

Germano Gavarrão de Freitas

Modelagem Paramétrica de Comportas Hidráulicas:  
Análise de Tensões e Estabilidade Estrutural

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

São Paulo

2001

Germano Gavarrão de Freitas

Modelagem Paramétrica de Comportas Hidráulicas  
Análise de Tensões e Estabilidade Estrutural

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

Área de Concentração:  
Engenharia Naval

Orientador:

Carlos Alberto Nunes Dias

São Paulo

2001

*A minha família*

**Dedicatória**

## **Agradecimentos**

Ao meu amigo Claudiomar, pelo incentivo e apoio.

Ao meu orientador Nunes, pela paciência e colaboração.

Aos meus amigos Ricardo e Gustavo, pelo apoio.

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

## Resumo

Este trabalho visa desenvolver uma ferramenta para geração automática de modelos de elementos finitos de comportas hidráulicas. Estes modelos serão utilizados para análise de tensões e verificação quanto à estabilidade estrutural (flambagem).

O método dos elementos finitos é uma ferramenta de cálculo moderna que permite avaliar soluções para as quais não há ferramentas analíticas disponíveis. Porém, o tempo para geração de modelos de cálculo pode ser alto em relação ao cronograma do projeto, principalmente se houver a necessidade de se alterar a geometria inicial. A utilização de um pré-processador permite que várias alternativas sejam analisadas para escolha da que melhor atenda os requisitos de projeto e custo.

Normalmente a otimização de estruturas metálicas envolve a redução da espessura de perfis. Esta alteração de espessura geralmente reduz os coeficientes de segurança quanto à estabilidade estrutural. Para avaliar estes coeficientes desenvolveu-se uma rotina que gera modelos de elementos finitos com a geometria da região da comporta a ser verificada. Como condições de contorno e carregamento utilizou-se o sugerido pela norma de projeto destes equipamentos.

## Abstract

This work has the objective of developing a pre-processor for the automatic generation of finite element models for the structure of hydraulic gates. These models will be used in stress and structural stability analysis (buckling).

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

Usually the optimization of metallic structures involves the reduction of thickness. This reduction often reduces the structural stability safety factors. In order to evaluate the structure's resistance to buckling, a tool was developed to build a finite element model with the geometry of the gate's critical region. Loads and the boundary conditions were assumed as stated in the technical specifications.

# Índice

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....  | 14 |
| 1.1   | OBJETIVOS DO TRABALHO .....   | 14 |
| 1.2   | JUSTIFICATIVA .....   | 15 |
| 1.3   | OBJETO DE ESTUDO .....  | 17 |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 20 |
| 2.1   | ERBISTE, "COMPORTAS HIDRÁULICAS" .....  | 20 |
| 2.2   | ANSYS, "PROGRAMMERS MANUAL" .....   | 21 |
| 2.2.1 | Manual de APDL .....  | 21 |
| 2.2.2 | Manual de UIDL .....  | 21 |
| 2.3   | CUNHA, "MODELAGEM PARAMÉTRICA DE ABERTURA EM CASCO RESISTENTE DE SUBMARINO" ..... | 22 |
| 2.4   | ZEID, "CAD/CAM THEORY AND PRACTICE" .....   | 22 |
| 2.5   | TIMOSHENKO, "THEORY OF ELASTIC STABILITY" .....                                   | 23 |
| 3     | MODELO DE SÍNTESE .....   | 24 |
|       | REFORÇO HORIZONTAL .....  | 31 |
| 4     | FERRAMENTAS AVALIADAS .....   | 35 |
| 5     | PRÉ-PROCESSADOR GÉNÉRICO .....  | 37 |
| 5.1   | DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA .....   | 37 |
| 5.2   | RESULTADOS OBTIDOS .....  | 38 |
| 6     | PRÉ-PROCESSADOR DEDICADO .....  | 40 |
| 6.1   | PROGRAMA BÁSICO .....   | 44 |
| 6.1.1 | Entrada de Dados .....  | 44 |

|    |  |   |   |
|----|--|---|---|
| 95 | <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                  |   | 9 |
| 92 | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> ..... |   | 8 |
| 88 | 7.3.3  | <i>Flambagem de uma região com alterações geométricas</i> ..... |   |
| 85 | 7.3.2  | <i>Flambagem na comporta inteira</i> .....                      |   |
| 73 | 7.3.1  | <i>Utilização em Casos Simples de Solução Conhecida</i> .....   |   |
| 72 | 7.3  | METODOLOGIA APLICADA.....                                       |   |
| 65 | 7.2  | ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTABILIDADE.....                           |   |
| 64 | 7.1  | TIPOS DE FLAMBAGEM.....   |   |
| 64 | <b>ESTABILIDADE ESTRUTURAL</b> .....                       |   | 7 |
| 59 | 6.5  | TESTES.....   |   |
| 58 | 6.4  | IMPLEMENTAÇÕES ADICIONAIS.....                                  |   |
| 56 | 6.3  | INTERFACE ENTRE MÓDULOS.....                                    |   |
| 55 | 6.2  | INTERFACE GRÁFICA.....  |   |
| 55 | 6.1.6  | <i>Pós-Processamento</i> .....                                  |   |
| 54 | 6.1.5  | <i>Solução</i> .....  |   |
| 53 | 6.1.4  | <i>Carregamento e Condições de Contorno</i> .....               |   |
| 47 | 6.1.3  | <i>Geração da Geometria</i> .....                               |   |
| 46 | 6.1.2  | <i>Tratamento e Verificação de Dados</i> .....                  |   |



# Notações, Nomenclaturas e Simbologias

- A – área da seção de uma viga
- a – menor lado de uma placa
- b – maior lado de uma placa
- B – largura da comporta
- D – rigidez à flexão de uma placa
- d – distância entre o centro de uma área ao centro de gravidade da seção de uma viga
- E – módulo de elasticidade do material
- $E_p$  – energia potencial
- $F_h$  – força resultante devido à carga hidrostática
- g – aceleração da gravidade
- h – altura da comporta
- $h_c$  – profundidade das regiões igualmente carregadas
- $h_o$  – função de forma para os deslocamentos de translação
- $h_\theta$  – função de forma para os deslocamentos de rotação
- H – altura da coluna d'água (carga hidrostática); função de forma
- $H_m$  – altura da coluna d'água (carga hidrostática)
- I – momento de inércia de uma viga
- k – coeficiente para cálculo de flambagem
- K – matriz de rigidez
- $K_G$  – matriz de rigidez geométrica
- $K_\sigma$  – coeficiente de flambagem
- L – largura da comporta
- M – momento atuante em uma seção de viga

mca – metros de coluna de água  
 n – número de vigas horizontais  
 N – força normal; carga aplicada; número de vigas  
 $N_0$  – força normal de carga passiva  
 $N_{critica}$  – carga crítica de estabilidade  
 $N_x$  – carga distribuída na direção x  
 P – carregamento externo  
 $P^{cr}$  – carregamento crítico  
 PCG – Pre-Conjugate Gradient Solver  
 t – espessura da placa  
 T – trabalho realizado pela força normal N  
 U – energia interna  
 q – deslocamentos nodais;  
 Q – vetor de deslocamentos nodais  
 y – deslocamento transversal  
 $y_k$  – posição das vigas horizontais  
 z – distância do ponto de análise ao CG de uma viga  
 $W_0$  – estimativa de peso  
 $W_{pl}$  – peso de uma placa  
 $W_N$  – trabalho realizado pela força N  
 $\alpha$  – razão entre os lados de uma chapa retangular  
 $\Delta$  – vetor de deslocamentos no interior do elemento  
 $\xi$  – coordenada local normalizada (entre 0 e 1)  
 $\lambda$  – fator para determinar carga de flambagem  
 p – massa específica do material

$\rho_{\text{água}}$  - massa específica da água

$\psi$  - razão entre tensões normais máxima e mínima em uma placa

$\sigma_1$  - tensão normal de compressão

$\sigma_{\text{adm}}$  - tensão admissível

$\sigma_e$  - tensão de Euler

$\sigma_{\text{cr}}$  - tensão de comparação

$\sigma_{\text{cr}}$  - tensão crítica de flambagem

$\sigma_{\text{vms}}, \sigma_{\text{eq}}$  - tensão equivalente (virtual) de Von Mises

$\tau_{\text{cr}}$  - tensão de cisalhamento de comparação

$\nu$  - coeficiente de Poisson ou coeficiente de segurança

$\theta$  - deslocamento nodal angular

$\omega$  - deslocamento nodal

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1- Componentes Estruturais de uma Comporta Plana.....                     | 26 |
| Figura 3.2 - Distribuição de Vigas Horizontais.....                                | 27 |
| Figura 3.3 – Tipos de Reforços.....  | 32 |
| Figura 5.1 - Fluxograma.....   | 38 |
| Figura 5.2- Análise de Convergência.....   | 39 |
| Figura 5.3- Exemplo de Resultado Obtido.....                                       | 39 |
| Figura 6.1 - Divisão de Áreas: Pontos Principais e Auxiliares.....                 | 43 |
| Figura 6.2 – Divisão do Programa.....  | 43 |
| Figura 6.3 - Divisão da Estrutura em Módulos.....                                  | 45 |
| Figura 6.4 - Exemplos de Parâmetros.....   | 45 |
| Figura 6.5 - Geração de "n" Pontos Básicos.....                                    | 48 |
| Figura 6.6 – Geração do Conjunto Básico de "m,n" Pontos.....                       | 50 |
| Figura 6.7 – Geração do Grupo Básico de "m,n,p" Pontos.....                        | 50 |
| Figura 6.8 – Exemplo de Geração de Áreas.....                                      | 51 |
| Figura 6.9 – Áreas dos Componentes de um Módulo.....                               | 51 |
| Figura 6.10 - Exemplo de Menus e Caixa de Diálogo.....                             | 56 |
| Figura 6.11 – Exemplo de Tela do Sistema de Ajuda On-Line.....                     | 57 |
| Figura 6.12 - Exemplos de Geometrias Geradas com o Pré-Processador.....            | 60 |
| Figura 6.13 - Estrutura e Modelo de Elementos Finitos Utilizados como Exemplo..... | 61 |
| Figura 6.14 - Distribuição de Tensões (Von Mises).....                             | 63 |
| Figura 7.1 - Tipos de Flambagem.....   | 64 |
| Figura 7.2 - Elemento de Viga.....   | 66 |
| Figura 7.3 - Elemento de Viga em sua Posição Deformada.....                        | 67 |
| Figura 7.4 - Exemplo de Cálculo com Cargas Passivas.....                           | 71 |

|    |  |
|----|--|
| 73 | Figura 7.5 - Viga Bi-Apoiada Submetida à Compressão                          |
| 76 | Figura 7.6 - Teste de Convergência para Coluna – Solução de um Auto-Problema |
| 76 | Figura 7.7 - Placa Submetida à Compressão                                    |
| 77 | Figura 7.8 - Ilustração dos Modos de Flambagem de Placas, Manson [8]         |
| 79 | Figura 7.9 – Gráfico para Avaliação de $k_{\phi}$ , Pfeil [7]                |
| 81 | Figura 7.10 - Comportamento das Placas – Timoshenko [10]                     |
| 81 | Figura 7.11 - Placa Submetida a Compressão                                   |
| 82 | Figura 7.12- Teste de Convergência para Placa – Solução de um Auto-Problema  |
| 83 | Figura 7.13 - Modos de Flambagem - Resultados da Análise Numérica            |
| 84 | Figura 7.14 – Análise de Estabilidade - Carregamento Composto                |
| 85 | Figura 7.15 - Resultado Numérico de um Caso de Carregamento Composto         |
| 86 | Figura 7.16 - Região Crítica   |
| 87 | Figura 7.17 - Carregamento da Região Crítica                                 |
| 87 | Figura 7.18 - Resultados Obtidos   |
| 90 | Figura 7.19 - Placa Reforçada e com Furos para Dreno                         |
| 91 | Figura 7.20 – Resultados Obtidos pela Variação de Geometria                  |

## 1 Introdução

A principal função das comportas hidráulicas é a contenção de meios aquosos, sendo utilizadas na proteção contra enchentes, proteção de equipamentos, obras de manutenção e limpeza, controle de vazão, irrigação e eclusas.

As primeiras comportas hidráulicas, datadas de 983, foram utilizadas pelos chineses em eclusas primitivas de madeira. As primeiras comportas metálicas surgiram por volta de 1850, decorrendo da demanda em construir comportas cada vez maiores, atingindo, na atualidade, mais de trinta metros de altura e vão livre. Tais dimensões aliadas ao fato das comportas atuais serem utilizadas em grande parte por consórcios de empresas particulares, leva a necessidade de se desenvolver projetos estruturais cada vez mais seguros e com um nível de custo que os tornem competitivos. A utilização de ferramentas modernas de cálculo como o Método de Elementos Finitos (MEF) possibilita este aumento na competitividade. Um exemplo de estruturas hidromecânicas de grandes dimensões são as comportas do canal do Panamá e as comportas das eclusas em construção atualmente no Brasil.

### 1.1 Objetivos do Trabalho

O projeto global de uma comporta hidráulica compreende basicamente três partes: tabuleiro (estrutura), peças fixas e mecanismo de manobra. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um programa pré-processador para geração automática de modelos para análise estrutural do tabuleiro. A otimização do tabuleiro possibilita, além da redução do custo do mesmo, sistemas de manobra menores, menor estrutura para sustentação do peso além de menores custos de transporte, manuseio, montagem e instalação. A utilização do método de elementos finitos permite ainda a análise de concepções para as quais seria difícil elaborar uma solução analítica.

O programa de discretização automática foi implementado em APDL (Ansys Parametric Design Language) e UIDL (Ansys Interface Design Language), duas linguagens paramétricas desenvolvida pela ANSYS Inc., as quais possibilitam o desenvolvimento de pré-processadores e interfaces gráficas para o seu software comercial ANSYS.

Estas linguagens podem ser divididas em duas partes:

- Linguagem de programação, que permite o desenvolvimento de programas estruturados como qualquer outra linguagem de programação, com acesso a arquivos, desenvolvimento de rotinas, "loops", condicionais e declaração de variáveis;

- Comandos ANSYS, que permitem acessar diretamente os comandos de pré-processamento, execução e pós-processamento do programa ANSYS.

## 1.2 Justificativa

Quando se faz uma análise estrutural usando programas de elementos finitos, a principal pergunta a ser respondida é: "Quais os esforços na estrutura?". No entanto, o que realmente se quer saber é: "Qual a melhor estrutura que resiste ao carregamento especificado dentro de critérios pré-definidos?". Para responder à segunda pergunta várias estruturas são idealizadas e verificadas; dentre as que resistem é escolhida a melhor segundo outros critérios, tais como preço, peso e facilidade de construção. Para utilizar este método é necessária a análise de várias geometrias. Por este motivo propõe-se um programa que gere estes modelos baseando-se apenas em alguns parâmetros que serão fornecidos pelo usuário, reduzindo-se, deste modo, o custo e o risco de erros de cada análise. Em linhas gerais o trabalho pode ser resumido por:

- Estudo da linguagem de programação APDL;

- Implementação destas técnicas em modelos simplificados;

- Implementação de um pré-processador para comportas hidráulicas;

A ideia da utilização de pré-processadores para auxiliar na análise e otimização de estruturas calculadas pelo MEF já está razoavelmente difundida. Porém, apesar de reduzir o tempo da geração de sucessivas malhas, automatizar o estudo de convergência e facilitar o estudo alterações geométricas, muitas vezes os pré-processadores dedicados não são utilizados devido ao seu tempo de desenvolvimento. Por este motivo, para alguns projetos de curto e médio prazo, o desenvolvimento de um pré-processador torna-se inviável. Com este estudo pretende-se estudar, explorar e difundir a utilização de recursos do próprio programa de elementos finitos, utilizando como exemplo o software comercial ANSYS, o qual desde o seu lançamento no mercado disponibilizou ferramentas de desenvolvimento, e continua aperfeiçoando-as, inclusive com a implementação de ferramentas de interface gráfica.

Além do lado funcional, pretende-se implementar uma interface gráfica, que ajudaria na utilização do produto pelo usuário e também auxiliaria na sua comercialização. A utilização das duas linguagens de programação desenvolvidas pela ANSYS (APDL e UIDL) permite uma boa relação entre tempo, qualidade e custo de desenvolvimento de pré e pós-processadores customizados. O fato das rotinas internas do programa e sua interface gráfica terem sido desenvolvidas utilizando estas mesmas linguagens permite que toda e qualquer customização do programa tenha forma e funcionamento semelhante ao próprio programa. Este fato reduz custo de treinamento de novos usuários e permitindo que os usuários do programa utilizem a customização de forma semelhante ao resto do produto.

No problema físico escolhido a utilização de pré-processadores customizados trará vantagens em duas situações:



- apresentação de propostas comerciais: com rapidez pode-se realizar uma pré-análise de uma dada comporta e apresentar propostas confiáveis, precisas e de baixo custo;

- otimização: o ganho de tempo na geração do modelo e análise de convergência permite que se estude geometrias alternativas. A otimização não se restringe ao item peso, ou seja, quantidade de matéria prima utilizada: a análise de várias configurações possibilitará o estudo de outros custos como quantidade de solda, facilidade de construção e utilização de matéria prima disponível em estoque.

Atualmente uma parcela significativa de potenciais compradores de equipamentos hidromecânicos são empresas privadas preocupadas com o custo e a confiabilidade dos projetos, e que possuem um mercado globalizado para escolher seus fornecedores. A agilidade propiciada pela rapidez de apresentação de uma proposta, a possibilidade de se analisar várias configurações e a confiabilidade do método de cálculo são fatores importantes para o atual mercado de geração de energia.

### 1.3 Objeto de Estudo

Existem vários tipos de comportas cujas definições podem ser encontradas na norma brasileira NBR-7259/82 – Comportas Hidráulicas – Terminologia. De acordo com suas características, as comportas podem ser classificadas segundo os seguintes critérios: função, movimentação, descarga, composição da estrutura, localização e forma da estrutura. Como o presente trabalho visa a geração de modelos paramétricos da estrutura de comportas, a classificação segundo a forma da estrutura (geometria) é a mais significativa. Erbiste [1] apresenta com maiores detalhes estas classificações. Segundo a forma de sua estrutura, as comportas podem ser classificadas em planas e radiais. Dentre os tipos de comporta plana, propôs-se estudar as comportas do tipo

A comporta gaveta é a mais simples entre as comportas planas. Sua concepção é semelhante à da ensecadeira, porém sua estrutura é dotada de uma superfície de deslizamento, geralmente metálica, a qual também pode ser utilizada como vedação. Este tipo de comporta é normalmente utilizado em canais de irrigação e obras de saneamento. Possui como principais vantagens a simplicidade de construção, exigir pouca manutenção, transmissão uniforme de carga para a obra civil e reduzida vibração em aberturas parciais devido ao atrito entre a mesma e o caminho de deslizamento. Possui como principal desvantagem o atrito para sua movimentação. Este fato restringe sua utilização em locais que necessitem de fechamento de emergência e dificulta a

#### **Comporta Gaveta**

somente com pressões equilibradas entre seus lados à jussante e à montante. da região isolada para retirada destas comportas, uma vez que devem ser movimentadas projeto que utiliza este tipo de comporta deverá prever procedimento para enchimento por elementos menores intercambiáveis, de mais fácil manuseio e armazenagem. O comportas de manutenção, sua utilização é temporária e muitas vezes são constituídas movimentação não deve ser realizada para interromper fluxo de água. Como são turbinas. Este tipo de comporta normalmente não possui rodas, portanto sua hidromecânicos, tais como comportas vágão, comportas mitra, comportas segmento e utilizadas para isolar uma região para manutenção e reparo de outros equipamentos. As comportas ensecadeiras, também conhecidas como Stoplogs são normalmente

#### **Comporta Ensecadeira**

destas comportas. mais utilizados em hidroelétricas e eclusas. A seguir apresenta-se um breve descritivo vágão, gaveta e ensecadeira. Esta escolha baseou no fato de serem os tipos de comporta

utilização de cabos para sua movimentação, pois nem sempre é possível seu acionamento por gravidade.

### **Comporta Vagão**

A comporta vagão é o tipo mais utilizado de comporta. Estas comportas possuem estrutura semelhante à ensacadeira e à gaveta, porém utiliza rodas em suas extremidades laterais para facilitar sua movimentação. A principal aplicação deste tipo de comporta é feita em instalações que necessitem de fechamento emergencial por peso próprio ou para interromper fluxo de água de alta pressão hidrostática, tais como as encontradas em desvios para formação de represas e tomadas d'água de hidroelétricas.

A estrutura das comportas planas citadas encontra-se apresentada de forma mais detalhada no item 3 deste texto.

Quanto à seleção do tipo de comporta, como em todo projeto de engenharia, deve-se avaliar as seguintes características: segurança operacional, custo, facilidade operacional, manutenção, transmissão de esforços para a obra civil, facilidade de transporte e montagem. Como nos projetos de estruturas navais e oceânicas, o processo de escolha do tipo de equipamento deverá considerar a avaliação de projetos anteriores e similares.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Erbiste, “Comportas Hidráulicas”

Este livro reúne de forma sintetizada os procedimentos básicos para escolha e dimensionamento de comportas hidráulicas. Está fortemente baseado na norma NBR 8883, por sua vez baseada na norma DIN 19704. Embora abranja todo o projeto de uma comporta, incluindo as peças fixas (apoios) e o sistema de manobra (acionamento), para este trabalho utilizou-se basicamente os capítulos 5 e 7, os quais incluem as etapas de dimensionamento do tabuleiro, determinação de tensões admissíveis e estimativas de peso.

É interessante notar que a palavra “dimensionamento” é, de certa forma, utilizada de maneira incorreta, uma vez que não existe estabelecido um procedimento para cálculo, e sim, um conjunto de verificações que devem ser realizadas para confirmar a integridade da estrutura proposta quanto às tensões admissíveis adotadas.

Embora Erbiste [1] apresente equações para estimativas iniciais, a definição dos parâmetros de projeto depende fortemente da experiência do engenheiro projetista. Em princípio busca-se a estrutura com menor peso, porém, nem sempre esta será a de menor custo. Custos relativos à mão de obra (soldagem, usinagem, detalhamento), tempo e facilidade de fabricação e manutenção são fatores tão importantes quanto o custo da matéria prima, como em qualquer projeto de engenharia. É importante lembrar que estes fatores sofrem alterações de valor e, conseqüentemente, suas importâncias no projeto podem variar ao longo do tempo e do local da implantação do mesmo.

