

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



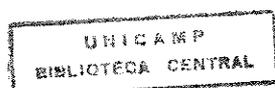
**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO DE ESTRUTURAS EM  
CASCA DE FORMAS LIVRES DE  
CONCRETO ARMADO  
(PLANTAS QUADRADAS)**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Eng. Miguel Angel Sedano Tapia

Campinas - SP, Brasil

Janeiro/1999



9913261

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO DE ESTRUTURAS EM**  
**CASCA DE FORMAS LIVRES DE**  
**CONCRETO ARMADO**  
**(PLANTAS QUADRADAS)**

**Eng. Miguel Angel Sedano Tapia**

Orientador : **Prof. Dr. Isaías Vizotto**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração : Estruturas.

Campinas - SP, Brasil

Janeiro/1999

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.
17/05/99
Prof. Dr. 
Matrícula: 70.925-8.

UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:	UNICAMP Se. 47c		
V.	Ex		
TOMBO BC/	38931		
PROC.	229/99		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00		
DATA	09/10/99		
N.º CPD			

CM-0012642B-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Se27c Sedano Tapia, Miguel Angel  
Contribuição ao projeto de estruturas em casca de formas livres de concreto armado (plantas quadradas). / Miguel Angel Sedano Tapia.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Isaías Vizotto  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

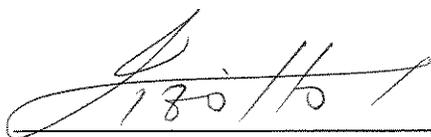
1. Cascas (Engenharia). 2. Cascas de concreto. 3. Otimização estrutural. 4. Método dos elementos finitos.  
I. Vizotto, Isaías. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

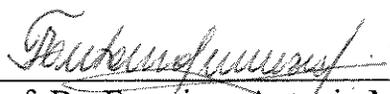
**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO DE ESTRUTURAS EM**  
**CASCA DE FORMAS LIVRES DE**  
**CONCRETO ARMADO**  
**(PLANTAS QUADRADAS)**

Eng. Miguel Angel Sedano Tapia

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora constituída por:



Prof. Dr. Isaiás Vizotto, presidente  
**FEC - UNICAMP**



Prof. Dr. Francisco Antonio Menezes  
**FEC - UNICAMP**



Prof. Dr. Loir Afonso Moreira  
**FEM - UNICAMP**

Campinas, 6 de janeiro de 1999

*Aos meus pais, Gilberto e Raquel; aos meus irmãos, Luis, Henry e Shirley; e aos meus avós, como prova do meu amor e eterna gratidão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu pai, Gilberto Sedano López e à minha mãe, Paulina Raquel Tapia Baldoce, por todo o apoio, carinho, amor e correções durante a infância e adolescência, enfim por fazerem parte da minha vida.

Aos meus irmãos Luis e Henry pelo carinho e ajuda recebidos.

A minha irmã Shirley que é motivo de muita alegria.

Aos meus avós por todo o carinho e estímulos recebidos.

A minha querida Cecilia pela sua compreensão, pelo seu amor, e carinho.

Aos meus tios, tias, primos e primas pelo incentivo e compreensão.

Ao Prof. Dr. Isaías Vizotto que, com dedicação, experiência e capacidade me ajudou. O meu reconhecimento à orientação capaz e segura, em especial por sua amizade e dedicação, que nos momentos de dificuldades abriu caminhos que possibilitaram a realização desta publicação.

Ao corpo docente do Departamento de Estrutura da FEC - UNICAMP, em especial ao Prof. Dr. Aloísio Ernesto Assan (da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP), pela colaboração recebida ao Prof. Dr. José Luiz Antunes de Oliveira e Souza (da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP), que me proporcionou o programa MeshTool que foi utilizado na geração das formas livres em casca e na discretização das malhas de elementos finitos apresentadas neste trabalho e ao Prof. Dr. Luiz Roberto Sobreira de Agostini (da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP), pelas dicas e orientação para realizar o detalhamento e armação da casca.

Ao setor de computação da FEC - UNICAMP, pelo uso dos equipamentos, e aos seus funcionários pela colaboração recebida.

Aos professores, colegas e funcionários do Departamento de Estruturas da UNICAMP, pelo apoio e amizade durante todo o curso.

Agradeço à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio e concessão da bolsa e do computador para o desenvolvimento da pesquisa.

Em especial, agradeço à Deus pelo amor, proteção e iluminação durante todo o transcurso da minha vida.

# SUMÁRIO

<b>1.- INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2.- OBJETIVOS</b>	5
<b>3.- PROJETO E EXECUÇÃO</b>	6
3.1.-DESENHOS	7
3.2.-MEMÓRIAS DE CÁLCULO	8
3.3.-ESPECIFICAÇÕES DE EXECUÇÃO	9
<b>4.-GERAÇÃO DAS FORMAS LIVRES</b>	10
4.1.-MENU DE BARRAS	11
4.1.1.-FILE	11
4.1.2.-EDIT	12
4.1.3.-MESH	13
4.1.4.-ATTRIBUTES	15
4.1.5.-SELECT	18
4.1.6.-DISPLAY	18
4.2.-FUNÇÕES DE VISUALIZAÇÃO	19
4.2.1.-ISOLATE	19
4.2.2.-AXIS	19
4.2.3.-GRID	19
4.2.4.-REDRAW	19

4.2.5.-FIT	20
4.2.6.-ZOOM +	20
4.2.7.-ZOOM -	20
4.3.- PRIMITIVAS DO AMBIENTE DE EDIÇÃO	21
4.3.1.- INSERÇÃO UTILIZANDO O TECLADO	21
5.3.2.- INSERÇÃO DE LINHAS	22
4.3.3.- INSERÇÃO DE POLIGONAIS	22
4.3.4.- INSERÇÃO DE ARCO DE CÍRCULO	23
4.3.5.- INSERÇÃO DE CÍRCULO	23
4.3.6.- INSERÇÃO DE BEZIER	23
4.3.7.- INSERÇÃO DE VÉRTICES	24
4.4.- AMBIENTE DE EDIÇÃO DA MALHA	24
4.5.- AMBIENTE DE VISUALIZAÇÃO DA MALHA	25
4.6.- ARQUIVO EM FORMATO NEUTRO	26
4.7.- PROGRAMA COMPUTACIONAL DE VIZOTTO	27
4.7.1.- ARQUIVO DE ENTRADA PARA O PROGRAMA DE VIZOTTO	29
4.8.- ARQUIVO DE ENTRADA PARA O PROGRAMA ANSYS	34
4.9.- RESULTADOS PARA A CASCA QUADRADA DE FORMA LIVRE SEM DOMO	38
4.10.- RESULTADOS PARA A CASCA QUADRADA DE FORMA LIVRE COM DOMO	40
4.11.- SEGURANÇAS DAS ESTRUTURAS	42
4.11.1.- TABELAS DAS COMBINAÇÕES DA CASCA QUADRADA SEM DOMO	43
4.11.2.- TABELAS DAS COMBINAÇÕES DA CASCA QUADRADA COM DOMO	50

<b>5.- DETALHAMENTO ESTRUTURAL</b>	66
5.1.-TIPOS DE DESENHO	67
5.2.-PLANTA DE CARGA	67
5.3.- DESENHOS PARA EXECUÇÃO DE FORMAS	68
5.4.- ARMAÇÃO	68
5.4.1.- OBJETIVOS DA ARMAÇÃO	69
5.4.2.- CONCENTRAÇÃO DE BARRAS DA ARMADURA	70
5.4.3.- REGIONALIZAÇÃO DA ARMADURA	71
5.4.4.- CRITÉRIOS DE PADRONIZAÇÃO DAS ARMADURAS	72
5.4.5.- DIÂMETRO MÁXIMO DAS ARMADURAS	73
5.4.6.- COBRIMENTO DAS ARMADURAS	73
5.4.7.- ARMADURA DE BORDA	74
5.4.8.- ARMADURA DE CISALHAMENTO	74
5.4.9.- ARMADURAS MÍNIMAS DE FLEXÃO	74
5.5.- CASCA QUADRADA SEM DOMO	75
5.6.- CASCA QUADRADA COM DOMO	77
5.7.- ASPECTOS CONSTRUTIVOS	79
5.8.- RELAÇÃO FLECHA – VÃO (ABATIMENTOS)	80
<b>6.- COMPORTAMENTO ESTRUTURAL</b>	81
6.1.- ILUMINAÇÃO	83
6.2.- ISOLAMENTO TÉRMICO	83
<b>7.- CONCLUSÃO</b>	85
7.1.- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88

## **8.- BIBLIOGRAFIA**

89

## **APÊNDICES**

A) MTOOL	93
B) ARQUIVO NEUTRO	103
C) ANSYS	112
D) NBR - 6120 CARGAS PARA CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE EDIFICAÇÕES	114
E) VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	117
F) NBR - 6123 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES	119
G) NBR – 8681 AÇÕES E SEGURANÇAS DAS ESTRUTURAS	133
H) GRÁFICOS E ISO-SUPERFÍCIES DOS CARREGAMENTOS	139
<b>ABSTRACT</b>	<b>163</b>

## RESUMO

Sedano Tapia, Miguel Angel. Contribuição ao projeto de estruturas em casca de formas livres de concreto armado – plantas quadradas. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1998. P. 164.

Dissertação.

O presente trabalho tem como objetivo a geração de formas livres de estruturas em casca, utilizando-se um programa gráfico denominado MTOOL para o desenho inicial das malhas planas de elementos finitos. O programa também fornece a discretização da malha de elementos finitos, sendo que o arquivo de saída deste programa é feito em formato neutro (ver apêndice B). Depois, a partir do modelo computacional desenvolvido por Vizotto (1993), procede-se a geração das geometrias de diferentes formas livres de estruturas em casca, concentrando-se neste trabalho em formas de grande interesse em Engenharia Civil, cascas com projeção em plantas quadradas, com e sem domo. O programa desenvolvido por Vizotto fornece um arquivo de saída que é lido pelo programa de análise numérica ANSYS.

As geometrias obtidas para estruturas em casca de formas livres são aquelas em que os estados ideais de tensões são de compressão pura para as principais solicitações atuantes.

Para as outras solicitações secundárias, é desejável que ocorra o mínimo possível de flexão das cascas, uma vez que o estado ideal, que é a ausência de flexão para todos os carregamentos, é praticamente impossível.

Deste modo é possível projetar formas livres e esbeltas de estruturas em casca para coberturas, com quaisquer formatos na projeção horizontal e que, em essência, possuam um comportamento aproximado de acordo com a Teoria de Membrana.

Serão analisados os comportamentos estáticos das diferentes estruturas sob as ações como peso próprio, carregamentos distribuídos, temperatura máxima e mínima e vento na direção diagonal e lateral.

Com os resultados anteriores, serão feitos detalhamentos estruturais das duas cascas (considerando o material como Concreto Armado).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Ambiente de edição da topologia	10
Figura 2 : Menu disponível no ambiente de edição da topologia	11
Figura 3 : Operações de transformação geométricas	12
Figura 4 : Diálogo utilizado na definição das subdivisões	13
Figura 5 : Diálogo utilizado na definição do mapeamento	14
Figura 6 : Descrição do arquivo de definição do PATTERN; utilizado no Mapeamento de transição	15
Figura 7 : Diálogo utilizado na definição do tipo e parâmetro do material	15
Figura 8 : Diálogo utilizado na definição dos atributos das arestas	16
Figura 9 : Diálogo utilizado na definição dos atributos dos vértices	17
Figura 10 : Diálogo utilizado na definição do tipo de análise	17
Figura 11 : Funções de visualização do sistema MTOOL	19
Figura 12 : Primitivas utilizadas no sistema MTOOL	21
Figura 13 : Acionamento da opção de teclado	22
Figura 14 : Ambiente de edição de malha	24
Figura 15 : Ambiente de visualização de malha	25
Figura 16 : Dimensões em planta da malha inicial para a geração Da estrutura em casca	32
Figura 17 : Dimensões em planta da estrutura em casca quadrada sem domo	32
Figura 18 : Dimensões da casca na projeção vertical no plano XZ	32
Figura 19 : Casca de forma livre obtida pelo carregamento da membrana flexível com peso próprio	32
Figura 20 : Dimensões em planta da malha inicial para a geração Da estrutura em casca	33



## LISTA DE TABELAS

### **Casca quadrada sem domo**

Tabela 1 : Peso próprio	38
Tabela 2 : Sobrecarga	38
Tabela 3 : Temperatura mínima	39
Tabela 4 : Temperatura máxima	39
Tabela 5 : Vento na direção diagonal	39
Tabela 6 : Vento na direção lateral	39

### **Casca quadrada com domo**

Tabela 7 : Peso próprio	40
Tabela 8 : Sobrecarga	40
Tabela 9 : Temperatura mínima	41
Tabela 10 : Temperatura máxima	41
Tabela 11 : Vento na direção diagonal	41
Tabela 12 : Vento na direção lateral	41

### **Casca quadrada sem domo**

Tabela I : Combinação 01	43
Tabela II : Combinação 02	43
Tabela III : Combinação 03	44
Tabela IV : Combinação 04	44
Tabela V : Combinação 05	45
Tabela VI : Combinação 06	45
Tabela VII : Combinação 07	46
Tabela VIII : Combinação 08	46
Tabela IX : Combinação 09	47

Tabela X : Combinação 10	47
Tabela XI : Combinação 11	48
Tabela XII : Combinação 12	48
Tabela A : Tensões Principais (MPa) da maior combinação	49
<b>Casca quadrada com domo</b>	
Tabela I : Combinação 01	50
Tabela II : Combinação 02	50
Tabela III : Combinação 03	51
Tabela IV : Combinação 04	51
Tabela V : Combinação 05	52
Tabela VI : Combinação 06	52
Tabela VII : Combinação 07	53
Tabela VIII : Combinação 08	53
Tabela IX : Combinação 09	54
Tabela X : Combinação 10	54
Tabela XI : Combinação 11	55
Tabela XII : Combinação 12	55
Tabela B : Tensões Principais (MPa) da maior combinação	56
Tabela 13 : Valores mínimos das cargas verticais	115
Tabela 14 : Fator topográfico S1	124
Tabela 15 : Fator S2	125
Tabela 16 : Fator estatístico S3	126
Tabela 17 : Valores limites dos coeficientes de pressão externa $C_{pe}$ e Coeficientes de sustentação $C_s$	129
Tabela 18 : Valores limites dos coeficientes de pressão externa $C_{pe}$ das Cúpulas sobre paredes cilíndricas	131
Tabela 19 : Ações permanentes de grande variabilidade	136
Tabela 20 : Ações permanentes de pequena variabilidade	137
Tabela 21 : Efeitos de Recalque de apoios e de retração dos materiais	137
Tabela 22 : Coeficientes de ponderação para ações variáveis	138
Tabela 23 : Valores dos fatores de combinação e dos fatores de utilização	138

# 1. INTRODUÇÃO

Estruturas em casca são aquelas formadas por superfícies de simples ou dupla curvatura em que a dimensão da espessura é muito menor que as outras dimensões. Para se definir a geometria de uma estrutura em casca é necessário fornecer a forma da superfície média, a espessura em todos os pontos e o contorno. A superfície média é o lugar geométrico dos pontos que dividem ao meio a espessura da estrutura em casca. A espessura, que pode ser constante ou variável, é medida segundo a normal à superfície.

Uma análise dos últimos 80 anos mostra que está surgindo um novo segmento profissional voltado para a área de projetos de estruturas em casca, que é caracterizado por um grupo de projetistas que tem atuado mais como engenheiros estruturais do que como arquitetos. Para estes engenheiros a estética tem sido a maior motivação para os seus projetos que podem ser identificados como uma nova forma de expressão de arte, denominada arte estrutural.

No início deste século as estruturas em casca começaram a ser utilizadas de modo alternativo em relação às estruturas convencionais. Atualmente, no projeto e construção de estruturas civis, as cascas podem ter um amplo emprego em coberturas, reservatórios, torres de resfriamento, túneis, silos, fundações, etc. ...

As coberturas em cascas finas de concreto armado surgiram na década de 1920 como uma possibilidade para se cobrir grandes áreas sem necessidade de pilares internos. A disponibilidade de folhas de metais de alta resistência no mesmo período estimulou os pesquisadores a utilizarem cada vez mais as estruturas em casca.

Os projetos de estruturas em casca de concreto para coberturas devem ser analisados sob alguns aspectos específicos como ciência aplicada, construção competitiva e o aspecto arquitetônico. A idéia principal que emerge destes três temas é que o projeto de engenharia apropriado inclui análise, construção e aparência, e que cada parte é essencial ao trabalho do engenheiro. Estas considerações são especialmente importantes em cascas de concreto para coberturas de grandes vãos.

Os principais projetistas deste gênero de estruturas foram engenheiros como Maillart, Dischinger, Finsterwalder, Tedesco, Torroja e Isler, e o arquiteto Candela. Todos tiveram boa formação em análise matemática, atuaram também como construtores ou trabalharam em associação com construtores, e tinham como principal objetivo as formas e aparências dos seus projetos. Embora Candela tivesse formação de arquiteto, ele desenvolveu considerável habilidade matemática e trabalhou também como construtor de quase todos seus principais projetos. Assim, ele atuou essencialmente como engenheiro na maior parte dos casos.

Embora em muitos trabalhos desses projetistas houvesse a colaboração de arquitetos, pode ser comprovado na maior parte dos casos que a forma final é o produto, não da colaboração, mas da visão de um projetista, o engenheiro.

Engenheiros e arquitetos ficaram fascinados com as possibilidades visuais e estéticas para estruturas em casca de concreto quando os trabalhos de engenheiros europeus ganharam publicidade na década de 1950. Esta fascinação em muitos casos fazia com que os problemas de construção ficassem em segundo plano e se ressaltasse somente as formas finais desses projetos. Muitas estruturas tiveram seus custos finais elevados quando os projetistas se expressaram com liberdade quanto às formas curvas, e os problemas de execução dos projetos não eram considerados devidamente. Os exemplos que tiveram maior publicidade foram o “Sydney Opera House” e o “Montreal Olympic Stadium”.

Tem sido freqüentemente afirmado que o efeito visual do projeto é de concepção do arquiteto. Até para pontes, talvez o exemplo mais puro de engenharia civil, alguns escritores afirmam que os arquitetos são necessários para projetá-las bonitas. Coberturas em casca são também muitas vezes atribuídas à arquitetura. O livro de Joedicke, "Shell Architecture", indica por seu título a idéia de que as estruturas em casca de Maillart, Freyssinet, Nervi, Isler e outros engenheiros são trabalhos de arquitetura.

A arte estrutural se distingue da arte arquitetônica pelo fato de que uma das motivações da arte estrutural pode, por exemplo, ser o controle de tensões nas estruturas e redução dos custos na execução dos projetos. Isto se torna mais freqüente onde os projetos são de grandes dimensões. A arte estrutural requer a visualização da forma como meio de controlar as tensões, enquanto que para a arte arquitetônica a forma é usualmente um meio de conceber e adequar espaços para os mais diversos fins.

Aumentar as proporções dos projetos significativamente torna as idéias dos engenheiros opostas as dos arquitetos. Quando um arquiteto não reconhece essa diferença de escala, os resultados podem ser desastrosos.

Além das considerações de escala, a utilização do ambiente a ser construído permite determinar se um trabalho é apropriado a um projeto de engenharia ou de arquitetura. Quanto maior o uso envolvendo diversas atividades de pequenos grupos de pessoas, maior é a caracterização como sendo um projeto de arquitetura; por outro lado, quanto maior o uso para máquinas (pontes, por exemplo), para materiais (armazéns, usinas de tratamento, etc. ...), maior é a caracterização de um projeto como sendo da área de engenharia.

Um engenheiro ou arquiteto especializado em construção de estruturas em casca deve observar os seguintes pontos :

- Executar a construção das cascas sem alterar o projeto original. Abster-se de adicionar alguma coisa que não seja absolutamente necessária pois cascas são formas marcantes, elas não precisam de decoração.

- As cascas devem ser construídas na melhor localização possível; devem ser consideradas como objetos raros, como uma obra de arte ou escultura.
- Colocar os elementos necessários tais como janelas, esquadrias, lâmpadas, etc. ... como complementares e secundários das construções.
- Assegurar que a qualidade original das estruturas em casca construída seja mantida permanentemente no futuro, planejando já no estágio de projeto ampliações posteriores.
- Adicionar uma cláusula no contrato assegurando que o profissional deve ser consultado para alterações técnicas ou quaisquer outras que possam vir a ser realizadas no futuro.

Se estes conceitos básicos forem respeitados, estruturas em casca podem muito bem contribuir para um enriquecimento da arquitetura moderna.

## **2.-OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é de contribuir com elementos para a realização de projetos de estruturas em casca de diferentes formas livres utilizando como material o concreto armado.

Neste trabalho teve-se como ferramenta auxiliar o software Mtool, que é um programa gráfico para o desenho inicial da malha plana de elementos finitos (projeções em plantas quadradas). Este programa também faz a discretização automática da malha; e foi complementado com a implementação de um programa para a geração do arquivo de dados de entrada para o programa Vizotto.

A partir disto, no programa Vizotto procede-se a geração de uma membrana flexível que através dos carregamentos será deformada até sua configuração de equilíbrio, sendo esta a forma final da casca. Serão analisados os comportamentos estáticos das diferentes estruturas sob as ações como peso próprio, carregamentos distribuídos, temperatura, vento, etc., com estes novos dados foram realizadas as análises numéricas das estruturas em casca. Por fim foram feitos os detalhamentos estruturais das duas formas quadradas com e sem domo.

Espera-se com este trabalho fornecer uma contribuição para que engenheiros projetistas possam realizar o dimensionamento e detalhamento estrutural destes tipos de estruturas visando funcionalidade e economia.

### **3.- PROJETO E EXECUÇÃO**

O início das atividades de engenharia em uma obra planejada é o projeto que, em geral, deve ser executados por engenheiros e arquitetos, em trabalho conjunto, pois forma e construção dependem intimamente uma da outra. Para o projeto de uma estrutura, é importante a experiência, que permite: escolher o material mais favorável, sob os pontos de vista técnico e econômico e um sistema estrutural adequado; orientar para um tipo de execução favorável; avaliar as dimensões das peças estruturais o mais exatamente possível ou calculá-las aproximadamente, a partir de hipóteses as mais simples possíveis. As dimensões são então verificadas e melhoradas através de cálculo preliminar, quando então se devem esboçar os detalhes construtivos e examinar sua execução. O projeto é representado em desenhos de conjunto, com vistas gerais. Seguem-se após os cálculos estruturais definitivos, com o dimensionamento, quando então se devem verificar as exigências de segurança quanto à capacidade resistente e à de utilização. Finalmente, elaboram-se os detalhes construtivos e produzem-se os desenhos de execução. Para isso, é necessário, freqüentemente, prever e levar em conta, até o detalhe, o processo de execução.

Projetar e construir bem uma obra é uma arte que pressupõe o conhecimento amplo e variado dos materiais, do desenvolvimento dos esforços, do dimensionamento, da execução e do comportamento estrutural, mas também uma ampla observação de obras, o exercício da profissão, além de aptidão natural. Em sua atividade, o engenheiro deveria sempre, por isso, aspirar não somente a uma boa construção, mas, também, a uma bela forma.

Para haver entendimento claro e perfeito entre o proprietário, o arquiteto, o engenheiro, o empreiteiro e os órgãos públicos na implantação de uma obra são necessários basicamente os seguintes documentos técnicos:

- desenhos de projeto, memória de cálculo com esquemas estruturais, desenhos de execução, relação de itens e quantidades de serviço, especificações e exigências de qualidade (particularmente importantes), cronograma de execução; no caso de haver utilização de elementos construtivos recentemente desenvolvidos, verificações especiais de segurança, acompanhadas eventualmente de certificados de ensaios e de relatórios de verificação do engenheiro verificador (geralmente um engenheiro consultor independente).

### 3.1.- DESENHOS

O projeto de uma obra é representado por desenhos de conjunto: vistas, cortes e plantas, nas escalas 1:100 ou 1:200; detalhes construtivos, nas escalas 1:20, 1:10, 1:5 ou 1:1. Os desenhos que contém a localização e a designação das peças estruturais servem como esquema de conjunto para o cálculo estrutural. Para a execução da obra, é necessário elaborar os desenhos de execução:

- **Desenhos de fôrmas**, nas escalas 1:50, 1:25 ou 1:20. Compreendem plantas – que representam a vista superior das superfícies das fôrmas – e cortes na estrutura concluída. Estes desenhos contém todas as dimensões, cotas, elevações, rebaixos, aberturas, canalizações embutidas no concreto, indicações sobre os materiais, juntas, vedações etc. ...;

- **Desenhos de armaduras**, nas escalas 1:50, 1:25 ou 1:20; detalhes nas escalas 1:10, 1:5 e 1:1. Destinam-se à representação das armaduras, com indicação da forma das barras, diâmetros, quantidades, espaçamentos entre barras, posição das camadas, comprimentos de emenda e de ancoragem, medidas exatas de cada barra individualmente ou das malhas de armadura, diâmetro dos pinos de dobramento, marcas (posições) para a lista de barras, cobrimento de concreto, indicações sobre o tipo de aço e o traço e classe de resistência do concreto. No caso de armaduras padronizadas, é suficiente dar indicações sob a forma de tabelas, que, no futuro, poderão ser fornecidas por computador.

### **3.2.- MEMÓRIAS DE CÁLCULO**

O prefácio de uma memória de cálculo deve conter indicações sobre o fluxo dos esforços na estrutura, conforme serviu de base ao cálculo estrutural (como, por exemplo, a absorção das cargas de vento).

O cálculo propriamente dito fornece essencialmente a demonstração da estabilidade da estrutura e o dimensionamento das peças estruturais. Em casos complicados, devem-se acrescentar croqui e indicações sobre a seção transversal e a disposição da armadura. São importantes, também, a avaliação do terreno de fundação, quanto a recalques e à segurança da fundação, a verificação da capacidade de utilização relativamente a deformações, aberturas de fissuras, vibrações, etc. Conforme o caso, é necessário levar em consideração as influências da temperatura, da retração e da deformação lenta. Frequentemente, é necessário calcular, também, a estrutura para as diversas fases de execução, bem como os escoramentos e as fôrmas.

Todas as demonstrações devem ser facilmente verificáveis; a bibliografia utilizada deve ser indicada; fórmulas e expressões não usuais, provenientes de bibliografia dificilmente acessível, devem ser deduzidas. Mesmo após decorridas algumas décadas, deverá ser possível verificar um cálculo (por exemplo, para a execução de reformas ou de concertos). É indispensável que a escrita seja bem legível.

### **3.3.- ESPECIFICAÇÕES DE EXECUÇÃO**

Nas especificações de execução, devem ser resumidas as instruções para a execução da obra (como, por exemplo: a localização adequada das juntas de construção; a seqüência de implantação da obra ou das fases de execução; eventualmente a proteção contra variações bruscas de temperatura; exigências para superfícies de concreto aparente; o processo de montagem para peças pré-moldadas, etc. ...).

## 4.- GERAÇÃO DAS FORMAS LIVRES

Para a geração das malhas planas iniciais utilizadas para a posterior geração das formas livres utilizou-se o programa gráfico bidimensional denominado MTOOL (ver Apêndice A) para a criação das primitivas e se chegar às formas desejadas.

Como em todo editor, no sistema MTOOL existem várias maneiras de se construir um determinado modelo. Para ilustrar a utilização deste ambiente, serão apresentados tópicos onde se discutem possíveis procedimentos para a realização das tarefas propostas. Objetiva-se familiarizar o leitor com o ambiente de edição topológica. Aconselha-se acompanhar as tarefas propostas, executando-as numa implementação do sistema.

Na Figura 1 é mostrado o ambiente de edição topológica, que contém quatro regiões distintas:

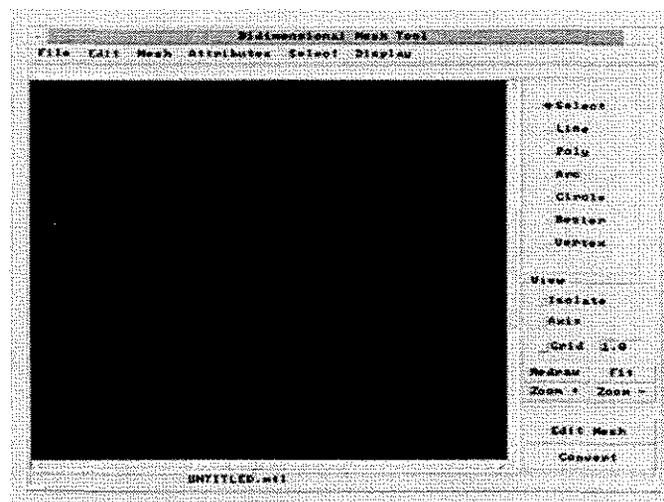


Figura 1.- Ambiente de edição da topologia.

