+HREF,LABA/2,
K,19,LBLIN/2+HALMA,HBLIN/2+HREF,0,
K,20,LBLIN/2+HALMA,HBLIN/2+HALMA,LABA/2,
K,21,LBLIN/2+HALMA,HBLIN/2+HALMA,0,
K,22,LBLIN/2+HREF,HBLIN/2+HALMA,LABA/2,
K,23,LBLIN/2+HREF,HBLIN/2+HALMA,0,
K,24,LBLIN/2,HBLIN/2+HALMA,LABA/2,
K,25,LBLIN/2,HBLIN/2+HALMA,0,
K,26,0,HBLIN/2+HALMA,LABA/2,
K,27,0,HBLIN/2+HALMA,0,

```

!***CRIAÇÃO DAS ÁREAS*****

```

A,1 ,2 ,7 , 6
A,3 ,2 ,7 ,10
A,7 ,2 ,4 ,12
A,2 ,5 ,8 , 7
A,9 ,6 ,7 ,10
A,10 ,7 ,12 ,11
A,7 ,8 ,13 ,12
A,15 ,9 ,10 ,17
A,17 ,10 ,11 ,19
A,19 ,11 ,23 ,21
A,11 ,12 ,25 ,23
A,12 ,13 ,27 ,25
A,14 ,16 ,17 ,15
A,16 ,18 ,19 ,17
A,18 ,20 ,21 ,19
A,20 ,22 ,23 ,21
A,22 ,24 ,25 ,23
A,24 ,26 ,27 ,25
APLOT

```

```

!=====
!***GERAÇÃO DA DA MALHA*****
!=====

```

```

ET,1,SHELL63
R,1,TC, , , , ,
R,2,TALMA/2, , , , ,
R,3,TABA, , , , ,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1E6
MPDATA,PRXY,1,,.3

```



ASEL,U, , ,ALL
ASEL,A, , , 1
ASEL,A, , , 2
ASEL,A, , , 3
ASEL,A, , , 4

TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL

ALLSEL

ASEL,U, , ,ALL
ASEL,A, , , 5
ASEL,A, , , 6
ASEL,A, , , 7
ASEL,A, , , 8
ASEL,A, , , 9
ASEL,A, , , 10
ASEL,A, , , 11
ASEL,A, , , 12

TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL

ALLSEL

ASEL,U, , ,ALL

ASEL,A, , , 13
ASEL,A, , , 14
ASEL,A, , , 15
ASEL,A, , , 16
ASEL,A, , , 17
ASEL,A, , , 18

TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL

ALLSEL

FINISH



```
!=====
!***APLICAÇÃO DE PRESSÃO E CONDIÇÕES DE CONTORNO*****
!=====
```

```
/SOLU
```

```
LSEL,S,LOC,Y,-.1,.1
DL,ALL,,SYMM
ALLSEL
LSEL,S,LOC,X,-.1,.1
DL,ALL,,SYMM
NSLL,S,1
```

```
ALLSEL
```

```
ASEL,S,LOC,Z,-.1,.1
DA,ALL,SYMM,,
```

```
ALLSEL
```

```
LSEL,S,LOC,Z,CBLIN/2-.1,CBLIN/2+.1
DL,ALL,,SYMM
NSLL,S,1
```

```
ALLSEL
```

```
ASEL,U,, ,ALL
ASEL,A,, ,1
ASEL,A,, ,4
SFA,ALL,,PRES,-PR
ALLSEL
```

```
!=====
!***SOLUÇÃO*****
!=====
```

```
EQSLV,PCG,1E-7
```

```
SOLVE
```

```
FINISH
```

```
/POST1
/EFACE,4
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/EXPAND,2,RECT,HALF,1E-5,,2,RECT,HALF,,1E-5,,10,RECT,HALF,,,CBLIN/2,
```