## 2.2 Ansys, "Programmers Manual"

### 2.2.1 Manual de APDL

Embora o manual padrão do software possua uma seção dedicada à linguagem APDL, esta é apresentada de forma muito resumida. Para a implementação do programa com melhor eficiência, utilizando recursos avançados de condicionais e ciclos ("loops"), recorreu-se ao manual de programação avançada. Este manual mostrou-se bastante útil, principalmente nas etapas do programa em que foi utilizada a abordagem top-down (ver item 6 deste texto). Alguns dos recursos mais utilizados foram as simplificações do comando "\*\*GET" (utilizado para resgatar parâmetros do programa, tais como coordenadas geométricas, resultados e parâmetros de execução) e os comandos de repetições e condicionais.

### 2.2.2 Manual de UIDL

O manual padrão do software não inclui uma seção sobre a linguagem UIDL. Para entender seus recursos foi necessário utilizar o manual de programação avançada. Esta linguagem não se mostrou prática de ser utilizada, e o manual também não é muito claro, principalmente no que se refere à elaboração do sistema de ajuda ("help on line"). Durante a elaboração deste trabalho, a Ansys alterou seu modo de exibir o sistema de ajuda. Em sua última versão (5.7), o sistema de ajuda é realizado através da linguagem *HTML* e visualizados através de um navegador para internet. Este novo sistema facilitou não somente a utilização do sistema de ajuda, como também sua elaboração. O restante da programação UIDL permaneceu inalterada.

### 2.3 Cunha, “Modelagem Paramétrica de Abertura em Casco

#### Resistente de Submarino”

O texto da dissertação de mestrado do engenheiro Cunha [3] foi útil em dois aspectos:

- Elaboração do pré-processador genérico: Cunha [3] dividiu a geração de um pré-processador para geração de um modelo de elementos finitos para abertura em cascos de submarinos em várias etapas. Uma destas etapas é a geração de uma grelha chapada.
- Programação em etapas: Utilizou-se o conceito de dividir o problema em etapas, aumentando a complexidade do modelo elaborado gradativamente.

A grelha chapada gerada por Cunha [3] é essencialmente a estrutura simplificada de uma comporta, ou seja, uma chapa reforçada.

### 2.4 Zeid, “CAD/CAM Theory and Practice”

Este livro foi bastante útil no desenvolvimento do pré-processador genérico, uma vez que o mesmo detalha o processo de discretização de superfícies em quadriláteros. O autor utiliza uma abordagem simplificada, porém suficiente para a discretização da geometria que descreve as comportas. Caso a geometria do problema envolvesse superfícies complexas delimitadas por curvas não coplanares, seria necessário abordar a discretização com rotinas mais genéricas. Mesmo não apresentando tais rotinas, existe em Zeid [2] indicação de bibliografia para discretização de geometrias mais complexas.

## 2.5 TIMOSHENKO, "Theory of Elastic Stability"

Na abordagem clássica dada por Timoshenko [10] para a teoria da estabilidade elástica, buscou-se o apoio teórico para formulações analíticas para o cálculo da estabilidade de placas e colunas. Embora Erbiste [1], Pfeil [7] e Manson [8] também apresentem formulações para o cálculo analítico, não descrevem seu desenvolvimento. Devido às características do fenômeno de segunda ordem do cálculo de flambagem, e a sua importância em uma estrutura metálica, no item 7.3 deste texto apresentou-se um estudo comparativo entre as formulações analíticas e numéricas, para verificar a precisão e aplicabilidade desta última. Erbiste [1], Pfeil [7] e Manson [8] apresentaram uma simplificação do desenvolvimento teórico de Timoshenko [10], substituindo uma parte do equacionamento por gráficos e tabelas para definição de coeficientes de flambagem. Na prática o uso de gráficos e tabelas mostra-se útil, podendo ser inseridos em rotinas de cálculo. Porém, didaticamente, o equacionamento apresentado por Timoshenko [10] demonstra-se mais adequado para a comparação com o método numérico por não ser uma aproximação de um caso com solução analítica bem determinada.

### 3 Modelo de Síntese

Uma comporta plana normalmente tem dois de seus lados apoiados sobre peças fixas (caminhos de rolamento). Em seu dimensionamento utiliza-se o conceito de grelha chapada, bi-apoiada lateralmente e submetida à pressão hidrostática.

Teoricamente, uma comporta poderia ser constituída apenas de uma chapa, com dimensões iguais às do duto no qual ela deve realizar o controle do fluxo de água. Porém, devido às grandes dimensões destes dutos, a espessura necessária resultaria em estruturas excessivamente pesadas, dificultando transporte, instalação e operação. Para ilustrar podemos utilizar a equação 3.1 apresentada no capítulo 7 de Ertbiste [1], relativo à estimativa de peso para comportas ensacadeiras. Segundo Ertbiste [1], as expressões apresentadas para estimativa do peso de comportas foram definidas por ajustes de curvas de dados estatísticos de 221 comportas, das quais 126 instaladas no Brasil.

$$W_e = 0,503(B^2hH)^{0,716} \quad (3.1)$$

onde

$W_e$  – estimativa de peso [N]

B - largura da comporta [m]

h - altura da comporta [m]

H - altura da coluna de água (pressão hidrostática) [m]

Consideremos o seguinte exemplo apresentado em Ertbiste [1]:

tipo: comporta ensacadeira

dimensões: 8 m x 9 m

carga (pressão): 32 mca (313,92 kPa)

Substituindo-se os dados do exemplo na equação 3.1, encontra-se  $W_e = 570kN$ .

O peso de uma chapa única pode ser estimado pelo cálculo de placas, onde a tensão máxima em uma placa bi-apoiada é obtida pela equação 3.2.



$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I} \quad (3.2)$$

$$M = \frac{phB^2}{8} \quad (3.2a)$$

$$I = \frac{ht^3}{12} \quad (3.2b)$$

onde

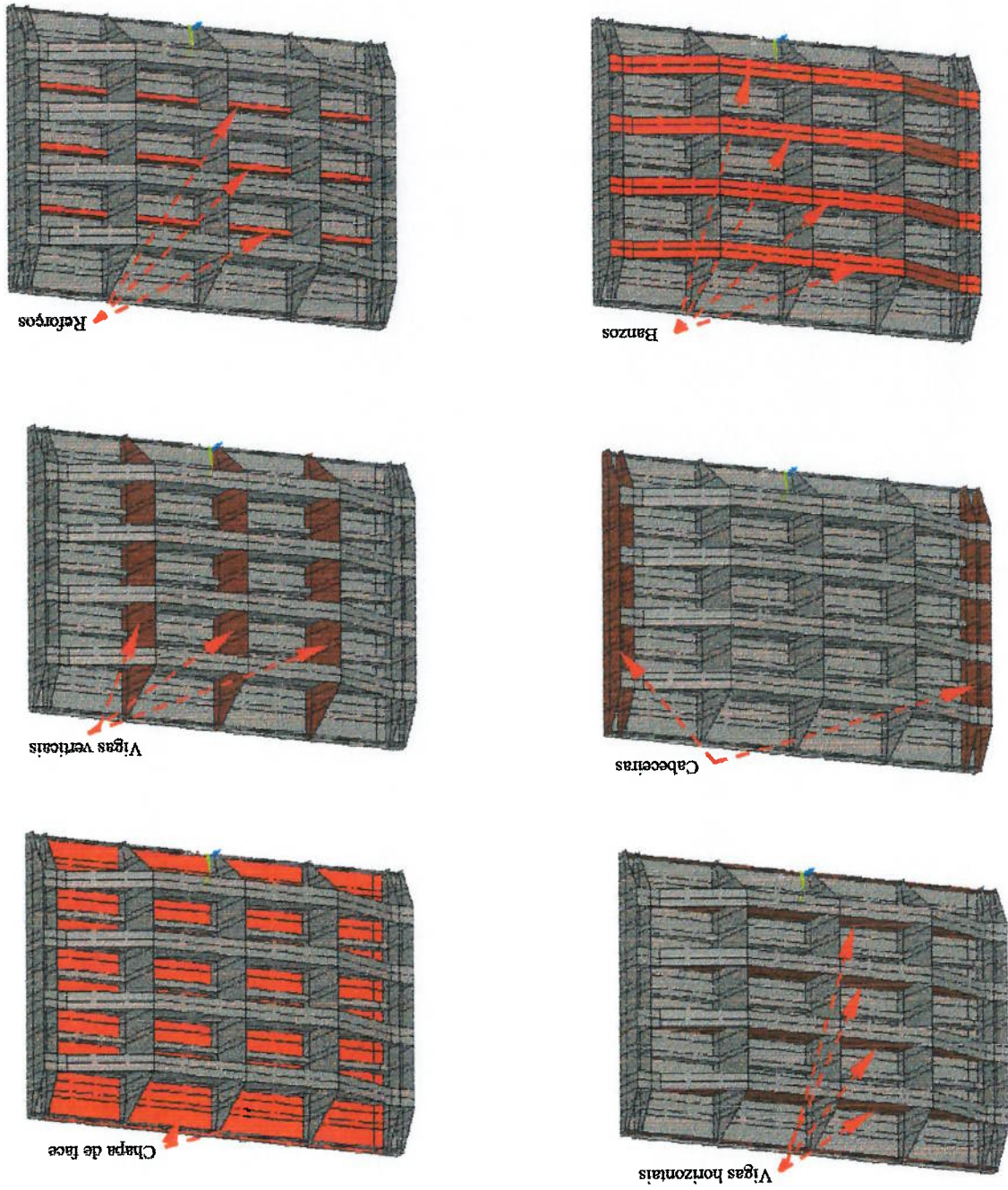
M – momento fletor máximo causado por p  
 p - carga hidrostática à qual a placa está sujeita  
 I – momento de inércia da seção da placa submetida à flexão  
 h – altura da comporta  
 B – largura da comporta  
 t - espessura da placa

A partir da equação 3.2 determina-se a espessura mínima necessária pela equação 3.3. Considerando-se uma tensão admissível de 217 MPa (87% da tensão de escoamento do aço ASTM A36, normalmente utilizado em comportas), verifica-se que a espessura necessária para a chapa é de 244 mm, resultando em um peso total de  $W_{pl} = 1353 \text{ kN}$ , ou seja, 2,37 vezes mais pesada em relação à estimativa apresentada por Erbiste [1], a qual é obtida através de dados estatísticos.

$$t > \sqrt{\frac{3pB^2}{4\sigma_{\max}}} \quad (3.3)$$

Devido à diferença de peso ilustrada neste exemplo, as comportas são normalmente construídas utilizando-se outros componentes estruturais. Os principais componentes encontrados em comportas planas estão ilustrados na figura 3.1.

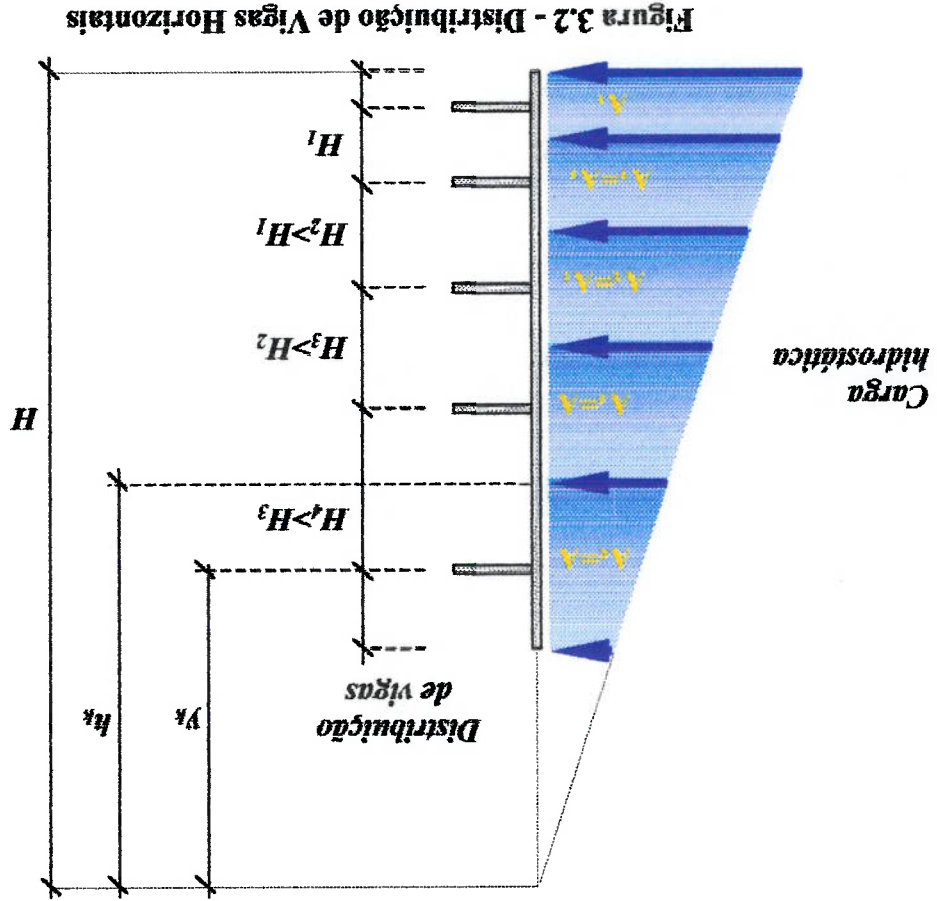
Figura 3.1- Componentes Estruturais de uma Comporta Plana



Apresenta-se abaixo um breve descritivo das funções estruturais dos componentes das comportas:

### Vigas horizontais

Este componente é utilizado para dividir a chapa de face em placas menores e para absorver, por flexão, a carga hidrostática. A divisão da chapa de face pelas vigas horizontais é normalmente realizada de tal forma que as vigas recebam cargas hidrostáticas semelhantes. Este procedimento é adotado para que as vigas tenham a mesmas dimensões, proporcionando ganhos de escala na fabricação. Esta divisão é conhecida como a "regra do trapézio", ilustrada na figura 3.2.



A determinação do número de vigas é, na verdade, um processo iterativo e uma solução de compromisso. Quanto mais vigas, menor a espessura da chapa de face e menor o tamanho das vigas. Porém, um aumento no número de vigas influi nos custos de mão de obra de corte, montagem e soldagem. Erbiste [1] apresenta a equação 3.4 para obtenção da estimativa inicial do número ideal de vigas horizontais.

$$N = \frac{100h}{H^m} \sqrt{\frac{t}{2\sigma^{adm}}} \quad (3.4)$$

onde N - estimativa para o número de vigas

h - altura da comporta

t - espessura do paramento

$H^m$  - altura de coluna d'água no centro da comporta

H - altura de coluna d'água na soleira

$\sigma^{adm}$  - tensão admissível à flexão do aço

A espessura da alma das vigas horizontais é determinada pela máxima tensão de cisalhamento admissível na extremidade da comporta. Normalmente a máxima altura da viga nas extremidades é limitada pela obra civil de concretagem (altura da ranhura). Em Erbiste [1] pode-se encontrar uma tabela para a estimativa inicial da altura da viga, a qual normalmente varia entre  $\frac{1}{12}L$  e  $\frac{1}{5}L$ , onde L é a distância entre apoios laterais (vão livre). Em comportas de grande vão de vedação adotam-se vigas horizontais com seção variável, uma vez que a tensão máxima de flexão ocorrerá no seu centro e a tensão máxima de cisalhamento ocorrerá em suas extremidades. Embora citado em Erbiste [1] a utilização de vigas com altura de  $\frac{1}{5}L$ , deve-se atentar para o fato de que a contribuição da força cortante não será mais desprezível em relação à flexão, como normalmente ocorre em vigas submetidas a uma carregamento distribuído.

Para determinar a posição das vigas horizontais Erbsite[1] propõe a seguinte formulação, ilustrada na figura 3.2:

$$h_k = H \sqrt{\frac{k + \beta}{n + \beta}} \quad \text{para } k \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3.5)$$

onde  $\beta = \frac{n(H-h)^2}{H^2 - (H-h)^2}$

$$y_k = \frac{2H}{3\sqrt{n + \beta}} \left[ (k + \beta)^{\frac{2}{3}} - (k - 1 + \beta)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (3.6)$$

Para verificar a validade destas equações, basta calcular a área de uma região  $A_k$  qualquer, conforme a equação 3.7, e verificar que este é o valor da carga total dividido pelo número de regiões.

$$A_k = (h_k - h^{k-1}) \left( \frac{h_k + h^{k-1}}{2} \right) = \frac{h(2H - h)}{2n} \quad (3.7)$$

### Vigas verticais (Septos)

As vigas verticais, comumente chamadas de septos projetistas de comportas, são utilizadas para delimitar as unidades de chapamento (chapa de face) e das vigas horizontais. Desta forma, reduz o risco de flambagem no paramento durante o içamento da comporta e da viga horizontal quando a comporta estiver submetida à carga hidrostática.

### Banzos

Os banzos são os flanges das vigas horizontais. Este componente em conjunto com a viga horizontal e com a largura colaborante da chapa de face determina uma viga "T". Em geral, pode-se adotar o seguinte procedimento para definição da seção dos banzos:

-defini-se a carga a qual cada viga horizontal estará sujeita, dividindo-se a carga hidrostática total  $F_h$  pelo número de vigas (considerando-se que todas recebem a mesma carga);

-determina-se o momento fletor máximo em cada viga considerando a carga em cada viga uniformemente distribuída;

-determina-se a inércia do flange necessária para que a tensão resultante não ultrapasse a máxima admissível conforme a equações 3.8 e 3.9.

$$F_h = Bh(\rho_{água}gH) \quad (3.8)$$

$$\sigma_{adm} \geq \frac{M}{I} z \Rightarrow I \geq \frac{M}{\sigma_{adm}} z, \text{ onde } I = I_{alma} + I_{flange} + I_{chapacolaborante} \quad (3.9)$$

É importante lembrar que a inércia da alma da viga horizontal, da chapa de face colaborante e do flange são compostas de duas parcelas, definidas pela inércia da seção

destes componentes e pela distância dos mesmos ao centro de gravidade do conjunto

$$(I = I_{seção} + Ad^2).$$

### Cabeceira

Esta viga vertical tem como única função distribuir os esforços das vigas horizontais para a obra civil, através de uma carga distribuída, no caso de comportas ensecadeiras, ou através de rodas, no caso de comportas vagão. Sua espessura será determinada de tal forma que as tensões de contato entre a cabeceira e a peça fixa, ou entre a cabeceira e os eixos das rodas, não ultrapassem os limites admissíveis. No caso de comportas

enscaderas, a espessura da cabeceira influencia diretamente a espessura da placa de aço inox necessária para o caminho de deslizamento.

### Chapa de face

A chapa de face, também conhecida como paramento, é o componente que realiza efetivamente o controle do fluxo de água. Sua espessura será definida conforme a equação 3.2. Considera-se cada unidades de chapamento delimitada pelas vigas horizontais e verticais como engastada nas laterais. Para reduzir as dimensões das placas, e consequentemente a espessura das mesmas, existem duas alternativas:

- aumentar o número de vigas horizontais e/ou verticais;
- utilizar reforços.

Normalmente adotam-se reforços, devido ao fato de acrescentarem menos peso à estrutura.

### Reforço horizontal

Conforme citado anteriormente, os reforços horizontais são utilizados para reduzir as dimensões das unidades de chapamento. A utilização de um reforço, por exemplo, divide cada placa em duas, conforme pode ser observado na figura 3.3.

Devido às características estruturais das vigas horizontais e verticais, normalmente a chapa de face é dividida em placas horizontais, ou seja, com dimensão horizontal (comprimento) maior que a vertical (altura). Teoricamente existiriam duas possibilidades para posicionar os reforços: horizontalmente ou verticalmente. Para decidir qual posição adotar, pode-se utilizar como exemplo uma placa delimitada originalmente sem reforços com largura  $b = 3.l$  e altura  $a = l$ , conforme ilustrado na figura 3.3i.



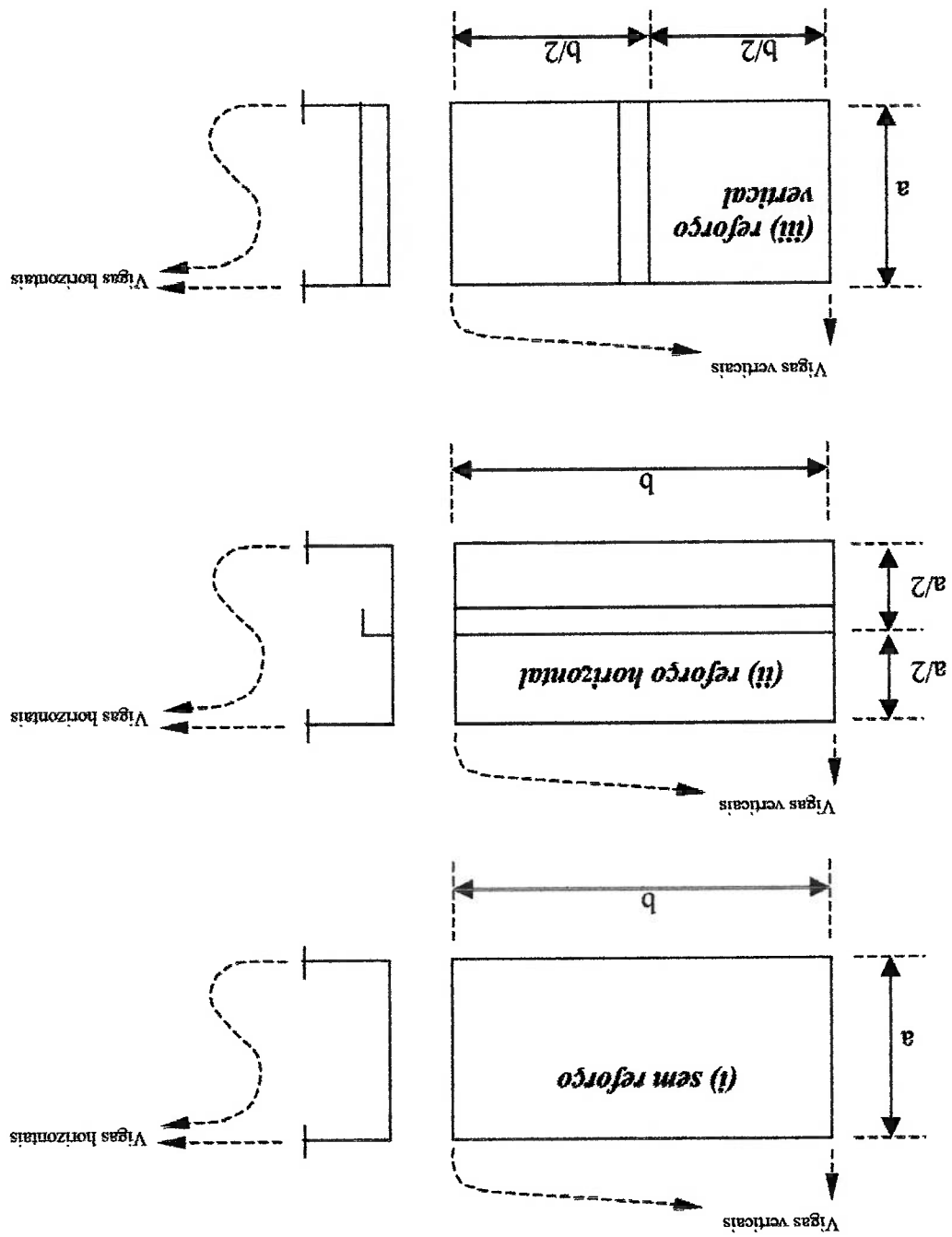


Figura 3.3 – Tipos de Reforços



Consideram-se então as seguintes divisões, ilustradas na figura 3.3:

i – sem divisões

ii – divisão horizontal

iii – divisão vertical.