- O menu de barra, onde estão funções que operam sobre arquivos, transformações geométricas, malhas, atributos, seleção e visualização;
- Primitivas de edição, onde estão relacionadas todas as primitivas gráficas disponíveis no sistema MTOOL;
- Funções de visualização que, combinadas com as localizadas no menu de barra, auxiliam na visualização e na edição do modelo topológico;
- Ligação com os outros dois ambientes disponíveis no sistema.

#### 4.1.- MENU DE BARRA

Na Figura 2, é mostrado o menu disponível no ambiente de edição topológica, seguindo a descrição de cada item que o compõe.

**File Edit Mesh Attributes Select Display**

**Figura 2.- Menu disponível no ambiente de edição da topologia.**

##### 4.1.1.- FILE

Esta função do menu contém funções responsáveis por operações sobre arquivos, cujos itens estão dispostos na seguinte ordem:

- NEW – inicia um novo projeto, apagando o anterior da memória;
- OPEN – carrega um arquivo já existente;
- SAVE – grava o projeto em um arquivo especificado pelo usuário;
- IMPORT – composto por dois sub-itens: *Primitives*, que importa primitivas no formato HED, e *DxfFormat*, que importa primitivas no formato DXF;
- EXPORT - composto por dois sub-itens: *Primitives*, que exporta primitivas no formato HED, e *Images*, que gera um arquivo com o conteúdo da tela;
- AUTOSAVE – com este item, é definido um intervalo de tempo no qual se deseje que o programa grave o um arquivo de *backup*;

- EXIT – opção de finalização do programa.

#### 4.1.2.- EDIT

Esta função do menu contém funções responsáveis por operações geométricas sobre o modelo topológico, e compreende os seguintes itens:

- UNDO – opera sobre o modelo, desfazendo as operações efetuadas. Opera até o momento do último comando de gravação;
- REDO – opera sobre o modelo, recuperando somente a última operação desfeita pelo comando UNDO;
- TRANSFORM – responsável por operações geométricas, que serão aplicadas sobre as primitivas selecionadas. As transformações geométricas disponíveis estão mostradas na Figura 3;

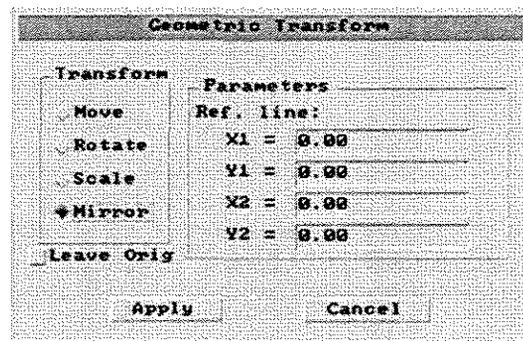
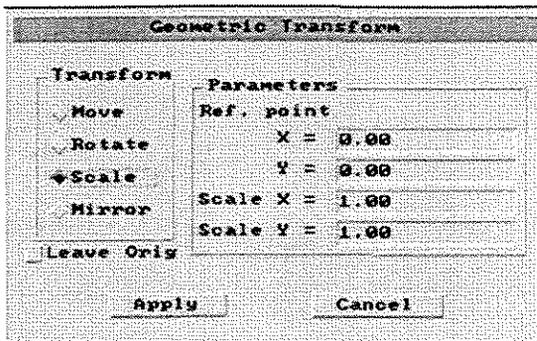
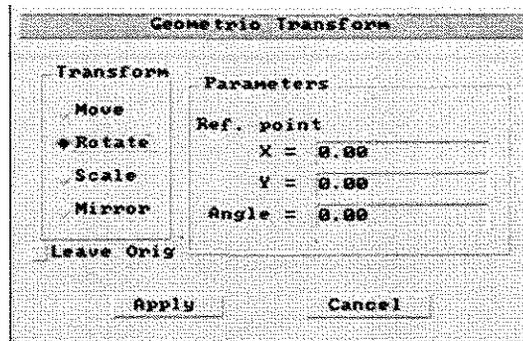
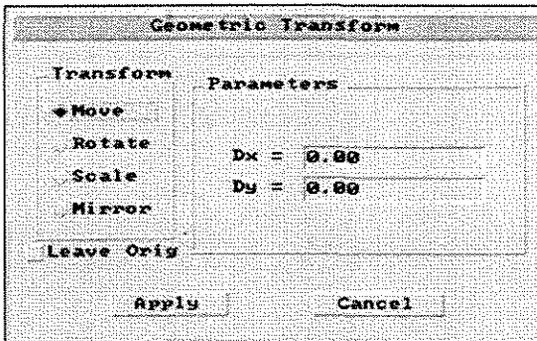


Figura 3.- Operações de transformações geométricas.

- REPEATE – repete o último comando de transformação geométrica, comando TRANSFORM, utilizado;
- DELETE – apaga todas as primitivas selecionadas do modelo.

#### 4.1.3.- MESH

Esta função do MENU é responsável pela definição do número de subdivisões e geração da malha de elementos finitos, ela é composta por três itens:

- SUBDIV – responsável pela definição da subdivisão das arestas do modelo. Na Figura 4, apresenta-se o diálogo utilizado na definição das subdivisões;

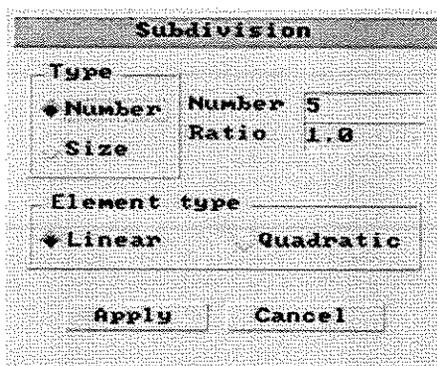
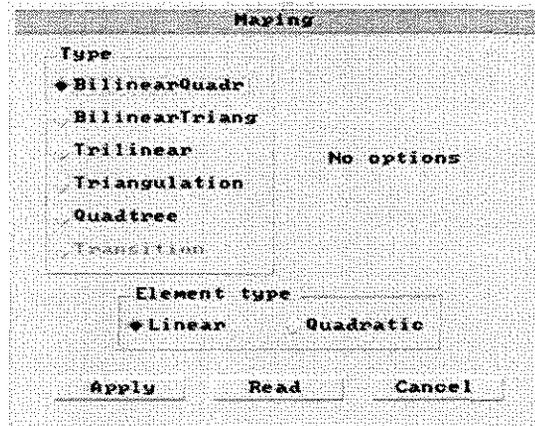


Figura 4.- Diálogo utilizado na definição das subdivisões.

- MAP – responsável pela definição do tipo de mapeamento utilizado nas regiões do modelo selecionadas. Na Figura 5, é apresentado o diálogo para definição do mapeamento utilizado.



**Figura 5.-** Diálogo utilizado na definição do mapeamento.

Os mapeamentos podem ser aplicados a regiões quadrilaterais, triangulares e em regiões de transição. No caso do mapeamento de transição é necessário que seja definido um PATTERN que representa a forma com que será feita a transição; o arquivo que descreve o PATTERN tem a seguinte composição:

- número de PATTERNS que são definidos no arquivo;
- nome do PATTERNS;
- o número de nós, número de nós no interior, número de elementos, número de subdivisões superior e inferior;
- coordenadas dos nós no sistema natural do PATTERN, as coordenadas são definidas no intervalo de (- 1.0 a 1.0);
- número do elemento, número de nós da incidência e incidência do elemento.

A Figura 6, mostra a descrição do arquivo.

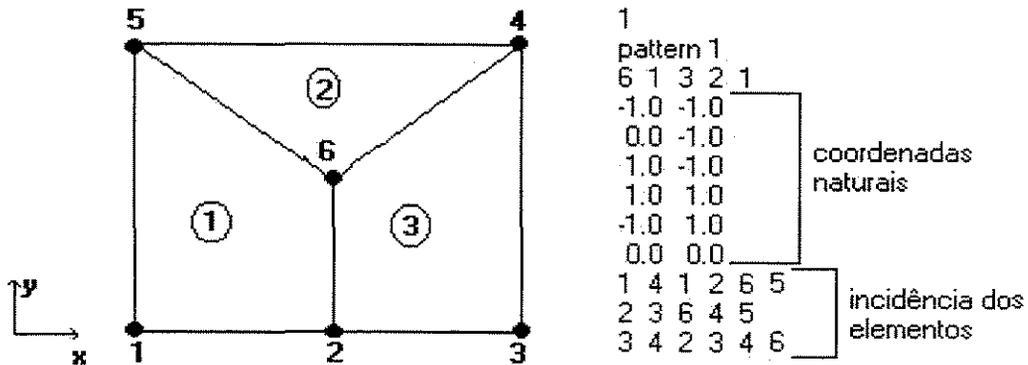


Figura 6.- Descrição do arquivo de definição do PATTERN, utilizado no mapeamento de transição.

#### 4.1.4.- ATTRIBUTES

Esta função é responsável pela definição dos atributos relativos a cada entidade do MTOOL, tais como:

- FACE – define os atributos relativos às regiões do modelo topológico: material, espessura, ordem de integração e se a região em questão é um buraco ou não. Na Figura 7, apresenta-se o diálogo utilizado na definição do tipo e parâmetro do material;

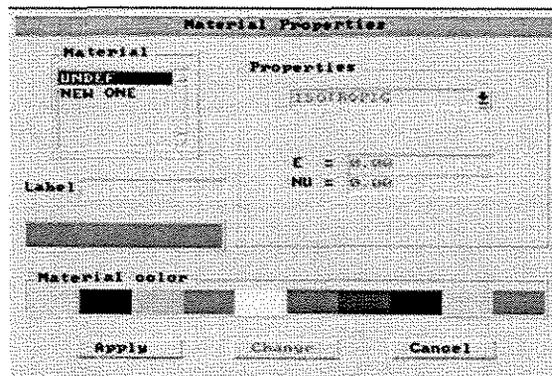


Figura 7.- Diálogo utilizado na definição do tipo e parâmetros do material.

- EDGE – define os atributos relativos às arestas do modelo topológico: condições de contorno, carregamento aplicado, deslocamentos prescritos, no caso de interface definem-se o material e a ordem de integração; é responsável também pela definição do tipo de aresta: geométrica, borda infinita ou interface. Na Figura 8, são apresentados os diálogos utilizados na definição dos atributos da aresta;

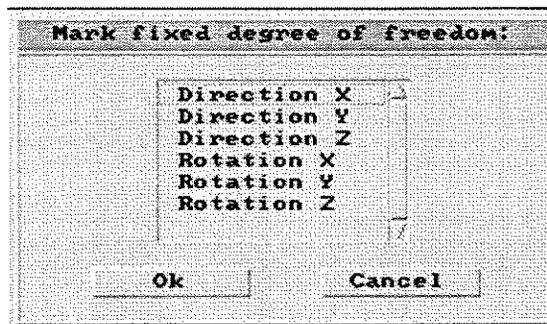
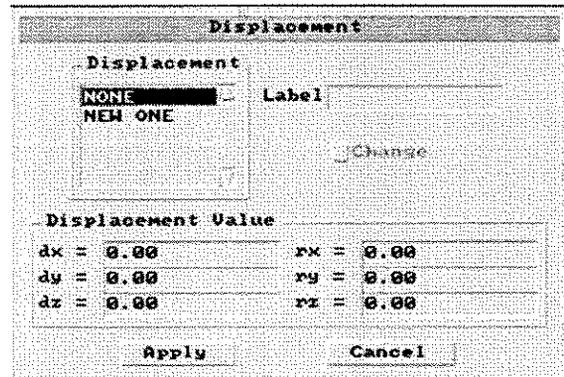
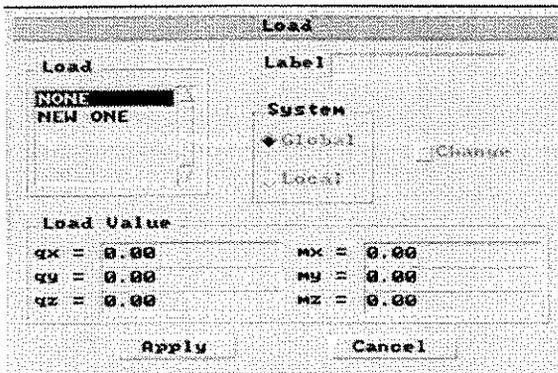


Figura 8.- Diálogo utilizado na definição dos atributos das arestas.

- VERTEX – define os atributos relativos aos vértices do modelo topológico: condições de contorno, carregamento aplicado, deslocamentos prescritos. Na Figura 9, são apresentados os diálogos utilizados na definição dos atributos dos vértices.

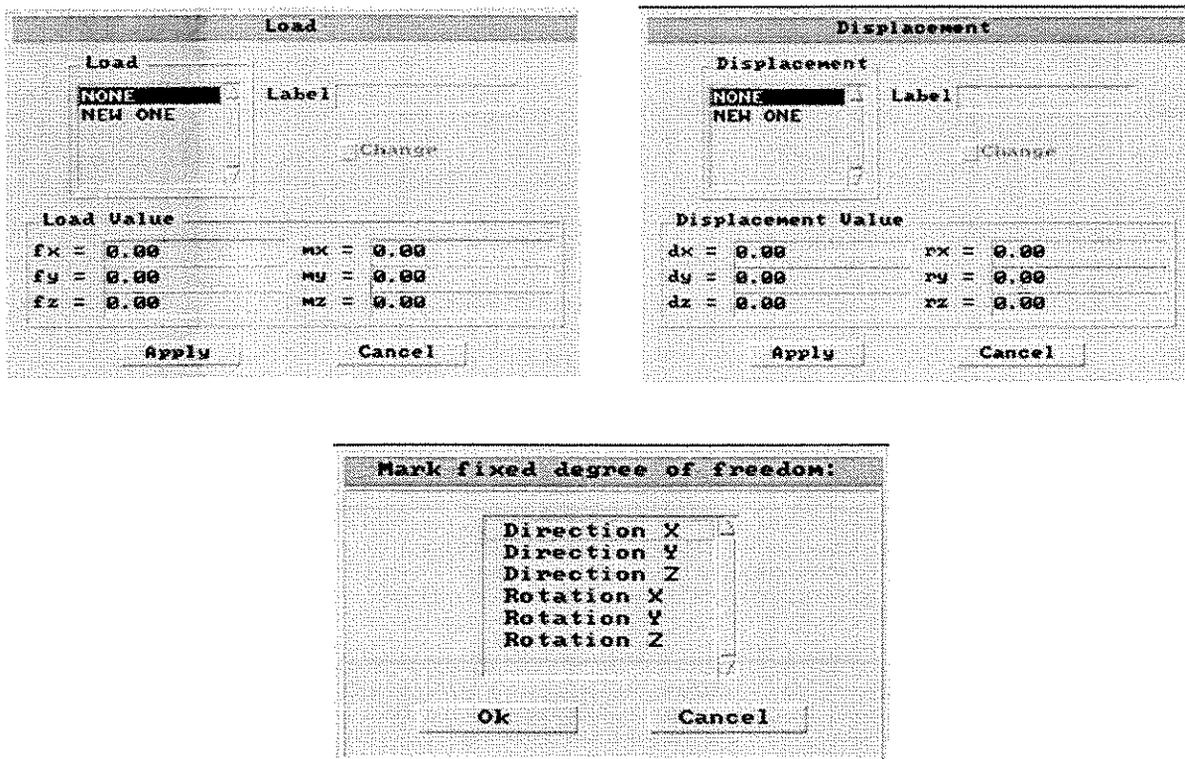


Figura 9.- Diálogo utilizado na definição dos atributos dos vértices.

A função é responsável, ainda, pela definição do tipo de análise que deve ser utilizada no modelo. Na Figura 10, é mostrado o diálogo para a definição do tipo de análise.

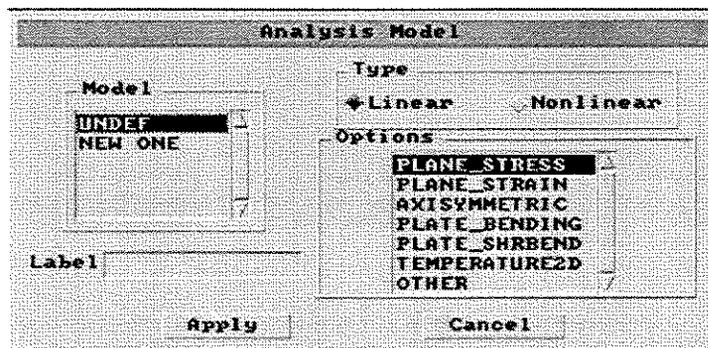


Figura 10.- Diálogo utilizado na definição do tipo de análise.

#### **4.1.5.- SELECT**

Esta função do menu é responsável pela seleção de entidades que possuam as mesmas características, tais como:

- MATERIAL – seleciona regiões com o mesmo material;
- THICKNESS – seleciona regiões com a mesma espessura;
- INTER. ORDER – seleciona regiões com a mesma ordem de integração;
- SUPPORT – seleciona arestas ou vértices que estejam com as mesmas condições de contorno aplicadas;
- LOAD – seleciona arestas ou vértices que tenham o mesmo carregamento aplicado;
- UNSELALL – desmarca as entidades do modelo selecionadas.

#### **4.1.6.- DISPLAY**

Esta função do menu é responsável por algumas funções de visualização, tais como :

- LIMIT – define os limites de visualização da área de desenho;
- DISTORTION – define a relação entre as dimensões vertical e horizontal da área de desenho;
- VISIBILITY – define quais atributos devem ser vistos: material, subdivisão, malha e condições de contorno.

## 4.2.- FUNÇÕES DE VISUALIZAÇÃO

Na figura 11, são mostradas as funções de visualização do sistema MTOOL. Estas funções são utilizadas para auxiliar na edição da geometria do modelo.

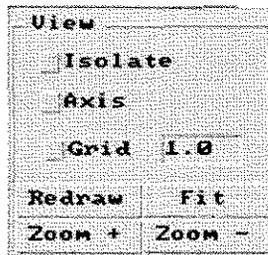


Figura 11.- Funções de visualização do sistema MTOOL.

### 4.2.1.- ISOLATE

Esta opção é utilizada para isolar as regiões selecionadas, ou seja, somente as regiões selecionadas ficarão visíveis na tela e somente elas serão convertidas para o modelo de elementos finitos.

### 4.2.2.- AXIS

Esta função tem por finalidade mostrar os eixos.

### 4.2.3.- GRID

Esta opção é composta de duas operações: uma opção de ligar e desligar, e a definição do espaçamento do *grid*. O *snap* fica disponível somente quando o grid está ativo e é acionado ao se pressionar a tecla *CONTROL*, durante a movimentação do *mouse*.

### 4.2.4.- REDRAW

Esta opção tem por finalidade redesenhar o modelo.

#### **4.2.5.- FIT**

Esta opção tem por finalidade enquadrar o modelo na área de visualização.

#### **4.2.6.- ZOOM +**

Permite ampliar uma região especificada do modelo, que passa a ocupar toda a área referente á janela de visualização; a região a ser ampliada é especificada por um retângulo, esta função não distorce o desenho de maneira que a região mapeada é referente ao menor retângulo dentro do retângulo especificado, que tenha a mesma razão da janela principal. Podem-se especificar diversas janelas de ZOOM consecutivas.

#### **4.2.7.- ZOOM -**

Permite restaurar a última janela de ZOOM especificada. Esta função só tem efeito caso já tenha sido executada alguma operação de ZOOM, sendo que a função FIT faz com que esta função não tenha mas efeito.

### 4.3.- PRIMITIVAS DO AMBIENTE DE EDIÇÃO

No ambiente de edição da topologia as funções, apresentadas na Figura 12, são sempre executadas até que o usuário troque para a opção SELECT ou para outra primitiva. Deste modo, o sistema fica esperando a inserção da primitiva selecionada ou da seleção de alguma entidade.

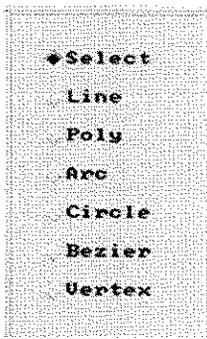


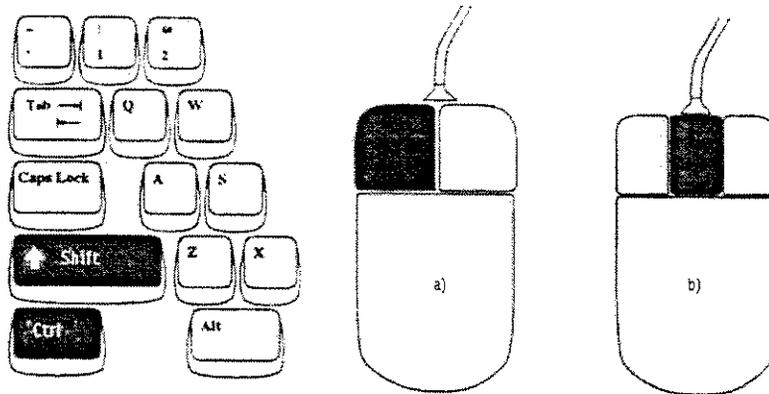
Figura 12.- Primitivas utilizadas no sistema MTOOL.

#### 4.3.1.- INSERÇÃO UTILIZANDO O TECLADO

No sistema MTOOL, a utilização do teclado para inserir primitivas pode ser feito de duas maneiras:

- Utilizando-se mouse de dois botões: deve-se utilizar as teclas *Control* e *Shift* e pressionar o botão esquerdo do *mouse*;
- Utilizando-se *mouse* de três botões: basta pressionar o botão do meio.

A Figura 13, mostra o acionamento da opção de teclado com as duas maneiras.



**Figura 13.- Acionamento da opção de teclado:**  
a) mouse de dois botões. b) mouse de três botões

#### 4.3.2.- INSERÇÃO DE LINHAS

A inserção de linhas no sistema MTOOL é feita escolhendo-se a primitiva LINE com uma única operação do mouse. O ponto inicial da linha é definido utilizando-se o botão esquerdo do *mouse* e, com o mesmo pressionado, movimenta-se o *mouse* para a posição final. Ao se soltar o botão do *mouse*, a inserção da linha é encerrada e uma nova linha é esperada.

#### 4.3.3.- INSERÇÃO DE POLIGONAIS

A inserção de poligonais no sistema MTOOL é feita, escolhendo-se a primitiva POLY, utilizando-se o botão esquerdo do *mouse* para definir os pontos da poligonal. Neste caso, o movimento do *mouse* é feito sem que o botão esquerdo do *mouse* esteja pressionado, e a inserção é encerrada pressionando-se o botão direito do *mouse*.

#### **4.3.4.- INSERÇÃO DE ARCO DE CÍRCULO**

A inserção de arcos de círculo no sistema MTOOL é feita escolhendo-se a primitiva ARC, utilizando-se o botão esquerdo do *mouse* para definir os pontos inicial e final do arco. Esta operação, como no caso da linha, é feita com uma única operação do *mouse*. Após definição dos pontos inicial e final do arco, o centro é definido interativamente, apontando-se o quadrado que identifica o centro e movimentando-se o *mouse* com o botão esquerdo pressionado. O pontos inicial e final que definem o arco podem ser movimentados da mesma forma como foi feito com o centro.

#### **4.3.5.- INSERÇÃO DE CÍRCULO**

A inserção de círculos no sistema MTOOL é feita escolhendo-se a primitiva Circle, utilizando-se o botão esquerdo do *mouse* para definir o centro e o raio do círculo. Esta operação, como no caso da linha, é feita com uma única operação do *mouse*.

#### **4.3.6.- INSERÇÃO DE BEZIER**

A inserção de BEZIER no sistema MTOOL é feita, escolhendo-se a primitiva Bezier, utilizando-se o botão esquerdo do *mouse* para definir o ponto inicial e final da Bezier. Esta operação, como no caso da linha, é feita com uma única operação do *mouse*. Após serem definidos os pontos inicial e final da Bezier, podem ser editados os pontos de controle, assim como os pontos de definição. A operação de edição é encerrada utilizando-se o botão direito do *mouse*, e a localização dos pontos de controle é feita posicionando-se o cursor nas marcas que representam os pontos, e com o botão esquerdo do *mouse* pressionado movimenta-se o ponto desejado para a posição correta. A operação de edição não é possível quando é utilizado o modo de inserção pelo teclado.

### 4.3.7.- INSERÇÃO DE VÉRTICES

A inserção de um vértice no sistema MTOOL é feita escolhendo-se a primitiva Vertex, utilizando-se o botão esquerdo do *mouse* para definir a posição desejada para o vértice.

### 4.4.- AMBIENTE DE EDIÇÃO DA MALHA

O ambiente de edição da malha mostrado na Figura 14, é utilizado para edições localizadas no modelo topológico. Esta edição é feita utilizando-se duas primitivas básicas: linha e vértice.

Neste ambiente, a região topológica é convertida para uma malha de elementos finitos que pode ser editada e onde se podem aplicar atributos a elementos e/ou arestas específicas. As funções de visualização, seleção e edição também estão presentes neste ambiente, realizando as mesmas ações do ambiente de edição de topologia. A aplicação de atributos é feita da mesma forma que no ambiente de topologia, porém cada região corresponde a um elemento finito. Sendo assim, o atributo aplicado é exclusivo deste elemento ou de suas arestas.

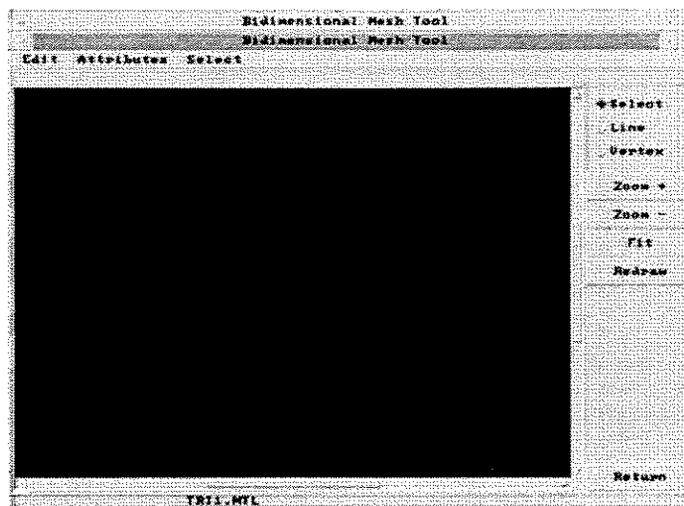
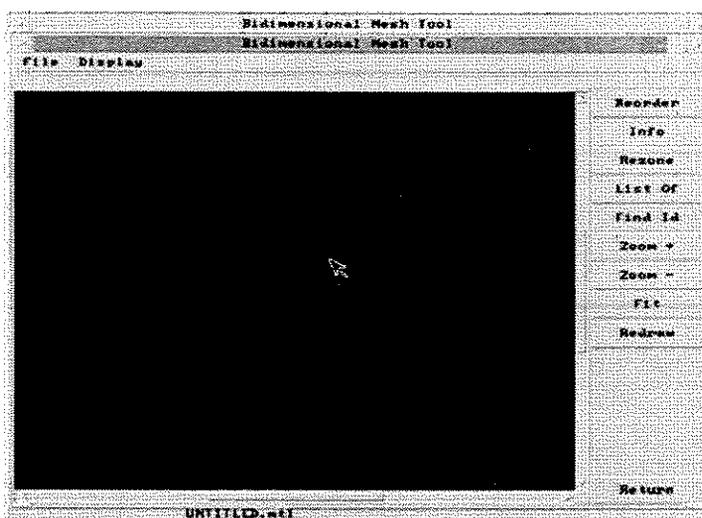


Figura 14.- Ambiente de edição de malha.

#### 4.5.- AMBIENTE DE VISUALIZAÇÃO DE MALHA

O ambiente de visualização de malha como mostrado na Figura 15, contém duas regiões distintas:

- O menu de barra, onde estão às funções que operam sobre arquivos e visualização das primitivas do modelo de elementos finitos;
- Uma área lateral que contém botões responsáveis pela visualização e geração de informações sobre o modelo.