```
RSYS,0
CSYS,0
```

```
PLNSOL,S,EQV,0,1
```

```
!=====
!***ARMAZENAMENTO DOS RESULTADOS*****
!=====
```

```
!***TENSÃO DE COMPARAÇÃO MÁXIMA ( VON MISES )*****
```

```
NSORT,S,EQV
*GET,SMAX, SORT,,MAX
```

```
!***VOLUME E PESO TOTAL*****
```

```
ETABLE,EVOL,VOLU
SSUM
*GET,VTOT,SSUM,,ITEM,EVOL
PESO=2*4*VTOT*0.00785*NB
```

```
*MSG,UI,'PESO','TOTAL=',PESO,'KGF'
%C %C %I %C
```

```
!***FIM DO PROGRAMA*****
```

```
!=====
!*** PROGRAMA PARA OTIMIZAÇÃO DO MODELO BLINDAGEM*****
!*** ARQUIVO - BLINAGEM_OPT.TXT*****
!*** CRIADO POR: PEDRO MIGUEL B. GALVEIAS S. LOPES*****
!****27 SETEMBRO DE 2001*****
!*****
!=====
```

```
!***IDENTIFICAÇÃO DO PROGRAMA DE CONST. MOD. PARAMÉTRICO
```

```
/OPT
OPANL,BLINDAGEM,TXT,C:\BLINDAGEM
```

```
!***DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO*****
```

```
OPVAR,CBLIN,DV,45,50
OPVAR,HALMA,DV,40,90
OPVAR,LABA,DV,10,13
OPVAR,TC,DV,1.25,3.75
OPVAR,TALMA,DV,1.25,2.5
OPVAR,TABA,DV,2.5,5
```

```
!***DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL DE ESTADO*****
```

```
OPVAR,SMAX,SV,,2400,001
```

```
!***DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO*****
```

```
OPVAR,PESO,OBJ
```

```
!***DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO E EXECUÇÃO*****
```

```
OPTYPE,SUBP
OPSUBP,30,10
OPKEEP,ON
OPSAVE,BLINDAGEM,OPT0
OPEXE
```

```
!***VIZUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS
```

```
OPLIST ! LISTA DE TODOS OS PROJETOS
PLVAROPT,PESO ! GRÁFICO PESO TOTAL X SET
```

```
FINISH
```

```
!***FIM DO PROGRAMA*****
```



ANEXO B - PROGRAMAS DE PARAMETRIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA BIFURCAÇÃO

```

=====
!
=====
!*** PROGRAMA DE CONSTRUÇÃO/SOLUÇÃO DO MODELO PARAMETRIZADO BIFURCAÇÃO*
!*** ARQUIVO - BIFSOT.TXT*****
!*** CRIADO POR - PEDRO MIGUEL B. GALVEIAS S. LOPES*****
!
=====
!*** 25 SET 2001*****
!
=====

!
=====
!*** ENTRADA DADOS DA GEOMETRIA DA BIFURCAÇÃO*****
!
=====

*SET,DE1,400      !DIÂMETRO DO CONE DE ENTRADA DA BIFURCAÇÃO
*SET,LE,280-DE1/4 !COMPRIMENTO DO CONE DE ENTRADA DA BIFURCAÇÃO
*SET,DS,330      !DIÂMETRO DO CONE DE SAÍDA DA BIFURCAÇÃO
*SET,ANG,25      !ÂNGULO ENTRE O CENTRO E EIXO DO CONE DE SAÍDA
*SET,TC,4.3      !ESPESSURA DA CASCA DA BIFURCAÇÃO
*SET,TCOE,1.9    !ESPESSURA DO CONDUTO DE ENTRADA
*SET,TCOS,1.6    !ESPESSURA DO CONDUTO DE SAIDA

*AFUN,DEG
*SET,DE,TAN(ANG/4)*(DE1/2)+DE1
*SET,DC,2*LE*TAN(ANG/2)+DE
*SET,LS,(DS-DC)/(-2*TAN(ANG/2))