Tem-se como resultado destas divisões novas placas com as seguintes dimensões:

$$i - b \times a$$

$$ii - b \times \frac{a}{2}$$

$$iii - \frac{b}{2} \times a.$$

Utilizando-se a equação 3.2 pode-se encontrar a espessura necessária para a chapa de face em cada caso, conforme a equação 3.10. Na tabela 3.1 é apresentado um comparativo entre a espessura necessária para cada situação.

$$t = \sqrt{\frac{k \cdot a^2 \cdot p}{100 \cdot \sigma}} \quad (3.10)$$

Os resultados encontrados mostram que a maior redução de espessura é conseguida ao reduzir-se o lado menor da unidade de chapamento, ao invés de diminuir a relação  $\frac{a}{b}$  ou seja, a utilização de reforços horizontais é mais eficiente.

Para uma correta utilização dos reforços, estes devem ser dimensionados de tal forma a garantir um apoio às placas, caso contrário não poderemos utilizar a hipótese de divisão de placa e lados engastados.

Tabela 3.1 – Tipo de Reforço e Espessura Necessária da Placa

| Dimensões da placa                       | Fator k | Espessura necessária  |
|--|---------|---|
| Caso i<br>$b \times a = 3$               | 50      | $t_0 = \sqrt{\frac{k \cdot a^2 \cdot p}{100 \cdot \sigma}}$ |
| Caso ii<br>$b \times \frac{a}{2} = 6$    | 50      | $t_1 = \frac{t_0}{2} = 0,5t_0$                              |
| Caso iii<br>$\frac{b}{2} \times a = 1,5$ | 30,9    | $t_{11} = \sqrt{\frac{3}{5}} t_0 \cong 0,77t_0$             |

É importante ressaltar que os itens acima não representam um roteiro de cálculo. As estimativas iniciais para a quantidade, altura e espessura das vigas horizontais servem apenas como orientação, e não como fórmulas para um projeto otimizado.

#### **4 Ferramentas Avaliadas**

Neste trabalho, os pré-processadores são classificados em dois tipos: genéricos e dedicados. Será atribuída a classificação de pré-processador genérico aos que podem ser utilizados para fornecer informações a qualquer programa de elementos finitos. Os pré-processadores que utilizam recursos específicos de um determinado programa de elementos finitos são classificados como dedicados. Os genéricos possuem a clara vantagem de poderem ser utilizados por vários programas, e os dedicados a vantagem de contar com recursos que reduzem o tempo de desenvolvimento. A seguir, descreve-se um breve comparativo entre as duas abordagens.

##### **Pré-processador genérico**

Vantagens:

- Desenvolvido em plataforma barata, reduz o custo de aquisição de um programa comercial de elementos finitos; e

- Divisão de tarefas por programadores (linguagens de programação melhor difundidas).

Desvantagens:

- É necessário um maior investimento de tempo inicial; e
- Para um mesmo tempo de desenvolvimento, pode-se obter uma melhor interface gráfica e recursos mais avançados com um pré-processador dedicado.

### **Pré-processador dedicado**

#### **Vantagens:**

- Há uma gama de empresas que trabalha com uma quantidade pequena de tipos de estruturas. Estas empresas geralmente não precisam de uma grande flexibilidade de sua ferramenta de cálculo;

- Facilidade de ser embuido no próprio programa de elementos finitos, tornando a interface gráfica semelhante a do programa original;

- Reduz custos de treinamento para profissionais que já utilizaram o programa de elementos finitos escolhido;

- Permite que o programador utilize recursos de CAD e discretização automática do próprio programa de elementos finitos;

- Facilidade e customização do pós-processamento; e
- Facilidade de acesso aos dados gerados pelo programa de elementos finitos para customização do pós-processamento e geração de relatórios automáticos.

#### **Desvantagens:**

- É necessário um maior investimento financeiro inicial, uma vez que um programa de elementos finitos com recursos avançados de programação possui maior custo em relação a outro que não possua estes recursos;

- Tem como principal restrição o fato de exigir, como plataforma de trabalho, um único programa de elementos finitos comercial, fato este que pode criar uma indesejável dependência tecnológica e dificuldades de migração para outro programa; e

- Quando o programador utiliza recursos internos de CAD e discretização automática como “caixas-pretas” há um menor controle do resultado, podendo-se obter malhas de qualidade nem sempre satisfatória.

## 5 Pré-processador Genérico

Inicialmente pensou-se no desenvolvimento de um pré-processador genérico que fosse capaz de gerar modelos para quaisquer programas de elementos finitos comerciais, apenas com a mudança do formato de dados de saída. Esta abordagem tem a grande vantagem de não depender de um software específico, que pode ter custo considerável e nem sempre estar disponível. Porém, o tempo de desenvolvimento será maior em relação ao de um pré-processador dedicado.

Adotando-se algumas simplificações como reforços igualmente espaçados e sem flanges, e condições de contorno de apoio perfeito nos quatro lados, desenvolveu-se o programa pré-processador com o objetivo de gerar dados para uma análise de elementos finitos no programa ALGOR.

### 5.1 Desenvolvimento do Programa

Não cabe aqui entrar em detalhes específicos de programação, mas vale ressaltar um fluxograma do processo de desenvolvimento do programa, conforme ilustrado na figura 5.1.

Na confecção do programa, utilizaram-se técnicas de Programação Orientada a Objetos, havendo um módulo central que utiliza instâncias de classes responsáveis por gerar nós e elementos para cada uma das partes estruturais do modelo. Uma destas instâncias de classe calcula as coordenadas nodais e a numeração dos nós e guarda estas informações em um arquivo de saída. Depois, outra instância de classe determina os nós que formam cada um dos elementos.

## 5.2 Resultados Obtidos

Da utilização deste programa obtve-se o teste de convergência ilustrado na figura 5.2, e o exemplo de resultado obtido esta ilustrado na figura 5.3.

Mesmo para um caso simples como o exemplificado, há um custo considerável no desenvolvimento da ferramenta de pré-processamento. O trabalho é bastante lento e tem uma aplicabilidade restrita, pois pequenas alterações geométricas implicam em muito tempo adicional para ajustes e programação.

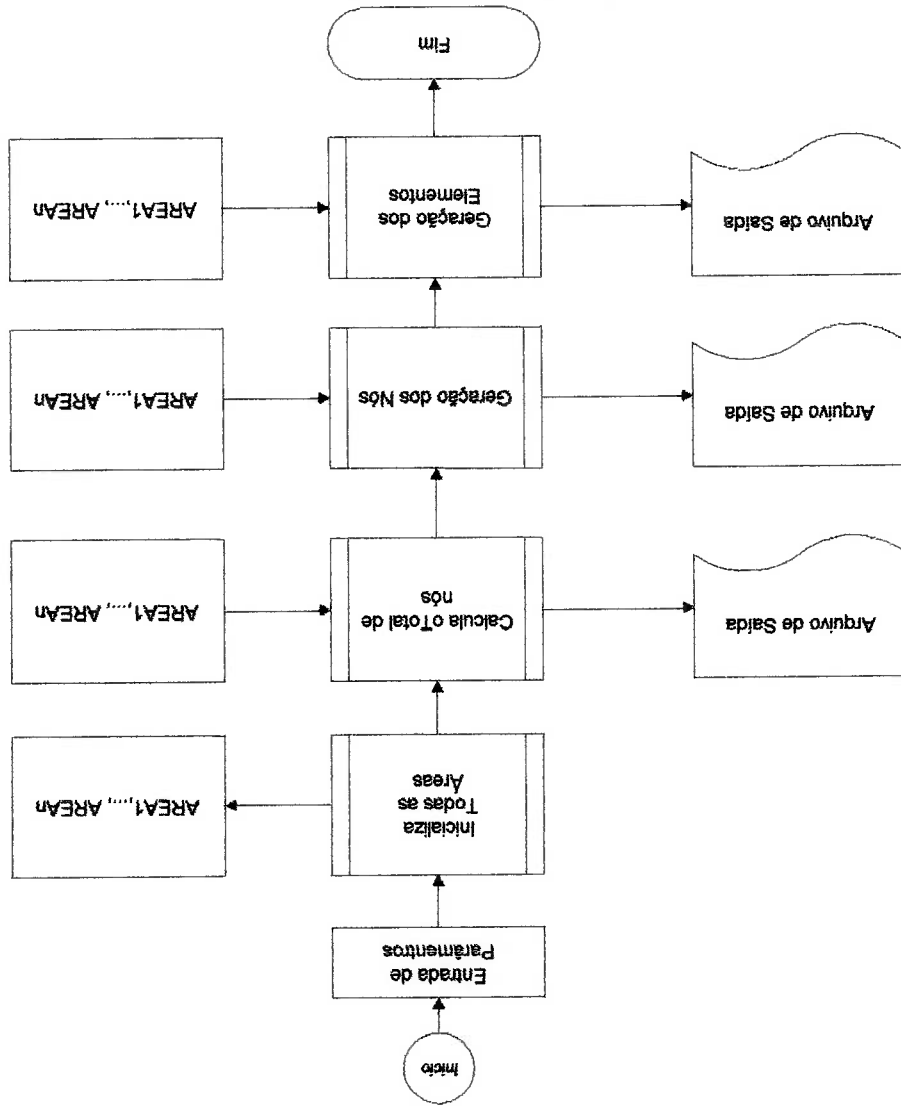


Figura 5.2- Análise de Convergência

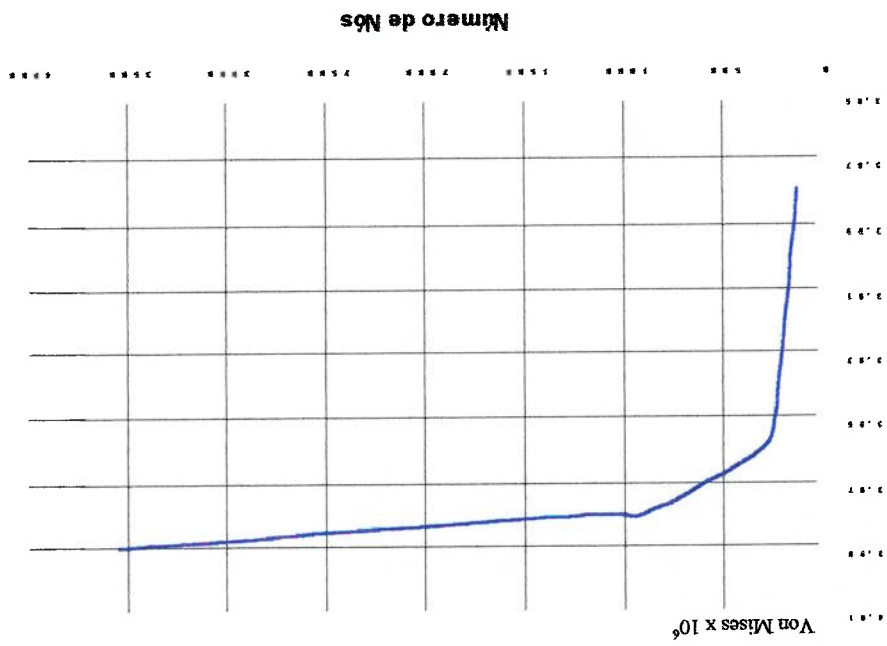
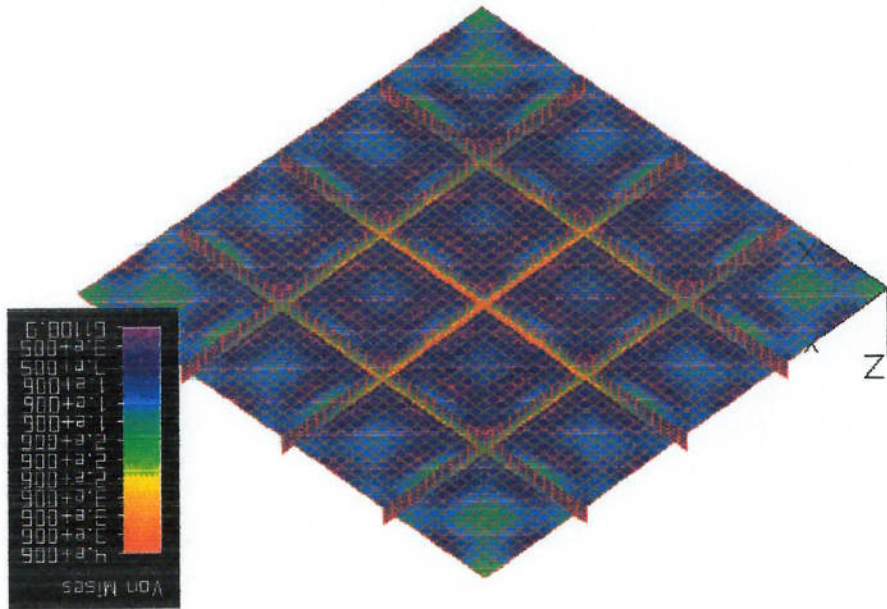


Figura 5.3- Exemplo de Resultado Obtido



## 6 Pré-Processador Dedicado

Os programas de elementos finitos comerciais mais difundidos, tais como ANSYS, ALGOR e PATRAN/NASTRAN, já trazem suas próprias linguagens de programação e customização que servem como ferramenta para a geração paramétrica de modelos de elementos finitos.

Nesse contexto, as linguagens APDI/UIDL para o ANSYS, EAGLE para o ALGOR e PCL para o PATRAN/NASTRAN, trazem recursos próprios e rotinas pré-programadas, permitindo a elaboração de programas, talvez, com uma melhor qualidade final e, seguramente, exigindo um menor tempo de desenvolvimento.

Considerado os objetivos do presente trabalho, utilizou-se a APDL (Ansys Parametric Design Language) [5] para construir um pré-processador especificamente destinado às comportas planas.

Para facilitar o desenvolvimento de um pré-processador foram estudadas algumas ferramentas de programação tais como:

- modelagem paramétrica de geometrias: a modelagem paramétrica da geometria mostrou-se bastante útil, uma vez que, garantindo-se a conectividade entre as áreas, o gerador de malha do programa de elementos finitos garante a conectividade do modelo. - geração automática de malhas genéricas e mapeadas: dentre os recursos de discretização automática que foram considerados, utilizou-se apenas o parâmetro de tamanho de elemento global e um concentrador em linhas especificadas, para o caso onde existem furos nas vigas horizontais. Observou-se que para este problema físico (comportas hidráulicas, ou seja, chapas retangulares) o fator que mais influencia a qualidade da discretização é a ordem em que são discretizadas. Áreas com geometria distorcida ou de tamanho reduzido devem ser discretizadas antes das demais. Desta



forma o gerador de malha possui maior liberdade para o posicionamento dos nós nas fronteiras destas áreas.

A princípio, o pré-processamento do software ANSYS permite a utilização de duas abordagens:

- *Bottom-up*: gera-se a geometria a partir de entidades menores e definem-se as maiores. Nós > Elementos; Pontos > Linhas > Áreas > Volumes;

- *Top-down*: geram-se diretamente as entidades maiores (elementos, linhas, áreas, volumes) e o programa gerencia automaticamente as entidades menores (pontos e nós).

A geração *bottom-up* permite um maior controle sobre a geometria, como por exemplo, a numeração de entidades. Porém, o programador deverá gerenciar a numeração das entidades menores. A geração *top-down* facilita a geração do modelo, uma vez que blocos maiores são gerados e são utilizadas ferramentas tais como intersecção e união (operações lógicas “booleanas”) para esculpir a forma final. Porém, esta metodologia dificulta o controle da numeração. Um bom controle de numeração pode tornar o programa mais ágil e consumir menos recursos computacionais. A geração *top-down* exige que o usuário gerencie as operações necessárias para garantir a conectividade do modelo, na *bottom-up* ele já a constrói assim. Deve-se ainda estar prevenido de forma a não se obter singularidades geométricas devido às operações entre as entidades geométricas.

Pode-se ainda utilizar uma metodologia mista, aproveitando os benefícios de cada uma quando convier e utilizando-se uma solução de compromisso entre facilidade e consumo de recursos.

Analogamente ao caso do pré-processador genérico, não cabe aqui entrar em maiores detalhes de programação, mas cabe ressaltar a metodologia adotada, elaborando-se as seguintes considerações:

- A divisão da comporta em componentes - peças que juntas formam o equipamento inteiro - é a mesma normalmente adotada pelos engenheiros que trabalham em projetos de comportas, conforme descrito em Erbiste [1]; e

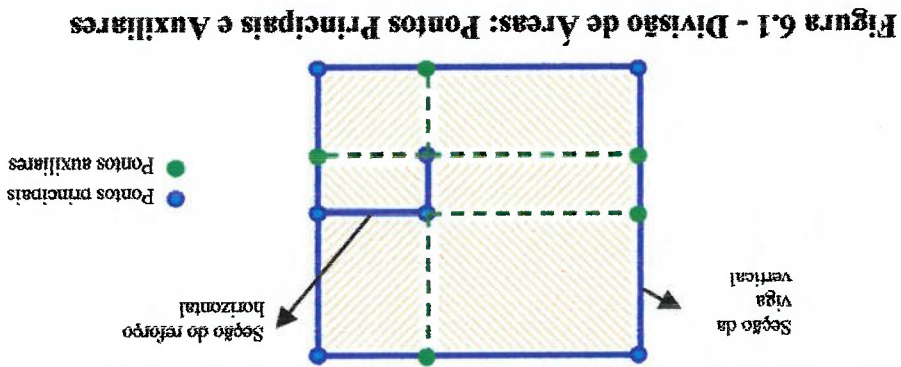
- A divisão dos componentes em áreas planas é o que, verdadeiramente, caracteriza a parametrização do modelo. Quando a divisão em áreas estiver finalizada a estrutura estará parametrizada.

A definição dos pontos principais e auxiliares contempla a determinação da posição dos vértices das áreas em função dos dados de entrada. Considerou-se como pontos principais aqueles que definem a geometria, e pontos auxiliares aqueles utilizados em conjunto com os principais de tal forma que seja possível dividir a geometria em áreas mapeáveis, ou seja, definidas com quatro lados. A título de exemplo, na figura 6.1 ilustra-se a região de uma viga vertical compreendida entre duas vigas horizontais, bem como sua ligação com os reforços horizontais: considere os pontos azuis como principais, ou seja, necessários para definir a geometria. Para que seja possível dividir a geometria em áreas mapeáveis (seis áreas mapeáveis) deve-se considerar os pontos auxiliares ilustrados em verde. A utilização de áreas mapeáveis, sempre que possível, auxilia na qualidade das discretizações automáticas.

Na etapa subsequente de geração do modelo de elementos finitos propriamente dito, cada uma das áreas definidas deverá ser discretizada em nós e elementos, lembrando-se que nós em arestas comuns de áreas vizinhas não deverão ocorrer em duplicidade.

Esta última etapa pode ser realizada com o auxílio de rotinas de discretização automática, já existentes nos programas de elementos finitos, ou utilizando rotinas próprias do pré-processador, confeccionadas com recursos, por exemplo, descritos em

Zeid [2].



O desenvolvimento do programa foi dividido em três módulos distintos: programa

básico, interface gráfica e interface entre módulos, conforme ilustrado na figura 6.2.

Optou-se por esta divisão devido à possibilidade de se desenvolver cada uma

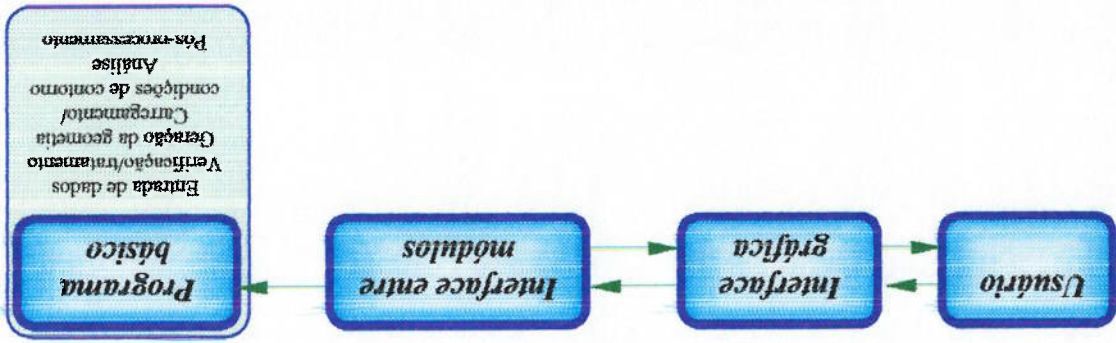
separadamente sem perda de trabalho, e de tal forma que o programa básico funcione

mesmo sem a interface gráfica, lendo dados de um arquivo texto. A interface gráfica

solicita dados ao usuário e escreve um arquivo texto a ser lido pelo programa básico, o

qual é responsável pela geração do modelo, aplicação das condições de contorno e

carregamento, solução e pós-processamento.