**Figura 15.- Ambiente de visualização de malha.**

No nosso caso foram desenhadas duas malhas iniciais de cascas quadradas com as seguintes características :

1. Casca em planta quadrada de (21 m x 21 m) sem domo.
2. Casca em planta quadrada de (21 m x 21 m) com domo (raio de 2,5 m).

O programa MTOOL fornece um arquivo de saída em formato neutro (ver Apêndice B). Neste caso é mostrado o arquivo de saída da malha inicial para a geração da casca quadrada de forma livre sem domo :

#### 4.6.- ARQUIVO EM FORMATO NEUTRO

%HEADER

File created by mtool program

%NODE

841

%NODE.COORD

841

1	-9.750000	-10.500000	0.000000
2	-9.000001	-10.500000	0.000000
3	-8.250000	-10.500000	0.000000
4	-7.500000	-10.500000	0.000000
5	-6.750000	-10.500000	0.000000
6	-6.000000	-10.500000	0.000000

.

.

.

839	8.250000	10.500000	0.000000
840	9.000001	10.500000	0.000000
841	9.750000	10.500000	0.000000

%MATERIAL

1

%MATERIAL.LABEL

1

1 'mat1'

```

%MATERIAL.ISOTROPIC
1
1      30000 0.25
%THICKNESS
1
1      1
%INTEGRATION.ORDER
1
1      2      2      1      2      2      1
%ELEMENT
1568
%ELEMENT.T3
1568
1      1      1      1      32      1      2
2      1      1      1      33      2      3
3      1      1      1      34      3      4
.
.
.
1566 1      1      1      808      839      838
1567 1      1      1      809      840      839
1568 1      1      1      810      841      840
%END

```

#### 4.7.- PROGRAMA COMPUTACIONAL DE VIZOTTO

Para a geração da forma tridimensional da casca, foi utilizado o programa do Prof. Dr. Isaiás Vizotto, desenvolvido em seu doutorado. A sua formulação teve como base técnicas combinadas de programação matemática e o método dos elementos finitos. Foi elaborado em linguagem Pascal e para ser usado em redes de trabalho tipo SUN e IBM.

É possível através deste programa, definir a forma tridimensional a partir de qualquer projeção em planta. Colocando-se os carregamentos desejados, que podem ser forças concentradas, distribuídas, simulação do peso próprio, pressão uniforme e deslocamentos prescritos.

Algumas hipóteses adotadas no programa:

- O elemento finito utilizado é o triangular plano com três graus de liberdade (CST); com deformação constante;
- A relação entre tensão e deformação é linear;
- Considerações de grandes deslocamentos e grandes deformações e para tal usou-se a solução exata de Deformação Quadrática de Green. Este estado plano de tensões é considerado para que tenhamos as condições de comportamento de membrana, que despreza as tensões e deformações fora do plano do elemento;
- O programa apresenta duas situações distintas: estruturas com Energia Potencial Total conhecida, para as quais é empregado um método de otimização do tipo Quase-Newton; e estruturas com Energia Potencial Total desconhecida, para as quais o método empregado é do tipo incremental Newton-Raphson.

Como resultado da aplicação desta formulação, é possível a definição de formas geométricas para estruturas em casca em que as cargas aplicadas são equilibradas, principalmente, por esforços internos de membrana. Entretanto, isto não exclui a possível existência de outros carregamentos que podem causar estados de tensão diferentes da compressão pura.

Por meio do modelo proposto é possível simular computacionalmente uma membrana flexível, de qualquer formato, sobre a qual podem atuar vários carregamentos, incluindo o efeito de pressão.

Sob a influência e a atuação destes carregamentos, a membrana é deformada até uma das suas configurações de equilíbrio, que define uma superfície média para a estrutura em casca fina a ser construída. No caso do carregamento de pressão pode ser mostrado, no caso geral, que o sistema de forças não é conservativo.

#### 4.7.1.- ARQUIVO DE ENTRADA PARA O PROGRAMA DE VIZOTTO

A seguir são mostrados os arquivos de entrada para o programa desenvolvido por Vizotto, assim como os gráficos das cascas obtidas.

##### Casca de planta quadrada sem domo

Alguns parâmetros:

nn : número de nós  
 ne : número de elementos  
 nr : número de restrições  
 nld : número de cargas sobre os nós  
 E : módulo de elasticidade  
 v : coeficiente de Poisson  
 t : espessura

nn	ne	nr	nld	E	v	t	densidade	iterações
841	1568	36	0	1.0	0.2	1.0	0.00018055	25230
1	-975.00	-1050.00	Numeração dos nós e coordenadas					
2	-900.00	-1050.00						
3	-825.00	-1050.00						
4	-750.00	-1050.00						
5	-675.00	-1050.00						
.								
.								
.								
839	825.00	1050.00						
840	900.00	1050.00						
841	975.00	1050.00						

1	32	2	1
2	33	3	2
3	34	4	3
4	35	5	4

Numeração dos elementos e incidências nodais

.

.

.

1566	808	838	839
1567	809	839	840
1568	810	840	841

1	1	0.0
1	2	0.0
1	3	0.0
27	1	0.0
27	2	0.0
27	3	0.0

Restrições de apoio e imposição de recalques

.

.

.

815	1	0.0
815	2	0.0
815	3	0.0

### Casca de planta quadrada com domo

nn	ne	nr	nld	E	v	t	densidade	iterações
874	1604	36	0	1.0	0.2	1.0	0.0003075	26220

1	-975.00	-1050.00
2	-900.00	-1050.00
3	-825.00	-1050.00
4	-750.00	-1050.00
5	-675.00	-1050.00

Numeração dos nós e coordenadas

.

.

.

872	825.00	1050.00
873	900.00	1050.00
874	975.00	1050.00

1	32	2	1
2	33	3	2
3	34	4	3
4	35	5	4
5	36	6	5

### Numeração dos elementos e incidências nodais

.  
.  
.

1601	840	870	871
1602	841	871	872
1603	842	872	873
1604	843	873	874

### Restrições de apoio e imposição de recalques

1	1	0.0
1	2	0.0
1	3	0.0
27	1	0.0
27	2	0.0
27	3	0.0

.  
.  
.

848	1	0.0
848	2	0.0
848	3	0.0
874	1	0.0
874	2	0.0
874	3	0.0

Nas Figuras 16 a 19 são apresentadas as formas obtidas por carregamento da membrana com forças uniformemente distribuídas atuando ascendentemente na forma quadrada sem domo.

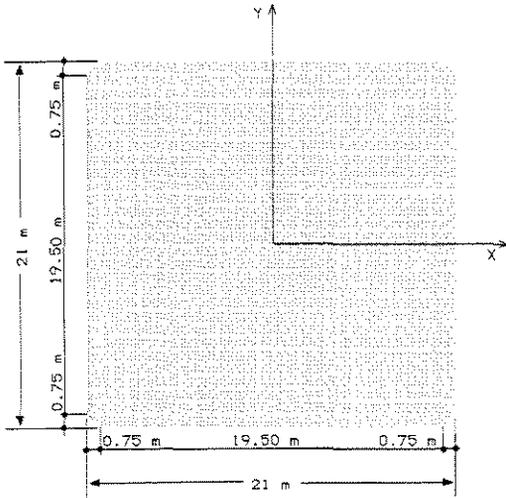


Figura 16 - Dimensões em planta da malha inicial para a geração da estrutura em casca

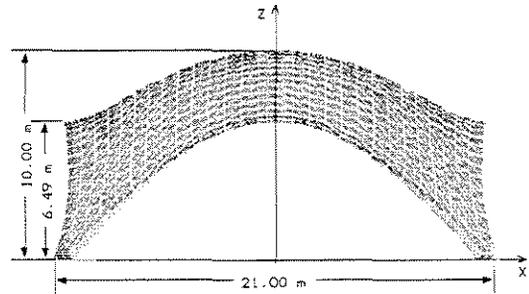


Figura 18 - Dimensões da casca na projeção vertical no plano XZ.

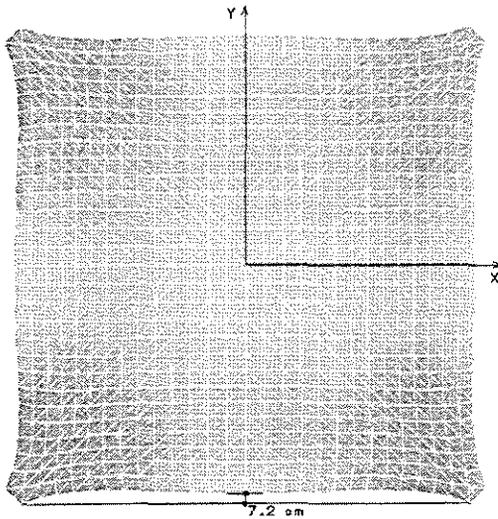


Figura 17 - Dimensões em planta da estrutura em casca quadrada sem domo.



Figura 19 - Casca de forma livre obtida pelo carregamento da membrana flexível com peso próprio.

Nas Figuras 20 a 23 são apresentadas as formas obtidas por carregamento da membrana com forças uniformemente distribuídas atuando ascendentemente na forma quadrada com domo.

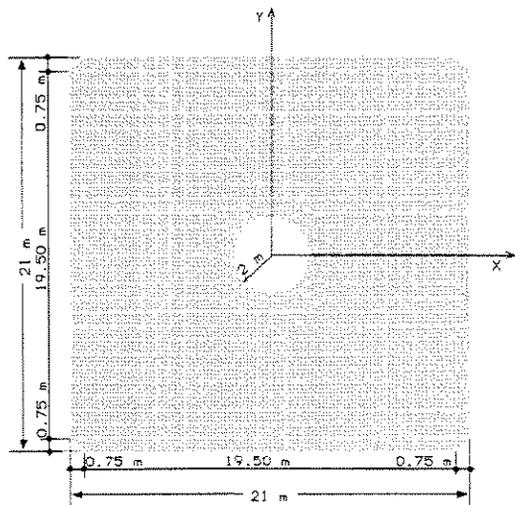


Figura 20 - Dimensões em planta da malha inicial para a geração da estrutura em casca.

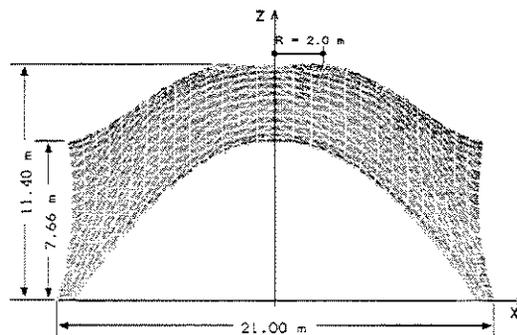


Figura 22 - Dimensões da casca na projeção vertical no plano XZ.

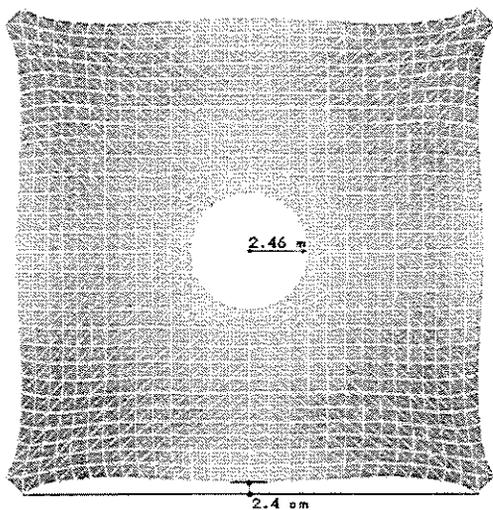


Figura 21 - Dimensões em planta da estrutura em casca quadrada com domo.



Figura 23 - Casca de forma livre obtida pelo carregamento da membrana flexível com peso próprio.

Depois de obtidas as formas geométricas das cascas com o programa desenvolvido por Vizotto, procedeu-se as análises estáticas das formas livres das estruturas em casca, com os apoios considerados fixos, sob a influência das ações de peso próprio, sobrecargas, temperatura e vento. Para tanto foi utilizado o programa de análise numérica ANSYS (ver apêndice C).

#### 4.8.- ARQUIVO DE ENTRADA PARA O PROGRAMA ANSYS

O elemento SHELL63 da biblioteca do ANSYS trabalha com flexão e comportamento de membrana; as cargas aplicadas estão sobre o plano e normal a ela. Este tipo de elemento tem seis graus de liberdade por nó: três de translação e três de rotação sobre os eixos X, Y e Z, respectivamente. A capacidade para grandes deformações também estão incluídas; as direções das tensões são paralelas ao sistema de coordenadas do elemento.

A geometria, localização dos nós, e o sistema de coordenadas para este tipo de elemento são mostrados na figura A. Este elemento está definido por quatro nós, permitindo a redução para um elemento simplificado de três nós. Para maiores detalhes ver referência bibliográfica com relação ao manual do ANSYS.

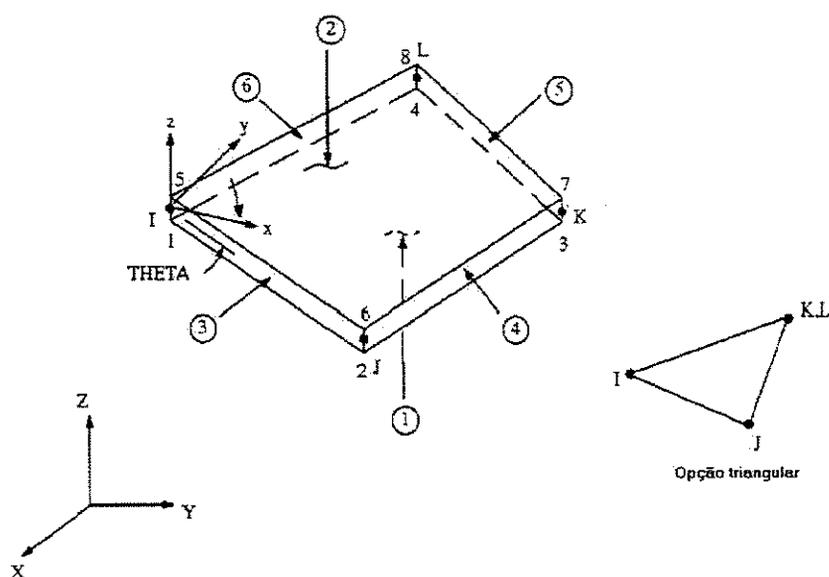


Figura A. Elemento SHELL63, os eixos X e Y estão sobre o plano do elemento.

## Casca de planta quadrada sem domo

KAN,0 : Análise Estática  
 ET,1,63 : Tipo de Elemento pertencente à biblioteca do ANSYS  
  
 R,1,40 : Espessura do Material  
 R,2,38  
 R,3,36  
 R,4,33  
 R,5,30  
 R,6,27  
 R,7,25  
  
 MP,EX,1,2.1e6 : Módulo de Elasticidade  
 MP,NUXY,1,0.2 : Coeficiente de Poisson  
 MP,ALPX,1,1e-07 : Coeficiente Térmico  
 MP,DENS,1,0.0025 : Densidade  
  
 N, 1, -975.0000, -1050.0000, 0.0000 : Numeração dos nós  
 N, 2, -897.5686, -1019.3653, 94.0792  
 N, 3, -820.5834, -1004.6596, 174.2007  
 .  
 .  
 N, 839, 820.5834, 1004.6596, 174.2007  
 N, 840, 897.5686, 1019.3654, 94.0792  
 N, 841, 975.0000, 1050.0000, 0.0000  
 REAL,1 : Numeração dos Elementos  
 E, 32, 2, 1, 1  
 E, 33, 3, 2, 2

```
REAL,1
E, 809, 839, 840, 840
E, 810, 840, 841, 841
E, 811, 841, 842, 842
```

```
D,1,ALL : Restrições
```

```
D,27,ALL
```

```
D,28,ALL
```

```
.
.
.
```

```
D,815,UX,UZ,ROTX,ROTZ
```

```
D,841,UX,UZ,ROTX,ROTZ
```

```
/VIEW,1,1,1.5,0.4 : Visualizar
```

```
/VUP,1,Z : Posição do eixo Z
```

```
/PBC,ALL,1 : Desenha as Condições de Contorno
```

```
EPlot : Desenha os Elementos
```

Para o elemento finito triangular considerado (SHELL63), as convenções adotadas para os deslocamentos, rotações e tensões principais são:

- Deslocamentos UX, UY, UZ são positivos nas direções positivas dos eixos X, Y e Z, respectivamente.

- Rotações ROTX, ROTY, ROTZ são positivas quando, segundo a regra da mão direita, o polegar é posicionado nos sentidos positivos dos eixos X, Y e Z, respectivamente.

- Tensões Principais S1, S2, S3 são positivas quando são de tração, e negativas quando de compressão.

Após a aplicação das ações através do programa de análise numérica ANSYS foram feitas as combinações requeridas pela Norma de Ações e Seguranças (ver Apêndice G), tomando-se em conta a ação do vento na direção diagonal e na lateral. Também considerou-se uma temperatura mínima e máxima, assim como o peso próprio e sobrecargas (ver Apêndice H).

Também são mostradas as Tabelas contendo os valores máximo e mínimo para os resultados dos deslocamentos da superfície média da casca, e das tensões principais nas superfícies superior, média e inferior; para cada tipo de ação aplicada, que são mostrados nas Tabelas 01 a 12.

Se a relação entre a espessura  $h$  e uma dimensão característica  $a$ , da superfície média da casca é menor do que  $1/20$  ( $h/a < 0,05$ ), tem-se o caso de *casca fina*, que se caracterizam por seguir as hipóteses de **Kirchhoff**:

- Um elemento reto da casca, normal a sua superfície média, após a deformação permanece perpendicular àquela superfície e mantém seu comprimento inicial; esta hipótese é equivalente a desconsiderar as tensões de cisalhamento atuantes na direção da espessura, bem como a deformação específica na direção perpendicular à superfície média;
- As tensões normais à superfície média são pequenas em comparação com as outras tensões e podem ser desprezadas; esta hipótese é equivalente a desconsiderar a energia de deformação correspondente a estas tensões.

#### 4.9.- RESULTADOS PARA A CASCA QUADRADA DE FORMA LIVRE SEM DOMO

Nas Tabelas de 1 a 6, são apresentados os resultados principais da análise estrutural da casca. Os materiais e parâmetros da geometria são mostrados a seguir:

- E: Módulo de Elasticidade;
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson;
- $\rho$ : Densidade da Massa;
- g: Aceleração da Gravidade;
- q: Carga Acidental variável na superfície devido aos fatores de segurança;
- t: Espessura da Casca – de 40 até 25 cm.;
- a: Comprimento da Casca no Eixo-X;
- b: Comprimento da Casca no Eixo-Y;
- $h_a$ : Máxima Altura da Casca no Lado do Comprimento a (Figura 3);
- $h_b$ : Máxima Altura da Casca no Lado do Comprimento b (Figura 3);
- $h_c$ : Máxima Altura no Centro da Casca (Figura 3).

Casca quadrada sem domo Peso próprio			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = $2.1 \times 10^4$ MPa		a = 21.00 m	
$\nu = 0.20$		b = 21.00 m	
$\rho = 2.5 \times 10^3$ Kg/m <sup>3</sup>		$h_a = 6.4894$ m	
g = 9.81 m/s <sup>2</sup>		$h_b = 6.4894$ m	
t = de 40 até 25 cm.		$h_c = 10.009$ m	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x$ (Max.) = $0.758 \times 10^{-3}$		$U_x$ (Min.) = $-0.757 \times 10^{-3}$	
$U_y$ (Max.) = $0.756 \times 10^{-3}$		$U_y$ (Min.) = $-0.761 \times 10^{-3}$	
$U_z$ (Max.) = $0.122 \times 10^{-3}$		$U_z$ (Min.) = $-0.00124$	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1$ (Max.)	0.21716	0.03266	0.45552
$S_1$ (Min.)	-0.00387	-0.001	-0.00113
$S_2$ (Max.)	0.01616	$0.2 \times 10^{-3}$	0.20676
$S_2$ (Min.)	-0.37971	-0.35021	-0.48954
$S_3$ (Max.)	$-0.244 \times 10^{-3}$	-0.04151	0.00184
$S_3$ (Min.)	-1.805	-1.751	-2.121

Tabela – 01.- Peso próprio.

Casca quadrada sem domo Sobrecarga			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = $2.1 \times 10^4$ MPa		a = 21.00 m	
$\nu = 0.20$		b = 21.00 m	
q = 200 Kg/cm <sup>2</sup>		$h_a = h_b = 6.4894$ m	
t = de 40 até 25 cm.		$h_c = 10.009$ m	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x$ (Max.) = $0.966 \times 10^{-3}$		$U_x$ (Min.) = $-0.965 \times 10^{-3}$	
$U_y$ (Max.) = $0.963 \times 10^{-3}$		$U_y$ (Min.) = $-0.969 \times 10^{-3}$	
$U_z$ (Max.) = $0.155 \times 10^{-3}$		$U_z$ (Min.) = $-0.00158$	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1$ (Max.)	0.2767	0.04161	0.58043
$S_1$ (Min.)	-0.00493	-0.00128	-0.00144
$S_2$ (Max.)	0.02059	$0.254 \times 10^{-3}$	0.26346
$S_2$ (Min.)	-0.48383	-0.44624	-0.62378
$S_3$ (Max.)	$-0.311 \times 10^{-3}$	-0.05289	0.00235
$S_3$ (Min.)	-2.3	-2.231	-2.703

Tabela – 02.- Sobrecarga.

Casca quadrada sem domo Temperatura mínima			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
$E = 2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$	$a = 21.00 \text{ m}$		
$\nu = 0.20$	$b = 21.00 \text{ m}$		
$T = 5^\circ \text{C}$	$h_a = h_b = 6.4894 \text{ m}$		
$t = \text{de } 40 \text{ até } 25 \text{ cm.}$	$h_c = 10.009 \text{ m}$		
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x (\text{Max.}) = 0.518 \times 10^{-3}$		$U_x (\text{Min.}) = -0.518 \times 10^{-3}$	
$U_y (\text{Max.}) = 0.518 \times 10^{-3}$		$U_y (\text{Min.}) = -0.518 \times 10^{-3}$	
$U_z (\text{Max.}) = 0.00118$		$U_z (\text{Min.}) = 0.00$	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1 (\text{Max.})$	0.0845	0.0766	0.09027
$S_1 (\text{Min.})$	$-0.431 \times 10^{-3}$	$-0.365 \times 10^{-3}$	$-0.316 \times 10^{-3}$
$S_2 (\text{Max.})$	0.00144	0.00265	0.05121
$S_2 (\text{Min.})$	-0.0786	-0.4819	-0.02704
$S_3 (\text{Max.})$	$-0.201 \times 10^{-3}$	$0.727 \times 10^{-3}$	$-0.377 \times 10^{-3}$
$S_3 (\text{Min.})$	-1.052	-1.054	-1.058

Tabela – 03.- Temperatura mínima.

Casca quadrada sem domo Temperatura máxima			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
$E = 2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$	$a = 21.00 \text{ m}$		
$\nu = 0.20$	$b = 21.00 \text{ m}$		
$T = 45^\circ \text{C}$	$h_a = h_b = 6.4894 \text{ m}$		
$t = \text{de } 40 \text{ até } 25 \text{ cm.}$	$h_c = 10.009 \text{ m}$		
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x (\text{Max.}) = 0.00466$		$U_x (\text{Min.}) = -0.00466$	
$U_y (\text{Max.}) = 0.00466$		$U_y (\text{Min.}) = -0.00466$	
$U_z (\text{Max.}) = 0.01061$		$U_z (\text{Min.}) = 0.00$	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1 (\text{Max.})$	0.76057	0.68943	0.81247
$S_1 (\text{Min.})$	-0.00388	$-0.328 \times 10^{-3}$	$-0.284 \times 10^{-3}$
$S_2 (\text{Max.})$	0.01297	0.02389	0.46092
$S_2 (\text{Min.})$	-0.70742	-0.43378	-0.24334
$S_3 (\text{Max.})$	-0.00181	$0.654 \times 10^{-3}$	0.00339
$S_3 (\text{Min.})$	-9.464	-9.489	-9.519

Tabela – 04.- Temperatura máxima.

Casca quadrada sem domo Vento na direção diagonal			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
$E = 2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$	$a = 21.00 \text{ m}$		
$\nu = 0.20$	$b = 21.00 \text{ m}$		
$q = 0,0135 \text{ Kgf/cm}^2$	$h_a = h_b = 6.4894 \text{ m}$		
$t = \text{de } 40 \text{ até } 25 \text{ cm.}$	$h_c = 10.009 \text{ m}$		
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x (\text{Max.}) = 0.00616$		$U_x (\text{Min.}) = -0.00119$	
$U_y (\text{Max.}) = 0.00617$		$U_y (\text{Min.}) = -0.00119$	
$U_z (\text{Max.}) = 0.00587$		$U_z (\text{Min.}) = -0.00752$	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1 (\text{Max.})$	3.877	4.746	5.867
$S_1 (\text{Min.})$	-0.01021	-0.00409	-0.01451
$S_2 (\text{Max.})$	1.684	0.25212	0.9666
$S_2 (\text{Min.})$	-1.117	-0.20875	-1.087
$S_3 (\text{Max.})$	0.01673	0.00728	0.01444
$S_3 (\text{Min.})$	-2.243	-1.415	-3.537

Tabela – 05.- Vento na diagonal.

Casca quadrada sem domo Vento na direção lateral			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
$E = 2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$	$a = 21.00 \text{ m}$		
$\nu = 0.20$	$b = 21.00 \text{ m}$		
$q = 0,0135 \text{ Kgf/cm}^2$	$h_a = h_b = 6.4894 \text{ m}$		
$t = \text{de } 40 \text{ até } 25 \text{ cm.}$	$h_c = 10.009 \text{ m}$		
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x (\text{Max.}) = 0.00616$		$U_x (\text{Min.}) = -0.00119$	
$U_y (\text{Max.}) = 0.00617$		$U_y (\text{Min.}) = -0.00119$	
$U_z (\text{Max.}) = 0.00587$		$U_z (\text{Min.}) = -0.00752$	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1 (\text{Max.})$	3.877	4.746	5.867
$S_1 (\text{Min.})$	-0.01021	-0.00409	-0.01451
$S_2 (\text{Max.})$	1.684	0.25212	0.9666
$S_2 (\text{Min.})$	-1.117	-0.20875	-1.087
$S_3 (\text{Max.})$	0.01673	0.00728	0.01444
$S_3 (\text{Min.})$	-2.243	-1.415	-3.537

Tabela – 06.- Vento na lateral.

## 4.10.- RESULTADOS PARA A CASCA QUADRADA DE FORMA LIVRE COM DOMO

Nas Tabelas de 7 a 12, são apresentados os resultados principais da análise estrutural da casca. Os materiais e parâmetros da geometria são mostrados a seguir:

- E: Módulo de Elasticidade;
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson;
- $\rho$ : Densidade da Massa;
- g: Aceleração da Gravidade;
- q: Carga Acidental variável na superfície devido aos fatores de segurança;
- t: Espessura da Casca;
- a: Comprimento da Casca no Eixo-X;
- b: Comprimento da Casca no Eixo-Y;
- $h_a$ : Máxima Altura da Casca no Lado do Comprimento a (Figura 7);
- $h_b$ : Máxima Altura da Casca no Lado do Comprimento b (Figura 7);
- $h_c$ : Máxima Altura no Centro da Casca (Figura 7).

Casca quadrada com domo			
Peso próprio			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = $2.1 \times 10^4$ MPa		a = 21.00 m	
$\nu = 0.20$		b = 21.00 m	
$\rho = 2.5 \times 10^3$ Kg/m <sup>3</sup>		$h_a = 7.6577$ m	
g = 9.81 m/s <sup>2</sup>		$h_b = 7.6575$ m	
t = de 40 até 25 cm.		$h_c = 11.403$ m	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x$ (Max.) = $0.932 \times 10^{-2}$		$U_x$ (Min.) = $-0.932 \times 10^{-2}$	
$U_y$ (Max.) = $0.933 \times 10^{-2}$		$U_y$ (Min.) = $-0.935 \times 10^{-2}$	
$U_z$ (Max.) = $0.172 \times 10^{-2}$		$U_z$ (Min.) = $-0.00125$	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1$ (Max.)	0.20899	0.05887	0.48155
$S_1$ (Min.)	-0.00517	-0.00114	-0.00127
$S_2$ (Max.)	0.002314	$0.352 \times 10^{-2}$	0.24197
$S_2$ (Min.)	-0.42579	-0.33956	-0.46513
$S_3$ (Max.)	-0.00532	-0.04385	0.0085
$S_3$ (Min.)	-1.739	-1.698	-2.1

Tabela – 07.- Peso próprio.