*SET,ALFAI,ATAN(((DC-DE)/2)/LE)
*SET,ALFAS,ATAN(((DC-DS)/2)/LS)
*SET,ALFAINT,(360-2*ANG)/2
*SET,ANGINT,360-ALFAI-ALFAS-ALFAINT
*SET,ALFACON,ATAN(2*LS/(DC-DS))
*SET,ALFA1,90-(ALFACON-ANG)
*SET,X1,(DC*SIN(ALFACON))/(2*SIN(ALFA1))
*SET,X,X1*COS(ANG)
*SET,Y,X1*SIN(ANG)
*SET,XVER,(DC/2)*COS(90-ANG)

!*** VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA*****

*IF,DS/2,GT,Y,THEN
  *MSG,ERROR,''
  (AUMENTE DIAMETRO DE SAIDA (DS)!!!)

  *GO,:BRANCH1

*ENDIF

*IF,XVER,GE,LE,THEN

  *MSG,ERROR,''
  (AUMENTAR COMPRIMENTO DE ENTRADA (LE)!!!)

  *GO,:BRANCH1
*ENDIF

*SET,TR,9.85      !ESPESSURA DO REFORÇO CENTRAL
*SET,TR1,4.3      !ESPESSURA DO REFORÇO LATERAL
*SET,HRE,180      !ALTURA DO REFORÇO EXTERNO CENTRAL

```



```

*SET,HRI,111.5      !ALTURA DO REFORÇO INERNO CENTRAL
*SET,HRES,50        !ALTURA DO REFORÇO EXTERNO SUPERIOR
*SET,HRESI,5        !ALTURA DO REFORÇO INTERNO SUPERIOR
*SET,HRES1,5        !ALTURA DO REFORÇO EXTERNO DE ENTRADA DA BIFURC.
*SET,PR,20.03       !PRESSÃO INTERNA NA BIFURCAÇÃO
*SET,TE,20          !DIMENSÃO DOS ELEMENTOS

```

```

!=====
!***CRIAÇÃO DA GEOMETRIA*****
!=====

```

```

!***ENTRADA NO PRÉ-PROCESSADOR*****

```

```

/PREP7

```

```

!***ÂNGULO DE VIZUALIZAÇÃO NA TELA*****

```

```

/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1

```

```

!***CRIAÇÃO DO CONE DE ENTRADA*****

```

```

K, , , ,
CYL4,0,0,DC/2
ADELL,1

```

```

WPSTYLE, , , , , ,1
WPOFF,0,0,-LE
CYL4,0,0,DE/2
ADELL,ALL
A,7,3,2,6

```

```

!***CRIAÇÃO DO CONE DE SAÍDA*****

```

```

CSYS,0
WPAVE,0,0,0
CSYS,0
WPROT,0,0,ANG
CYL4, , ,DC/2
ADELL,2
WPOFF,0,0,LS
CYL4, , ,DS/2
ADELL,2
NUMMRG,KP
A,14,10,3,15
WPCSYS,-1,0
WPSTYLE, , , , , ,0
WPROT,0,0,ANG/2
ASBW,ALL
ADELE,3, , ,1
ADELE,4, , ,1
AGLUE,ALL
CSYS,4
WPCSYS,-1,0
WPSTYLE, , , , , ,0
WPROT,0,0,-90+ANG
ARSYM,Z,1, , , ,0,0
NUMMERGE,KP
WPCSYS,-1,0
WPROT,0,0,90
ASBW,ALL
ADELL,3, , ,1
GPLOT

```



!***CRIAÇÃO DO REFORÇO CENTRAL*****

```
CSYS,0
K, , , ,X1+HRE,
LSTR,13,18
K, , , ,X1-HRI,
LSTR,13,19
WPSTYLE, , , , , , ,0
K, , ,DC/2+HRES, ,
LSTR,3,20
K, , ,DC/2-HRESI, ,
LSTR,3,21
!ALLSEL
!CSYS,0
BSPLIN,19,21, , , , ,0,-1,0,0,COS(60),-COS(30),
!ALLSEL
!GPLOT
CSKP,11,1,1,18,20,((DC/2)+HRES)/(X1+HRE),1,
L,18,20
AL,19,27,21,16
AL,20,16,24,26
```

!***CRIAÇÃO DO REFORÇO LATERAL*****