**Figura 6.2 – Divisão do Programa**

## 6.1 Programa Básico

O programa básico foi dividido em seis partes, desenvolvidas em arquivos separados para facilitar o desenvolvimento, alterações e compreensão por terceiros. Conforme ilustrado na figura 6.2, o programa foi dividido em: entrada de dados; tratamento e verificação de dados; geração da geometria; carregamento e condições de contorno; análise; e pós-processamento.

### 6.1.1 Entrada de Dados

A entrada de dados é definida atribuindo-se valores a determinadas variáveis adotadas como os parâmetros significativos do problema, dentre as quais podemos citar o número de vigas horizontais e verticais, a altura das almas, espessura das vigas e a largura dos flanges.

Para o problema físico escolhido, dividu-se a entrada de dados em duas etapas:

- Entrada por módulos: Dividiu-se a comporta em módulos, os quais são definidos como a região compreendida entre duas vigas horizontais. Os módulos são classificados em inferior, superior e intermediários, conforme ilustrado na figura 6.3, devido às características próprias dos módulos inferior e superior. Deve-se lembrar que os módulos intermediários podem ser diferentes entre si devido a parâmetros como a distância entre vigas horizontais, largura dos banzos e espessura das chapas.

- Entrada por elementos: Dividiu-se a comporta em chapa de face, reforços, vigas horizontais, cabeceiras, septos e banzos, nomenclatura que normalmente é utilizada em comportas planas, conforme ilustrado na figura 3.1, previamente apresentada no item 3.



A descrição da comporta é realizada através da indicação do número de módulos e da existência ou não dos elementos em um módulo, indicando também sua posição geométrica e espessuras. Para tal descrição, deve-se atribuir valores às variáveis que definem a geometria, como por exemplo as ilustradas nas cotas da figura 6.4.

Figura 6.3 - Divisão da Estrutura em Módulos

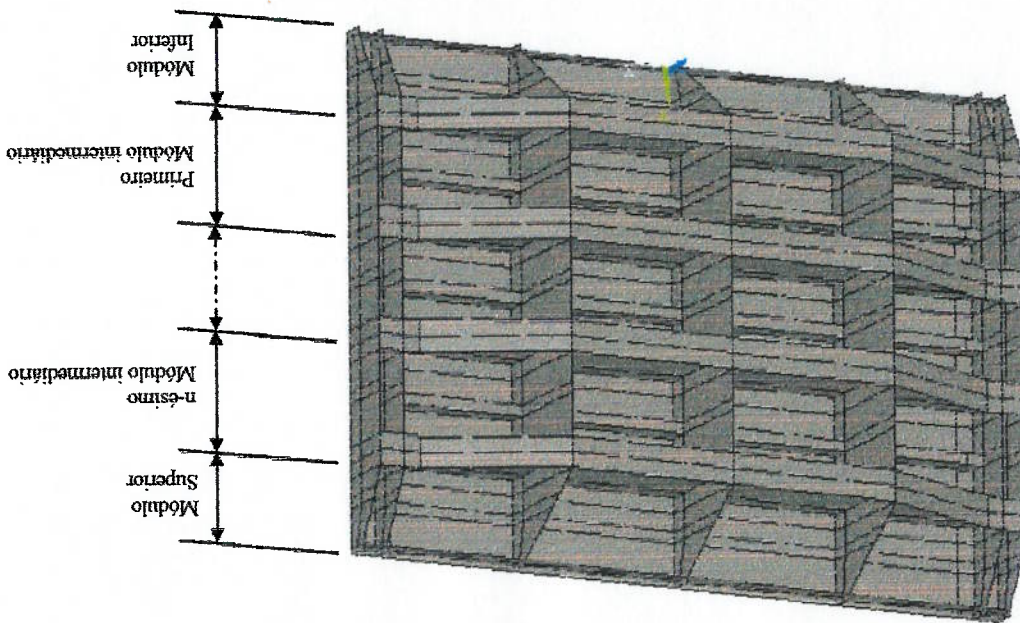
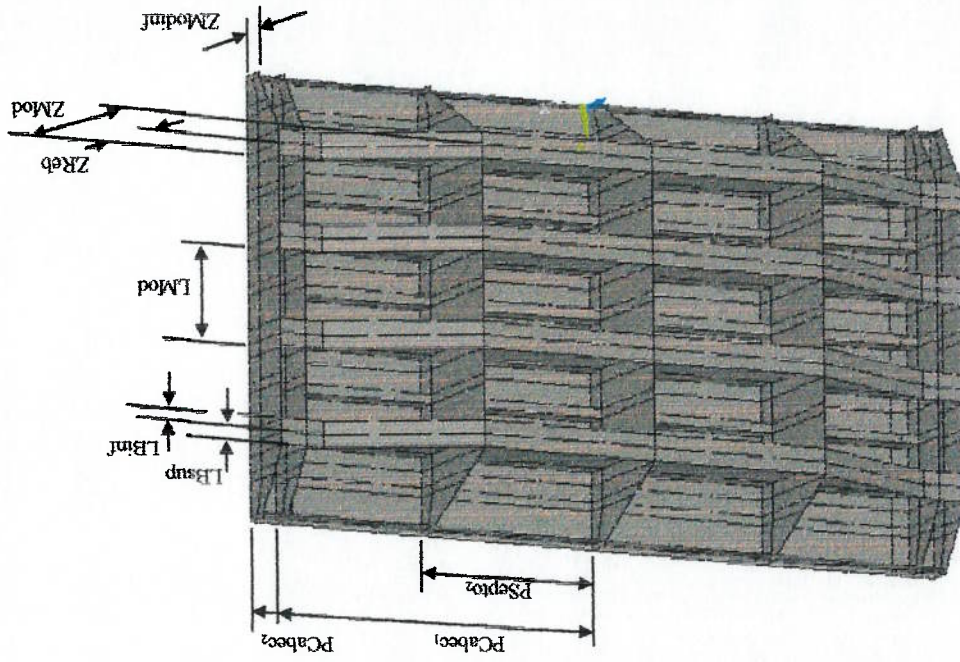


Figura 6.4 - Exemplos de Parâmetros



### 6.1.2 Tratamento e Verificação de Dados

Esta etapa possui duas funções distintas: facilitar a utilização do programa e filtrar dados incompatíveis. O tratamento de dados é utilizado para converter os dados de entrada do usuário em dados que o programa irá efetivamente utilizar para a geração do modelo. Esta transformação pode ter dois motivos:

- facilitar a entrada de dados, solicitando valores comuns aos utilizados no projeto, e transformando-os em parâmetros de geometria básica, como, por exemplo, raios de concordância em centro de ângulo de arcos; e
- ajustar os valores de entrada para as aproximações inerentes ao processo de modelagem, como, por exemplo, o posicionamento de chapas na linha média da espessura.

A verificação de dados é uma etapa bastante presente nos programas atuais. Ela verifica a coerência dos dados de entrada de duas maneiras:

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

Estas duas etapas permitem uma aproximação entre o usuário e o programa, reduzindo tempo de treinamento e risco de erros, bem como facilitando a identificação dos erros ou avisos.

Em conjunto com a verificação de dados, a entrada de dados possui algumas funções que atuam ativamente de forma a não permitir dados incompatíveis, tais como a utilização de menus específicos para espessuras pois, devido à diferença de ordem de grandeza entre as espessuras e as dimensões da comporta existe a possibilidade de se utilizar, equivocadamente, unidades erradas. Para tal, a entrada de dados oferece um menu no qual o usuário escolhe entre as espessuras padrões disponíveis no mercado.

### 6.1.3 Geração da Geometria

Para a geração do modelo geométrico optou-se pelo método “bottom-up”, ou seja, criam-se pontos e sobre estes se definem áreas.

#### Geração de Pontos

A geração de pontos é dividida em três etapas, cada uma acrescentando uma dimensão à comporta. Primeiro criam-se “n” pontos sobre o eixo x, chamados pontos básicos, conforme ilustrado na figura 6.5. Estes pontos definem as posições dos septos, cabeceiras, banzos verticais e linha de vedação. A quantidade total “n” de pontos é função do número de septos e cabeceiras, se existem ou não banzos verticais e da posição da linha de vedação. A equação 6.1 calcula o número de pontos necessários no eixo X. Como as comportas são estruturas simétricas em relação ao plano YZ (figura 6.3), as variáveis do programa que representam a geometria são relativas à metade da estrutura.

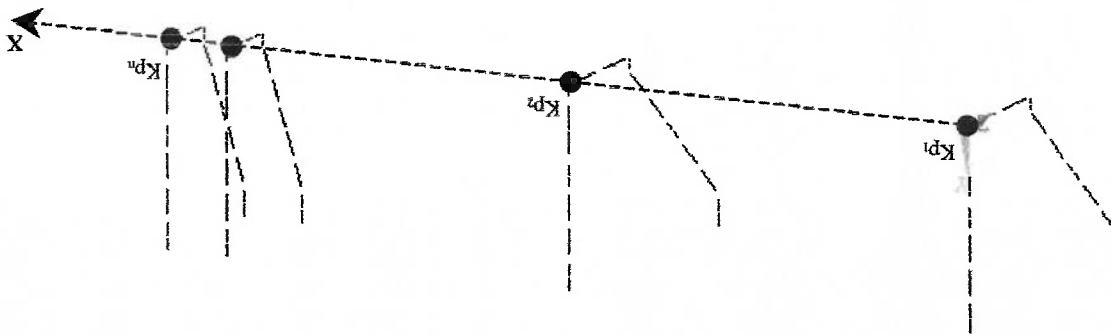


Figura 6.5 - Geração de "n" Pontos Básicos

$$NPtX = NS + NC + (2.EBV.NS - 1) + PS1 + EBV.PS1 + VC + 2.ER \quad (6.1)$$

Onde

NPtX - Número de pontos no eixo X

NS - Número de septos (presentes na metade da comporta)

NC - Número de cabeceiras (presentes na metade da comporta)

EBV -  $\begin{cases} 0 \text{ se não existem banzos verticais} \\ 1 \text{ se existem banzos verticais} \end{cases}$

PS1 -  $\begin{cases} 0 \text{ se existe septo no plano de simetria} \\ 1 \text{ se não há septo no plano de simetria} \end{cases}$

ER -  $\begin{cases} 0 \text{ se não houver variação de altura nas vigas horizontais fora dos septos} \\ 1 \text{ se houver variação de altura nas vigas horizontais fora dos septos} \end{cases}$

VC -  $\begin{cases} 0 \text{ se a posição da vedação coincide com pontos anteriores} \\ 1 \text{ se a posição da vedação não coincide com pontos anteriores} \end{cases}$



Criando-se "m" cópias destes "n" pontos básicos, trasladadas sobre o eixo z, obtêm-se o um conjunto básico de "m.n" pontos, conforme ilustrado na figura 6.6. Estes pontos definem a altura das vigas horizontais, septos, cabeceiras e reforços. Analogamente a definição da quantidade "n" de pontos necessários na direção X, a quantidade "m" dependerá da existência ou não de reforços horizontais.

Finalmente, trasladando-se estes "m.n" pontos sobre o eixo y, obtêm-se um grupo básico de "(m.n).p" pontos, conforme ilustrado na figura 6.7. Esta etapa define a largura dos banzos horizontais, posição dos reforços, largura da parte dobrada dos reforços e distância entre vigas horizontais (altura dos módulos). Novamente, a quantidade de pontos dependerá da existência ou não de banzos e tipo de reforços horizontais.

O grupo básico define um módulo da comporta, o qual consiste nos subconjuntos presentes entre duas vigas horizontais, conforme citado no item 6.1.1. Sobrepondo estes módulos sob o eixo y, obtêm-se os pontos necessários para a geração do modelo geométrico da comporta por inteiro.

A principal dificuldade desta etapa é a administração da numeração dos pontos em função da existência ou não de determinados componentes, como os banzos horizontais, verticais ou reforços horizontais.

Gerção de Áreas

As áreas dos componentes são definidas através dos pontos gerados na etapa anterior. O pré-processador gera uma área básica (ilustrada em azul na figura 6.8) e utilizando-se dois ciclos ("loops") criam-se as demais áreas trasladando a primeira no plano do componente (ilustradas em cinza). A geração das áreas da chapa de face do primeiro

Figura 6.7 – Gerção do Grupo Básico de "m.n.p" Pontos

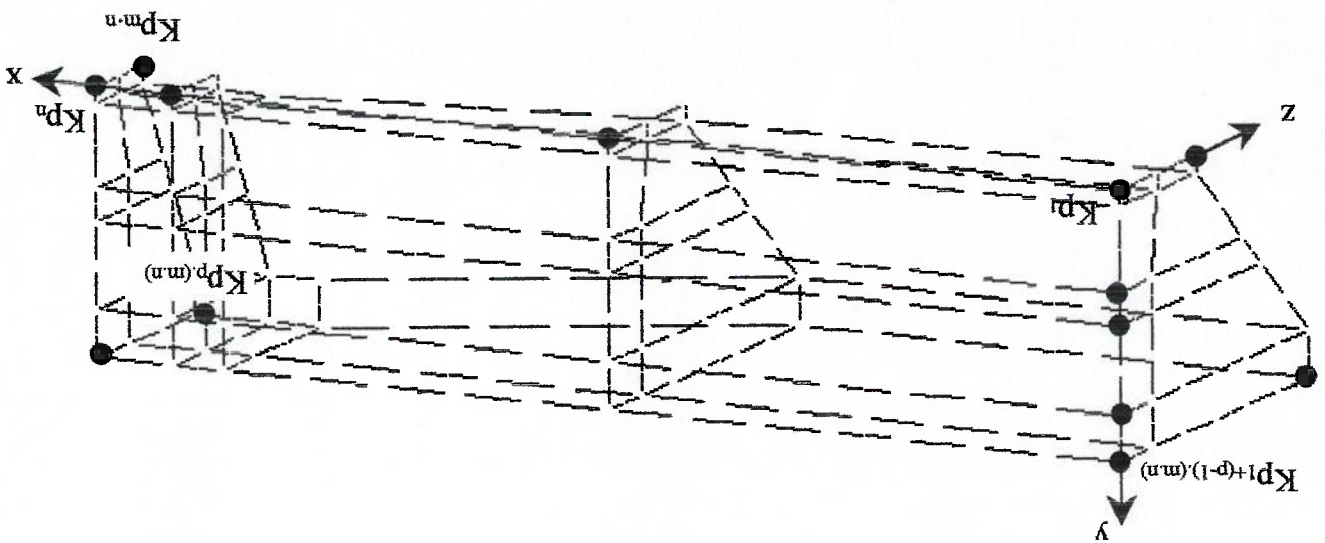
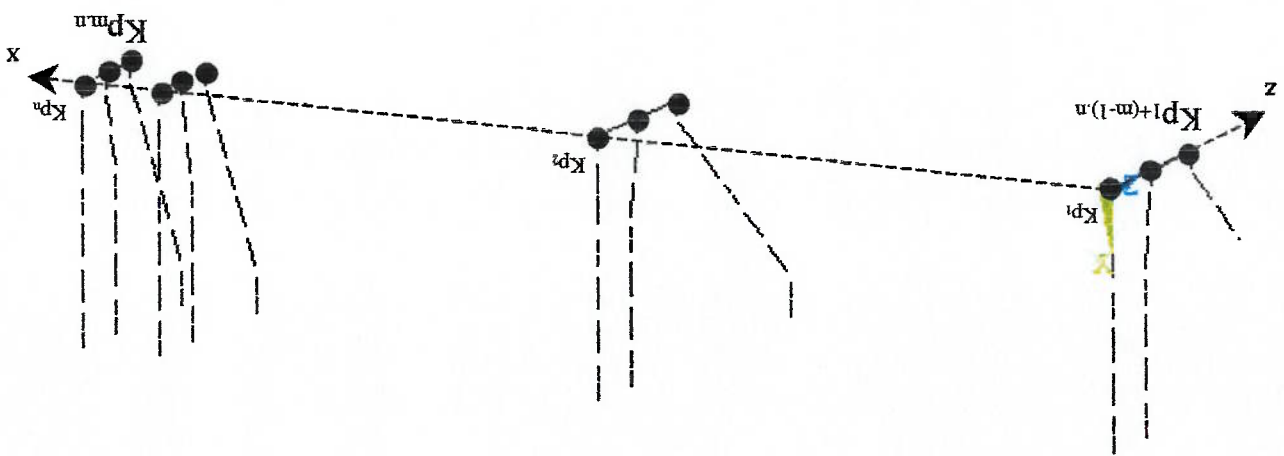


Figura 6.6 – Gerção do Conjunto Básico de "m.n" Pontos



módulo esta ilustrada na figura 6.8, e na figura 6.9 encontram-se ilustradas as áreas dos componentes de um módulo intermediário.

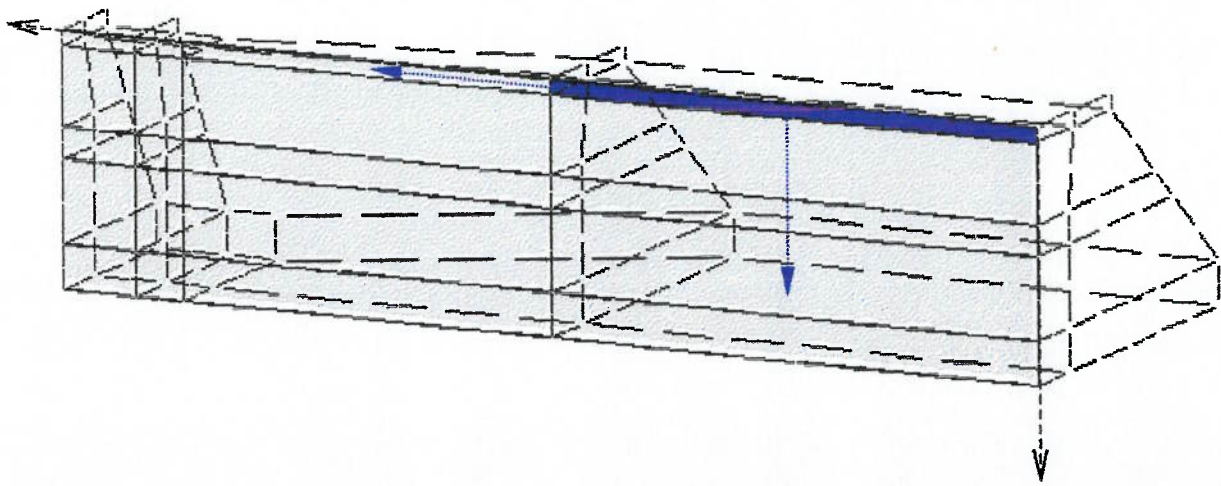


Figura 6.8 – Exemplo de Geração de Áreas

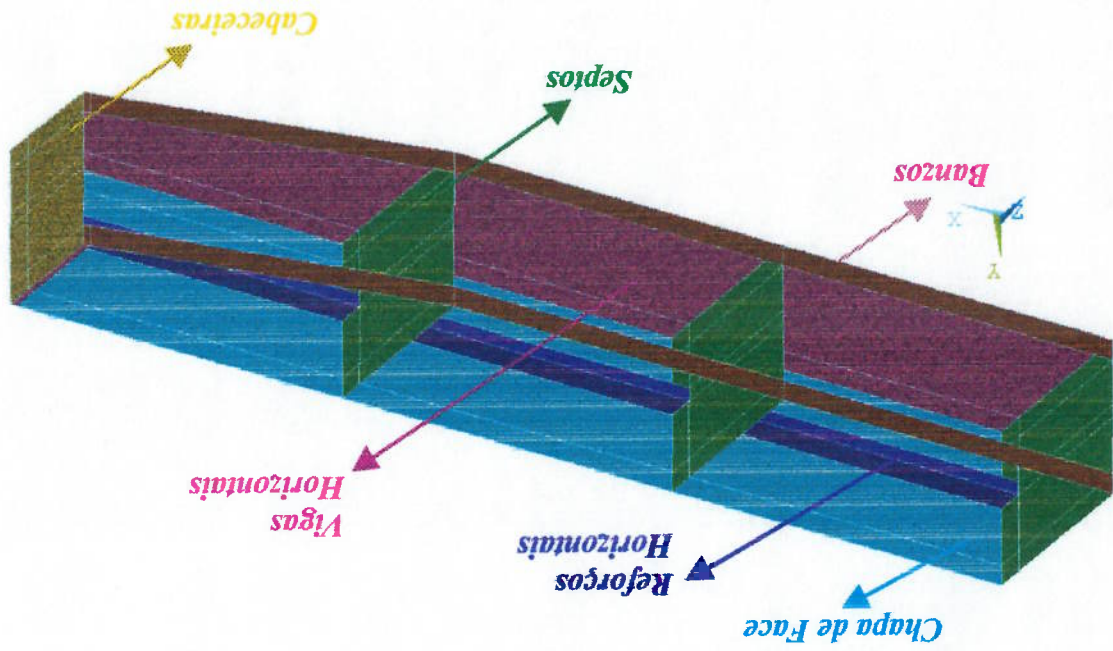


Figura 6.9 – Áreas dos Componentes de um Módulo

### **Geração de Itens Especiais**

Alguns itens como os furos nas vigas horizontais e os eixos de uma comporta vagoão teriam implementação direta muito complexa. Seriam necessárias várias divisões auxiliares que dependeriam da existência ou não de outros componentes, sem a garantia de se obter uma discretização satisfatória. Por este motivo, para a geração de itens especiais foram adotados os seguintes procedimentos:

#### **- Furos nas vigas horizontais:**

Os furos foram gerados utilizando-se a metodologia top-down, mais especificamente, utilizando-se subtração de áreas. Geram-se círculos com diâmetro igual ao desejada nas vigas horizontais, e subtraem-nos das mesmas. Após esta operação, as áreas que compõe as vigas horizontais não são mais mapeáveis, ou seja, definidas por quatro curvas. Por este motivo a discretização definida nestas áreas não será mapeada, e sim de geração livre, podendo gerar alguns elementos triangulares ou distorcidos. Ao utilizar o recurso dos furos, o usuário deverá observar a qualidade da discretização realizada, e alterar o tamanho dos elementos quando necessário.

#### **- Rodas da comporta vagoão:**

Devido à arbitrariedade na posição e quantidade de rodas em uma comporta vagoão, optou-se por não incluir divisões no modelo para defini-las. Devido ao caráter de apoio das rodas, as mesmas foram definidas como condição de contorno, conforme descrito no item 6.1.4.