Casca quadrada com domo			
Sobrecarga			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = $2.1 \times 10^4$ MPa		a = 21.00 m	
$\nu = 0.20$		b = 21.00 m	
q = 200 kg/cm <sup>2</sup>		$h_a = h_b = 7.6577$ m	
t = de 40 até 25 cm.		$h_c = 11.403$ m	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
$U_x$ (Max.) = 0.00119		$U_x$ (Min.) = - 0.00119	
$U_y$ (Max.) = 0.00119		$U_y$ (Min.) = - 0.00119	
$U_z$ (Max.) = $0.22 \times 10^{-2}$		$U_z$ (Min.) = - 0.0016	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
$S_1$ (Max.)	0.26629	0.07502	0.6136
$S_1$ (Min.)	-0.00659	-0.00146	-0.00161
$S_2$ (Max.)	0.00295	$0.449 \times 10^{-2}$	0.30831
$S_2$ (Min.)	-0.54255	-0.43267	-0.59267
$S_3$ (Max.)	-0.00678	-0.05587	0.00363
$S_3$ (Min.)	-2.216	-2.164	-2.675

Tabela – 08.- Sobrecarga.

Casca quadrada com domo Temperatura mínima			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = 2.1x10 <sup>4</sup> MPa		a = 21.00 m	
v = 0.20		b = 21.00 m	
T = 5 °C		h <sub>a</sub> = h <sub>b</sub> = 7.6574 m	
t = de 40 até 25 cm.		h <sub>c</sub> = 11.403 m	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
U <sub>x</sub> (Max.) = 0.517 x10 <sup>-3</sup>		U <sub>x</sub> (Min.) = -0.517 x10 <sup>-3</sup>	
U <sub>y</sub> (Max.) = 0.517 x10 <sup>-3</sup>		U <sub>y</sub> (Min.) = -0.517 x10 <sup>-3</sup>	
U <sub>z</sub> (Max.) = 0.001135		U <sub>z</sub> (Min.) = 0.00	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
S <sub>1</sub> (Max.)	0.08997	0.08375	0.07759
S <sub>1</sub> (Min.)	-0.457 x10 <sup>-3</sup>	-0.388 x10 <sup>-4</sup>	-0.362 x10 <sup>-3</sup>
S <sub>2</sub> (Max.)	0.00259	0.00232	0.03846
S <sub>2</sub> (Min.)	-0.08942	-0.04741	-0.04767
S <sub>3</sub> (Max.)	-0.111 x10 <sup>-3</sup>	0.704 x10 <sup>-3</sup>	0.391 x10 <sup>-3</sup>
S <sub>3</sub> (Min.)	-1.055	-1.058	-1.062

Tabela – 09.- Temperatura mínima.

Casca quadrada com domo Temperatura máxima			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = 2.1x10 <sup>4</sup> MPa		a = 21.00 m	
v = 0.20		b = 21.00 m	
T = 45 °C		h <sub>a</sub> = h <sub>b</sub> = 7.6574 m	
t = de 40 até 25 cm.		h <sub>c</sub> = 11.403 m	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
U <sub>x</sub> (Max.) = 0.00465		U <sub>x</sub> (Min.) = -0.00465	
U <sub>y</sub> (Max.) = 0.00465		U <sub>y</sub> (Min.) = -0.00465	
U <sub>z</sub> (Max.) = 0.01022		U <sub>z</sub> (Min.) = 0.00	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
S <sub>1</sub> (Max.)	0.80969	0.75372	0.69833
S <sub>1</sub> (Min.)	-0.00412	-0.35 x10 <sup>-3</sup>	-0.326 x10 <sup>-4</sup>
S <sub>2</sub> (Max.)	0.0233	0.02085	0.34612
S <sub>2</sub> (Min.)	-0.80482	-0.42668	-0.42906
S <sub>3</sub> (Max.)	-0.0010	0.633 x10 <sup>-4</sup>	0.00352
S <sub>3</sub> (Min.)	-9.493	-9.523	-9.555

Tabela – 10.- Temperatura máxima.

Casca quadrada com domo Vento na direção diagonal			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = 2.1x10 <sup>4</sup> MPa		a = 21.00 m	
v = 0.20		b = 21.00 m	
q = 0,0135 Kgf/cm <sup>2</sup>		h <sub>a</sub> = h <sub>b</sub> = 7.6574 m	
t = de 40 até 25 cm.		h <sub>c</sub> = 11.403	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
U <sub>x</sub> (Max.) = 0.00833		U <sub>x</sub> (Min.) = -0.00227	
U <sub>y</sub> (Max.) = 0.00833		U <sub>y</sub> (Min.) = -0.00227	
U <sub>z</sub> (Max.) = 0.00709		U <sub>z</sub> (Min.) = -0.00849	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
S <sub>1</sub> (Max.)	7.193	5.312	6.486
S <sub>1</sub> (Min.)	-0.01271	-0.00408	-0.01771
S <sub>2</sub> (Max.)	2.369	0.24551	1.1265
S <sub>2</sub> (Min.)	-1.25	-0.18597	-1.2802
S <sub>3</sub> (Max.)	0.02845	0.00857	0.01574
S <sub>3</sub> (Min.)	-6.49	-2.81	-4.0512

Tabela – 11.- Vento na diagonal.

Casca quadrada com domo Vento na direção lateral			
Materiais e Parâmetros da Geometria			
E = 2.1x10 <sup>4</sup> MPa		a = 21.00 m	
v = 0.20		b = 21.00 m	
q = 0,0135 Kgf/cm <sup>2</sup>		h <sub>a</sub> = h <sub>b</sub> = 7.6574 m	
t = de 40 até 25 cm.		h <sub>c</sub> = 11.403 m	
Deslocamentos da Superfície Média (m.)			
U <sub>x</sub> (Max.) = 0.004996		U <sub>x</sub> (Min.) = -0.004996	
U <sub>y</sub> (Max.) = 0.00715		U <sub>y</sub> (Min.) = 0.00	
U <sub>z</sub> (Max.) = 0.00475		U <sub>z</sub> (Min.) = -0.00636	
Tensões Principais			
Tensões (MPa)	Superfícies		
	Superior	Média	Inferior
S <sub>1</sub> (Max.)	5.128	3.211	3.551
S <sub>1</sub> (Min.)	-0.02262	-0.00886	-0.01221
S <sub>2</sub> (Max.)	1.061	0.43697	1.507
S <sub>2</sub> (Min.)	-1.946	-0.15649	-0.7996
S <sub>3</sub> (Max.)	0.01013	0.01244	0.03901
S <sub>3</sub> (Min.)	-4.047	-1.613	-3.013

Tabela – 12.- Vento na lateral.

#### 4.11.- SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS

Os tipos de combinações sugeridas pela Norma de Ações e Seguranças para as cascas de plantas quadradas com e sem domo, considerando-se as diferentes ações estão relacionadas a seguir :

Convenções usadas :

p.p.	:	peso próprio
s.c.	:	sobrecarga
temp1	:	temperatura mínima
temp2	:	temperatura máxima
vla	:	vento na direção lateral
vdi	:	vento na direção diagonal

- 1.-  $1.4 \text{ p.p.} + 1.4 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp1} + 0.84 \text{ vla}$
- 2.-  $1.4 \text{ p.p.} + 1.4 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp1} + 0.84 \text{ vdi}$
- 3.-  $1.4 \text{ p.p.} + 1.4 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp2} + 0.84 \text{ vla}$
- 4.-  $1.4 \text{ p.p.} + 1.4 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp2} + 0.84 \text{ vdi}$
- 5.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp1} + 1.4 \text{ vla}$
- 6.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp1} + 1.4 \text{ vdi}$
- 7.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp2} + 1.4 \text{ vla}$
- 8.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 0.84 \text{ temp2} + 1.4 \text{ vdi}$
- 9.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 1.2 \text{ temp1} + 0.84 \text{ vla}$
- 10.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 1.2 \text{ temp1} + 0.84 \text{ vdi}$
- 11.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 1.2 \text{ temp2} + 0.84 \text{ vla}$
- 12.-  $1.4 \text{ p.p.} + 0.84 \text{ s.c.} + 1.2 \text{ temp2} + 0.84 \text{ vdi}$

Foram aplicados os fatores correspondentes, indicados pela Norma de Ações e Segurança, encontrando-se a combinação de maior efeito para as cascas de plantas quadradas com e sem domo.

## 4.11.1.- Tabelas das combinações da casca quadrada sem domo

Combinação N° 01

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.035	-0.0299	1.1642	-0.0103	4.7581	-0.01321
<b>S<sub>2</sub></b>	1.3654	-4.2228	0.03853	-4.2558	2.5899	-3.8719
<b>S<sub>3</sub></b>	0.628*10 <sup>-2</sup>	-8.2797	0.53*10 <sup>-2</sup>	-9.358	0.0391	-10.485
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.005103	-0.005107
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.006091	-0.002802
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.011891	-0.004991

Tabela I

Combinação N° 02

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	1.876	-0.02224	0.59561	-0.55*10 <sup>-2</sup>	2.9025	-0.01467
<b>S<sub>2</sub></b>	1.3308	-6.7095	0.561*10 <sup>-2</sup>	-6.3864	1.2989	-6.0634
<b>S<sub>3</sub></b>	0.569*10 <sup>-2</sup>	-8.9444	-0.10925	-9.5303	0.013174	-10.389
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.006443	-0.003213
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.006444	-0.003212
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.010307	-0.005993

Tabela II

Combinação N° 03

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.1466	-0.02703	1.0385	-0.01004	4.153	-0.01352
<b>S<sub>2</sub></b>	1.4279	-2.7194	0.04377	-1.5899	2.211	-1.9432
<b>S<sub>3</sub></b>	0.65*10 <sup>-2</sup>	-5.4913	0.24*10 <sup>-2</sup>	-5.0441	0.03657	-7.9277
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.005443	-0.005432
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.006915	-0.00163
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.004704	-0.008412

Tabela III

Combinação N° 04

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	2.0324	-0.01934	0.29712	-0.52*10 <sup>-2</sup>	2.3046	-0.01497
<b>S<sub>2</sub></b>	1.4094	-2.1395	0.567*10 <sup>-2</sup>	-2.1305	0.9401	-3.119
<b>S<sub>3</sub></b>	0.68*10 <sup>-2</sup>	-6.603	-0.02051	-6.255	0.01087	-9.3454
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.007321	-0.473*10 <sup>-3</sup>
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.007327	-0.494*10 <sup>-3</sup>
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.003569	-0.009652

Tabela IV

Combinação N° 05

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	5.3027	-0.03678	1.7536	-0.01412	6.1883	-0.01908
<b>S<sub>2</sub></b>	1.8357	-3.7823	0.46762	-2.1754	3.2698	-2.6954
<b>S<sub>3</sub></b>	0.01074	-7.9804	0.01617	-9.4275	0.05802	-10.941
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.005762	-0.005779
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.008772	-0.001799
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.014186	-0.007304

**Tabela V**Combinação N° 06

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.2636	-0.02485	2.0719	-0.62*10 <sup>-2</sup>	3.1229	-0.02162
<b>S<sub>2</sub></b>	1.834	-5.9823	0.10701	-5.5697	1.4425	-5.1572
<b>S<sub>3</sub></b>	0.01459	-9.0246	0.78*10 <sup>-2</sup>	-9.7855	0.01778	-11.00
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.009316	-0.003306
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.00933	-0.003308
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.012805	-0.00901

**Tabela VI**

Combinação N° 07

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	5.4064	-0.03391	1.6279	-0.01386	5.5841	-0.01939
<b>S<sub>2</sub></b>	1.9116	-3.436	0.44318	-0.70393	2.8839	-1.8989
<b>S<sub>3</sub></b>	0.01134	-6.893	0.01613	-4.4551	0.05548	-7.6792
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.007187	-0.007177
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.009595	-0.00083
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.007095	-0.010895

**Tabela VII**Combinação N° 08

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.4879	-0.02195	3.3663	-0.59*10 <sup>-2</sup>	4.9774	-0.02231
<b>S<sub>2</sub></b>	1.9145	-1.958	0.12544	-1.9671	1.112	-3.2177
<b>S<sub>3</sub></b>	0.016398	-5.8758	0.78*10 <sup>-2</sup>	-5.4536	0.01889	-9.8731
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.010214	-0.00038
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.010219	-0.00039
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.006891	-0.012989

**Tabela VIII**

Combinação N° 09

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.0217	-0.02855	1.2015	-0.97*10 <sup>-2</sup>	4.7257	-0.01225
<b>S<sub>2</sub></b>	1.2366	-3.2308	0.13984	-3.4725	2.5952	-4.1544
<b>S<sub>3</sub></b>	0.601*10 <sup>-2</sup>	-11.533	0.942*10 <sup>-2</sup>	-12.277	0.039	-13.317
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.006719	-0.006723
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.006942	-0.004414
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.01531	-0.002844

**Tabela IX**Combinação N° 10

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	1.8227	-0.02111	0.84867	-0.49*10 <sup>-2</sup>	2.8705	-0.01372
<b>S<sub>2</sub></b>	1.1707	-5.4725	0.01435	-5.2064	1.3317	-5.3294
<b>S<sub>3</sub></b>	0.477*10 <sup>-2</sup>	-12.205	0.387*10 <sup>-2</sup>	-12.381	0.013282	-13.304
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.00809	-0.004845
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.008091	-0.004847
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.013689	-0.003702

**Tabela X**

Combinação N° 11

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.1755	-0.02444	1.022	-0.93*10 <sup>-2</sup>	3.8614	-0.01271
<b>S<sub>2</sub></b>	1.3077	-2.4694	0.10184	-1.6414	2.0468	-1.7558
<b>S<sub>3</sub></b>	0.659*10 <sup>-2</sup>	-4.9623	0.936*10 <sup>-2</sup>	-4.1628	0.03538	-6.5168
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.004828	-0.00482
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.006368	-0.001096
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.005034	-0.00734

**Tabela XI**Combinação N° 12

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	2.017	-0.01697	0.62492	-0.45*10 <sup>-2</sup>	2.0184	-0.01415
<b>S<sub>2</sub></b>	1.3059	-2.1097	0.04795	-2.2601	0.81325	-3.1505
<b>S<sub>3</sub></b>	0.785*10 <sup>-2</sup>	-5.3205	0.419*10 <sup>-2</sup>	-5.0129	0.01045	-7.9111
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.006732	-0.000214
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.006737	-0.000219
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.004179	-0.008549

**Tabela XII**

**Tabela A- Tensões Principais (MPa) da maior combinação.**

SUP.	NODE	SUP.	MED.	INF.
<b>S<sub>1</sub> Máx.</b>	4	<b>1.8227</b>	-0.32*10 <sup>-2</sup>	-0.34*10 <sup>-2</sup>
<b>S<sub>1</sub> Mín.</b>	437	<b>-0.02111</b>	-0.39*10 <sup>-2</sup>	2.0651
<b>S<sub>2</sub> Máx.</b>	65	<b>1.1707</b>	-0.36*10 <sup>-2</sup>	-1.0737
<b>S<sub>2</sub> Mín.</b>	28	<b>-5.4725</b>	-5.2064	-4.9403
<b>S<sub>3</sub> Máx.</b>	793	<b>0.48*10<sup>-2</sup></b>	-0.040275	-1.4484
<b>S<sub>3</sub> Mín.</b>	814	<b>-12.205</b>	-12.261	-12.318

MED.	NÓS	SUP.	MED.	INF.
<b>S<sub>1</sub> Máx.</b>	61	0.89115	<b>0.84867</b>	0.8062
<b>S<sub>1</sub> Mín.</b>	380	-0.014266	<b>-0.49*10<sup>-2</sup></b>	1.9292
<b>S<sub>2</sub> Máx.</b>	764	0.1797	<b>0.01435</b>	-0.048131
<b>S<sub>2</sub> Mín.</b>	28	-5.4725	<b>-5.2064</b>	-4.9403
<b>S<sub>3</sub> Máx.</b>	764	0.28*10 <sup>-2</sup>	<b>0.39*10<sup>-2</sup></b>	-1.2988
<b>S<sub>3</sub> Mín.</b>	28	-11.458	<b>-12.381</b>	-13.304

INF.	NÓS	SUP.	MED.	INF.
<b>S<sub>1</sub> Máx.</b>	407	0.19161	0.459	<b>2.8705</b>
<b>S<sub>1</sub> Mín.</b>	234	1.5127	0.1538	<b>-0.01372</b>
<b>S<sub>2</sub> Máx.</b>	438	-2.0319	-0.035231	<b>1.3317</b>
<b>S<sub>2</sub> Mín.</b>	31	-2.3321	-5.0664	<b>-5.3294</b>
<b>S<sub>3</sub> Máx.</b>	466	-3.3593	-0.80201	<b>0.013282</b>
<b>S<sub>3</sub> Mín.</b>	28	-11.458	-12.381	<b>-13.304</b>

## 4.11.2.- Tabelas das combinações da casca quadrada com domo

Combinação N° 01

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.3853	-0.03894	1.6032	-0.01121	4.3646	-0.01384
<b>S<sub>2</sub></b>	1.2678	-4.326	0.06948	-4.3144	2.2803	-4.1315
<b>S<sub>3</sub></b>	0.713*10 <sup>-2</sup>	-8.6079	0.934*10 <sup>-2</sup>	-9.5874	0.04436	-10.57
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.005658	-0.005647
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.007723	-0.002292
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.011432	-0.005474

**Tabela I**Combinação N° 02

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	5.5008	-0.02737	2.6155	-0.59*10 <sup>-2</sup>	2.7374	-0.01665
<b>S<sub>2</sub></b>	1.2950	-6.7416	0.08773	-6.4933	1.2159	-6.245
<b>S<sub>3</sub></b>	0.010204	-9.2208	-0.66*10 <sup>-2</sup>	-9.9727	0.018139	-10.82
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.008672	-0.003273
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.008678	-0.00327
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.010234	-0.007029

**Tabela II**

Combinação N° 03

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.3937	-0.03587	1.6009	-0.01095	3.8972	-0.01423
<b>S<sub>2</sub></b>	1.3041	-3.0276	0.06988	-1.5631	2.0018	-1.7596
<b>S<sub>3</sub></b>	0.764*10 <sup>-2</sup>	-5.3784	0.93*10 <sup>-2</sup>	-5.3094	0.04172	-8.2997
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.006804	-0.006796
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.008657	-0.001291
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.004648	-0.008811

**Tabela III**Combinação N° 04

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	5.5109	-0.024612	2.6261	-0.57*10 <sup>-2</sup>	2.2986	-0.017235
<b>S<sub>2</sub></b>	1.3406	-2.0838	0.087556	-2.1255	0.94449	-3.045
<b>S<sub>3</sub></b>	0.012247	-6.5125	-0.66*10 <sup>-2</sup>	-6.218	0.01587	-9.8425
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.009663	-0.105*10 <sup>-3</sup>
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.009696	-0.646*10 <sup>-3</sup>
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.004156	-0.010542

**Tabela IV**

Combinação N° 07

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	6.4695	-0.04484	3.4291	-0.015112	5.0906	-0.02017
<b>S<sub>2</sub></b>	1.7806	-3.8135	0.40759	-0.60482	2.6772	-1.7942
<b>S<sub>3</sub></b>	0.01357	-6.7161	0.016498	-5.0568	0.06164	-8.1981
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.00893	-0.008923
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.012041	-0.000115
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.00717	-0.011491

**Tabela VII**Combinação N° 08

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	9.6727	-0.02812	4.9505	-0.64*10 <sup>-2</sup>	5.8916	-0.02631
<b>S<sub>2</sub></b>	2.3396	-2.1534	0.22992	-1.987	1.0342	-3.1607
<b>S<sub>3</sub></b>	0.03001	-9.5392	0.01158	-5.6404	0.02131	-10.671
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.013644	-0.001318
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.01371	-0.001274
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.008168	-0.014395

**Tabela VIII**

Combinação N° 09

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.5855	-0.03673	1.7958	-0.01051	4.2464	-0.01273
<b>S<sub>2</sub></b>	1.1337	-3.3236	0.15824	-3.5924	2.2468	-4.0796
<b>S<sub>3</sub></b>	0.683*10 <sup>-2</sup>	-11.725	0.961*10 <sup>-2</sup>	-12.448	0.04369	-13.357
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.007243	-0.007234
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.007239	-0.003872
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.014638	-0.003298

**Tabela IX**Combinação N° 10

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	5.6438	-0.02569	2.768	-0.53*10 <sup>-2</sup>	2.6422	-0.01565
<b>S<sub>2</sub></b>	1.1642	-5.6099	0.10747	-5.413	1.1955	-5.3504
<b>S<sub>3</sub></b>	0.01108	-12.366	0.676*10 <sup>-2</sup>	-12.663	0.018013	-13.286
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.009278	-0.004938
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.009271	-0.004898
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.013445	-0.004689

**Tabela X**

Combinação N° 11

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	3.5976	-0.03234	1.7925	-0.010161	3.5786	-0.013314
<b>S<sub>2</sub></b>	1.2059	-2.7398	0.14875	-1.5759	1.8471	-1.5871
<b>S<sub>3</sub></b>	0.781*10 <sup>-2</sup>	-4.8436	0.956*10 <sup>-2</sup>	-4.4937	0.03994	-6.8695
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.00606	-0.006053
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.007987	-0.000664
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.004979	-0.007726

**Tabela XI**Combinação N° 12

Tensões Principais (MPa)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>S<sub>1</sub></b>	5.6341	-0.02145	2.7702	-0.49*10 <sup>-2</sup>	2.106	-0.01657
<b>S<sub>2</sub></b>	1.2632	-2.241	0.1071	-2.2642	0.78995	-3.095
<b>S<sub>3</sub></b>	0.013947	-5.8938	0.677*10 <sup>-2</sup>	-5.0216	0.01444	-8.3957
	<b>Superfície SUP.</b>		<b>Superfície MED.</b>		<b>Superfície INF.</b>	

Deslocamentos (cm)

	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>
<b>U<sub>X</sub></b>	0.008952	-0.000504
<b>U<sub>Y</sub></b>	0.008985	-0.000468
<b>U<sub>Z</sub></b>	0.004856	-0.00945

**Tabela XII**

**Tabela B.-Tensões Principais (MPa) da maior combinação.**

SUP.	NÓS	SUP.	MED.	INF.
<b>S<sub>1</sub> Máx.</b>	364	<b>5.6438</b>	2.7589	0.46328
<b>S<sub>1</sub> Mín.</b>	45	<b>-0.02569</b>	-0.43*10 <sup>-2</sup>	1.9529
<b>S<sub>2</sub> Máx.</b>	177	<b>1.1642</b>	-0.37*10 <sup>-2</sup>	-1.1484
<b>S<sub>2</sub> Mín.</b>	28	<b>-5.6099</b>	-5.4144	-5.2178
<b>S<sub>3</sub> Máx.</b>	350	<b>0.01108</b>	0.27*10 <sup>-3</sup>	-1.5894
<b>S<sub>3</sub> Mín.</b>	847	<b>-12.366</b>	-12.341	-12.316

MED.	NÓS	SUP.	MED.	INF.
<b>S<sub>1</sub> Máx.</b>	364	5.6269	<b>2.768</b>	0.46328
<b>S<sub>1</sub> Mín.</b>	72	-0.017297	<b>-0.53*10<sup>-2</sup></b>	1.9152
<b>S<sub>2</sub> Máx.</b>	391	0.75228	<b>0.10747</b>	-0.53302
<b>S<sub>2</sub> Mín.</b>	28	-5.6109	<b>-5.413</b>	-5.2178
<b>S<sub>3</sub> Máx.</b>	391	0.52*10 <sup>-2</sup>	<b>0.68*10<sup>-2</sup></b>	-1.0134
<b>S<sub>3</sub> Mín.</b>	846	-12.198	<b>-12.663</b>	-13.256

INF.	NÓS	SUP.	MED.	INF.
<b>S<sub>1</sub> Máx.</b>	14	0.25495	0.50309	<b>2.6422</b>
<b>S<sub>1</sub> Mín.</b>	234	1.6277	0.14814	<b>-0.01565</b>
<b>S<sub>2</sub> Máx.</b>	45	-1.4353	-0.061516	<b>1.1955</b>
<b>S<sub>2</sub> Mín.</b>	31	-2.2346	-5.0985	<b>-5.3504</b>
<b>S<sub>3</sub> Máx.</b>	490	-3.1119	-0.72063	<b>0.018013</b>
<b>S<sub>3</sub> Mín.</b>	28	-11.56	-12.423	<b>-13.286</b>

Com estes resultados, foram utilizados para análise os valores das tensões máximas e mínimas nas superfícies superior, média, e inferior das cascas.

A seguir são mostrados os gráficos da combinação maior assim como as iso-superfícies das máximas combinações encontradas.

Das Figuras 24 a 29 são apresentados os deslocamentos (UX, UY, UZ), rotações (ROTX, ROTY, ROTZ) e tensões principais (S1, S2, S3) na superfície média da casca no eixo-X e na simetria do eixo-Y.

Das Figuras 30 a 71 são apresentadas as iso-superfícies dos deslocamentos (UX, UY, UZ), rotações (ROTX, ROTY, ROTZ) e tensões principais (S1, S2, S3) nas três superfícies (superior, média e inferior) das combinações maiores da casca.