```
CSKP,12,0,1,11,21,1,1,
WPCSYS,-1,12,
KWPAVE, 11
CSYS,4
K, ,HRES, , ,
LSTR, 11, 22
CSYS,12,
LARC,22,20,1,HRES+DC/2,
AL,28,29,21,22
```

!***CRIAÇÃO DO CONE DE ENTRADA*****

```
WPCSYS,-1,0
WPOFF,0,0,-LE-DE1/4
CYL4,0,0,DE1/2
ADELE, 7
A,6,23,24,7
WPCSYS,-1,0
```

!***CRIAÇÃO DO REFORÇO DO CONE DE ENTRADA*****

```
KWPAVE,24
CSYS,4
K, , ,HRES1, ,
LSTR,24,27
LSTR,20,27
KWPAVE,7
LSBW,37, ,
LSTR,7,28
AL,38,21,9,37
AL,39,37,35,36
```

!***CRIAÇÃO DO CONDUTO DE SAÍDA PARA COND. DE CONTORNO*****

```
WPCSYS,-1,0
WPOFF,0,0
WPROT,0,0,ANG
WPOFF,0,0,LS+DS
CYL4, , ,DS/2
ADELE, 10
```



A,29,14,15,30
A,30,15,16,31

!***CRIAÇÃO DOS CONDUTO DE ENTRADA PARA COND. DE CONTORNO*****

WPCSYS,-1,0
WPOFF,0,0,-DE1/4-DE1-LE
CYL4,0,0,DE1/2
ADELE, 12
A,23,33,34,24
NUMMRG,KP,.1, ,
APLOT

!=====

!***GERAÇÃO DA MALHA*****

!=====

!***DEFINIÇÃO DAS CONSTANTES REAIS *****

ET,1,SHELL63
R,1,TC, , , , , ,
R,2,TR/2, , , , , ,
R,3,TR1, , , , , ,
R,4,TR1/2, , , , , ,
R,5,TCOE, , , , , ,
R,6,TCOS, , , , , ,

!***DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS*****

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

!***GERAÇÃO DA MALHA DA CASCA DA BIFURCAÇÃO*****

ASEL,U, , ,ALL
ASEL,A, , ,1
ASEL,A, , ,4
ASEL,A, , ,5
ASEL,A, , ,7
TYPE,1
MAT,1
REAL,1
ESYS,0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!***GERAÇÃO DA MALHA DO REFORÇO CENTRAL*****

ASEL,U, , ,ALL
ASEL,A, , , 2
ASEL,A, , , 3
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
ESIZE,TE,0,



AMESH,ALL

ALLSEL

!***GERAÇÃO DA MALHA DO REFORÇO LATERAL*****

ASEL,U, , ,ALL

ASEL,A, , ,6

TYPE,1

MAT,1

REAL,3

ESYS,0

SECNUM,

ESIZE,TE,0,

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,1

AMESH,ALL

ALLSEL

!***GERAÇÃO DA MALHA DO REFORÇO DO CONE DE ENTRADA*****

ASEL,U, , ,ALL

ASEL,A, , ,8

ASEL,A, , ,9

TYPE,1

MAT,1

REAL,4

ESYS,0

SECNUM,

ESIZE,TE,0,

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,1

AMESH,ALL

ALLSEL

!***GERAÇÃO DA MALHA DO CONDUTO DE ENTRADA*****

ASEL,U, , ,ALL

ASEL,A, , , 12

TYPE, 1

MAT, 1

REAL, 5

ESYS, 0

SECNUM,

ESIZE,TE,0,

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,1

AMESH,ALL

ALLSEL

!***GERAÇÃO DA MALHA DO CONDUTO DE SAÍDA*****

ASEL,U, , ,ALL

ASEL,A, , ,10

ASEL,A, , ,11

TYPE,1

MAT,1

REAL,6

ESYS,0

SECNUM,

ESIZE,TE,0,

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,1

AMESH,ALL

ALLSEL

!***ELIMINAÇÃO DE ENTIDADES DESNECESSÁRIAS*****