#### 6.1.4 Carregamento e Condições de Contorno

##### Carregamento

Os únicos carregamentos presentes em uma comporta hidráulica são a carga hidrostática e o peso próprio. A carga hidrostática é imposta utilizando-se um recurso do software ANSYS, onde se define uma pressão  $p_0$  e um gradiente de pressão, cujo módulo é definido por “p.g” e cuja direção é definida pelo eixo vertical da comporta, onde “p” é a densidade do fluido e “g” a aceleração da gravidade. O software automaticamente aplica uma pressão distribuída nos elementos da chapa de face, representando assim a distribuição de pressão no equipamento. O peso próprio da estrutura é aplicado utilizando-se um recurso do software de impor uma aceleração ao modelo na direção vertical.

##### Condições de Contorno

Embora cada projeto possa ter suas particularidades em termos de condições de contorno, adotou-se as mais comumente encontradas. Cabe lembrar que, se necessário, novas condições podem ser incorporadas ao programa, ou mesmo alteradas pelo usuário após a aplicação automática do programa. As condições aplicadas foram apoio vertical na região inferior na chapa de face, condições de contorno de simetria na região central da comporta e apoio lateral na direção do fluxo de água. Esta última condição possui duas alternativas, em função do tipo de comporta: vazio ou ensecadeira.

##### - Comporta ensecadeira

Apoiou-se a comporta na região posterior das vigas cabeceiras, ao longo de seu comprimento.

**- Comporta vagão**

Não será objetivo deste programa analisar em detalhes a roda da comporta e sua interação com a peça fixa do caminho de rolamento, bem como a interação do eixo das rodas com a comporta. O dimensionamento do eixo, roda, rolamento e região da cabeceira que recebe o eixo deve ser realizado considerando-se as concentrações de tensão devido ao contato entre esses componentes. Para apoiar a comporta, utilizou-se o comando “\*GFT” do ANSYS para retornar o número dos nós que estivessem mais próximos dos centros dos eixos da comporta. No caso de comportas vagão existem duas cabeceiras em cada extremidade da comporta de igual dimensões, e, portanto, de discretizações idênticas. Entre cada par de nós (um em cada cabeceira) gerou-se mais um nó e dois elementos de viga, com propriedades de inércia iguais à do eixo utilizado no equipamento. Apoiou-se então a comporta no centro destes eixos. Em uma primeira abordagem apoiou-se a comporta diretamente nas vigas cabeceiras, porém, toda a carga era transferida para a cabeceira interna.

**6.1.5 Solução**

Dentre os diferentes tipos de “solvers” disponíveis no software ANSYS, optou-se por utilizar o PCG (gradientes pré conjugados), devido ao desempenho sensivelmente melhor em modelos com elevado número de graus de liberdade, e desempenho semelhante aos demais “solvers” disponíveis em modelos pequenos. Em todas as comportas analisadas, notou-se que a utilização de um fator de convergência de  $10^{-5}$  foi suficiente para garantir a convergência. Deve-se porém, sempre realizar um cálculo com fator mais rigoroso após a geometria final ser fixada.



### 6.1.6 Pós-Processamento

Como toda análise por elementos finitos, deve sempre haver um engenheiro responsável pela análise dos resultados, não podendo o programa, portanto, ser responsável por informar qual a tensão máxima resultante no modelo. Todavia, para facilitar uma pré-análise, gerou-se rotinas que automaticamente selecionam os grupos de componentes e geram arquivos de plotagens ilustrando as curvas de contorno para os resultados de tensões de Von Mises e deslocamentos encontrados.

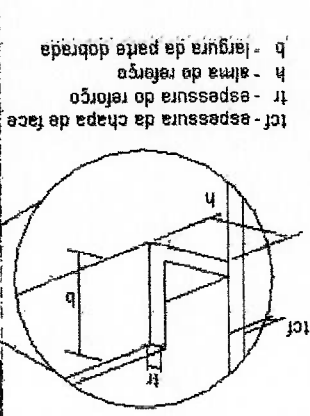
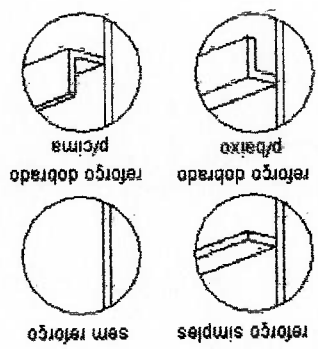
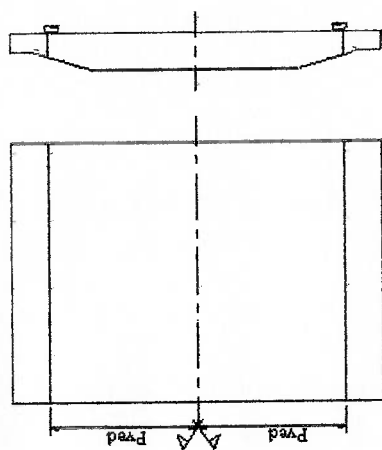
## 6.2 Interface Gráfica

A interface gráfica foi desenvolvida em UIDL (Ansys Interface Design Language). O objetivo da interface gráfica é ler os dados via caixa de diálogos e menus e gerar um arquivo texto a ser lido pelo programa básico. A existência da interface gráfica não apenas facilita a utilização do programa como também valoriza o lado comercial do mesmo. A interface gráfica está dividida em duas partes: menus de acesso e caixas de diálogo. Os menus dividem o acesso às caixas de diálogo, agrupando-as para facilitar o acesso e evitando um aglomerado de informações. Existem basicamente quatro grupos de caixas de diálogo: entrada de dados; carregamento; solução; e pós-processamento. A “entrada de dados” está ainda dividida em três sub-grupos: módulos; componentes; e gerenciamento de arquivos. O sub-grupo componentes divide-se ainda entre os componentes da comporta: chapa de face e reforços horizontais; vigas horizontais; vigas verticais; e banzos. A figura 6.10 ilustra a divisão dos grupos de caixas (menus) e o acesso à caixa de diálogo dos banzos, e a figura 6.11 ilustra a interface gráfica do sistema de ajuda para a chapa de face e reforços.

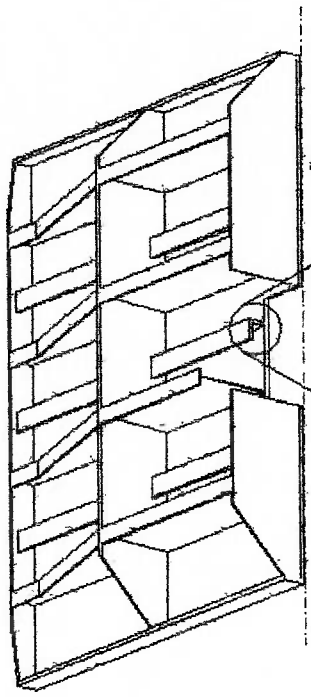




**Chapa de Face**  
**Definição dos componentes**  
**Geração do modelo**



tcf - espessura da chapa de face  
 tr - espessura do reforço  
 h - altura do reforço  
 b - largura da parte dobrada



Pved - posição da vedação

**Figura 6.11 – Exemplo de Tela do Sistema de Ajuda On-Line**

## 6.4 Implementações Adicionais

A elaboração do programa em ADPL possibilita ainda a implementação de funções adicionais a baixo custo. Estas alterações podem ser realizadas a partir da leitura de uma rotina adicional após a geometria ser gerada pelo programa. Ainda que as alterações adicionais não estejam completamente compatíveis com todo o programa, a parametrização de pequenas alterações pode ser útil, sendo implementada definitivamente a posteriori. Segue abaixo exemplos de tais alterações:

- Componentes com variações de espessura: Tais modificações podem ser rapidamente efetuadas selecionando os componentes desejados e utilizando-se as variáveis já existentes que contêm a posição indexada dos componentes. Em comportas com grandes dimensões é comum a utilização de vigas e flanges com variação de espessura, pois aproveitam-se as emendas de chapas para realizar a transição. Em comportas de pequenas dimensões não seria viável utilizar uma emenda de chapa para obter-se pequena redução de peso na estrutura final;

- Utilização de furos com geometrias, posições e quantidades alternativas: Tais modificações podem ser rapidamente efetuadas gerando-se comportas sem furos e utilizando-se da metodologia top-down para gerar os furos;

- Alteração nas condições de contorno: Tais modificações podem ser rapidamente realizadas acrescentando-se, ou substituindo-se as condições de contorno originais do programa, tais como as condições de apoio e variação de pressão. Um exemplo seria uma tampa de fundo, a qual possui carga hidrostática uniforme em sua chapa de face, ou uma grelha apoiada em seus quatro lados; e

- Alteração dos tipos de elementos: Tais modificações podem ser facilmente realizadas definindo-se novos tipos de elementos tais como os quadráticos ou do tipo "p", bem

como substituindo as flanges das vigas e os reforços horizontais por elementos de treliça.

## 6.5 Testes

A figura 6.12 ilustra a versatilidade do pré-processador exibindo alguns modelos gerados pela variação de parâmetros como o número de vigas horizontais e a altura total da comporta. Conforme citado no item 6.1, é importante ressaltar a flexibilidade do pré-processador gerado, não somente em termos de parâmetros geométricos dimensionais, mas também na quantidade e existência de determinados componentes, tais como os banzos, reforços horizontais e variações de altura das vigas.

Como exemplo, analisou-se uma comporta com as seguintes características:

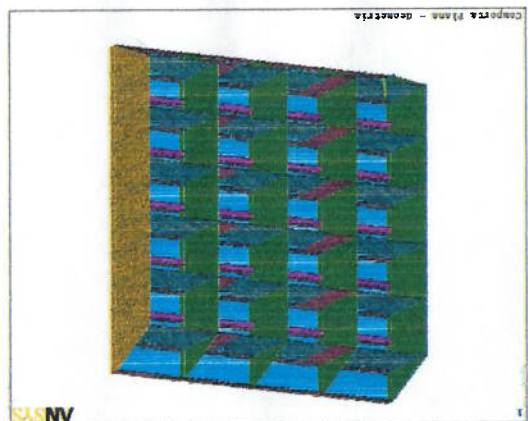
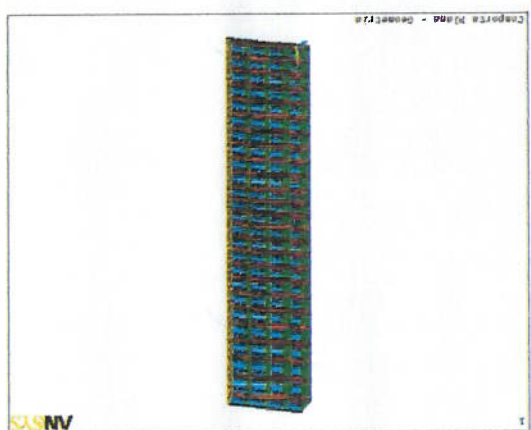
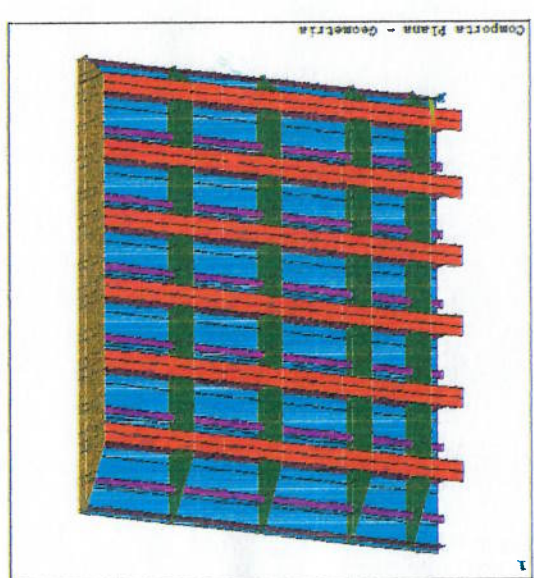
- 4,6 m de altura;

- 6,9 m de vão livre;

- 35,2 mca (345,3 kPa) de carga (pressão) hidrostática na soleira.

Para este equipamento utilizou-se uma concepção com 5 vigas horizontais, conforme ilustrado na figura 6.13. A tabela 6.1 apresenta os dados obtidos durante análise da comporta variando-se o parâmetro "tamanho do elemento" nos dados de entrada. Nesta tabela estão relacionadas as tensões obtidas nos principais componentes da comporta: chapa de face, vigas horizontais e banzos. Note que para este equipamento utilizou-se um número menor de vigas horizontais em relação ao indicado pela equação 3.4 pois um número maior de vigas acarretaria em vigas horizontais muito próximas, fato este que dificultaria as operações de soldagem.

Figura 6.12 - Exemplos de Geometrias Geradas com o Pré-Processador



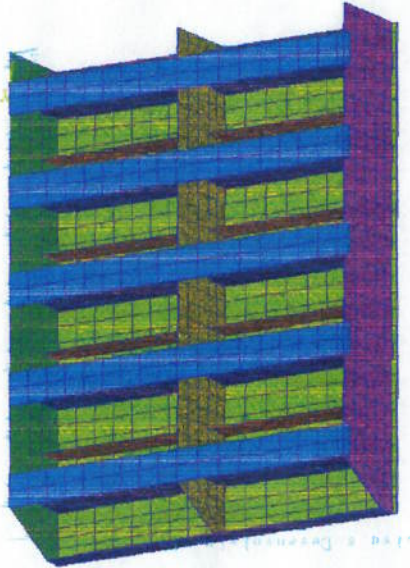
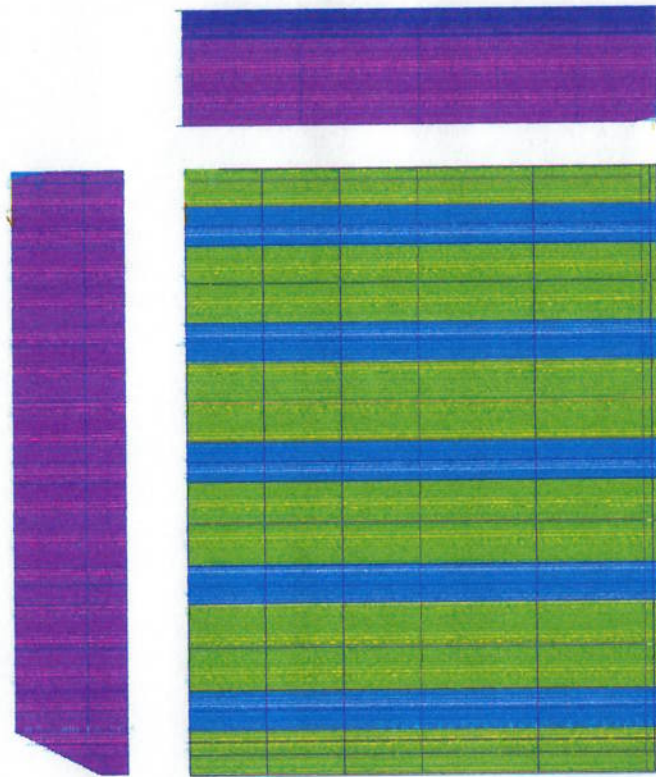


Figura 6.13 - Estrutura e Modelo de Elementos Finitos Utilizados como Exemplo

Tabela 6.1 – Avaliação da Discretização

| Tamanho do elemento [m] | Tensão de von Mises [MPa] |                 |               | Flexão [mm]     |
|-------------------------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------------|
|                         | Banzo                     | Viga Horizontal | Chapa de Face |                 |
| 0,500                   | 170                       | 168             | 170           | 10,1            |
| 0,250                   | 172                       | 168             | 170           | 10,1            |
| 0,125                   | 175                       | 166             | 172           | 10,1            |
|                         |                           |                 |               | Viga Horizontal |

A figura 6.14 ilustra a distribuição de tensões de Von Mises no equipamento. A tabela 6.2 apresenta a distribuição de carga nas vigas horizontais. Nesta tabela apresenta-se:

- Carga absoluta: Carga, em  $kN$ , absorvida por cada viga. A soma de todas as cargas equivale à metade da carga hidrostática total (equação 3.8) pelo fato do modelo utilizar condições de contorno de simetria;
- Carga relativa: Razão entre a carga absorvida pela viga e a carga total; e
- Diferença percentual: Razão entre a carga da viga e a carga da viga menos carregada (neste caso, a viga 3).

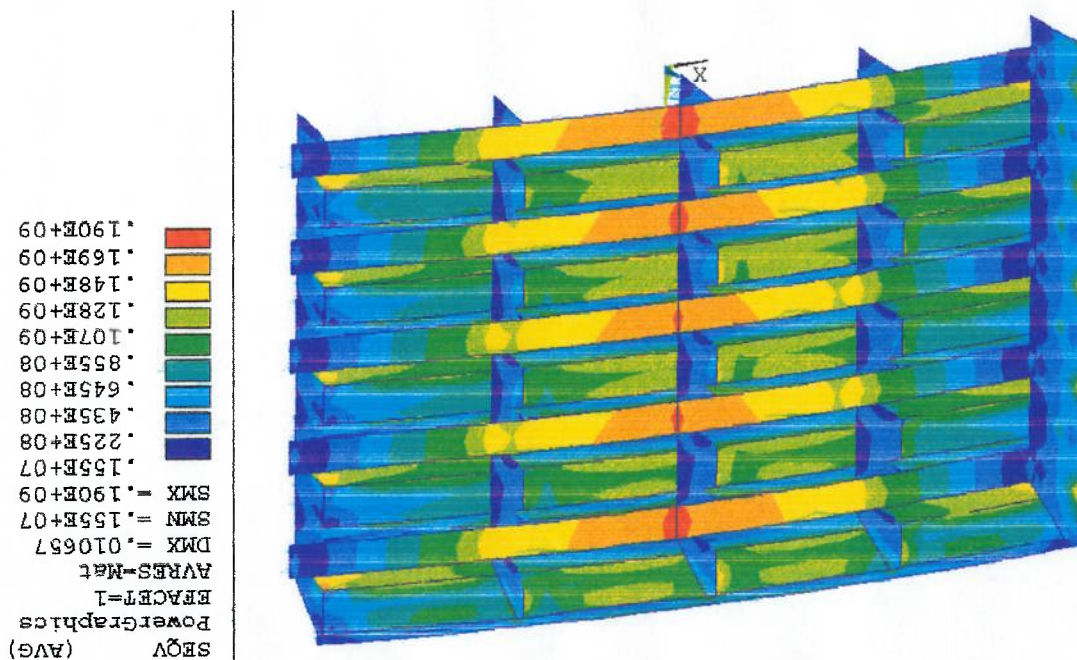
Observa-se que o posicionamento de vigas segundo o método dos trapézios (equação 3.6) resulta em vigas internas menos carregadas em relação às vigas das extremidades inferior e superior. A maior diferença de carregamento neste caso foi de 8,8% entre as vigas 3 e 5.



| Viga | Carga Absoluta [kN] | Carga Relativa | Diferença % |
|------|---------------------|----------------|-------------|
| 1    | 1053                | 20,5%          | 106,7%      |
| 2    | 1019                | 19,9%          | 103,3%      |
| 3    | 986                 | 19,2%          | 100,0%      |
| 4    | 996                 | 19,9%          | 101,0%      |
| 5    | 1073                | 20,5%          | 108,8%      |

Tabela 6.2 – Distribuição de carga

Figura 6.14 - Distribuição de Tensões (Von Mises)



## 7 Estabilidade Estrutural

Ao otimizarmos uma estrutura do tipo grelha chapada, surge um novo problema: qual o coeficiente de segurança quanto à estabilidade estrutural? Para tal questionamento há duas possíveis verificações:

- Utilizar os valores de tensão obtidos pela análise de elementos finitos e recorrer a tabelas analíticas/empíricas;

- Realizar uma análise numérica de estabilidade

Como o objetivo deste trabalho é automatizar a análise de estruturas utilizando preferencialmente ferramentas numéricas, a segunda opção foi abordada com mais detalhes.

### 7.1 Tipos de Flambagem

É comum a seguinte classificação de tipos de flambagem, ilustradas na figura 7.1:

- flambagem global: caracterizada pela desestabilização de uma coluna submetida a compressão ou viga submetida à flexão;
- flambagem local: caracterizada pela desestabilização local de uma placa da estrutura;

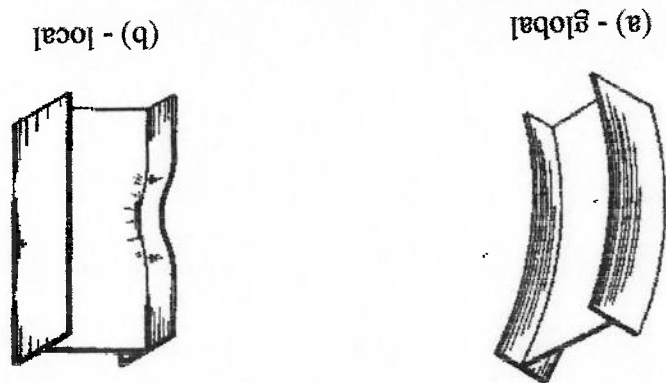


Figura 7.1 - Tipos de Flambagem



Teoricamente, na estrutura de uma comporta existe o risco de flambagem em três regiões: alma das vigas horizontais; flanges das vigas horizontais; reforços horizontais. As vigas e os reforços horizontais estão submetidos à flexão, e as placas formadas entre as vigas verticais, bem como os banzos (flanges) estão sob o risco de flambagem local. Porém, na prática, devido à relação entre a altura e espessura destes componentes, somente a alma da viga está sujeita à flambagem (nos demais componentes a estrutura atingiria o limite de escoamento antes da desestabilização).

## 7.2 Análise Numérica de Estabilidade

Na análise de estabilidade estrutural recorre-se ao uso do fato de que os esforços de membrana afetam a rigidez à flexão. Assim, admitindo que tal efeito é introduzido no equilíbrio estático (de um modelo de elementos finitos) por uma nova matriz de rigidez denominada  $[K_G]$ , a qual modifica a matriz original  $[K]$ , podemos escrever a expressão apresentada na equação 7.1. Neste item estão apresentadas as principais etapas para compreensão de uma análise numérica de estabilidade. Uma abordagem teórica mais detalhada pode ser encontrada em Clough [11] e Bathe [6].

$$[K - K_G(N)] \cdot \bar{Q} = P \quad (7.1)$$

onde

$\bar{Q}$  – deslocamentos nodais

$P$  – carregamento externo

$N$  – esforços de membrana (causados por  $P$ )

Da observação da equação 7.1, verifica-se que pode haver carregamento externo  $P$  que, através de  $N$ , torne nulo o determinante de  $[K - K_G]$ , tornando indeterminado o equilíbrio

expresso na equação. Defina-se, assim, a estabilidade elástica inicial pelo estabelecimento de um problema matemático de autovalor. A título de exemplo, consideremos o caso de estruturas reticuladas compostas por vigas no plano cujo elemento típico pode ser observado na figura 7.2.