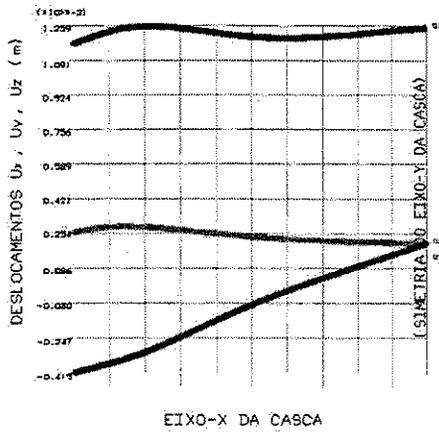


Figura 24 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada sem domo

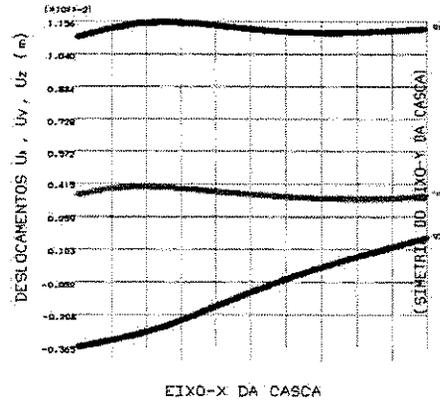


Figura 27 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

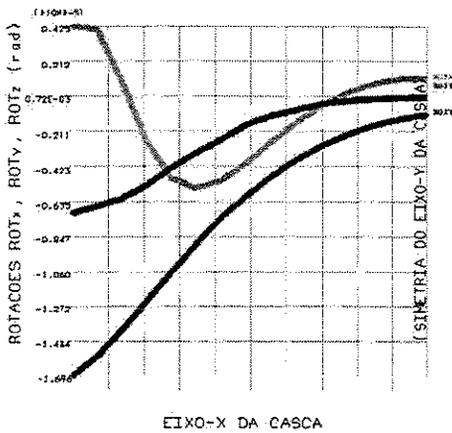


Figura 25 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada sem domo

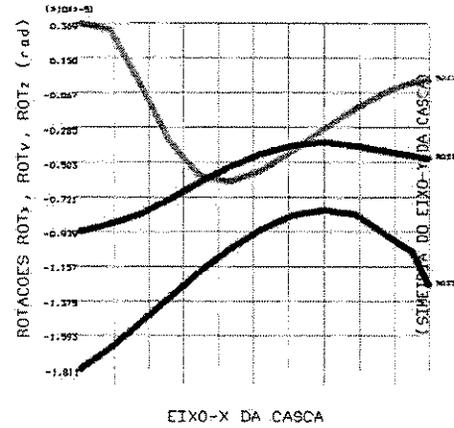


Figura 28 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada com domo

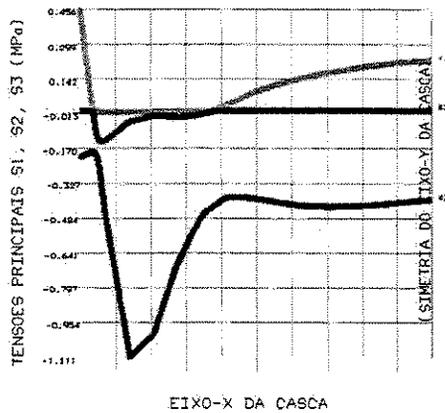


Figura 26 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada sem domo

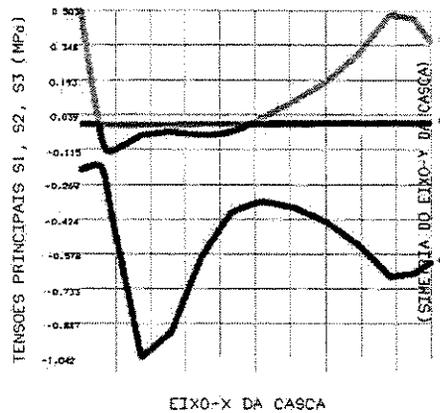


Figura 29 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada com domo

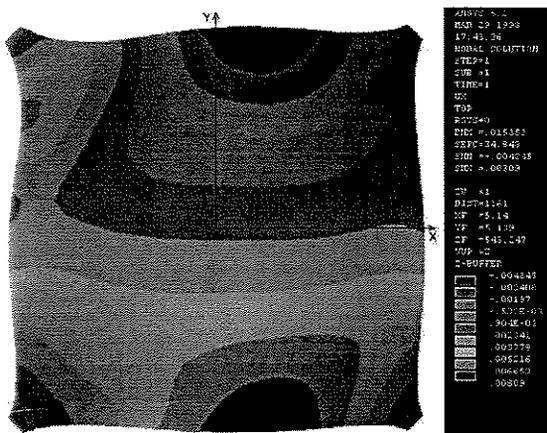


Figura 30 - Deslocamentos UX iguais nas três superfícies da casca quadrada sem domo

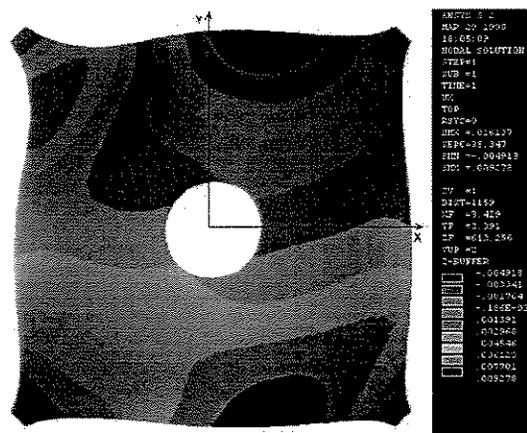


Figura 33 - Deslocamentos UX iguais nas três superfícies da casca quadrada com domo

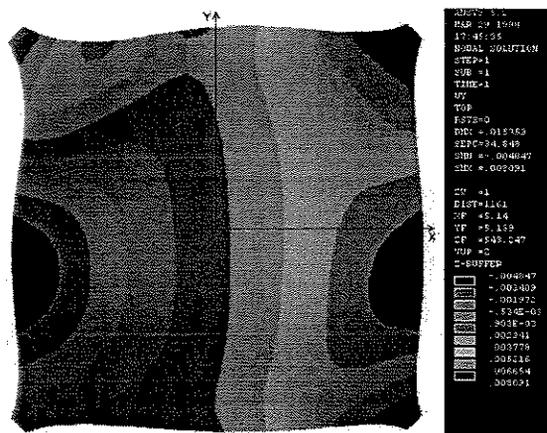


Figura 31 - Deslocamentos UY iguais nas três superfícies da casca quadrada sem domo

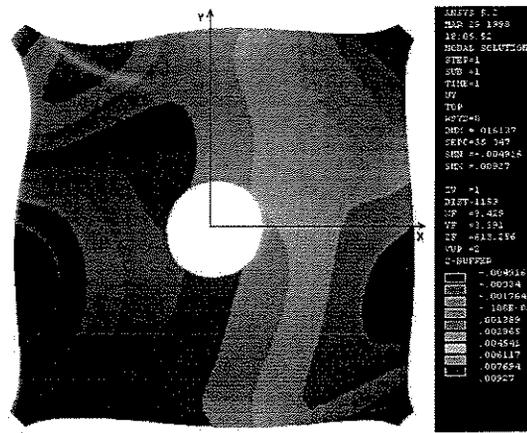


Figura 34 - Deslocamentos UY iguais nas três superfícies da casca quadrada com domo

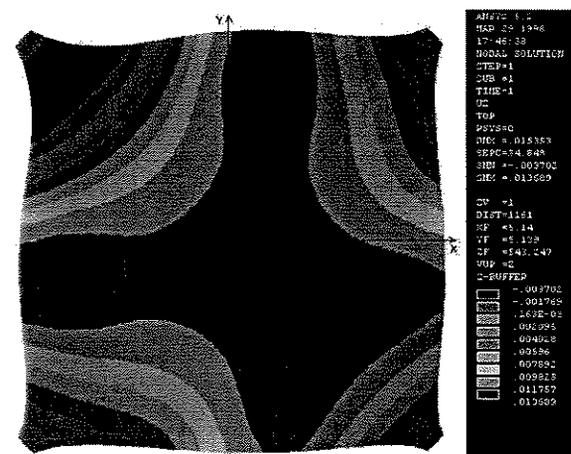


Figura 32 - Deslocamentos UZ iguais nas três superfícies da casca quadrada sem domo

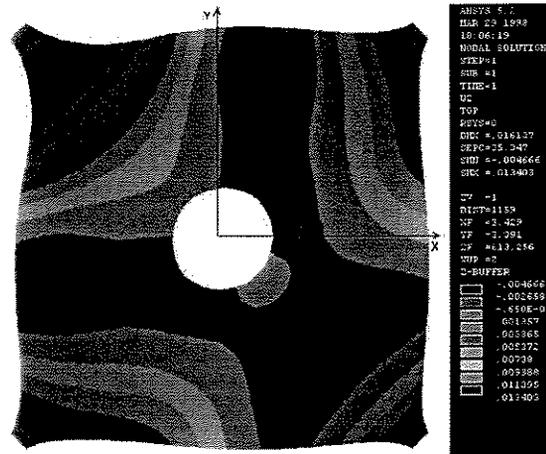


Figura 35 - Deslocamentos UZ iguais nas três superfícies da casca quadrada com domo

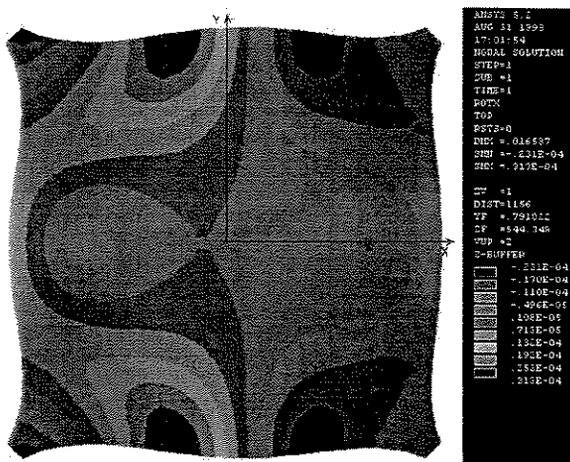


Figura 36 - ROTX na superfície Superior da casca quadrada sem domo

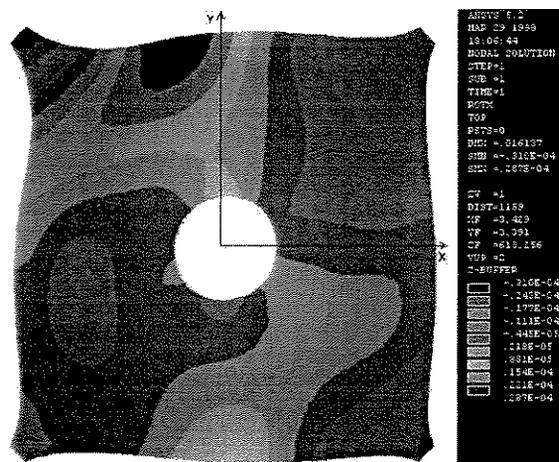


Figura 39 - ROTX na superfície Superior da casca quadrada com domo

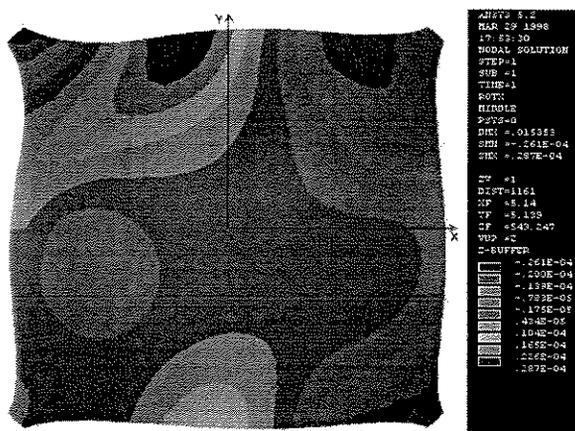


Figura 37 - ROTX na superfície Média da casca quadrada sem domo

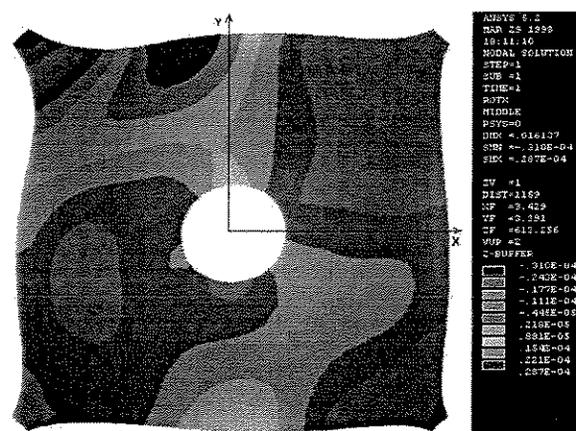


Figura 40 - ROTX na superfície Média da casca quadrada com domo

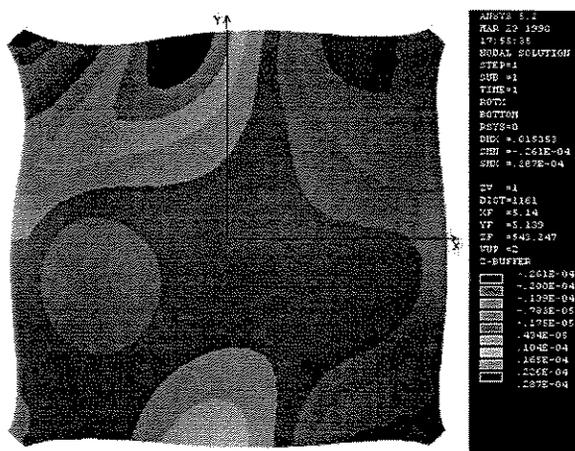


Figura 38 - ROTX na superfície Inferior da casca quadrada sem domo

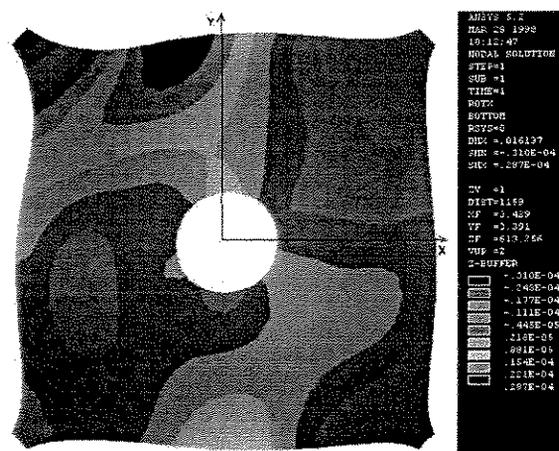


Figura 41 - ROTX na superfície Inferior da casca quadrada com domo

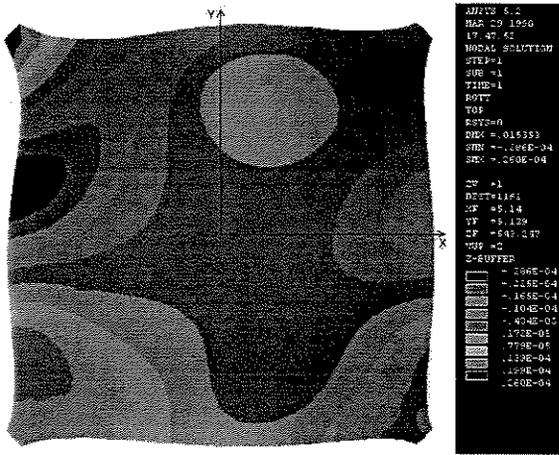


Figura 42 - ROTY na superfície Superior da casca quadrada sem domo

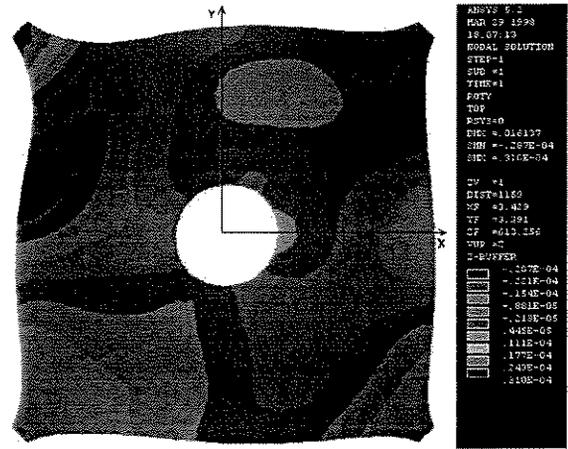


Figura 45 - ROTY na superfície Superior da casca quadrada com domo

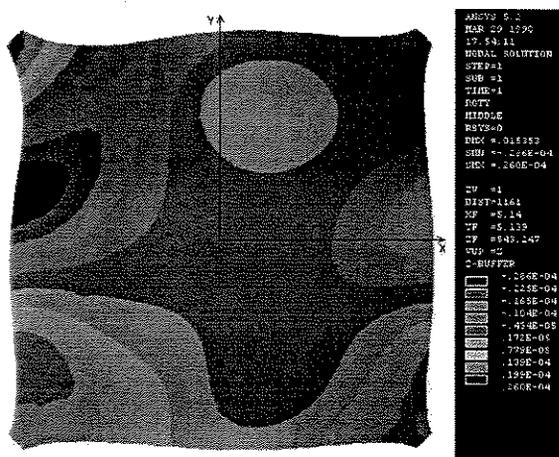


Figura 43 - ROTY na superfície Média da casca quadrada sem domo

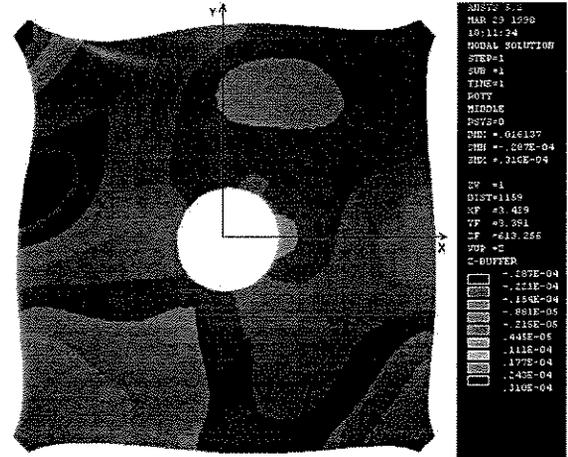


Figura 46 - ROTY na superfície Média da casca quadrada com domo

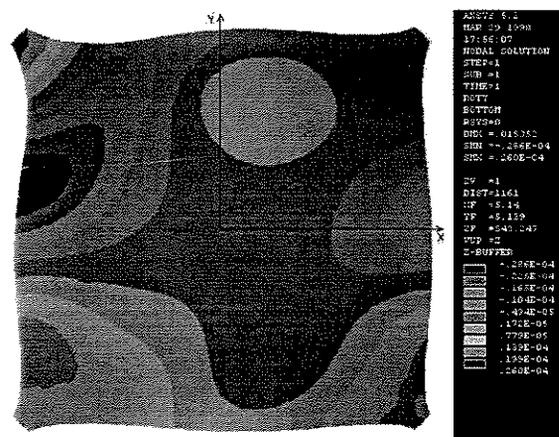


Figura 44 - ROTY na superfície Inferior da casca quadrada sem domo

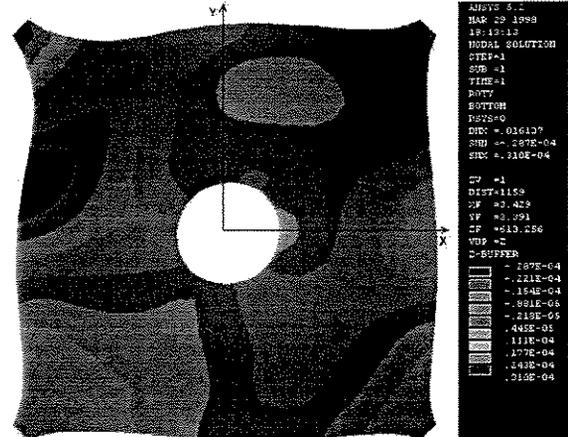


Figura 47 - ROTY na superfície Inferior da casca quadrada com domo

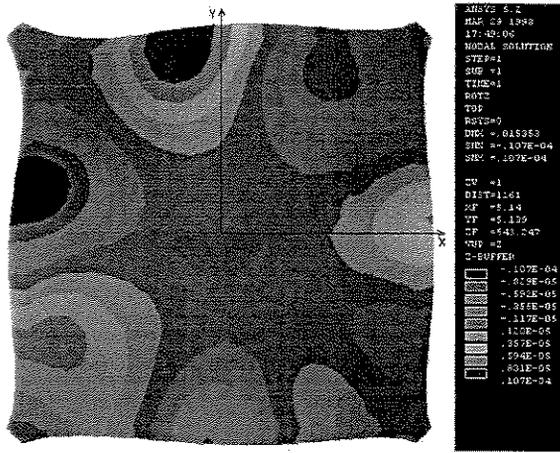


Figura 48 - ROTZ na superfície Superior da casca quadrada sem domo

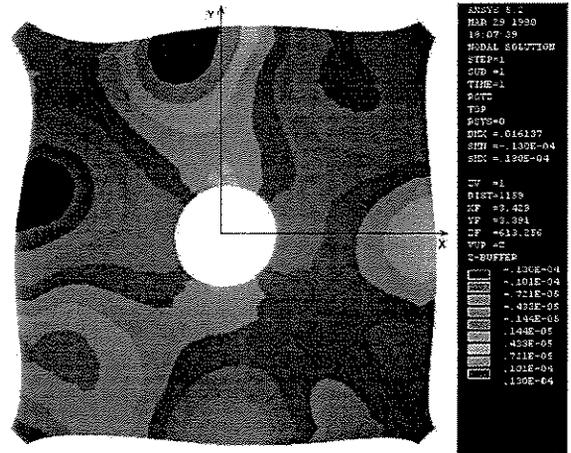


Figura 51 - ROTZ na superfície Superior da casca quadrada com domo

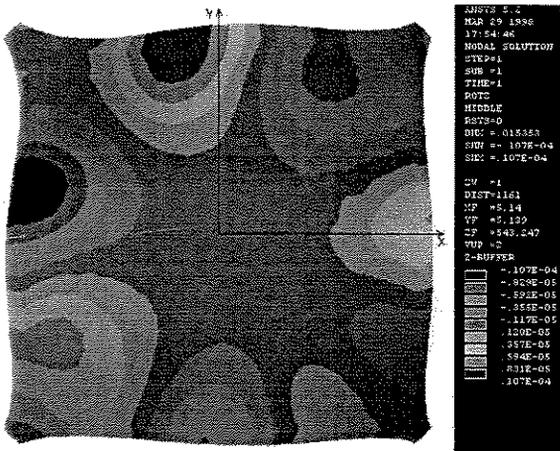


Figura 49 - ROTZ na superfície Média da casca quadrada sem domo



Figura 52 - ROTZ na superfície Média da casca quadrada com domo

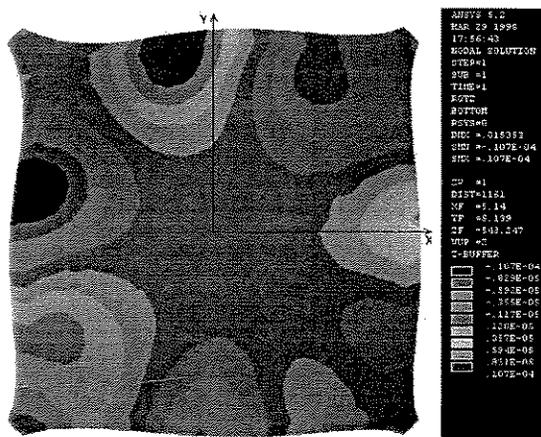


Figura 50 - ROTZ na superfície Inferior da casca quadrada sem domo

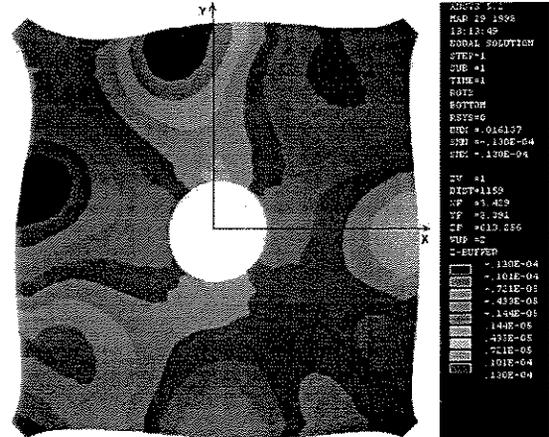
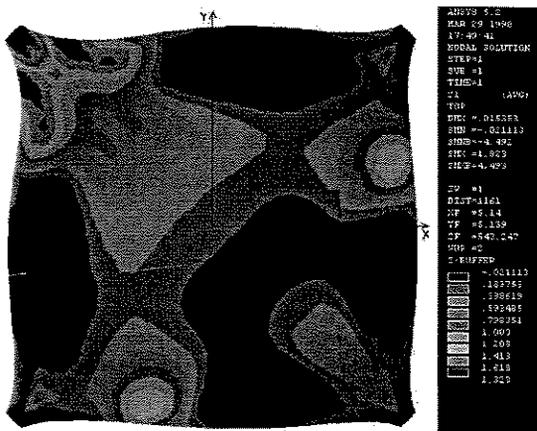