```

LSLA
KSLI
LSINV
KPINV
LDEL,ALL
KDEL,ALL
ALLSEL
FINISH

```

```

!=====
!***APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO*****
!=====

```

```

!***ENTRADA NO SOLVER*****

```

```

/SOLU

```

```

!***APLICAÇÃO DE ENGASTAMENTO NA ENTRADA E SAÍDA*****

```

```

LSEL,U, , ,ALL
LSEL,A, , ,40
LSEL,A, , ,41
LSEL,A, , ,47
DL,ALL,,ALL

```

```

!***APLICAÇÃO DE SIMETRIA*****

```

```

ALLSEL
CSYS,0
LSEL,S,LOC,Y,-.1,.1
DL,ALL,,SYMM
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-.1,.1
DL,ALL,,SYMM
NSLL,S,1
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,X,-.1,.1
DA,ALL,SYMM,,
ALLSEL,ALL

```

```

!***APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO (PRESSÃO NA INTERNA NA CASCA)*****

```

```

ASEL,U, , ,ALL
ASEL,A, , ,1
ASEL,A, , ,4
ASEL,A, , ,5
ASEL,A, , ,7
ASEL,A, , ,10
ASEL,A, , ,11
ASEL,A, , ,12
SFA,ALL,,PRES,PR
ALLSEL,ALL

```

```

!***SELEÇÃO DO MÉTODO DE SOLUÇÃO E EXECUÇÃO DA SOLUÇÃO*****

```

```

EQSLV,PCG,1E-7
ALLSEL
SOLVE

```

```

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

```

```

ASEL,U, , ,ALL

```



```

ASEL,A, , , 10
ASEL,A, , , 11
ASEL,A, , , 12
ESLA,U
FINISH

```

```

/POST1
/EFACE,4
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/EXPAND,4,POLAR,HALF,,90
RSYS,0
CSYS,0
PLNSOL,S,EQV,0,1
NSORT,S,EQV
*GET,SMAX, SORT,,MAX
ETABLE,EVOL,VOLU
SSUM
*GET,VTOT,SSUM,,ITEM,EVOL
PESO=4*VTOT*0.00785

```

```

*MSG,UI,'PESO','TOTAL=',PESO,'KGF'
%C %C %I %C

```

```

:BRANCH1

```

```

!=====
!***FIM DO PROGRAMA*****
!=====

```

A seguir pode-se ver o programa de otimização:

```

!=====
!*** PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DO MODELO PARAMETRIZADO BIFURCAÇÃO*****
!*** ARQUIVO - BIFOT_OPT.TXT*****
!*** CRIADO POR - PEDRO MIGUEL B. GALVEIAS S. LOPES*****
!=====
!*** 25 SET 2001*****
!=====

```

```

!***IDENTIFICAÇÃO DO ARQUIVO DE ANÁLISE*****
/OPT
OPANL,BIFOT,TXT,C:\BIFURCA1

```

```

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

```

```

OPVAR,TR,DV,2.5,10
OPVAR,TC,DV,2.5,5
OPVAR,TR1,DV,2.5,7.5
OPVAR,HRE,DV,50,200
OPVAR,HRI,DV,50,100
OPVAR,HRES,DV,15,50

```

```

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

```

```

OPVAR,SMAX,SV,,2000,001

```

```

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

```

```

OPVAR,PESO,OBJ

```

```

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

```

```

OPTYPE,SUBP
OPSUBP,70,20

```

OPKEEP, ON
OPSAVE, BIOTM, OPT0

!***EXECUÇÃO DA OTIMIOZAÇÃO*****

OPEXE

!***VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS*****

OPLIST
PLVAROPT, SMAX
PLVAROPT, PESO
FINISH

!=====
!***FIM DO PROGRAMA*****
!=====