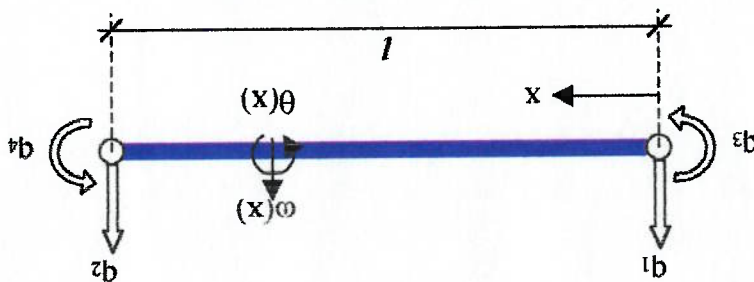


Figura 7.2 - Elemento de Viga

Assim, considerando-se o pórtico plano da figura 7.2 pode-se adotar a seguinte

expressão:

$$\Delta(x) = H(x) \cdot \bar{Q} \quad (7.2)$$

onde:

$\Delta$  - vetor dos deslocamentos no interior do elemento =  $\{\omega(x), \theta(x)\}^T$

$\bar{Q}$  - vetor dos deslocamentos da extremidade =  $\{q_1, q_2, q_3, q_4\}^T$

H - matriz das funções de forma

De tal sorte que:

$$H = \begin{Bmatrix} h_\theta \\ h_\omega \end{Bmatrix} \quad (7.3)$$

sendo

$$\bar{Q}(x) = h^e(x) \bar{Q} \quad (7.4)$$

$$\theta(x) = \frac{d\omega(x)}{dx} = h_{\theta}(x) \cdot \bar{O} \quad (7.5)$$

Agora, pela aplicação do Princípio dos Trabalhos Virtuais, a matriz de rigidez, para uma

viga prismática de seção constante, é obtida de:

$$[K] = E.I. \int_0^l \begin{pmatrix} d_2 h_T^* \\ d_2 h_w^* \\ d_2 h^* \end{pmatrix} dx = E.I. \int_0^l \begin{pmatrix} dh_T^* \\ dh_w^* \\ dh_{\theta}^* \end{pmatrix} dx \quad (7.6)$$

Onde as funções de forma para a interpolação da flecha  $\omega$  e a rotação  $\theta$  são,

respectivamente:

$$h_w = \left\{ \left( 1 - 3\xi_2^2 + 2\xi_3^3 \right) \left( 3\xi_2^2 - 2\xi_3^3 \right) - x(\xi - 1)^2 \right\} x(\xi - \xi_2^2) \quad (7.7)$$

$$h_{\theta} = \frac{dx}{dh_w} \quad (7.8)$$

sendo

$$\xi = \frac{l}{x} \text{ (transformação para coordenada local normalizada)} \quad (7.9)$$

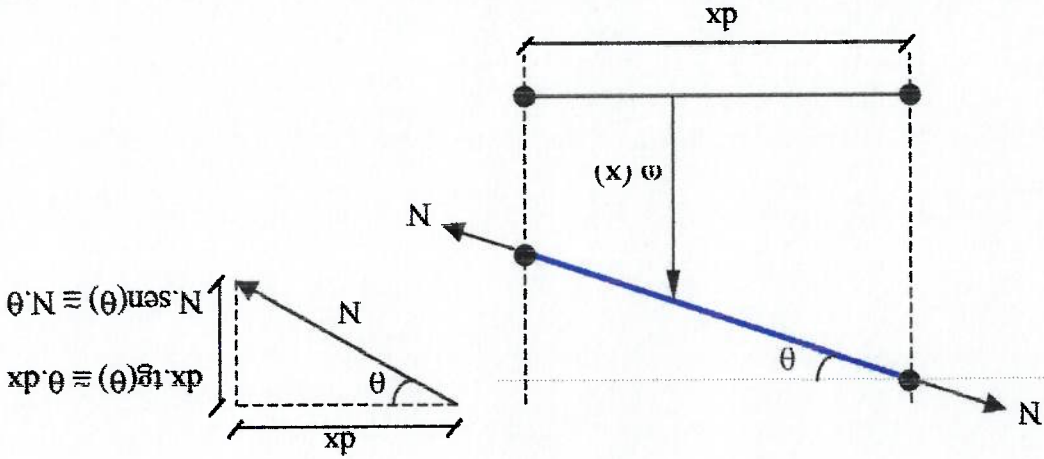


Figura 7.3 - Elemento de Viga em sua Posição Deformada

O cálculo da matriz de rigidez  $K$  apresentado na equação 7.6 computa, apenas, a energia potencial de deformação elástica relativa ao trabalho dos momentos fletores ao longo da extensão da viga (0,1). Para se chegar à concepção da matriz de rigidez geométrica  $K_G$ , é necessário, adicionalmente, computar o trabalho realizado pela força normal  $N$  durante o deslocamento lateral por flexão da viga. Assim, recorrendo-se novamente ao uso do Princípio dos Trabalhos Virtuais, e observando-se a figura 7.3, desenvolve-se a seguinte dedução de  $K_G$ :

Sejam,

T – O trabalho realizado pela força normal  $N$ , suposta conhecida, e constante sobre todo o vão da viga

U – O trabalho realizado pelos esforços de extremidade relativos à matriz  $K_G$

Assim

$$T = \int_0^L N \theta^2 dx = \frac{2}{1} N \int_0^L \theta^2 dx \quad (7.10)$$

$$U = \sum_1^j \sum_1^i \frac{2}{1} K_{\theta_i \theta_j} \bar{\theta}_i \bar{\theta}_j = \frac{2}{1} K^o \bar{\theta} \bar{\theta} \quad (7.11)$$

Agora, como

$$\theta = h_\theta \bar{\theta} \Rightarrow \theta^2 = \bar{\theta}^T h_\theta^o h_\theta \bar{\theta} \quad (7.12)$$

portanto

$$T = \frac{2}{1} \bar{\theta}^T \left[ N \int_0^L h_\theta^o h_\theta dx \right] \bar{\theta} \quad (7.13)$$

fazendo  $T = U$  (A) tem-se

$$K_G = N \int_0^L h_\theta^o h_\theta dx = N \int_0^L \left( \frac{d h_\theta^o}{dx} \right) \left( \frac{d h_\theta}{dx} \right) dx \quad (7.14)$$

Resultando, finalmente, com o uso da equação 7.7 na equação 7.14:

$$K_G = N \begin{bmatrix} 6 & 5I & 6 & 1 & 10 & 10 \\ 5I & 6 & 1 & 1 & 10 & 10 \\ 6 & 1 & 1 & 1 & 10 & 10 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

Observando a equação 7.15, é importante notar que a matriz de rigidez geométrica é função apenas do carregamento e da geometria, não dependendo do material, e que ainda, varia linearmente com N. Logo, como N depende do carregamento externo P, e também varia linearmente com ele, a equação 7.1 pode ser reescrita por:

$$[K - \lambda K_G(N)]Q = \lambda P \quad (7.16)$$

cujos valor crítico do carregamento externo, o qual causa flambagem, é dado por

$$P_{cr} = \lambda P \quad (7.17)$$

sendo  $\lambda$  o mais baixo autovalor do problema  $[K - \lambda K_G]$ .

Por outro lado, como N é função de P, antes da solução do autoproblema é necessário realizar uma análise estática simples para, dado P, obter N. Após isto, conhecida  $K_G(N)$ , deve-se obter a menor raiz de:

$$\det[K - \lambda K_G] = 0 \quad (7.18)$$

Do exposto, fica claro que sobre todo o carregamento externo definido será aplicado o multiplicador  $\lambda$ , até que se produza a instabilidade. Assim, cargas invariantes, tais como o peso próprio, são de difícil contabilização neste processo.

Uma alternativa útil para a solução de tal problema pode ser encontrada em Dias [9], onde o carregamento aplicado é subdividido em duas categorias, como se faz na equação 7.16 modificada para a versão abaixo:

$$[K - K_0(N_0)\lambda - K_0(N)]\tilde{Q} = \lambda P \quad (7.19)^t$$

onde

$N_0$  - esforços de membrana decorrentes de aplicação de cargas passivas ( $P_0$ )  
 $N$  - esforços de membrana decorrentes de aplicação de cargas ativas ( $P$ )

Nesse contexto, classificam-se como cargas passivas aquelas que modificam a rigidez original mas não causam, por si próprias, instabilidade; tem valor invariante e, portanto, não são afetadas pelo autovalor  $\lambda$ . Por outro lado, cargas ativas são aquelas que, em se modificando a rigidez original, podem vir a causar instabilidade, acarretando que, afetadas pelo multiplicador  $\lambda$ , terão seus valores críticos determinados pela solução do auto-problema cujas raízes, ditos autovalores, são definidos como a solução de:

$$\det[K - K_0(N_0)\lambda - K_0(N)] = 0 \quad (7.20)$$

Da observação da equação 7.20, conclui-se que as cargas críticas de flambagem, que são os valores críticos das cargas ativas, dependem do nível de solicitação imposto pelas cargas passivas. A figura 7.4 ilustra um caso onde o peso próprio é, obviamente,

---

<sup>t</sup> Convém ressaltar que neste texto, como normalmente é considerado em análises de flambagem, forças normais de compressão são positivas, ao contrário do usualmente empregado na Resistência dos

invariante, e onde se deseja conhecer o valor crítico da carga  $F$  de compressão aplicada na extremidade livre. Na situação "a" o peso próprio, agindo como carga passiva, causa tração na viga aumentando sua capacidade de resistir à instabilidade por flambagem, enquanto que em "b" o inverso acontece. Logo, as soluções para  $F_{cr}$  para ambos os casos são absolutamente distintas, e tanto mais distintas quanto maior o efeito relativo do peso próprio. Finalizando este item, é importante enfatizar que a análise completa de um problema de instabilidade por flambagem, como aqui formulado, envolve três fases: análise estática linear para determinação dos esforços de membrana ( $N_0$ ) decorrentes das cargas passivas ( $P_0$ ); cálculo dos esforços de membrana ( $N$ ) decorrentes das cargas ativas ( $P$ ), cujos valores foram inicialmente arbitrados; e análise de autovalor para cálculo das cargas críticas:  $P_{cr} = \lambda.P$ . Se as cargas arbitradas forem maiores que a de instabilidade resultará em pelo menos um autovalor menor que a unidade.

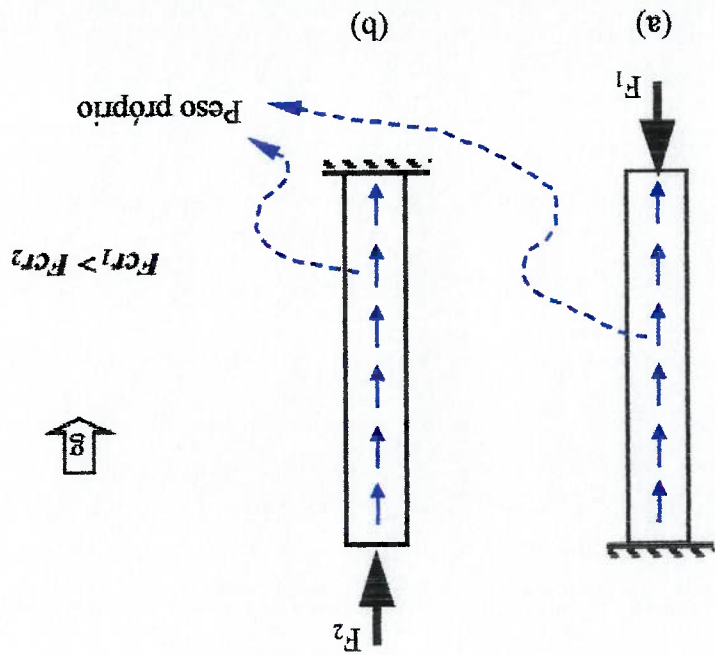


Figura 7.4 - Exemplo de Cálculo com Cargas Passivas



Alguns programas de elementos finitos, como o Ansys, não possuem esta distinção entre cargas ativas e passivas. Para resolver este problema podemos adotar a seguinte técnica iterativa, onde "i" indica a iteração corrente:

- Gerar um modelo de cálculo utilizando as cargas ativas P e aplicando as cargas passivas  $P_0$  multiplicando-as por um fator  $\phi_i$

- Obter o autovalor  $\lambda_i$

- Conforme explicado anteriormente, a carga crítica da estrutura será representada por  $\{\lambda_i, P, \lambda_i, \phi_i, P_0\}$ ; e

- Se  $\lambda_i \cdot \phi_i \neq 1$  devemos adotar:  $\phi_{i+1} > \phi_i$ , se  $\lambda_i \cdot \phi_i < 1$

$$\phi_{i+1} < \phi_i, \text{ se } \lambda_i \cdot \phi_i > 1$$

Repete-se este procedimento até que  $\lambda_n \cdot \phi_n = 1$ , ou seja a carga crítica da estrutura será

$$\text{representada por } \{\lambda, P \text{ e } \lambda_n \cdot \phi_n, P_0\} = \{\lambda, P \text{ e } P_0\}$$

### 7.3 Metodologia Aplicada

Para gradativamente atingir o objetivo de compreender e atestar a análise de instabilidade para uma comporta, pela aplicação do MBF segundo os preceitos anteriormente vistos, adotou-se a metodologia a seguir:

- Validação da análise numérica através da comparação com problemas de solução analítica conhecida (coluna e placa)
- Verificação de uma comporta inteira
- Verificação de uma região da comporta com alterações geométricas



### 7.3.1 Utilização em Casos Simples de Solução Conhecida

#### Flambagem de Coluna

Mesmo não sendo o tipo de flambagem que surge em comportas hidráulicas, este tipo de problema foi abordado por possuir solução analítica bem conhecida, e ser de simples implementação, possibilitando verificar a aplicabilidade da ferramenta numérica. A figura 7.5 ilustra um caso simples de ser avaliado: uma coluna bi-apoiada submetida a uma carga de compressão.

Pela teoria de flexão de vigas temos

$$d^2y + \frac{M}{EI} = 0 \quad (7.21)$$

ou seja

$$d^2y + \frac{N}{EI}y = 0 \quad (7.22)$$

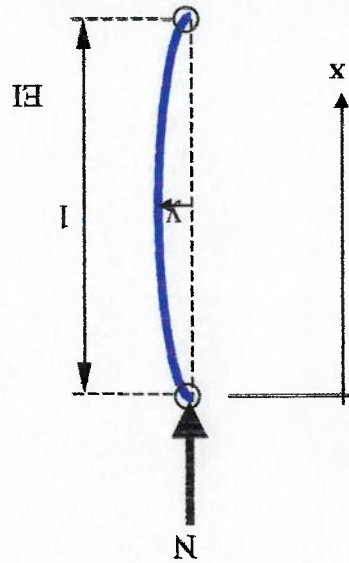


Figura 7.5 - Viga Bi-Apoiada Submetida à Compressão

tomando  $k^2 = \frac{N}{EI}$  temos como solução desta equação diferencial de segunda ordem

$$y = K_1 \text{sen } k \cdot x + K_2 \text{cos } k \cdot x \quad (7.23)$$

No caso de uma viga bi-apoiada, temos como condições de contorno.

$$\begin{aligned} x = 0 \quad y = 0 & \quad \therefore K_2 = 0, \\ x = l \quad y = 0 & \quad \therefore 0 = K_1 \text{sen } kl \end{aligned} \quad (7.24)$$

Existem três possibilidades para solução deste sistema:

- a)  $K_1 = 0 \therefore y = 0$ . Esta seria a resposta encontrada pela teoria de primeira ordem, ou seja, sem deslocamento lateral;
- b)  $kl = 0 \therefore k = 0 \therefore N = 0$ . Neste caso não haveria força de compressão aplicada;
- c)  $kl = n\pi$ . Esta seria a solução de interesse para este problema.

Tomando  $kl = n\pi$  temos

$$\frac{N}{EI} = k^2 = \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 \quad (7.25)$$

ou seja

$$N_{\text{critico}} = \frac{n^2 \pi^2 \cdot EI}{l^2} \quad (7.26)$$

Para cada valor inteiro positivo de  $n$ , teremos cargas de flambagem associadas. Para um projeto de engenharia, normalmente, a carga crítica é a primeira, ou seja, para  $n = 1$ .

Neste caso teremos

$$N_{critical} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \text{ e } \gamma = K_1 \text{ sen } \frac{l}{2} \quad (7.27)$$

Esta carga crítica para colunas também é conhecida como carga crítica de Euler ( $N_E$ ).

em homenagem ao matemático que a deduziu pela primeira vez.

Para comparar os resultados entre a formulação analítica e a numérica apresentada,

utilizou-se como exemplo uma viga com as seguintes características:

$$- E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ N.m}^{-2}$$

$$- I = 8,33 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4$$

$$- L = 1 \text{ m}$$

Análiticamente obtemos um valor de carga crítica:

$$N_{critical} = \frac{\pi^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 8,33 \cdot 10^{-13}}{1^2} = 1,69 \cdot N \quad (7.28)$$

Modelando-se esta viga pelo método dos elementos finitos, e utilizando-se a solução por um auto-problema, obteve-se resultado equivalente, conforme pode ser observado no teste de convergência da figura 7.6. É importante notar que, mesmo para um modelo com apenas três nós, a diferença percentual com relação ao valor analítico é de menos de 1%.

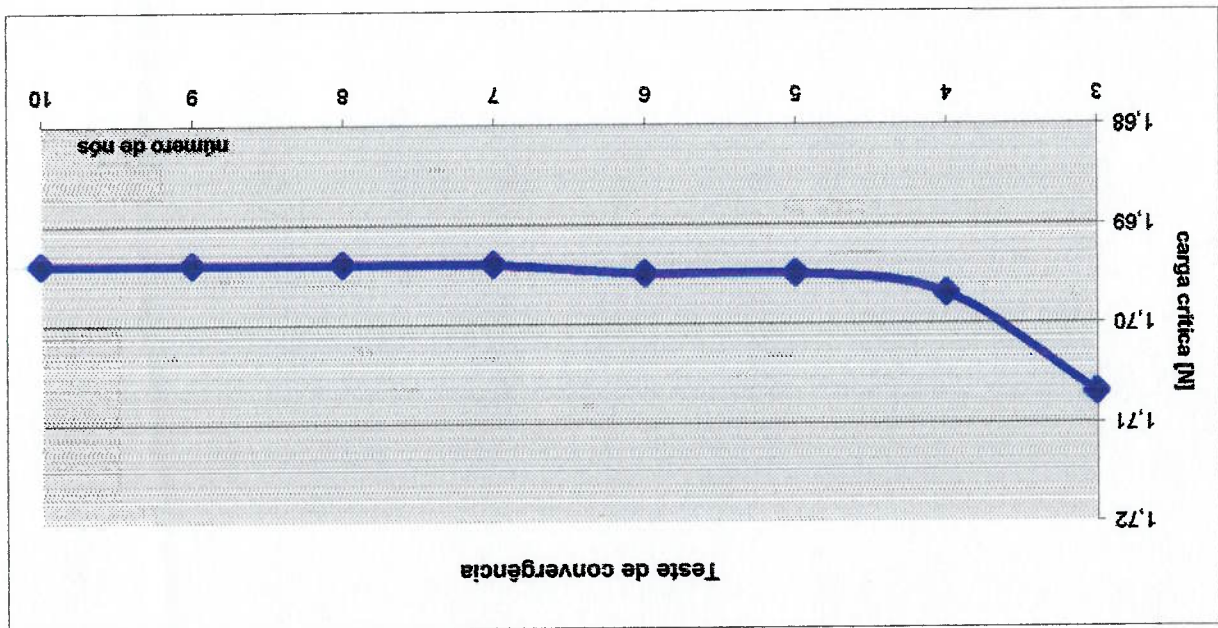
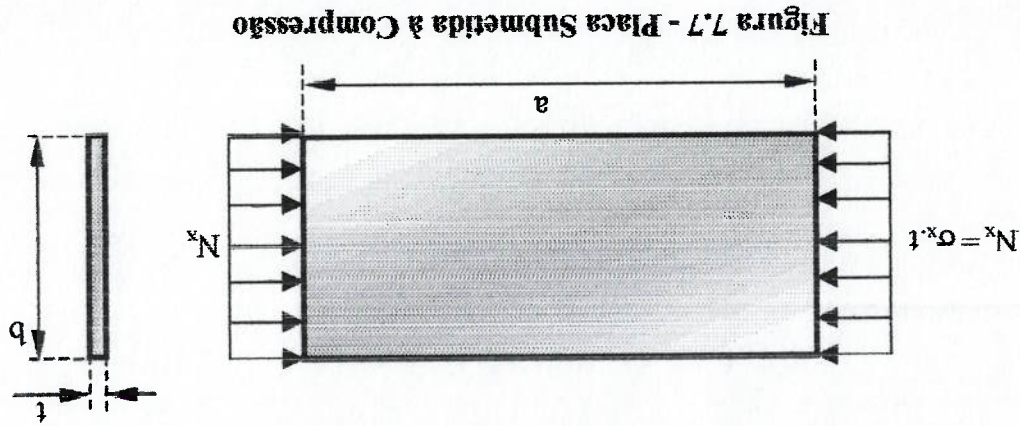


Figura 7.6 - Teste de Convergência para Coluna – Solução de um Auto-Problema

Flambagem de Placa – Compressão simples

Analogamente à equação 7.22 apresentada para colunas, a situação de equilíbrio para uma placa simplesmente apoiada submetida à compressão, conforme ilustrado na figura 7.7, pode ser representada pela equação 7.29. Timoshenko [10] apresenta a solução deste problema nas equações 7.30 e 7.31, representando a forma da estrutura desestabilizada e a carga crítica de flambagem, respectivamente.