Figura 53 - ROTZ na superfície Inferior da casca quadrada com domo



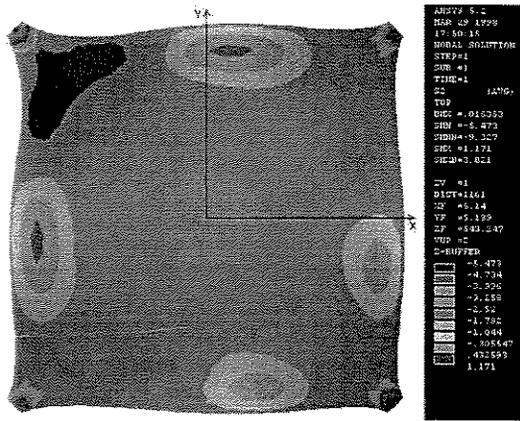


Figura 60 - S2 na superfície Superior da casca quadrada sem domo

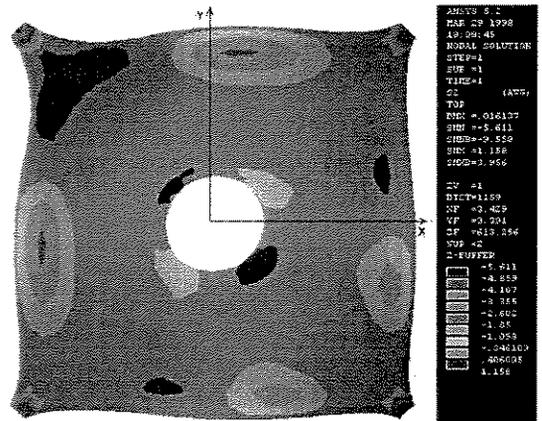


Figura 63 - S2 na superfície Superior da casca quadrada com domo

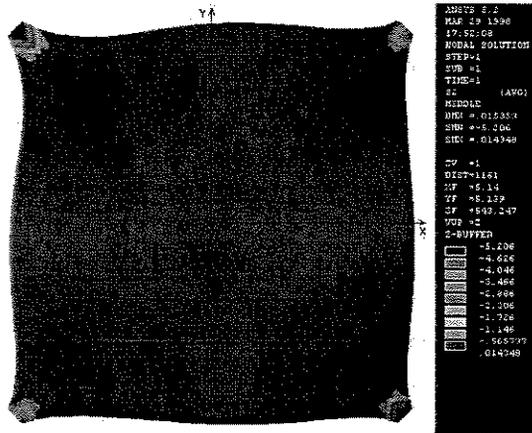


Figura 61 - S2 na superfície Média da casca quadrada sem domo

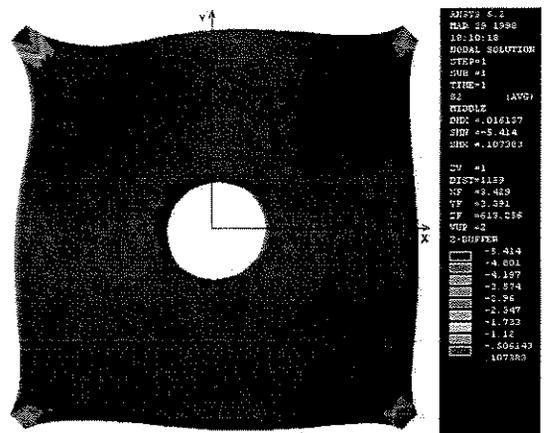


Figura 64 - S2 na superfície Média da casca quadrada com domo

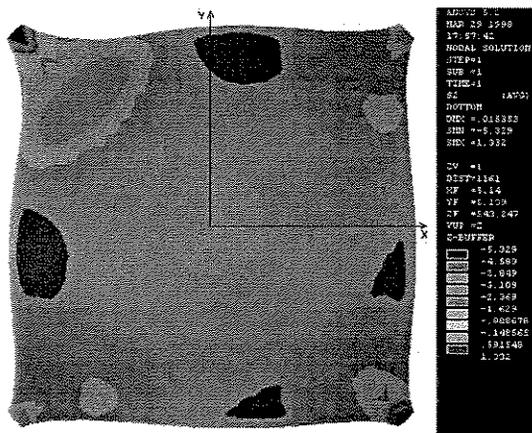


Figura 62 - S2 na superfície Inferior da casca quadrada sem domo

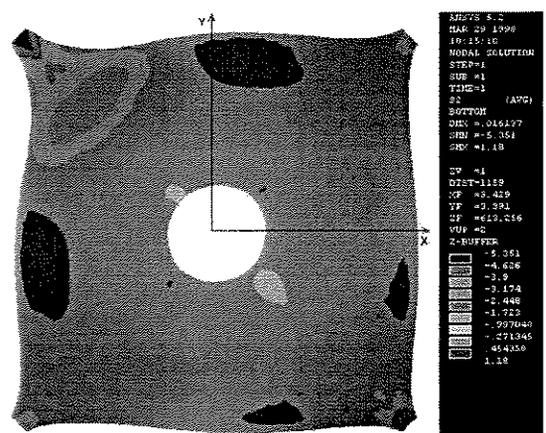


Figura 65 - S2 na superfície Inferior da casca quadrada com domo

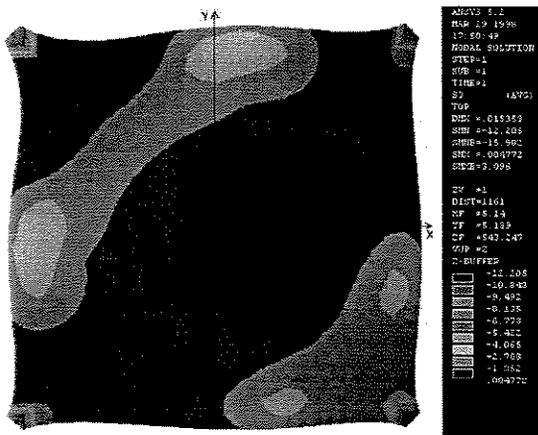


Figura 66 - S3 na superfície Superior da casca quadrada sem domo

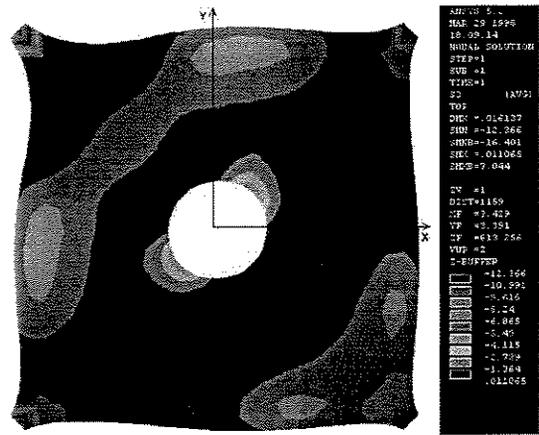


Figura 69 - S3 na superfície Superior da casca quadrada com domo

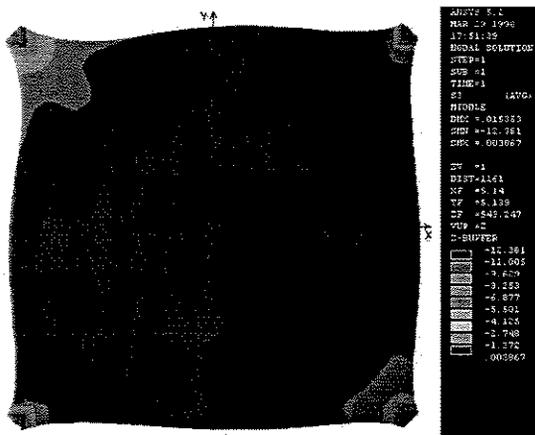


Figura 67 - S3 na superfície Média da casca quadrada sem domo

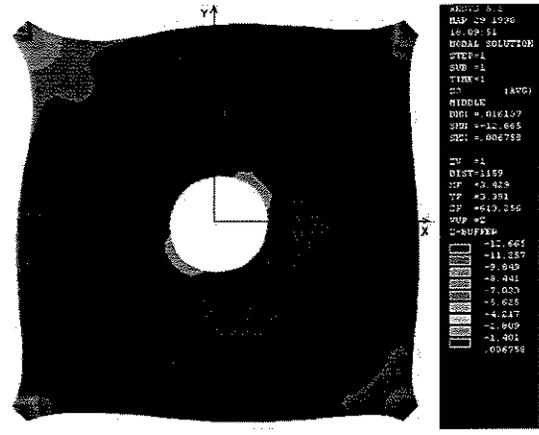


Figura 70 - S3 na superfície Média da casca quadrada com domo

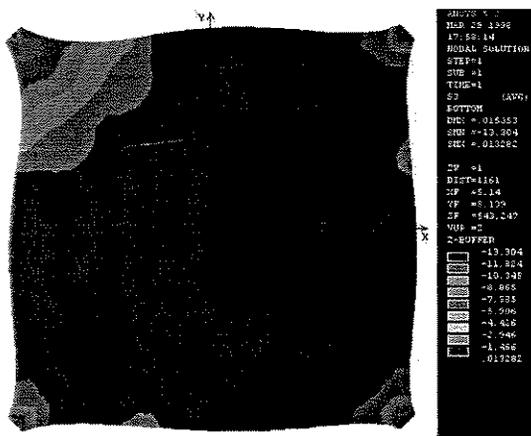


Figura 68 - S3 na superfície Inferior da casca quadrada sem domo

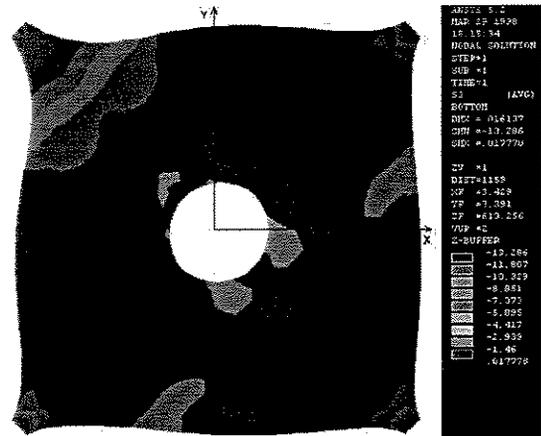


Figura 71 - S3 na superfície Inferior da casca quadrada com domo

## **5.- DETALHAMENTO ESTRUTURAL**

Estruturas de concreto exigem o emprego de armaduras de aço capazes de absorver os esforços internos de tração que nelas aparecem. Na grande maioria dos casos essas armaduras são passivas, isto é, elas recebem esforços como decorrência das deformações da estrutura sob ação das cargas externas. Elas não causam esforços por si mesmas.

Como princípio fundamental de projeto das estruturas de concreto, exige-se que a segurança em relação a estados limites últimos jamais dependa da resistência à tração do concreto.

Considerando as diferentes partes das construções de concreto, torna-se necessário estabelecer regras específicas para a organização do arranjo das armaduras de cada uma das peças estruturais empregadas.

As regras da técnica de armar as peças estruturais devem estar baseadas no conhecimento da distribuição dos seus esforços internos.

Ao longo do tempo, a evolução de tais regras acompanhou a evolução geral da técnica de projetar as estruturas de concreto. Nesse campo houve um progresso particularmente notável durante as últimas décadas.

A técnica de projetar as estruturas de concreto evoluiu do método determinista das tensões admissíveis para o método probabilista dos estados limites.

As armaduras de aço deixaram de ser tratadas como meras fibras resistentes à tração, que poderiam ser criadas livremente pelo projetista, procurando-se agora o conhecimento objetivo do real comportamento dessas armaduras até os possíveis estados limites últimos das peças estruturais.

O concreto armado deixou de ser tratado quase como se fosse um material unitário e passou a ser considerado como um material composto, pelo concreto e pelo aço, devendo respeitar-se a compatibilidade de funcionamento solidário desses dois materiais.

## **5.1.- TIPOS DE DESENHOS**

À rigor o projeto estrutural de um edifício em concreto armado é constituído de três tipos de desenhos:

- Planta de cargas e locação dos pilares;
- Desenhos de formas;
- Desenhos de armações.

Observação:

Um quarto tipo de desenho também pode integrar o projeto estrutural de uma estrutura em concreto armado. Este desenho é o “desenho de locação das estacas e/ou tubulões” e, logicamente, só será necessário se a opção do tipo de fundação for por estacas ou tubulões.

## **5.2.- PLANTA DE CARGAS**

Geralmente é o primeiro desenho de um projeto estrutural, cuja primordial finalidade é o fornecimento de informações que, adicionadas às sondagens do terreno onde se erguerá a edificação, permitirão a definição do tipo de fundação (tubulão, estaca, sapata, etc. ) mais adequada à obra.

Observações:

- A escolha do tipo de fundação é feita por um Engenheiro especializado em mecânica dos solos (Engenheiro de fundações);
- Somente após a definição do tipo de fundação, pode-se dar início à execução do primeiro desenho do projeto estrutural necessário ao início da obra (desenho de formas das fundações);
- Muitas vezes, em obras pequenas, quando o tipo de fundação já está praticamente definido, a “planta de cargas” pode ser dispensada, sendo, neste caso, as cargas indicadas no desenho das “formas das fundações”.

### **5.3.- DESENHOS PARA EXECUÇÃO DE FORMAS**

Neste desenho, todo elemento, ou detalhe da estrutura, deve ficar perfeitamente definido, por suas dimensões e por sua localização e posição em relação a eixos, divisas, testadas ou linhas de referências relevantes. Sendo assim, devem ser feitos tantos cortes e/ou elevações quantos forem necessários para a perfeita definição dos elementos estruturais em representação.

Um desenho para execução de formas deve ser executado em escala 1:50 ou em outra escala usualmente usada no meio técnico, desde que a clareza do desenho não seja prejudicada.

### **5.4.- ARMAÇÃO**

Para armar corretamente, é necessário ter uma idéia clara do desenvolvimento dos esforços no interior da estrutura, principalmente no Estádio II, mas é preciso também examinar detalhadamente os aspectos práticos do processo construtivo. Só se consegue solucionar bem os problemas de armaduras complicadas com trabalho exaustivo, até o detalhe, e amor pela atividade de projetar. O engenheiro deve conscientizar-se que o grau de importância da arte de armar é o mesmo que o de suas demais tarefas parciais, no quadro de atividades de uma obra.

#### 5.4.1.- OBJETIVOS DA ARMAÇÃO

A armadura do concreto com barras de aço, malhas de aço, telas ou malhas de arame tem por finalidade vários objetivos.

- A armadura de aço deve absorver os **esforços de tração** em peças estruturais solicitadas à flexão e à tração. No seu dimensionamento, admite-se que o concreto, devido a sua pequena resistência à tração, não colabora na absorção dos esforços de tração. As armaduras, portanto, têm por função contribuir para a capacidade resistente ou para a estabilidade da estrutura.
- Com a armadura, não se pode evitar o aparecimento de fissuras no concreto solicitado à tração; a armadura deve, porém, fazer com que as fissuras no concreto, sob a ação das cargas de utilização, permaneçam na ordem de grandeza de capilares, isto é, que não sejam facilmente visíveis a olho nu.
- Com esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes valores máximos para aberturas de fissuras: em ambiente seco 0,3 mm e em ambiente úmido 0,2 mm, que não devem ser ultrapassados para não prejudicar a proteção contra a corrosão.
- Em muitos casos, a armadura também tem a função de limitar a abertura das fissuras devido a estados de tensão produzidos por efeitos de coação, tais como o impedimento à deformação, no caso de variação de temperatura, de retração, de estruturas hiperestáticas, etc.
- Em peças comprimidas, a armadura tem por função aumentar a capacidade resistente do concreto à compressão ou a segurança de peças comprimidas esbeltas contra a flambagem, evitando ainda o aparecimento de grandes fissuras ou o colapso devido à ação simultânea de momentos fletores. Com armadura de compressão, pode-se também diminuir as deformações devido à retração do concreto e à deformação lenta – por exemplo, as flechas devido à retração e à deformação lenta – dispondo a armadura nas zonas comprimidas na flexão altamente solicitadas.

- A armadura solicitada somente à compressão, em peças sem perigo de flambagem, deve ser tão pequena quanto possível, por motivos econômicos, devido à existência de concretos de alta resistência. Quando ocorrerem tensões de compressão elevadas, será necessário dispor uma armadura transversal ou um cintamento, que garanta o concreto contra o risco de fendilhamento devido à deformação transversal ou à tração transversal e a armadura de compressão contra o risco de flambagem.
- Armaduras com malha estreita – por exemplo, telas de arame com abertura de malha da ordem de 3 a 5 cm. – ou malhas de arame são utilizadas como armaduras de pele para evitar que o cobrimento de concreto das armaduras principais se rompa devido a tensões de aderência ou em caso de incêndio.

Obtém-se um comportamento resistente mais favorável das peças de concreto armado quando as armaduras forem dispostas segundo as trajetórias das tensões principais de tração, e distribuídas em barras finas, na seção tracionada, proporcionalmente ao valor das tensões de tração. Essa regra é seguida quase que somente no caso de cascas e de outras estruturas laminares de parede fina.

#### **5.4.2.- CONCENTRAÇÃO DE BARRAS DA ARMADURA**

Quando as percentagens de armadura são elevadas, é necessário desenhar a distribuição das barras na seção transversal na escala 1:10 ou 1:5; em casos complicados, até mesmo na escala 1:2 ou 1:1. Essa recomendação é especialmente importante nos casos de cruzamentos de armaduras muito densas. É necessário deixar bem claro como o concreto poderá ser introduzido e adensado entre as armaduras. Geralmente é necessário, para isso, deixar “folgas para o vibrador” com largura mínima de 10 cm. Nestes locais, devem ser evitadas, emendas de barras por traspasse.

### **5.4.3.- RACIONALIZAÇÃO DA ARMADURA**

Com os custos de mão-de-obra permanentemente em elevação e a diminuição do número de operários especializados, ganha importância o conceito de racionalização da armadura. Por racionalização entende-se aqui, todas as medidas capazes de diminuir o custo total, através de planejamento e execução da armadura, diminuindo, portanto, os custos dos desenhos de armaduras e listas de barras, bem como os de corte, dobramento, colocação e montagem.

A execução e a colocação da armadura podem ser favoravelmente influenciadas por meio das seguintes medidas:

- limitação do número de diâmetros diferentes das barras (menores perdas, menor estoque, melhor rendimento por ocasião do corte);
- uso do maior número possível de barras retas sem ganchos (só é necessário cortar no comprimento, o que é favorável para o transporte e estocagem);
- limitação dos tipos de dobramento e do número de posições de barras (menor custo de mão-de-obra; eventualmente, utilização de linhas de corte ou dobramento operadas automaticamente);
- escolha de tipos de emenda adequados;
- escolha de malhas, malhas dobradas, conjuntos de barras soldadas e outros sistemas de antecipação da montagem de partes componentes na fábrica.

A racionalização da armadura, no sentido de mecanizar a fabricação, pode ser obtida por meio de métodos industriais. Sob condições favoráveis de trabalho, as armaduras podem ser mais ou menos automaticamente pré-fabricadas, na maioria das vezes com solda por pontos, total ou parcialmente.

Distinguem-se elementos pré-fabricados, que são montados na fôrma, para constituir a armadura definitiva (por exemplo: malhas, conjuntos de barras unidas por elementos de ligação, conjuntos de barras soldadas, conjunto de barras dobradas em ângulo e permitindo deslocamentos relativos entre os conjuntos, estribos em malha, estribos ligados por barras longitudinais (em “escada de marinho”); e “gaiolas” de armadura, total ou parcialmente pré-fabricadas, que são simplesmente colocadas na fôrma. Para fins de transporte e de estocagem, os elementos pré-fabricados de armaduras devem suportar bem o empilhamento.

Uma condição importante para a verdadeira racionalização das armaduras é a padronização (uniformização) dos tipos de barras ou dos elementos da armadura ou, mesmo, das “gaiolas” de armadura ou dos detalhes de armação.

Somente a padronização possibilitará o desenvolvimento racional das diversas atividades relacionadas com a produção de aço para armaduras: os desenhos e as listas podem ser simplificados, as máquinas de corte e de dobramento podem ser operadas automaticamente, a marcação e o controle podem ser executados mais rapidamente – especialmente quando se utilizam computadores.

#### **5.4.4.- CRITÉRIOS DE PADRONIZAÇÃO DAS ARMADURAS**

Para a padronização das armaduras é necessário que sejam feitas idealizações dos esquemas resistentes das peças estruturais.

Com a padronização, procuram-se obter arranjos estereotipados de armaduras, os quais devem garantir uma eficiente utilização das barras de aço.

Em princípio, um arranjo de armaduras passivas é considerado satisfatório desde que atenda às seguintes exigências:

- A solução adotada deve levar a uma facilidade de montagem da armadura e da concretagem da peça;
- Dentro das condições de segurança especificadas, obtém-se um consumo de materiais, tanto de concreto quanto de aço, que tende a ser o menor possível;
- Antes que ocorra a ruína da peça, as barras de aço podem efetivamente entrar em carga, como previsto no respectivo projeto;
- A mobilização da resistência das barras da armadura não deve acarretar o risco de perda da solidariedade entre o aço e o concreto;
- Em condições de utilização normal, as peças estruturais não devem apresentar fissuração exagerada.

#### **5.4.5.- DIÂMETRO MÁXIMO DAS ARMADURAS**

O diâmetro das barras não deve ultrapassar  $1/10$  da espessura da casca.

Para uma espessura de 40 cm. temos:  $40 \cdot 1/10 < \phi 8$  da armadura.

Para uma espessura de 25 cm. temos:  $25 \cdot 1/10 < \phi 6,3$  da armadura.

#### **5.4.6.- COBRIMENTO DAS ARMADURAS**

O cobrimento mínimo das armaduras é estabelecido por Norma, e foi tomado o valor de 2 cm para este tipo de construção.

Nesse sentido deve-se utilizar cobrimento adequado das barras. De acordo com o ACI 318 recomenda como cobrimento mínimo em cascas de concreto moldadas no local os valores de 13mm e 19mm respectivamente para barras de diâmetro menores ou iguais a 16mm e maiores ou iguais a 19mm. Além disso o teor de cloretos deve ser limitado a 2% da massa de cimento. Esses cobrimentos devem ser aumentados quando se deseja resistência ao fogo. Outro fator importante na definição do cobrimento é a aderência da armadura ao concreto que impõe, geralmente, valores de cobrimento no mínimo iguais ao diâmetro das barras.

#### 5.4.7.- ARMADURA DE BORDA

Nas bordas das cascas calculadas, deverá ser disposta uma armadura superior (negativa) e inferior (positiva), perpendicularmente à borda, com área da seção transversal não inferior a  $0,10 h$  ( $\text{cm}^2 / \text{m}$ ), onde  $h$  é a espessura da casca em (cm.).

Para uma espessura de 40 cm. temos:  $0,10*40 = 4 \text{ cm}^2 / \text{m}$ .

Para uma espessura de 25 cm. temos:  $0,10*25 = 2.5 \text{ cm}^2 / \text{m}$ .

#### 5.4.8.- ARMADURA DE CISALHAMENTO

A armadura de cisalhamento, quando necessária, poderá ser constituída por estribos e/ou por barras dobradas.

A seguir são mostrados os dois exemplos de referência das armaduras das estruturas em casca estudadas.

#### 5.4.9.- ARMADURAS MÍNIMAS DE FLEXÃO

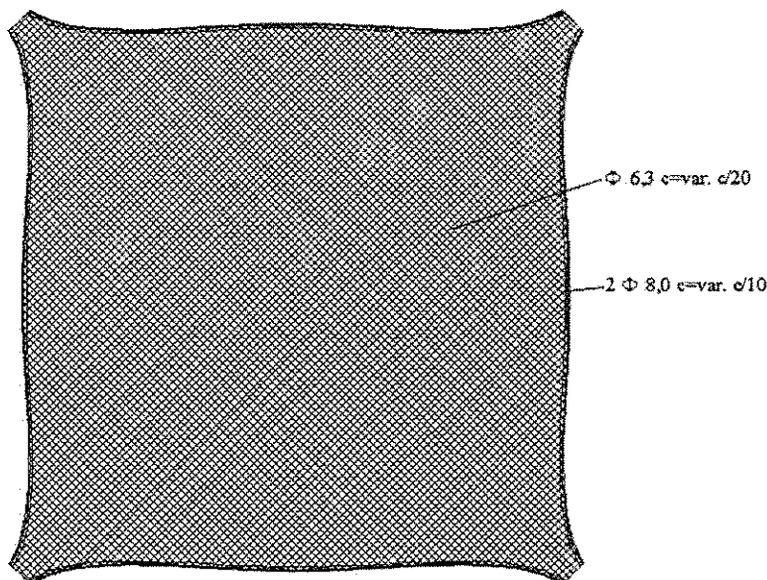
Se a armadura for de aço CA 40, CA 50 ou CA 60, podemos considerar para o caso de casca que  $A_{s, \min}$  (negativa) e  $A_{s, \min}$  (positiva) igual a  $0,15*h$  onde,  $h$  é a espessura da casca, no nosso caso todos os cálculos levaram a utilizar aço mínimo, quer dizer:  $\phi 6,3$  para as malhas colocadas em duas camadas e  $\phi 8$  para o caso dos apoios e da armadura de borda e dos reforços nos apoios.

Para uma espessura de 40 cm. temos:  $0,15*40 = 6 \text{ cm}^2 / \text{m}$ .

Para uma espessura de 25 cm. temos:  $0,15*25 = 3.75 \text{ cm}^2 / \text{m}$ .

## 5.5.- CASCA QUADRADA SEM DOMO

Em princípio o concreto utilizado em cascas não necessita ter alta resistência já que usualmente as tensões na estrutura não são elevadas. Porém deve-se considerar que em uma casca a maior parte do carregamento é permanente e portanto a fluência irá se manifestar de maneira intensa, daí ser interessante se utilizar concreto com resistência não muito baixa que apresente valor adequado do módulo de deformação ( $E_c$ ). Além da resistência adequada a esforços mecânicos o concreto deve proporcionar à armadura proteção adequada contra corrosão.



**Figura 72.- Detalhamento da armadura da casca sem domo, camada superior e inferior e armadura de borda (planta).**

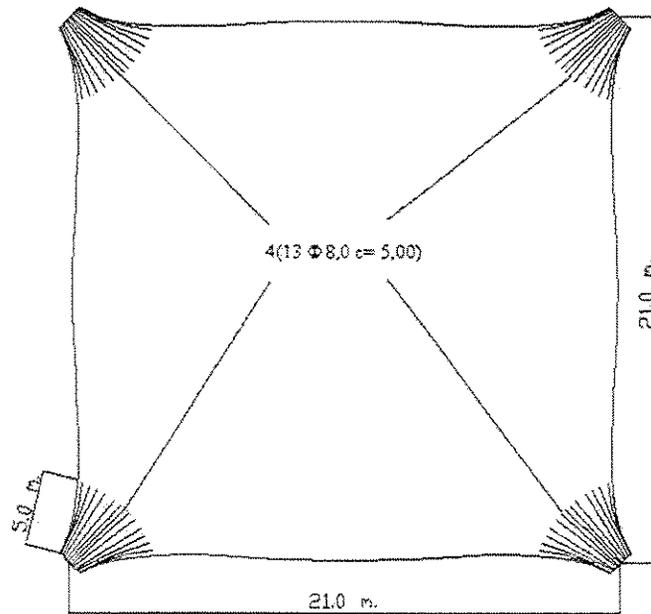


Figura 73.- Reforço adicional (superior e inferior) na região do apoio (planta).

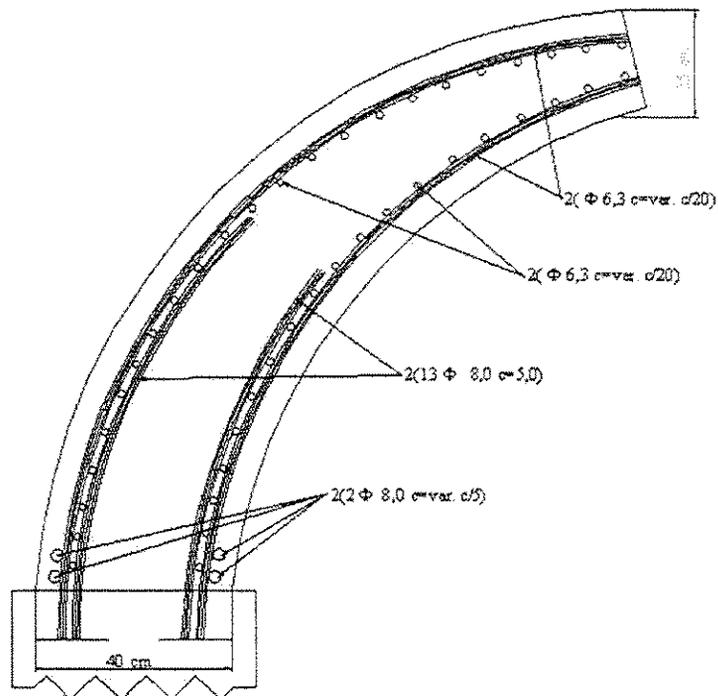
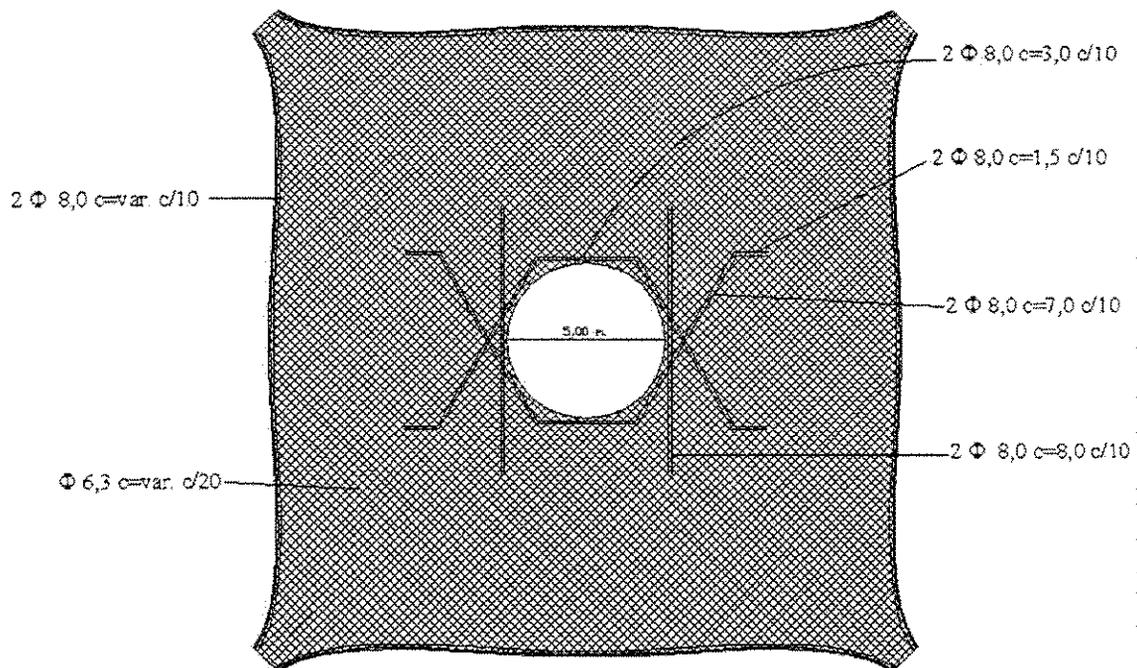


Figura 74.- Disposição da armadura no apoio (corte).

## 5.6.- CASCA QUADRADA COM DOMO

Obtém-se um comportamento resistente mais favorável das peças de concreto armado quando as armaduras forem dispostas segundo as trajetórias das tensões principais de tração, e distribuídas, em barras finas, na seção tracionada, proporcionalmente ao valor das tensões de tração. Essa regra é seguida quase que somente no caso de casca e de outras estruturas laminares de parede fina. Em todos os demais tipos de estrutura, para diminuir o custo, a disposição da armadura é limitada a duas ou três direções e às zonas de borda, ficando, assim, muito simplificada.



**Figura 75.- Detalhamento da armação da casca com domo, camada superior e inferior, armadura de borda e detalhamento da armadura no domo (planta).**

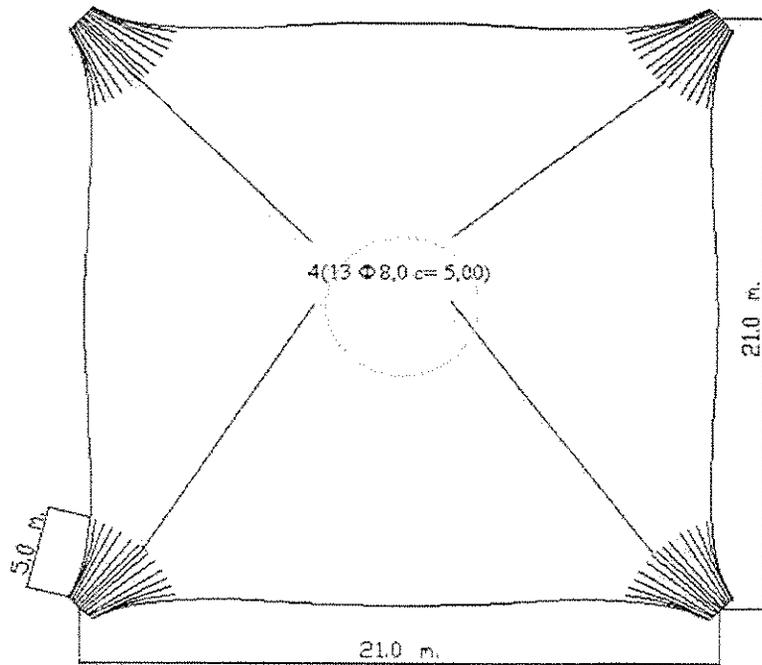


Figura 76.- Reforço adicional (superior e inferior) na região do apoio (planta).