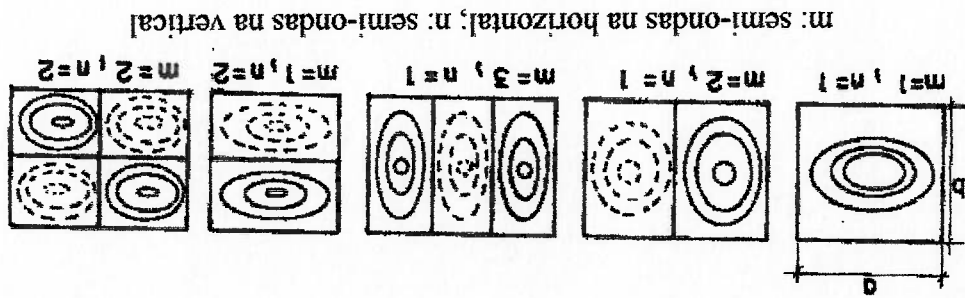


onde

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} - \text{rigidez a flexão da placa}$$

$m, n$  - número de semi-ondas (portanto inteiro positivo) na configuração

deformada da placa, conforme ilustrado na figura 7.8



$m$ : semi-ondas na horizontal;  $n$ : semi-ondas na vertical

Figura 7.8 - Ilustração dos Modos de Vibração de Placas, Manson [8]

$$(7.29) \quad \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{D}{1} N_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}$$

$$(7.30) \quad \omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \operatorname{sen} \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi y}{b} \right)$$

$$(7.31) \quad (N_x)_{cr} = \frac{\pi^2 a^2 D}{m^2} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2$$

Como a carga crítica de interesse é a de menor valor, adota-se  $n = l$ , resultando na equação 7.32, onde para cada relação  $\frac{b}{a}$  haverá um valor de  $m$  que tornará  $(N_x)_{cr}$  a carga crítica.

$$(N_x)_{cr} = \frac{\pi^2 D}{a^2} \left( m + \frac{m b^2}{a^2} \right) \quad (7.32)$$

De forma análoga, Erbiste [1], Manson [8] e Pfeil [7] apresentam o resultado deste

problema segundo a equação 7.33.

$$\sigma_n = k_o \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{b}{a} \right)^2 \quad (7.33)$$

onde

$$\sigma_n = \frac{(N_x)_{cr}}{t} - \text{tensão crítica de flambagem}$$

$$k_o - \text{constante função de } m \text{ e da relação } \frac{b}{a}$$

Para o cálculo de  $k_o$  Erbiste [1] e Manson [8] apresentam a tabela 7.1, enquanto Pfeil [7] apresenta o gráfico ilustrado na figura 7.9. A utilização da constante  $k_o$  representa uma aproximação da equação 7.32, porém de fácil aplicação por engenheiros de projeto.



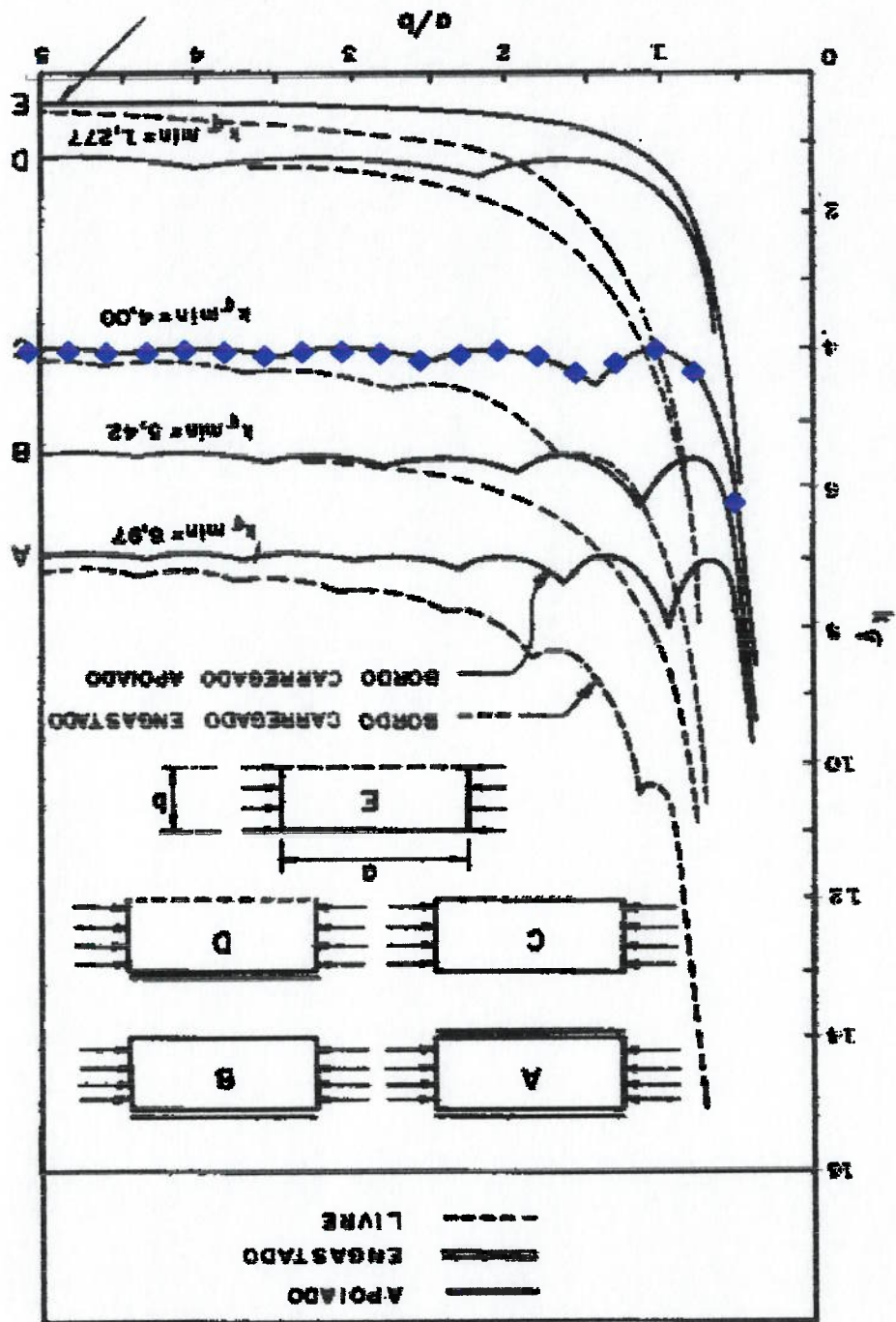


Figura 7.9 – Gráfico para Avaliação de  $k_g$ , Freil [7]

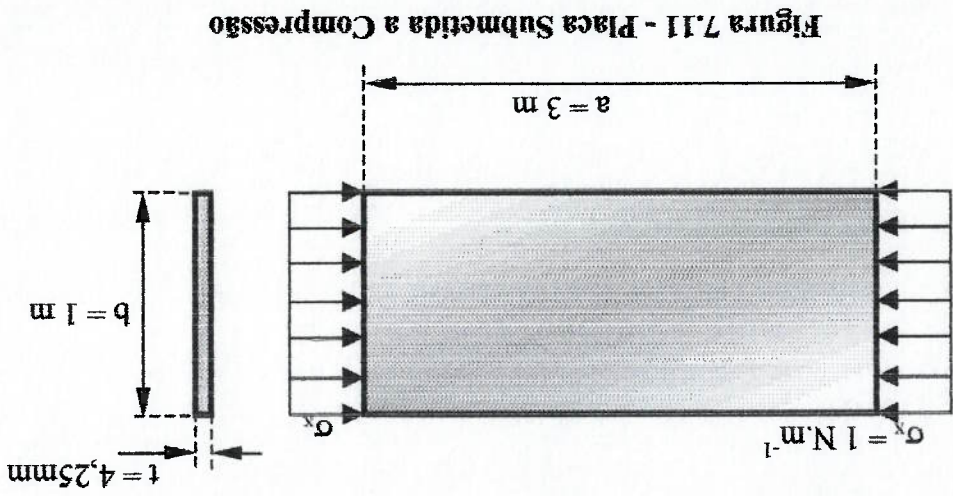
◆ – Valores obtidos numericamente

Tabela 7.1 - Tabela para Avaliação de  $k_{\psi}$ , Erbiste [1], Mansos [8]

| CARGA |   | tensão de | região de              | coeficiente de  |
|-------|---|-----------|------------------------|---|
|       |   | flambagem | validez                | flambagem   |
| 1     | Tensões de compressão linearmente distribuídas, $0 \leq \psi \leq 1$  |           | $\alpha \geq 1$        | $k = \frac{8,4}{\psi + 1,1}$                                |
| 2     | Tensões de compressão e de tração linearmente distribuídas com predominância de compressão $-1 < \psi < 0$  |           | $\alpha < 1$           | $k = \frac{1}{\alpha + 1,1} \frac{1}{\psi + 1,1}$           |
|       | Tensões de compressão e de tração linearmente distribuídas com predominância de tração $\psi < -1$  |           | $\alpha < \frac{2}{3}$ | $k = \frac{15,87 + 1,87}{\alpha^2} + \frac{8,60}{\alpha^2}$ |
| 3     | Tensões de compressão e de tração linearmente distribuídas com valores extremos de igual valor $\psi = -1$ ou predominantemente de tração $\psi < -1$ |           | $\alpha > \frac{3}{2}$ | $k = 23,9$  |
|       | Tensões de cisalhamento uniformemente distribuídas  |           | $\alpha < 1$           | $k = 4,00 + \frac{4,00}{\alpha^2}$                          |
| 4     |   |           |                        | coeficiente de flambagem                                    |

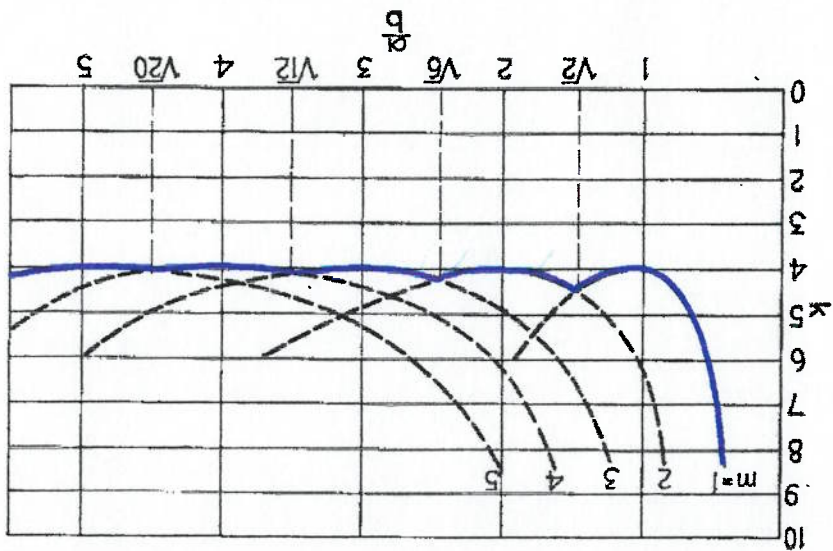
Observando-se o gráfico da figura 7.9, pode-se perceber uma alteração de comportamento no fator  $\alpha$  nas curvas apresentadas, onde, por exemplo, aparecem máximos e mínimos locais na curva "C". Observando-se a equação 7.32, pode-se perceber que para cada valor de  $\frac{a}{b}$ , existirá um valor de  $m$  que torne mínima a expressão. O gráfico da figura 7.10 apresenta as várias curvas variando-se o parâmetro





Para comparar os resultados entre a formulação analítica e a numérica apresentada, utilizou-se como exemplo uma placa de aço ( $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ N.m}^{-2}$ ) apoiada em seus quatro lados conforme as características geométricas ilustradas na figura 7.11.

**Figura 7.10 - Comportamento das Placas - Timoshenko [10]**



para cada relação  $\frac{a}{b}$ .

$m$ . Da observação deste gráfico pode-se concluir qual valor de  $m$  deve ser considerado

Utilizando o gráfico apresentado na figura 7.10, conclui-se que o valor de  $m$  a ser utilizado é três. Substituindo-se os valores geométricos e propriedades de material na equação 7.32 encontra-se  $Ncr^{analítico} = 57,15 \text{ kN.m}^{-1}$ .

Modelou-se esta placa pelo método dos elementos finitos considerando-se um carregamento de  $1 \text{ N.m}^{-1}$  em sua lateral, conforme ilustrado na figura 7.11. Utilizando-se a solução por um autoproblema e realizando-se uma análise de convergência, obtive-se como resultado o gráfico ilustrado na figura 7.12. O eixo horizontal do gráfico representa o número de divisões no lado maior da placa. O número de divisões do lado menor foi determinado de forma a manter a razão de aspecto dos elementos próxima da unidade. Conforme pode ser observado no gráfico, houve convergência para um valor de  $Ncr^{numérico} = 57,15 \text{ kN.m}^{-1}$ , equivalente ao analítico. É interessante observar que mesmo utilizando-se apenas oito divisões no lado maior da placa, obtém-se um valor correspondente a 95% do analítico.

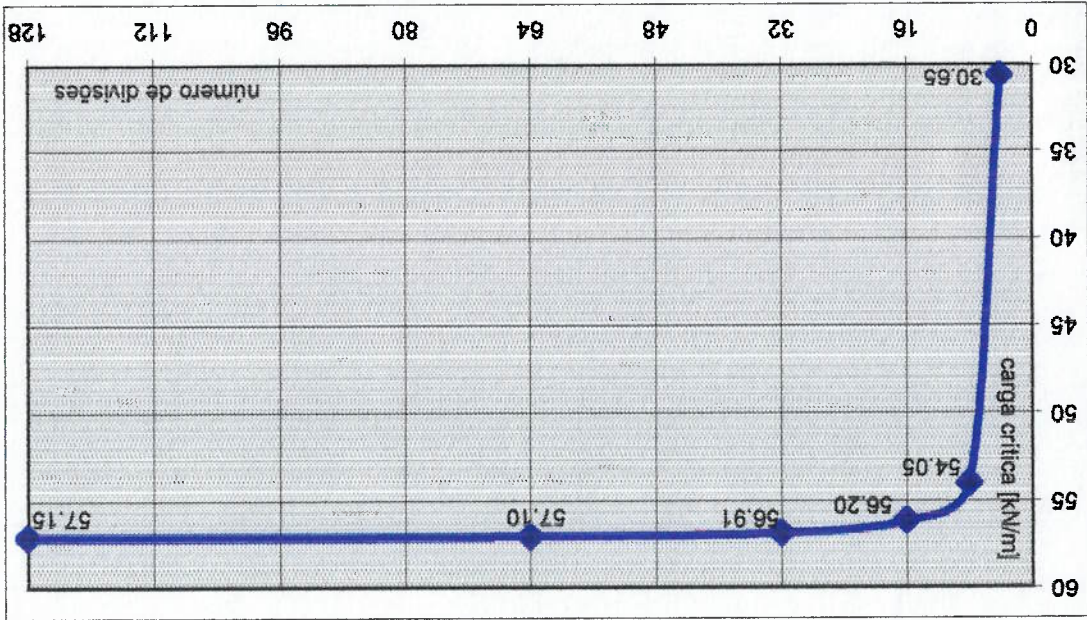


Figura 7.12- Teste de Convergência para Placa – Solução de um Auto-Problema



Para verificar a alteração da forma de flambagem das placas, alterou-se o comprimento a placa apresentada de forma a se obter várias relações  $\frac{a}{b}$ . A partir do valor da carga crítica calculada pelo método numérico, calculou-se o valor de  $k_{cr}$ , cujos valores estão ilustrados em azul no gráfico apresentado na figura 7.8. Na figura 7.13 encontram-se ilustrados os modos de flambagem obtidos numericamente.

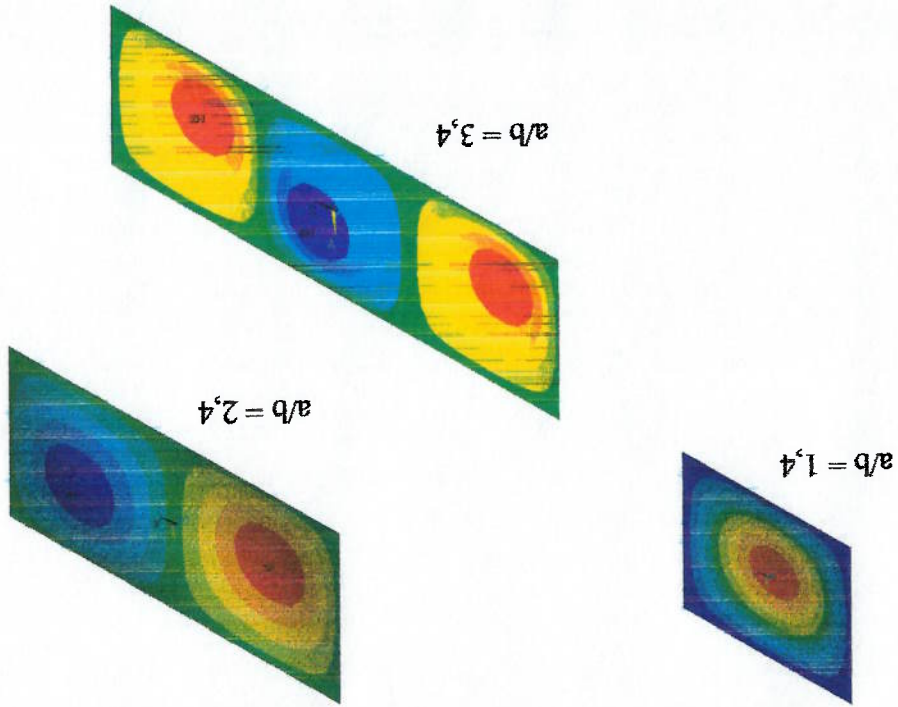


Figura 7.13 - Modos de Flambagem - Resultados da Análise Numérica

É importante lembrar que mesmo sendo geometria e carregamentos simétricos, não podemos utilizar condições de contorno de simetria na construção deste modelo de elementos finitos. Analogamente ao problema de determinação dos modos naturais de vibração, uma estrutura simétrica pode apresentar modos simétricos ou anti-simétricos, conforme ilustrado na figura 7.13. Caso seja utilizado um modelo com condições de contorno de simetria, os resultados encontrados serão apenas os relativos aos modos simétricos.

**Flambagem de Placa – Carregamento composto**

Embora os resultados apresentados para a viga e para a compressão simples indiquem boa correlação com os resultados analíticos, em uma comporta as placas estão sujeitas a carregamentos compostos de flexão e cisalhamento. Para analisar tal situação pode-se utilizar a formulação apresentada na equação 7.34, conforme indicado em Erbiste [1].

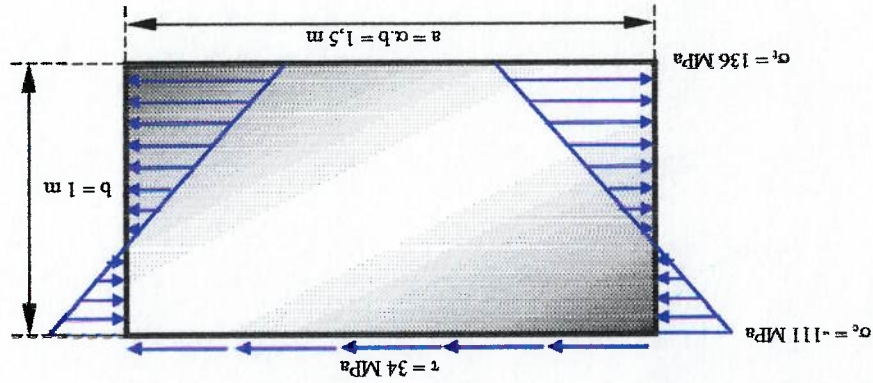
$$\sigma_{fc} = u \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2} \quad (7.34)$$

$$u = \frac{1 + \psi \frac{4\sigma_y}{\sigma_1} + \sqrt{\left(3 - \psi \frac{4\sigma_y}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\sigma_1}\right)^2}}{1}$$

onde  $\psi$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau$  e  $\tau_{II}$  representam os valores encontrados na tabela 7.1.

Para comparar a solução obtida pelo método analítico com a do método numérico, analisou-se um modelo conforme o exemplo ilustrado na seção 5.4.3 de Erbiste [1],

ilustrada na figura 7.14.



**Figura 7.14 – Análise de Estabilidade - Carregamento Composto**

Utilizando a equação 7.34, obtem-se um coeficiente de segurança à flambagem de  $V_{análise} = 4,4$ . O resultado no modelo numérico, com as mesmas condições de contorno, ilustrado na figura 7.14, é  $V_{numérico} = 4,5$ . Observando que  $\frac{V_{análise} - V_{numérico}}{V_{numérico}} = 2\%$  concluímos que ambos os métodos apresentam resultados equivalentes.

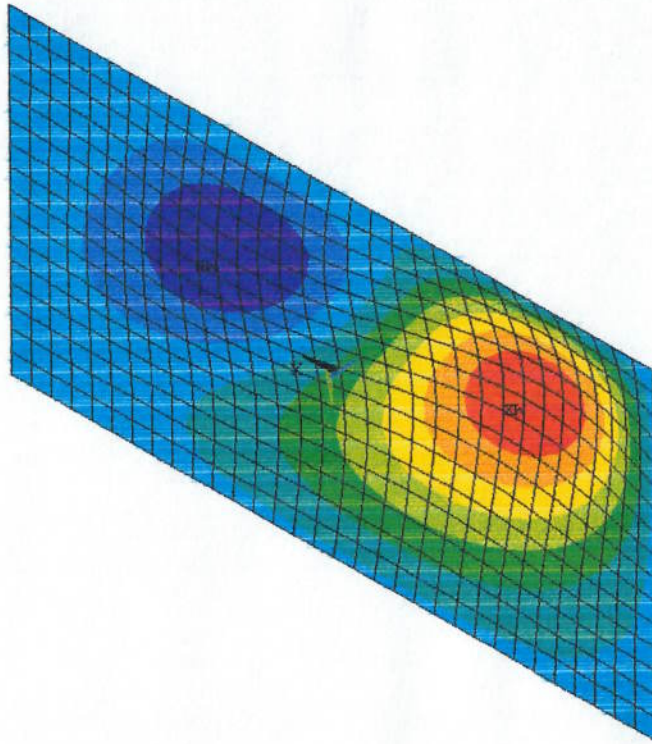


Figura 7.15 - Resultado Numérico de um Caso de Carregamento Composto

### 7.3.2 Flambagem na comporta inteira

Adotando o mesmo método aplicado à análise de estabilidade das placas, realizou-se uma análise de flambagem na comporta apresentada no item 6.5. As condições de contorno e carregamento aplicadas foram as mesmas da comporta em operação. O resultado obtido indica que a região mais crítica é a região da viga horizontal superior



limitada pela cabeceira e pelo septo, conforme ilustrado na figura 7.16. O valor obtido

$$\text{foi } \lambda = \frac{\text{carga crítica}}{\text{carga aplicada}} = 8,9.$$

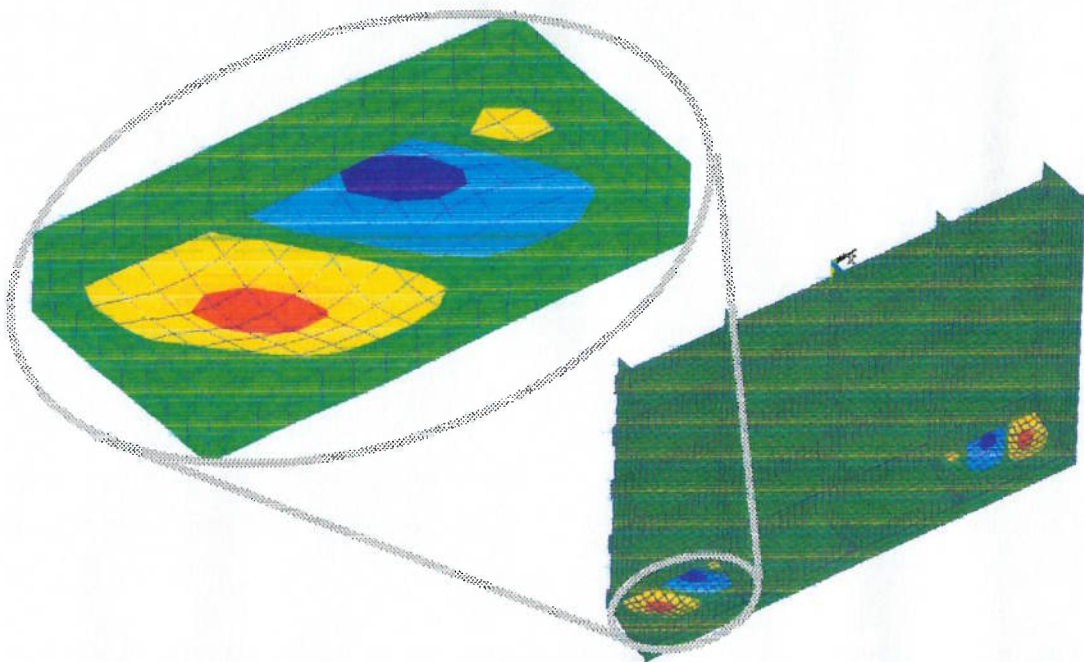


Figura 7.16 - Região Crítica

Para comparar o resultado obtido com o estudo realizado anteriormente, gerou-se um novo modelo de placa considerando duas condições de contorno:

- placa simplesmente apoiada (conforme indicado pela norma)
- placa engastada (para comparação)

Como carregamento adotou-se as tensões médias obtidas no cálculo estático (item 6.5 deste texto), conforme ilustrado na figura 7.17. Os resultados obtidos estão ilustrados na figura 7.18.

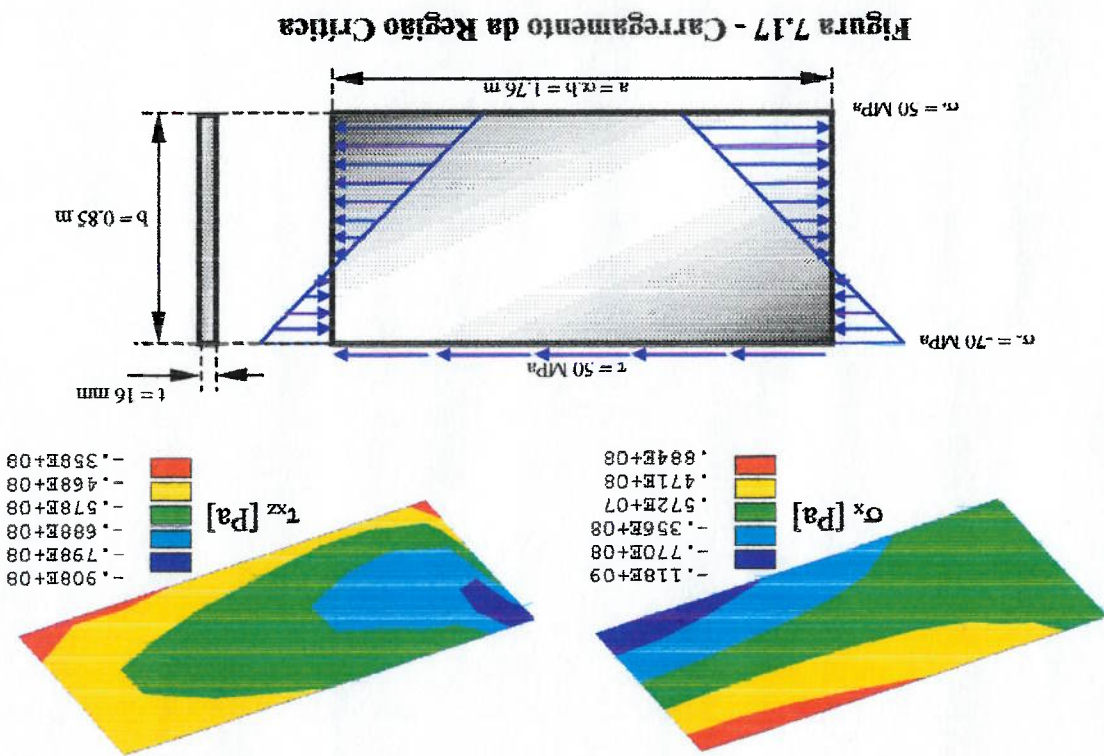


Figura 7.17 - Carregamento da Região Crítica

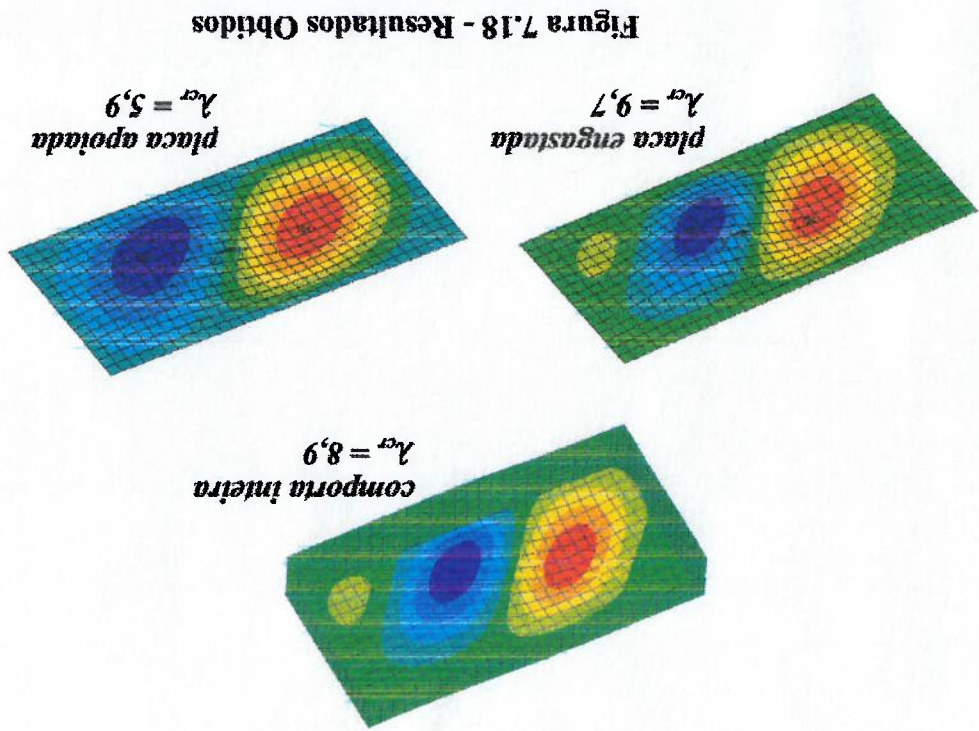


Figura 7.18 - Resultados Obtidos

Conforme esperado, o valor de  $\lambda$  crítico obtido para a comporta inteira é um valor intermediário entre os valores obtidos para a placa apoiada e a placa engastada. É interessante observar que, devido à rigidez das vigas verticais (septos e cabeceira), dos banzos (flanges) e da chapa de face, o comportamento da comporta se assemelha mais ao da placa engastada.

### 7.3.3 Flambagem de uma região com alterações geométricas

Existem situações para as quais não há uma solução analítica simples para o cálculo de flambagem. Nas comportas, uma destas situações é a presença de reforços e furos nas placas. Para ilustrar esta situação utilizou-se como exemplo a região crítica de uma comporta de eclusa de grandes dimensões, cuja viga horizontal possui aproximadamente cinco metros de altura de alma, e são necessários dois furos de um metro de diâmetro cada para drenagem de água, entre cada duas vigas verticais. A figura 7.19 ilustra esta região.

Considerando-se como carregamento os resultados obtidos pelo cálculo estático, avaliou-se a região considerando-se separadamente e em conjunto a influência dos itens ilustrados na figura 7.19. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 7.2 e na figura 7.20. A coluna  $\lambda_{cr}$  da tabela apresenta os valores obtidos nas análises numéricas, e a coluna  $\lambda_{relativo}$  apresenta os mesmos valores em relação ao caso 2 (placa com furo sem reforços), para facilitar a verificação da influência de cada item em relação aos demais.



Dos resultados apresentados podemos concluir, para este exemplo:

- Caso 1 x 2: Por estar situado próximo à linha neutra da viga, os furos pouco influenciaram a resistência à flambagem (7%);
- Caso 2 x 3: A utilização do reforço vertical também pouco influencia a resistência a flambagem (4%);
- Caso 2 x 4: A utilização deste reforço horizontal aumentou em 105% a resistência a flambagem desta região (configuração esta normalmente utilizada como reforço de placas); e
- Caso 2 x 5: A utilização dos dois reforços em conjunto aumenta em 3,85 vezes a resistência a flambagem desta região. Este aumento ocorre pois praticamente divide-se a placa em duas novas placas com dimensões menores em relação à placa original.

Embora os casos 4 e 5 apresentem grande aumento na resistência à flambagem da placa original, deve-se estar atento ao fato que estes cálculos são realizados considerando-se o material como linear elástico. Para considerar-se a não linearidade do material após o limite de proporcionalidade do mesmo, existem tabelas como as apresentadas na DIN 4114 para redução do valor de  $\lambda$  encontrado para o chamado *coeficiente de segurança reduzido* ou *coeficiente de segurança real*.

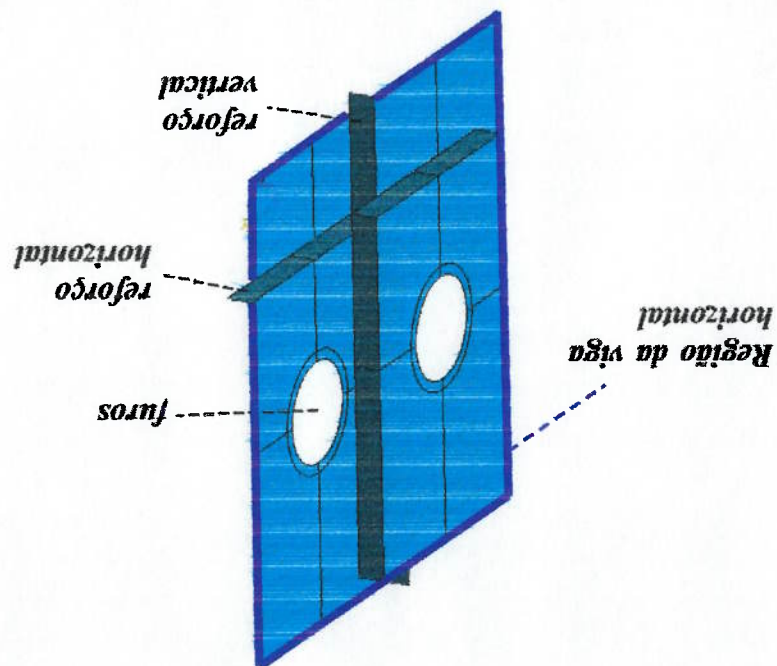
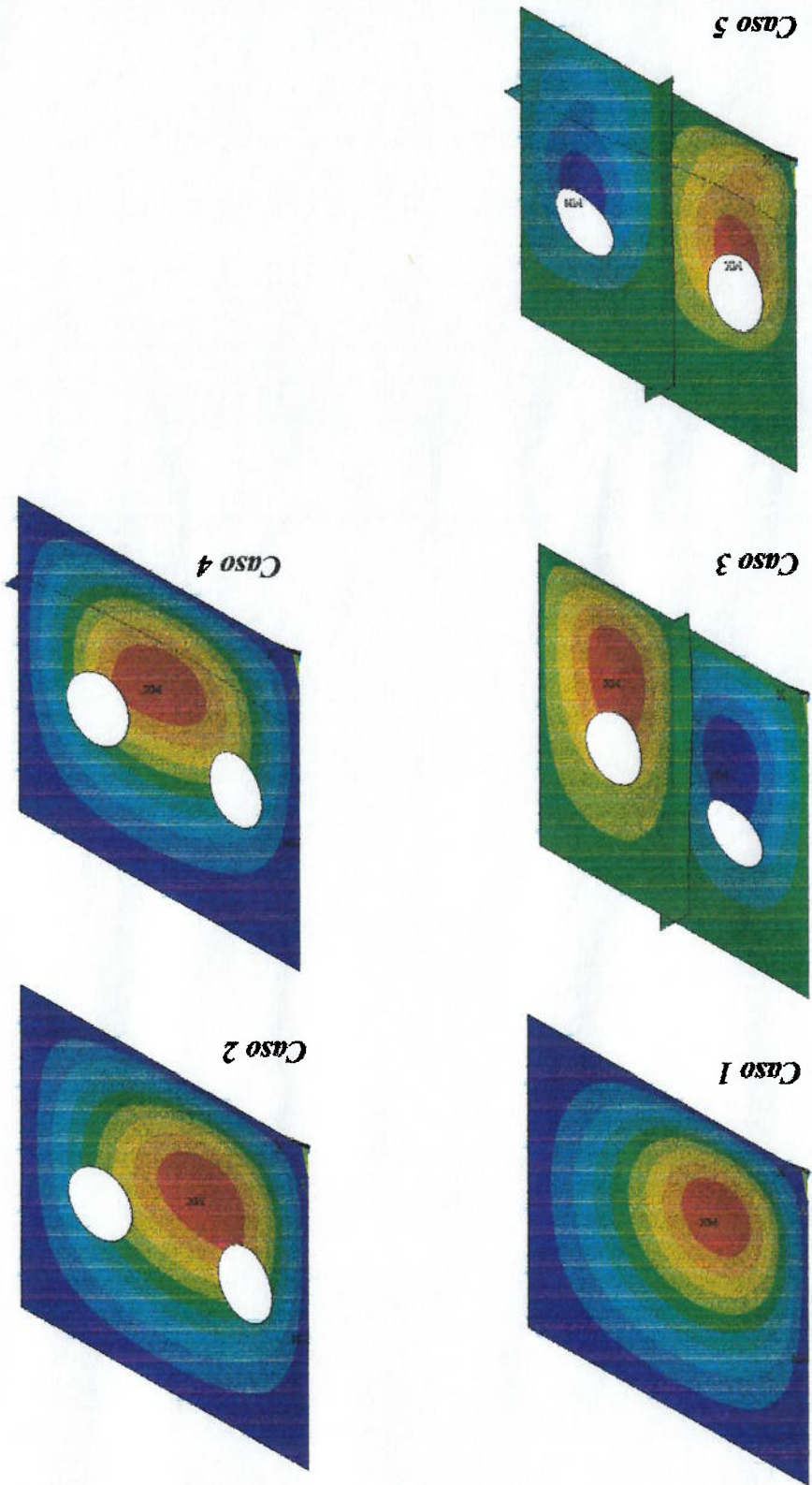


Figura 7.19 - Placa Reforçada e com Furos para Dreno

Tabela 7.2 – Avaliação de Alteração na Geometria

| Caso | Furo | Reforço vertical | Reforço horizontal | $\lambda_{cr}$ | $\lambda_{relativo}$ | Resultado               |  |
|------|------|------------------|--------------------|----------------|----------------------|-------------------------|--|
|      |      |                  |                    |                |                      | Consideração geométrica |  |
| 1    | •    |                  |                    | 1,41           | 1,07                 |                         |  |
| 2    | •    |                  |                    | 1,32           | 1,00                 |                         |  |
| 3    | •    | •                |                    | 1,37           | 1,04                 |                         |  |
| 4    | •    |                  | •                  | 2,70           | 2,05                 |                         |  |
| 5    | •    | •                | •                  | 5,08           | 3,85                 |                         |  |

Figura 7.20 – Resultados Obtidos pela Variação de Geometria



## 8 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A decisão de se utilizar, ou não, um pré-processador para discretização automática de

um modelo de elementos finitos deve ser baseada na resposta a duas perguntas:

- Quantas vezes serão realizadas análises numéricas em estruturas semelhantes?
- É possível descrever a geometria da estrutura por um conjunto de parâmetros?

Somente o fato de viabilizar uma análise de convergência mais expedita não justificaria, talvez, o custo da elaboração de um pré-processador, pois vários softwares atualmente já possuem recursos de refinamento paramétrico de malha.

Tomada a decisão de se criar um pré-processador, deve-se, ainda, fazer a opção entre um genérico ou um dedicado. Em linhas gerais, quanto mais simples for o modelo a ser gerado, mais barato será implantá-lo em um pré-processador genérico. Porém, na medida em que o problema for adquirindo maiores proporções, a decisão deve avalizada sob a análise dos aspectos descritos no item 4 deste texto.

Deve-se ressaltar que a utilização de pré-processadores também é uma importante ferramenta de controle de qualidade do modelo, já que há maior domínio na entrada de dados de condições de contorno e de cargas, e, ainda, maior garantia de que malhas ruins não serão utilizadas. Desta forma evitam-se os erros mais comuns quanto à consistência do modelo, tais como os de escolha de condições de contorno relevantes para o problema, de unidades das propriedades físicas, de recursos de análise a selecionar, de grau de refinamento da malha, etc. Erros que, usualmente cometidos por usuários pouco experimentados em MEF, podem comprometer toda a validade do projeto.

Como temas para trabalhos futuros sugere-se:

- Sub-modelagem automática: em alguns casos, um modelo de elementos finitos utilizando elementos de casca pode apresentar problemas de convergência, principalmente nas regiões de encontro de chapas. Este problema pode ser solucionado substituindo-os por elementos sólidos. Porém, uma análise com elementos sólidos terá um custo muito maior em relação a uma com elementos de casca. Uma possível solução é a sub-modelagem, técnica com a qual realiza-se uma análise mais detalhada de uma região de interesse, utilizando como condições de contorno o resultado de uma análise preliminar. Desta forma pode-se analisar uma região específica, sem a necessidade de se refinar o modelo completo. É possível ainda alterar o tipo de elemento, utilizando elementos sólidos, por exemplo. Utilizando-se a linguagem APDL, é possível gerar uma rotina para gerar um sub-modelo de uma determinada região da comporta, automaticamente.

- Estimativa para os dados de entrada iniciais, baseado em formulações analíticas. Para automatizar ainda mais o processo, poderiam ser elaboradas rotinas que apresentassem valores iniciais para a análise, baseados nos conceitos apresentados no item 3 deste texto;

- Conceito de componentes gerados independentemente e unidos por NUMMRG. O programa desenvolvido e apresentado neste texto garante a conexão entre os diversos componentes do modelo de elementos finitos através da utilização de nós idênticos nas interfaces. Uma outra abordagem possível seria criar entidades (nós, linhas, pontos, etc...) com posições coincidentes, e depois unidas com operações booleanas. Esta metodologia simplificaria a rotina que controla a numeração de pontos, uma vez que só controlaria a numeração de cada componente, e não do modelo como um todo. Por

outro lado, pequenos erros de arredondamento poderiam gerar erros, permitindo que alguns componentes não estivessem unidos;

- Interligação com rede neural. Ainda que um modelo paramétrico permita sua utilização como ferramenta de cálculo em rotina de otimização, a execução de cada iteração poderia ter um custo proibitivo. Para obter-se respostas mais rápidas, poderia-se interligar o pré-processador a uma rede neural, a qual se encarregaria de "interpoliar" os resultados a partir de concepções previamente analisadas;

Não se deve crer, contudo, que a existência de uma ferramenta paramétrica de cálculo, tal como o pré-processador apresentado neste texto, exclui a necessidade de um analista estrutural versado nas questões do problema que se estuda. A análise de resultados, à luz de toda as hipóteses adotadas, é tarefa que exige o completo domínio do projeto estrutural, no qual o MEF é, tão só e unicamente, uma ferramenta avançada de cálculo.



## 9 Bibliografia

- [1] ERBISTE, P. C.; "Comportas Hidráulicas", Editora Campus / Eletrobrás, Rio de Janeiro, 1987.
- [2] ZEID, I.; "CAD/CAM Theory and Practice", McGraw-Hill, Singapore, 1991.
- [3] CUNHA, C. C.; Modelagem Paramétrica de Abertura em Casco Resistente de Submarino, Tese de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1999.
- [4] DIAS, C.A. N.; MASSAROTI, V. M.; "FEM Parametric Solid Modeling for Welded Tubular Joint Analysis", IASTED International Conference. Applied Modeling and Simulation, July 27<sup>th</sup>, August 1<sup>st</sup>, 1997, Banff - Canada.
- [5] ANSYS Programmers Manual for Release 5.4, ANSYS Inc., 1996.
- [6] BATHE, KLAUS-JÜRGEN; Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- [7] FEIL, WALTER; Estruturas de Aço, LTC - Livros técnicos e Científicos Editora S.A., 1982.
- [8] MANSON, JAYME; Pontes Metálicas e Mistas em Viga Reta. Projeto e Cálculo, LTC - Livros técnicos e Científicos Editora S.A., 1976.
- [9] DIAS, C. A. N.; Adaptação do Programa SAP-IV para o Cálculo de Flambagem Elástica de Estruturas Reticuladas, 10º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro - RJ, 1984.
- [10] TIMOSHENKO, S. P.; Theory of Elastic Stability, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1961.
- [11] CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J.; Dynamics of Structures, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1975.