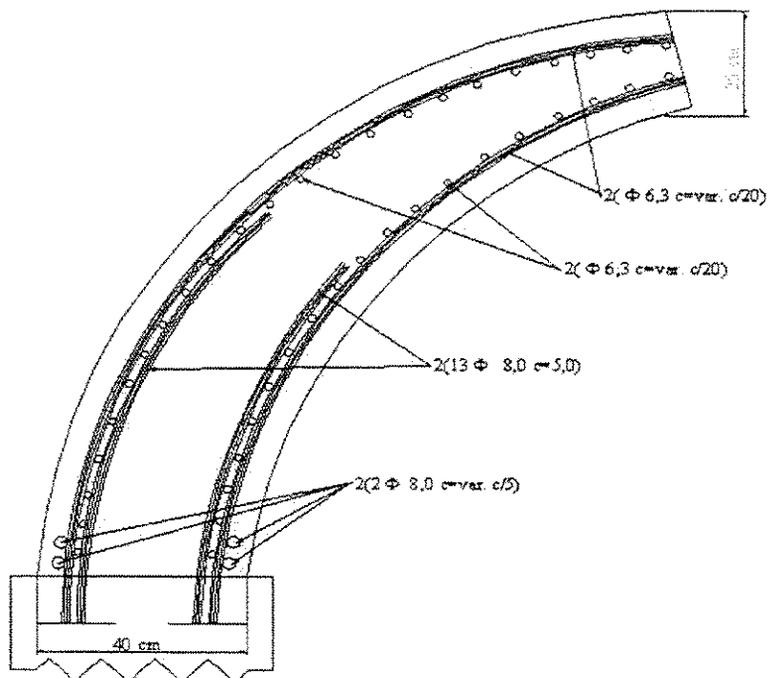
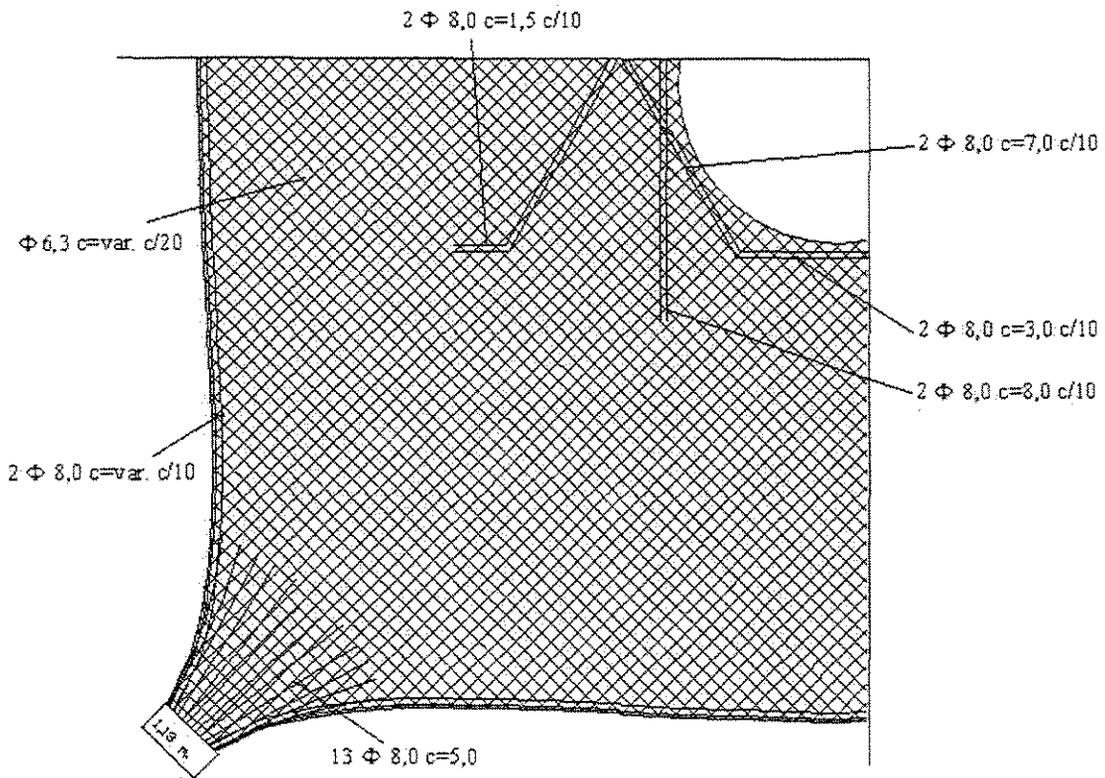


Figura 77.- Disposição da armadura no apoio (corte).



**Figura 78.- Detalhamento da armadura (camada superior e inferior) de  $\frac{1}{4}$  da casca quadrada com domo (planta).**

## 5.7.- ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Os processos construtivos mais empregados para construção de cascas com forma livre são: processo convencional de moldagem local, bastante utilizado por Heinz Isler.

O processo convencional de moldagem local pode ocasionar em custo proibitivo. A variação da curvatura e sua inversão próximo à borda das cascas com forma livre traz sérias dificuldades à execução da fôrma. O descimbramento deve ser bem planejado, com relação à seqüência de retirada do escoramento; além disso há risco da fôrma ficar presa à estrutura, problema comum em peças de grande superfície, que pode causar esforços e deslocamentos elevados na estrutura ainda com pequena idade. No entanto esse processo tem sido muito utilizado em estruturas com até 40m de vão.

Naturalmente podem ser tomados cuidados necessários para evitar esses problemas. Para evitar problemas com a montagem da fôrma a superfície deve ser definida em projeto por coordenadas bem próximas umas das outras.

A seqüência de descimbramento deve ser analisada caso a caso para que possa ser definida, além disso é conveniente prever dispositivos de descimbramento. O problema da fôrma ficar presa à estrutura pode ser evitado com uso de ligações adequadas entre os painéis da fôrma, que facilitem a desfôrma.

A moldagem sobre monte de terra é uma alternativa interessante que tem como problema principal o içamento da estrutura (de maneira semelhante ao processo “lift-up” utilizado em lajes cogumelo, principalmente nos EUA). Essa etapa requer grande controle do processo, equipamentos adequados e equipe especializada.

Neste trabalho pode-se propor utilizar um processo em que a fôrma seja incorporada à estrutura definitiva. Nesse caso a fôrma, de material leve, poderia ser aproveitada como isolante térmico e acústico, suprimindo assim deficiências do concreto em realizar tais funções. Isso pode trazer vantagens com relação ao método convencional como redução do peso sobre o cimbramento, por exemplo. Além disso procura-se dar ênfase à utilização de concretos com granulometria fina que possibilitem moldagem de peças com pequena espessura.

## **5.8.- RELAÇÃO FLECHA - VÃO (ABATIMENTO)**

Por abatimento entende-se a relação entre a altura máxima da casca (flecha) e seu vão. O abatimento influencia o comportamento da estrutura e seu processo construtivo. Em alguns casos é determinado em função de requisitos funcionais do projeto. Quando houver liberdade para o projetista na escolha desses parâmetros deve-se levar em conta que cascas mais abatidas produzem reações horizontais de maior intensidade e podem Ter esforços de flexão mais pronunciados em suas bordas. Por outro lado, caso o processo construtivo seja moldagem in loco, um maior abatimento, pode proporcionar menor inclinação da superfície da casca, pode facilitar o lançamento do concreto.

## 6.- COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

A respeito da relação existente entre vínculos e a estrutura em casca com comportamento de membrana, ou comportamento de membrana somado com o de flexão, tem-se a seguir algumas considerações de Williams e de Rekach :

Se uma estrutura em casca é vinculada adequadamente em seu contorno, ela pode suportar qualquer carga principalmente pelo comportamento de membrana. Comportamento de membrana é a ação de forças de tração, compressão e de cisalhamento atuando em um plano tangencial à estrutura. Momentos fletores e torsões e forças cortantes (isto é, forças agindo perpendicularmente à estrutura em casca) poderão ocorrer localmente nas regiões do contorno e das cargas concentradas. Mas o principal mecanismo de absorção e transmissão das cargas por parte da estrutura é a ação de membrana.

O comportamento de membrana pode ocorrer se as seguintes condições forem satisfeitas :

- A estrutura em casca deve ter uma superfície com variação suave e contínua, com espessura constante ou discretamente variável. Uma mudança brusca dos raios de curvatura ou da espessura pode fazer surgir uma diferença de deformação, e conseqüentemente produzir flexão;
- O carregamento da estrutura em casca deve ser contínuo, podendo variar suavemente. Uma força concentrada faz surgir flexão na região de aplicação da mesma. Portanto, o comportamento de membrana pode existir somente em regiões distantes dessa região;

- As bordas da estrutura em casca devem ser vinculadas de modo que elas possam se mover livremente segundo a direção normal;
- As forças aplicadas nas bordas devem estar contidas no plano tangente da estrutura em casca.

Contudo, se a estrutura em casca não é vinculada adequadamente, geralmente ela irá requerer o efeito combinado das ações de membrana, momentos fletores e torsões, e forças cortantes para manter o equilíbrio. As deformações de uma estrutura em casca que não é vinculada adequadamente podem ocorrer pela flexão da superfície da mesma sem mudar as dimensões de sua superfície média. Estes modos de deformação são denominados de modos inextensíveis.

A situação é análoga a de uma treliça. Uma característica da treliça é que ela pode se deformar somente se os seus elementos mudarem de comprimento. Uma treliça em que os nós são ideais e ela pode se deformar sem que os comprimentos de seus elementos se alterem é um mecanismo.

Na prática, é geralmente impossível vincular adequadamente uma estrutura em casca por causa da arquitetura e restrições funcionais, mas deve-se ter sensibilidade estrutural para projetar uma estrutura em casca mesmo com vinculação inadequada.

Uma estrutura em casca é estaticamente determinada se as condições de contorno são tais que permitem a solução das equações de equilíbrio. Se as condições de contorno são especificadas excessivamente (isto é, muitas tensões impostas como condições de contorno são nulas, e conseqüentemente, os deslocamentos são livres), não existe solução e a estrutura em casca não é adequadamente vinculada – ela é um mecanismo e pode ser submetida a uma deformação inextensiva.

Se as condições de contorno especificadas são insuficientes (isto é, existem poucas tensões nulas impostas como condições de contorno, e conseqüentemente, existem muitos deslocamentos impedidos) então existe mais que uma solução para as equações de equilíbrio, e a casca é estaticamente indeterminada.

## **6.1. - ILUMINAÇÃO**

A iluminação pode ser obtida de diversas maneiras: através das fachadas, por meio de um ou mais domo sobre a estrutura em casca, por aberturas entre várias estruturas em casca ou através de janelas colocadas entre estruturas em casca de níveis diferentes. Pode-se obter iluminação da luz do dia de modo que se desejar, porém a solução mais comum é por meio de um domo na parte superior da casca. Uma iluminação natural de 6% da área total é mais que suficiente para a maioria dos casos, apesar da orientação dos especialistas em que a área de iluminação seja de 14% da área total.

Contudo, sabe-se que uma passagem de luz horizontal proporciona o dobro da iluminação se comparada com uma janela vertical do mesmo tamanho. A qualidade da iluminação depende das relações geométricas entre altura, distância e tamanho das passagens de luz. Tem-se publicado muitas idéias a respeito do assunto, e é bom lembrar que as áreas grandes são mais adequadas para serem iluminadas, e que domo de iluminação em tetos baixos concentram a iluminação (o que pode ser desconfortável na época do verão).

## **6.2 - ISOLAMENTO TÉRMICO**

O problema de isolamento é resolvido por meio de uma compressão inicial adequada e com a utilização do conhecimento da moderna tecnologia do concreto que resultam em uma estrutura naturalmente impermeável.

Esta afirmação pode ser comprovada teoricamente e pelos projetos executados. Além disso, podem ser aplicados produtos para pintura dos tetos que proporcionam um alto índice de reflexão dos raios solares, elasticidade duradoura e aderência permanente ao concreto. Por meio desta pintura o aquecimento da estrutura em casca pode ser atenuado, tem-se uma maior impermeabilização e ainda um bom acabamento.

O isolamento térmico é feito no interior da estrutura em casca de maneira muito prática, pois as placas isolantes são colocadas sobre o escoramento antes da concretagem, além de servirem também como bons absorventes acústicos. Tem havido muitas discussões sobre condensação quando o isolamento térmico é feito no interior do edifício, o que provoca muitos danos em edifícios tradicionalmente convencionais.

## 7.- CONCLUSÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar algumas conclusões e alguns comentários sobre os resultados obtidos na presente dissertação, bem como indicar algumas sugestões para continuidade do trabalho.

A utilização do programa gráfico Mtool, que apresenta o modo de fazer uma forma em planta e discretizar uma malha de elementos finitos de qualquer tipo. Auxiliado pelo apêndice A, outros usuários podem aprender a como modelar uma estrutura em planta, seja ele uma casca ou não.

O programa de Vizotto, por sua vez faz gerações da forma tridimensional através do arquivo de saída do Mtool, com algumas modificações para adequar-se as hipóteses daquele. A geração baseia-se na configuração de equilíbrio da membrana formada.

A utilização do software ANSYS para realizar as análises numéricas das estruturas em casca, considerando diferentes tipos de carregamentos (peso próprio, sobrecarga, temperatura mínima e máxima, vento na direção diagonal e lateral).

Com os resultados encontrados procedeu-se a realizar os detalhamentos estruturais das duas cascas estudadas (casca quadrada com e sem domo).

Os projetos de estruturas em casca são um grande desafio para os engenheiros e arquitetos modernos. Existem possibilidades ilimitadas para construção desses tipos de estruturas para as mais diversas aplicações. Podem ser construídas igrejas, indústrias, centros de exposições, centros desportivos, restaurantes, pavilhões de todos os tipos e formas, edifícios para habitações, etc. ...

Se estas estruturas são construídas adequadamente elas são funcionais, econômicas e estéticas. Se as regras físicas fundamentais de geração das formas são seguidas, os problemas de engenharia podem ser resolvidos adequadamente. Se estas condições não são observadas, dificilmente alguma técnica pode ser utilizada para a correção da estrutura adequadamente.

As estruturas em casca são dominantes e devem ser cuidadosamente situadas em relação às construções adjacentes. Elas causam maior impacto quando situadas em parques ou junto à natureza. Mas podem ser construídas com sucesso em ambientes urbanos. Contudo, algumas regras devem ser observadas, como por exemplo: dimensões apropriadas, distância suficiente das construções mais próximas, estilo contrastando com as outras construções ao redor, etc. ...

Convém não olvidar as formas das fachadas e janelas e suas ligações com as estruturas em casca, que devem ser discretas e ter um papel secundário na arquitetura final do projeto; isso pode ser conseguido pela escolha apropriada dos materiais.

As fachadas podem ser construídas utilizando-se os sistemas tradicionais e normais. As paredes podem ser, por exemplo, de aço, de concreto armado, de vidro, etc. As soluções mais bonitas são obtidas quando é usado muito vidro. Se as portas forem corredeiras pode-se ter um aproveitamento total do espaço interno. Uma fachada nunca deve dominar uma estrutura em casca, pois essas estruturas constituem formas fortes que não precisam de decoração.

Além disto, a utilização da tecnologia atual de concreto resulta em uma estrutura naturalmente impermeável. O isolamento obtido é suficiente para proteger a estrutura em casca de grandes diferenças de temperatura entre o exterior e o interior da mesma.

Comprova-se que desde a construção das primeiras estruturas em casca até as mais recentes não existem sinais de deterioração. Em determinadas ocasiões, um ou outro proprietário pode revestir a estrutura com uma leve camada de tinta ou outro material apropriado, mas isto não é feito por necessidade de manutenção, e sim por razões estéticas.

Além disso, podem ser aplicados produtos nas superfícies externas das cascas que proporcionam um alto índice de reflexão dos raios solares, com boa elasticidade e aderência permanente ao concreto. Por meio desta pintura o aquecimento da estrutura em casca pode ser atenuado, tendo-se uma maior impermeabilização e ainda um bom acabamento.

A iluminação natural pode ser obtida de diversas maneiras: através das fachadas, por meio de um ou mais domos, por aberturas entre as estruturas e através de janelas colocadas entre cascas de níveis diferentes. A qualidade da iluminação depende das relações geométricas entre altura, distância e tamanho das passagens de luz. Pode-se obter iluminação natural do modo que se desejar, porém a solução mais comum é através de um domo na parte superior da casca.

Os processos de construção de estruturas em casca têm que ser planejados e executados cuidadosamente para se obter o melhor resultado de qualidade a um custo razoável. As estruturas em casca oferecem relativamente grandes vãos livres e pouco consumo de material. Pelo fato dessas estruturas poderem ser feitas com bordas livres e poucos apoios, elas se tornam leves e elegantes.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para as formas geométricas das estruturas em casca, foram feitas análises do comportamento estático (peso próprio, sobrecarga, temperatura e vento). O campo de pesquisas relacionado ao estudo das casca é muito amplo. Estas pesquisas podem envolver um grupo multidisciplinar de engenheiros, arquitetos, físicos e matemáticos, onde devem existir preocupações com os aspectos relacionados aos projetos arquitetônicos e estruturais, e às técnicas e processos construtivos.

Os efeitos da não linearidade do material, bem como as influências dependentes do tempo e os efeitos de instabilidade não foram considerados no modelo. Estas abordagens são assuntos para serem tratados posteriormente em seqüência a este trabalho.

Embora o comportamento de cascas ter sido considerado satisfatório com relação aos efeitos sísmicos em terremotos recentes, é necessária uma pesquisa mais detalhada sobre o assunto.

Os pontos sugeridos para serem abordados e pesquisados posteriormente com relação às estruturas em casca de um modo geral são:

- Geração de outras formas livres, como triangulares, retangulares, pentagonais, figuras irregulares, etc. ...;
- Análise das formas das estruturas em casca em relação ao conforto térmico, acústica e iluminação;
- Desenvolvimento de técnicas e de processos construtivos aplicados às estruturas em casca;
- Análise do comportamento das cascas com relação aos efeitos da instabilidade.

Todos os estudos devem ser realizados levando-se em conta as condições brasileiras de disponibilidade de materiais, tipos de solos ocorrentes, temperatura, umidade, estações climáticas, etc. ...

## 8.-BIBLIOGRAFIA

- Ansys, Inc., ANSYS 5.2 Complete User`s Manual, August, 1995.
  
- Arcaro, V. F., Conceitos Fundamentais e Métodos Computacionais Básicos para Encontrar Configurações de Equilíbrio de Estruturas Não-Lineares, UNICAMP - Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, junho, 1992.
  
- Assan, A. E. Método dos Elementos Finitos – Primeiros Passos. Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Construção Civil – Faculdade de Engenharia Civil, Maio, 1993.
  
- Becker, E. B.; Carey, G. F.; Oden, J. T., Finite Elements, An Introduction, Vol. I, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
  
- Belluzzi, O, Ciencia de la Construcción I, Aguilar, S. A , Madrid, 1971.
  
- Belluzzi, O, Ciencia de la Construcción III, Aguilar, S. A , Madrid, 1971.
  
- Brebbia, C. A - Connor, J. J., Fundamentals of Finite Elements Techniques for Structural Engineers, London, Butterworth & Co. (Publishers) Ltda.,1973.
  
- Chen, W. F., Saleeb, A F., Constitutive Equations for Engineering Materials, Vol. 1, Elasticity and Modeling, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.

- Concrete Shell Buckling. ACI Symposium, Washington, D.C., 1979. ACI, 1981.
- Gol'denveizer, A L., Teoria de los Cascarones Elásticos Delgados, Cia. Editorial Continental, S. A , México, 1963.
- Gould, P. L., Analysis of Shells and Plates, Springer-Verlag, New York Inc., 1988.
- Hass, A M., Desing of Thin Concrete Shells, Vol. 2, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
- Heger, F. J. & Zagharmee, M. S. Buckling of thin concrete domes. ACI Journal, November – December, 1983.
- Isler, H., Aplicaciones Recientes de Cascarones Representativos, Congreso Internacional sobre la Aplicación de Estructuras Laminares en Arquitectura, México, 1967.
- Isler, H., Doce años de Aplicación de Cascarones tipo Burbuja, Congreso Internacional sobre la Aplicación de Estructuras Laminares en Arquitectura, México, 1967.
- Kollegger, J. , Traglastversuch na einer freigeformten Stahlbetonschale, No. 7, 1989.
- Margarit, J. ; Buxadé, C., Cálculo de Estructuras en Paraboloides Hiperbólico, Manuales de Arquitectura - 3, Editorial Blume, Barcelona, 1969.
- Makowski, Z. S. Shell analogies applied to the analysis of stress distribution in braced domes. In: Makowski, Z. S. Analysis, desing and construction of braced domes. New York, Nichols, 1984.

- Mtool, versão 1.97, Copyright Rational Systems, Inc. 1990 – 1994. PUC, Rio de Janeiro.
- Pfluger, A , Elementary Statics of Shells, 2nd. Ed., F. W. Dodge Corporation, 1961.
- Popov, E. P., Progress in Analysis and Desing of RC Shells, Engineering Structures, v. 13, april, pp. 128-143, 1991.
- Ramaswamy, G. S. Desing and construction of concrete shell roofs. New York, McGraw-Hill, 1968.
- Rekach, V. G. , Static Theory of Thin-Walled Space Structures, Mir Publishers, Moscow, 1978.
- Timoshenko, S. Woinowski-Krieger, S., Teory of Plates and Shells, New York, McGraw-Hill, 1959.
- Vizotto, I., Geração Computacional de Formas Livres de Estruturas em Casca, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, agosto, 1993.
- Williams, C. J. K. , The Generation of a Class of Structural Forms for Vaults and Sails, in The Structural Engineer / volume 68/ No. 12/ 1990.
- Zagottis, D. de, Pontes e Grandes Estruturas : V - Introdução à Teoria das Placas e das Cascas, Escola Politécnica - USP, São Paulo, 1973.
- Zienkiewicz, O C., The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, New York, 1971.

# APÊNDICES

## APÊNDICE : A

### MTOOL (Bidimensional Mesh Tool)

MTOOL é um sistema gráfico interativo para geração, edição e manipulação de malhas de elementos finitos bidimensionais. Baseado numa estrutura de dados topológica, o sistema propicia um ambiente favorável para edição e atribuição da malha.

Destacam-se as seguintes funcionalidades do sistema.

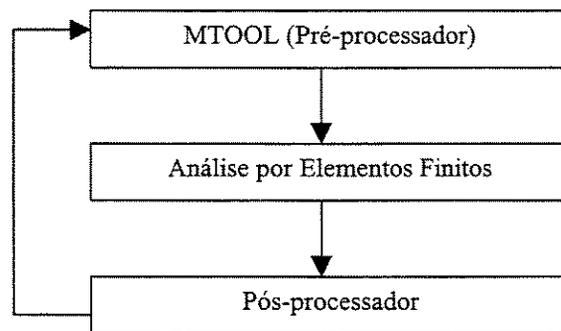
- Edição da geometria do modelo com funções de transformações geométricas e teclas de *undo/redo*;
- Atribuição de materiais com suas respectivas propriedades nas regiões do modelo;
- Geração de malhas de elementos finitos baseada em mapeamentos transfinitos ou em processos de geração automática;
- Edição local da malha de elementos finitos;
- Atribuição de condições de suporte nodais ou ao longo de arestas do modelo;
- Atribuição de cargas, deslocamentos prescritos, temperatura nodal e carregamento linearmente distribuído;
- Especificação de elementos de interface e fronteira de elementos infinitos;
- Visualização da malha de elementos finitos e seus atributos (número de nós e elementos, materiais, cargas, etc.);
- Manipulação da vista através de funções para especificação de *zoom*, translação, etc.;
- Especificação de valores numéricos com auxílio de *grid* ou diretamente através do teclado.

O sistema foi desenvolvido utilizando-se o sistema de interface com o usuário **Iup/Led** que permite a obtenção de uma interface atrativa e eficiente para execução das tarefas. Sob o sistema de interface e o sistema para geração de malha propriamente dito, encontra-se o sistema gráfico **GKS/PUC** que garante a portabilidade para diversos ambientes.

Outra ferramenta importante utilizada no desenvolvimento do MTOOL é a biblioteca de função, **HED**, que manipula estruturas de dados topológicas para gerenciamento de subdivisões planares.

## 1.- INTRODUÇÃO

MTOOL é um programa gráfico interativo para geração de malhas de elementos finitos bidimensionais. Ele pertence à categoria de programas ditos pré-processadores, por preparar dados para um programa de análise, conforme ilustrado na Figura A.1.



**Figura A.1.- Arquitetura de um sistema de elementos finitos que utiliza o MTOOL**

A geração da geometria e topologia do modelo discretizado por elementos finitos, no sistema MTOOL, segue, basicamente, três etapas. Na Figura A.1 ilustra-se esta seqüência. Na primeira etapa, define-se a geometria do modelo através de sua fronteira. Nesta etapa, inclui-se, também, a subdivisão da geometria em regiões onde serão aplicados os processos automáticos para geração de malhas.

Na Segunda etapa, especifica-se o número de subdivisões das arestas que definem as fronteiras das regiões criadas na etapa anterior. Define-se assim, quantos nós (de elementos finitos) cada aresta deve ter.

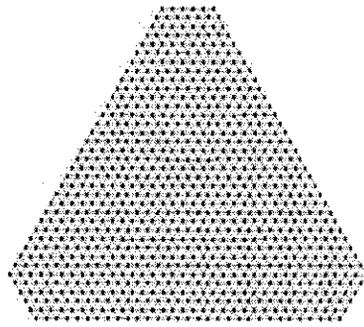
Na terceira etapa, adota-se, para cada região, um procedimento para geração da malha de elementos finitos. Observa-se, nesta etapa, que as malhas de elementos geradas são associadas às regiões. Praticamente, as malhas são tratadas independentemente, região por região.

A compatibilidade de malhas entre duas regiões é garantida pelo fato de que os nós comuns estão sobre a mesma curva que é contorno de ambas as regiões.

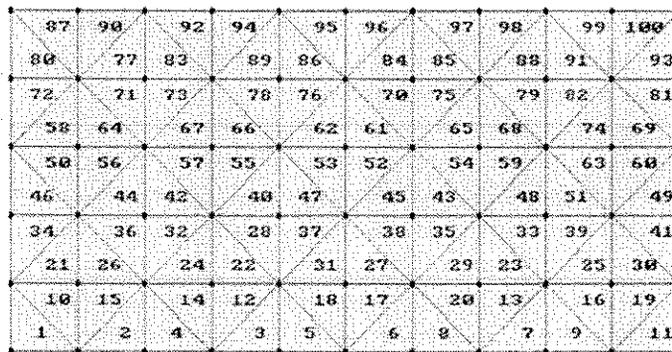
O sistema permite, ainda, a edição local de malha dentro das regiões. Podem-se criar ou apagar elementos da malha nesta edição local. A única restrição feita pelo sistema é não aceitar edições na fronteira ou fora da região para não comprometer a compatibilidade entre as regiões.

Sobre a geometria das regiões, o usuário pode definir os materiais, as propriedades geométricas (espessuras), carregamentos e condições de contorno. Essas definições são permitidas tanto na geometria do modelo quanto diretamente na malha durante uma edição local.

Concluídas a edição e a atribuição do modelo, deve-se converter o modelo de regiões e malhas associadas numa representação única de malhas de elementos finitos. Neste ponto, o sistema entra num segundo ambiente que oferece funções básicas para visualização da malha de elementos finitos. Nesta conversão, o sistema verifica a validade dos elementos finitos gerados durante a edição. Na Figura A.2, mostra-se o modelo discretizado por elementos finitos apresentado na Figura A.3 já convertido para uma representação única de malha (observa-se a numeração dos elementos da malha).

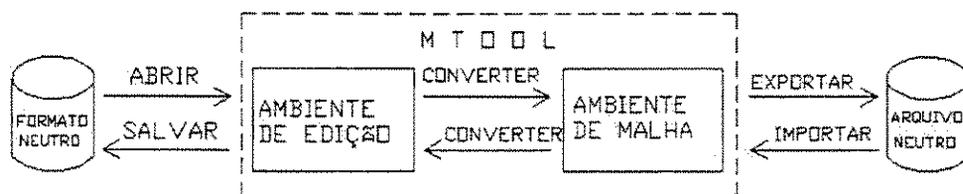


**Figura A.2.- Modelo discretizado por elementos finitos.**



**Figura A.3.- Visualização da malha de um modelo de elementos finitos.**

Existem, portanto, dois ambientes distintos dentro do sistema MTOOL: o ambiente de geração, edição e atribuição do modelo; e o ambiente para visualização de malhas de elementos finitos. Na figura A.4, mostra o fluxo dos dados entre estes ambientes.



**Figura A.4.- Fluxo de dados no sistema MTOOL.**

Aqui o usuário constrói a malha de elementos finitos no ambiente de edição tratando-a como uma subdivisão planar. Este ambiente é suportado pela estrutura de dados topológica *half-edge* que permite assegurar a consistência do modelo durante sua manipulação. Não existe, por exemplo, informação de número de nós e número de elementos neste ambiente (e acredita-se que esta informação é totalmente dispensável durante a geração da malha).

Finalizada a construção da malha, o usuário entra no ambiente para visualização de malhas de elementos finitos. Para isso, a subdivisão planar do ambiente de edição passa por um procedimento que a converte numa estrutura de elementos finitos convencional. Aqui, então, o usuário pode executar funções típicas de elementos finitos, como reordenação nodal. No entanto, neste ambiente não há funções para edição da malha, pois não se tem o suporte da estrutura de dados topológica. Nada impede que o usuário retorne ao ambiente de edição e faça nova conversão para elementos finitos.

No sentido inverso, a importação de uma malha gerada fora do sistema MTOOL para o ambiente de visualização de elementos finitos é bastante simples, já que se utiliza a estrutura de incidência convencional. No entanto, para que se possa editar a malha importada, é necessário realizar a conversão inversa (passar da estrutura de elementos finitos para a estrutura topológica de subdivisão planar). Esta conversão, embora não trivial, também é suportada pelo sistema que procura identificar a melhor correspondência.

### **1.1.- GERAÇÃO/EDIÇÃO/ATRIBUIÇÃO DO MODELO**

O ambiente para geração e edição do modelo é suportado por uma estrutura de dados topológica, conforme mencionado, sendo capaz de manter a consistência do modelo durante a criação/edição. A estrutura topológica permite, ainda, atribuir um certo grau de inteligência ao sistema. É possível, por exemplo, identificar interseções entre as arestas, identificar se uma região foi definida ou dividida em outras, verificar os efeitos indiretos de uma determinada atribuição (por exemplo, a troca do número de subdivisões de uma aresta elimina as malhas adjacentes, caso contrário o modelo ficaria inconsistente), etc.

Por oferecer tantas vantagens, é de se esperar que a estrutura topológica necessite de uma implementação relativamente complexa e ocupe um espaço de memória relativamente grande para sua realização. Por estes motivos, optou-se por utilizar a biblioteca de estrutura topológica **HED** (baseada na *half-edge data structure*) que oferece uma interface de alto nível (nível abstrato), eliminando a complexidade da estrutura topológica do código da aplicação.

Para minimizar o espaço de memória necessário para o armazenamento do modelo, idealizou-se uma estrutura hierárquica onde, num primeiro nível, encontra-se o modelo geométrico onde as malhas de elementos finitos, que representam o segundo nível hierárquico, são tratadas como atributos.

#### 1.1.1.- INTERFACE COM A BIBLIOTECA HED

**HED** é uma biblioteca construída para gerenciar a representação de modelos pela estrutura de dados *half-edge*. A biblioteca **HED** oferece um conjunto de funções que permite a interface com o programa de aplicação, eliminando a complexidade da manutenção de uma estrutura topológica do código da aplicação propriamente dito.

Entre outras, existem funções para: criar ou destruir um modelo, inserir um vértice ou uma aresta, redefinir atributos das entidades vértice, aresta, face e modelo (ou sólido), realiza *undos* e *redos*, coletar uma entidade que possua determinada posição, gravar ou ler o modelo, etc.

Como esta biblioteca é independente da aplicação, existem mecanismos para que cada aplicação associe seus próprios atributos. Resumidamente, podemos dizer que existe um campo em cada entidade da estrutura de dados (vértice, aresta, face e sólido) que é reservado para que a aplicação “pendure” (neste campo) um atributo que lhe seja conveniente. Como a biblioteca desconhece a natureza destes atributos, cabe à aplicação desenvolver funções específicas para manipulá-los.

Desta forma, cada vez que for identificada uma criação, alteração ou destruição de uma entidade, a biblioteca executa um procedimento que o programa de aplicação associa a cada evento. Assim, por exemplo, se uma aresta for inserida no modelo, a rotina associada à criação de aresta é executada. Nela, o programa de aplicação define os atributos que são associados à aresta.

Estas funções recebem o nome de funções **cliente**, por serem definidas pelo programa que é um cliente da biblioteca. Existem funções cliente associadas a diversos eventos tais como: criação de entidades, liberação de atributos, gravação e leitura de atributos, etc.

## **1.2.- HIRARQUIA DAS ENTIDADES TOPOLÓGICAS NO MTOOL**

No sistema MTOOL, existem dois níveis hierárquicos dentro do ambiente de edição. O nível da geometria do modelo e o nível para edição local de malhas de elementos finitos. No nível da geometria, estão as funções para modelagem geométrica do modelo (define-se aqui a geometria da estrutura) e as funções que associam atributos às diversas entidades da geometria. No nível da malha, estão funções para modelar a malha diretamente e atribuir propriedades locais.

No nível da geometria, a entidade topológica modelo (ou sólido) representa regiões, as arestas representam fronteiras da geometria e os vértices, interseções entre fronteiras, e são posteriormente mapeados para nós da malha de elementos finitos. Já no nível da malha, o modelo representa uma malha de elementos finitos, cada face corresponde a um elemento finito e cada vértice representa um nó da malha.

No nível da geometria, as malhas de elementos finitos geradas são tratadas como atributos das entidades. Como se sabe, para realizar a geração de uma malha por meio de mapeamento transfinitos, por exemplo, deve-se subdividir o modelo em regiões topologicamente equivalentes a retângulos (mapeamento bilinear) ou a triângulos (mapeamento trilinear) e, ainda, devem-se especificar as subdivisões das arestas que representam o contorno dessas regiões. Assim, o modelo completo possui várias malhas aparentemente independentes que estão associadas às diversas regiões. Inicialmente, armazena-se cada malha utilizando-se uma estrutura de incidência convencional associada à região a que pertence. Para garantir a compatibilidade entre as diversas malhas, os contornos das malhas são também representados por estruturas topológicas paralelas às representações por incidência. A vantagem de usar a representação por incidência recai no pequeno espaço de memória para seu armazenamento (em contrapartida, não é possível editar a malha neste nível).

A edição local da malha é garantida pelo sistema MTOOL em cada região. Assim, caso se deseje editar localmente a malha, é necessário fazer a conversão da estrutura de incidência para uma representação puramente topológica. Neste, ponto, deixa-se o nível da geometria e entra-se no nível da malha, onde é possível ao usuário editar uma região desta.

Quando se retorna ao nível da geometria, o modelo topológico que representa a malha de elementos finitos passa a ser considerado, novamente, como simples atributo da região (se o usuário desejar manipular esta região de malha novamente, o programa torna este modelo topológico ativo).

Tanto no nível da geometria como no nível da malha, é permitido ao usuário especificar condições de suporte e carregamento às entidades topológicas.

Observa-se que este modelo hierárquico impõe algumas restrições. No entanto, oferece uma forma bastante otimizada, no que diz respeito ao espaço de memória e eficiência na execução das tarefas, para representação de modelos de elementos finitos é uma atividade de uso restrito (principalmente em grandes modelos) e que, portanto, não pode comprometer a representação do modelo como um todo.

### 1.3.- AMBIENTE PARA VISUALIZAÇÃO DA MALHA

Após a geração, edição e atribuição do modelo, o usuário pode entrar no ambiente para visualização da malha de elementos finitos. Converte-se, então, o modelo topológico do ambiente de edição, com seus respectivos atributos, em uma representação única de elementos finitos.

Neste ambiente, além das funções para manipulação de vista, tais como *zoom*, translação, etc.; estão disponíveis funções próprias de malha de elementos finitos, tais como reordenação nodal e visualização da numeração de nós e elementos da malha. Existem funções também para exportar a malha de elementos finitos para um arquivo e importar uma malha de elementos finitos convencional de um arquivo.

Os dois ambientes (edição e visualização de malha de elementos finitos) são tratados de forma completamente independentes. Assim, o usuário pode usar o ambiente de elementos finitos apenas para visualizar, consultar ou reordenar os nós de malhas já existentes, sem que, necessariamente, passe ao ambiente de edição. Se for necessário editar uma malha importada, então é necessário passar para o ambiente de edição executando um algoritmo de conversão inversa (passa da estrutura de elementos finitos para a estrutura topológica).

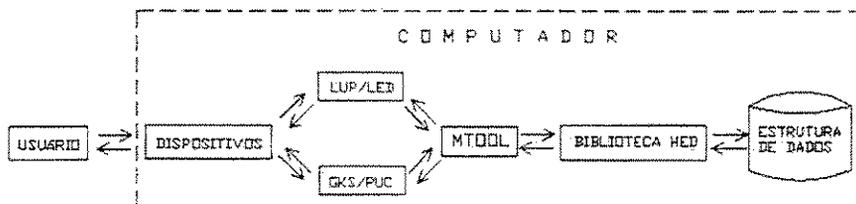
Assim como uma estrutura gerada no ambiente de edição precisa passar pelo ambiente de malhas de elementos finitos para exportar a malha num formato de estrutura de incidência.

Ressalta-se que estes algoritmos de conversão não são perfeitamente inversos. Portanto, um modelo gerado no sistema MTOOL, exportado como malha de elementos finitos e, em seguida, importados e convertidos para o ambiente de edição, provavelmente aparecerá com outras entidades topológicas em relação ao modelo que deu origem à malha. No entanto, como era de se esperar, ambos os modelos representam a mesma malha de elementos finitos.

#### 1.4.- FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO UTILIZADAS

O MTOOL possui recursos que oferecem uma interface com usuário amigável e atrativa. Como base do sistema, existe uma biblioteca para representação de subdivisões do plano baseada numa estrutura de dados topológica que permite atribuir ao sistema um determinado grau de inteligência, sem comprometer a eficiência das operações.

O sistema foi implementado utilizando-se o sistema de interface com o usuário **Iup/Led**, o sistema gráfico **GKS/PUC** e o gerenciador de subdivisões planares (**HED**) baseado na estrutura de dados topológica *Half-Edge Data Structure* como ilustrado na Figura A.5.



**Figura A.5.- Ferramentas utilizadas no desenvolvimento do MTOOL.**

#### 1.5.- AMBIENTES QUE COMPÕE O SISTEMA MTOOL

O sistema MTOOL é composto por três ambientes distintos:

- O ambiente de edição da topologia, onde é definido o modelo geométrico, feitas a discretização das regiões, que compõe o modelo geométrico, e a aplicação de atributos;
- O ambiente de edição de malha, onde é possível editar uma região específica, gerando-se elementos novos e aplicando-se atributos aos nós e elementos que compõem a malha;
- O ambiente de visualização da malha de elementos finitos, onde é possível obter informações relativas à quantidade de nós e elementos da malha, reordenação dos nós para minimização da largura de banda e perfil, geração do arquivo neutro, geração de listas de nós.

## APÊNDICE : B

### ARQUIVO NEUTRO

#### 1.- OBJETIVO

O arquivo neutro para a intercomunicação de dados em (e entre) programas de cálculo visa padronizar os formatos de transferência de dados, melhorando a compatibilidade e a portabilidade de tais dados/arquivos, e organizar tais dados de modo a facilitar ao usuário sua geração e manipulação.

#### 2.- CARACTERÍSTICAS GERAIS

a) a base de dados é dividida em três arquivos: **Geometria**, que contém os dados relativos à geometria do problema; **Malhas**, que contém os dados da geração das malhas de elementos finitos, detalhes do cálculo e condições de contorno; e **Materiais**, que contém o banco de dados das propriedades físicas dos materiais dos problemas.

b) a base de dados deve conter todos os dados necessários do pré ao pós-processamento, qualquer que seja o programa que a esteja utilizando. A falta de qualquer dado imprescindível ao cálculo deve ocasionar a interrupção do mesmo;

c) o formato deve ser de fácil leitura às linguagens de programação existentes no mercado, como o C++ e Fortran. Deve também ser legível ao usuário, permitindo-o reconhecer os campos através das palavras chaves, sem a necessidade de um manual;

d) a estrutura dos arquivos deve ser de fácil entendimento, permitindo ao usuário familiarizado com a Análise de Elementos Finitos analisar os dados com a simples inspeção dos arquivos.

### 3.- CARACTERÍSTICAS DOS ARQUIVOS

- Os arquivos estão em formato ASCII, de modo seqüencial;
- Não é necessário nenhum alinhamento de colunas, pois os arquivos são orientados de modo linear;
- A base de dados é seccionada em blocos de dados, cada uma delas começando com um cabeçalho (“label”) precedido por um porcentagem (%) que permite ao programa selecionar o bloco que importa ler, desprezando os blocos que não são necessários;

A convenção de tipos de variáveis adotada é:

[v]	variável inteira;
<v>	variável real;
'v(n)'	string de, no máximo, <b>n</b> caracteres.

### 4.- DADOS GERAIS

%REMARK

O “label” REMARK pode aparecer em qualquer ponto do arquivo (entre seções) e seu conteúdo é ignorado. É usado para documentar o arquivo.

%HEADER.FILE

Nome do arquivo

%HEADER.AUTHOR

Nome do autor ou do programa que gerou o arquivo.

%HEADER.DATE

Data da criação do arquivo.

%HEADER.VERSION

Versão do arquivo de formato neutro

%HEADER.TITLE

'File\_title(80)'

%HEADER.ANALYSIS

'Analysis\_type(12)'

%HEADER.ANALYSIS.MAXIMUM.STEPS

<max\_step>

%HEADER.ANALYSIS.TIME.STEPS

<time\_steps>

%HEADER.ANALYSIS.TOLERANCE.STEPS

<tolerance>

%HEADER.ANALYSIS.MAXIMUM.ITERATIONS

<max\_iteration>

%HEADER.ANALYSIS.PRINT.STEPS

<print\_steps>

%HEADER.ANALYSIS.ALGORITHM

"label"\_algorithm'

%HEADER.ANALYSIS.ERROS

<error>

%HEADER.ANALYSIS.NLOOP

<nloops>

%HEADER.UNITS

'length\_'label'(5)' 'mass\_'label'(5)' 'time\_'label'(5)' 'angle\_'label'(5)'

'temperature\_'label'(5)'

OBS.: Os "labels" de unidades utilizados são (o primeiro de cada lista é o "default"):

comprimento (length): M, CM, MM, MC, INCH, FEET.

massa (mass): KG, G, LB.

tempo (time): SEC, MIN, HR.

ângulo (angle): RAD, DEG, CYC.

temperatura (temperature): DEGC, DEGF, DEGK.

%END

Este "label" determina o fim do arquivo. Toda informação que vem após o "label" é ignorada.

## 5.- DADOS DOS NÓS

Os nós são definidos por um identificador e podem ter um "label" associado.

%NODE

[#\_of\_nodes]

%NODE.COORD

[node\_id] <x> <y> <z>

...

%NODE.LABEL

[#\_of\_node\_labels]

[node\_id] 'node\_label(12)'

...

%NODE.SUPPORT

[#\_of\_constrained\_node]

[node\_id] [dx] [dy] [dz] [rx] [ry] [rz] (0=free, 1=fixed)

...

## 6.- DADOS DOS ELEMENTOS

Os elementos são definidos por um identificador e separados por tipo, e podem ter um “label” associado. Qualquer outro tipo de elemento pode ser implementado nesta seção.

%ELEMENT

[#\_of\_elements]

%ELEMENT.LABEL

[#\_of\_elements\_labels]

[element\_id] 'element\_label(12)'

%ELEMENT.TRUSS

[#\_of\_truss\_elements]

[element\_id] [material\_id] [section\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id]

...

%ELEMENT.BEAM

[#\_of\_beam\_column\_elements]

[element\_id] [material\_id] [section\_id] [orientation\_id] [lib\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id]

%ELEMENT.T3

[#\_of\_t3\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id]

[node\_k\_id]

...

%ELEMENT.T6

[#\_of\_t6\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id] ...

[node\_n\_id]

...

%ELEMENT.Q4

[#\_of\_q4\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id]

[node\_k\_id] [node\_l\_id]

...

%ELEMENT.Q8

[#\_of\_q8\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id] ...

[node\_o\_id] [node\_p\_id]

...

%ELEMENT.DKT

[#\_of\_dkt\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id] ...

[node\_k\_id]

...

%ELEMENT.DKQ

[#\_of\_dkq\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id] ...

[node\_1\_id]

...

%ELEMENT.QUAD

[#\_of\_quad\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id] ...

[node\_p\_id]

...

%ELEMENT.INTERFACE

[#\_of\_interface\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id] ...

[node\_n\_id]

%ELEMENT.INFINITE

[#\_of\_infinite\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_i\_id] [node\_j\_id] ...

[node\_m\_id]

...

%ELEMENT.BRICK8

[#\_of\_brick8\_elements]

[element\_id] [material\_id] [thickness\_id] [integration\_id] [node\_1\_id] [node\_2\_id] ...

[node\_8\_id]

...

```
%ELEMENT.BRICK20
[#_of_brick20_elements]
[element_id] [node_1_id] [node_2_id] ... [node_19_id] [node_20_id]
...
```

## 7.- ATRIBUTOS DOS ELEMENTOS

A espessura dos elementos e as tabelas da ordem de integração.

```
%THICKNESS
[#_of_element_thickness]
[section_id] <thickness>
...
%INTEGRATION.ORDER
[#_of_element_integration_orders]
[integration_id] [stiffness_r] [stiffness_s] [stiffness_t] [stress_r] [stress_s] [stress_t]
...
```

## 8.- DADOS DE CARREGAMENTO

Estes dados são organizados em diversos casos. Cada caso tem sua própria combinação de dados, que inclui as modificações nas condições de contorno originais.

```
%LOAD
[#_of_load_cases]
%LOAD.CASE
[current_load_case_id] 'case_label(12)'

%LOAD.CASE.NODAL.FORCE
[#_of_nodal_force]
[node_id] <Fx> <Fy> <Fz> <Mx> <My> <Mz>
...
```

```
%LOAD.CASE.NODAL.DISPLACEMENT
[#_of_nodal_displacement]
[node_id] <dx> <dy> <dz> <rx> <ry> <rz>
...
```

## 9.- DADOS DOS RESULTADOS

Processamento (ou pós-processamento) dos dados do problema. O número de casos é, no mínimo, um (caso “default”), acrescido do número de casos definidos nos Dados de Carregamento.

```
%RESULTS
[#_of_cases]

%RESULTS.CASE
[current_case_id] ‘case_label(20)’
```

## 10.- DADOS DOS MATERIAIS

Os materiais são definidos através de um identificador e podem ter um “label” associado. Os dados dos materiais são dispostos independentemente do tipo do material. Ao ler o arquivo de materiais, o programa deve localizar, através do identificador do material, qual(is) a(s) característica(s) existente(s) e armazená-la(s).

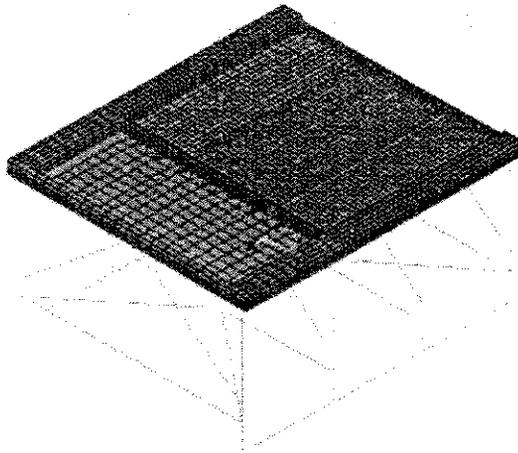
```
%MATERIAL
[#_of_materials]

%MATERIAL.LABEL
[#_of_material_labels]
[material_id] ‘material_label(12)’
```

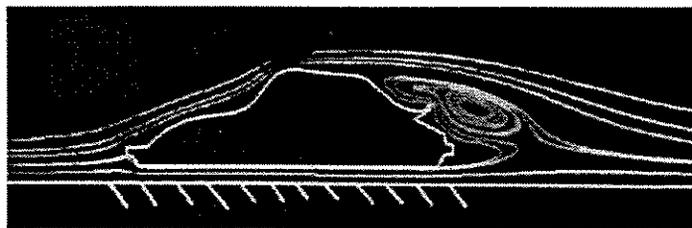
## APÊNDICE : C

### ANSYS / FULL

O ANSYS é um software elaborado pela ANSYS, Inc. que possui aplicação geral em análise de problemas encontrados em engenharia CAE (Computer Aided Engineering) através do Método dos Elementos Finitos.



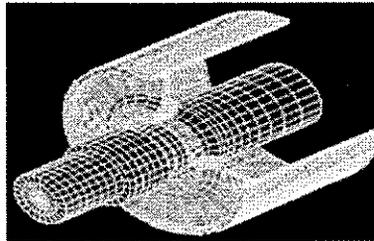
O programa oferece recursos avançados para a realização de análises estruturais estáticas e dinâmicas, lineares e não lineares, análises de transferência de calor e fluidos, análises eletromagnéticas e acústicas, contando com uma biblioteca de mais de 100 tipos de elementos, que o torna capaz de realizar uma vasta gama de simulações necessárias ao ambiente de projeto.



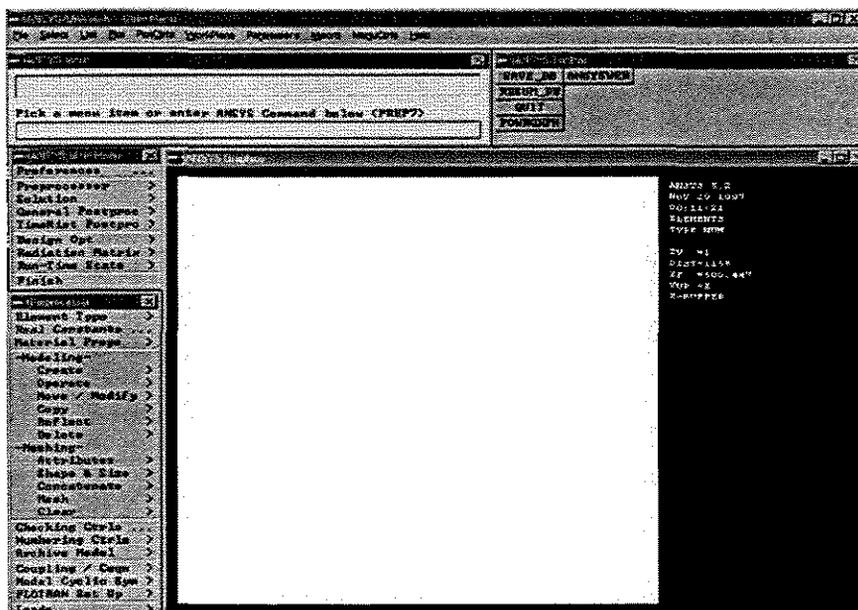
O ANSYS conta com poderosos recursos gráficos para pré e pós-processamento, recursos de criação de geometrias equivalentes a modeladores sólidos consagrados no mercado, incluindo definição de primitivas e álgebra booleana, além de avançadas técnicas como submodelagem, subestruturação, malha adaptativa e otimização estrutural.

Ambiente Operacional:

Está disponível para os principais computadores nas plataformas PC, Workstations e Supercomputadores. Possui integração com vários softwares de CAD, através do arquivo IGES, e outros softwares.



A seguir é mostrado a tela de apresentação do ANSYS versão 5.2. Para maiores informações ler o manual do ANSYS :



## **APÊNDICE : D**

### **NBR – 6120 CARGAS PARA CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE EDIFICAÇÕES**

#### **1.- OBJETIVO**

1.1 Esta Norma fixa as condições exigíveis para determinação dos valores das cargas que devem ser consideradas no projeto de estruturas de edificações, qualquer que seja sua classe e destino, salvo os casos previstos em normas especiais.

1.2 Para os fins desta Norma, as cargas são classificadas nas seguintes categorias :

a - Carga Permanente;

b - Carga Acidental.

#### **2.- CARGA PERMANENTE E CARGA ACIDENTAL**

##### **2.1 Carga Permanente**

2.1.1 Este tipo de carga é constituído pelo peso próprio da estrutura e pelas sobrecargas fixas correspondentes aos pesos de todos os elementos construtivos e instalações permanentes.

2.1.1 Quando forem previstas paredes divisórias, cuja posição não está definida no projeto, o cálculo de pisos com suficiente capacidade de distribuição transversal da carga deve ser feito, admitindo, além dos demais carregamentos, uma carga uniformemente distribuída por metro quadrado de piso não menor que um terço do peso por metro linear de parede pronta, observando o valor mínimo de  $1 \text{ KN/m}^2$ .

## 2.2 Carga Acidental

É toda aquela que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos, etc.).

### 2.2.1 Condições peculiares

2.2.1.1 Nos compartimentos destinados a carregamentos especiais, como os devidos a arquivos, depósitos de materiais, máquinas leves, caixas-fortes, etc. não é necessária uma verificação mais exata destes carregamentos, desde que se considere um acréscimo de  $3 \text{ KN/m}^2$  ao valor da carga acidental.

2.2.1.2 As cargas verticais que se consideram atuando nos pisos de edificações, além das que se aplicam em caráter especial referem-se a carregamentos devidos a pessoas, móveis, utensílios e veículos, e são supostas uniformemente distribuídas, com os valores mínimos indicados na Tabela 13 :

TABELA 13 - Valores mínimos das cargas verticais

$\text{KN/m}^2$

Local		Carga
Arquibancadas		4.00
Balcões	mesma carga da peça com a qual se comunicam	-
Bancos	hall	3.00
	escritórios e banheiros	2.00
	salas de diretoria e de gerência	1.50
Bibliotecas	sala de leitura	2.50
	sala para depósito de livros	$\geq 4.00$
	sala com estantes de livros - a ser determinada em cada caso ou $2.50 \text{ KN/m}^2$ por metro de altura, observado, porém o valor mínimo de	$\geq 6.00$
Casas de Máquinas	(incluindo o peso das máquinas) a ser determinada em cada caso, porém	$\geq 7.50$
Cinemas	hall e platéia com assentos fixos	3.00
	estúdio e platéia com assentos móveis	4.00
	banheiro	2.00
Clubes	sala de refeições e de assembléia com assentos fixos	3.00
	sala de assembléia com assentos móveis	4.00

	salão de danças e salão de esportes	5.00
	sala de bilhar e banheiro	2.00
Corredores	com aceso ao público	3.00
	sem aceso ao público	2.00
Cozinhas não Residenciais	a ser determinada em cada caso, porém	$\geq 3.00$
Depósitos	a ser determinada em cada caso e na falta de valores experimentais	-
Edifícios Residenciais	dormitório, sala, copa, cozinha e banheiro	1.50
	despensa, área de serviço e lavanderia	2.00
Escadas	com aceso ao público	3.00
	sem aceso ao público	2.50
Escolas	anfiteatro com assentos fixos, corredor e sala de aula	3.00
	sala de professores e banheiro	2.00
Escritórios	salas de uso geral e banheiros	2.00
Forros	sem aceso a pessoas	0.50
Galeria de Arte	a ser determinada em cada caso, porém	$\geq 3.00$
Galeria de Lojas	a ser determinada em cada caso, porém	$\geq 3.00$
Garagens e Estacionamentos	para veículos de passageiros ou semelhantes com carga máxima de 25 KN por veículo	3.00
Ginásios de Esportes		5.00
Hall	sem aceso ao público	1.50
	com aceso ao público	3.00
Hospitais	dormitório, enfermaria, sala de recuperação, sala de cirurgia sala de raios X e banheiro	2.00
	corredor e vestíbulo	3.00
Laboratórios	incluindo equipamentos, a ser determinada em cada caso, porém	$\geq 3.00$
Lavanderias	incluindo equipamentos	3.00
Lojas		4.00
Restaurantes		3.00
Teatros	palco	5.00
	demais dependências : cargas iguais às especificadas para cinemas	-
Terraços	sem aceso ao público	2.00
	com aceso ao público	3.00
	inacessível a pessoas	0.50
	destinado a heliportos elevados : as cargas deverão ser fornecidas pelo órgão competente do ministério da Aeronáutica	-

## APÊNDICE : E

### VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Supõe-se, para o cálculo, que as variações de temperatura sejam uniformes ao longo da estrutura, salvo quando a desigualdade dessas variações, entre partes diferentes da estrutura, seja muito acentuada. O coeficiente de dilatação térmica do concreto armado é considerado igual a  $10^{-5}$  por  $^{\circ}\text{C}$ .

As variações de temperatura, ocasionando alterações de volume do esqueleto sólido e da água contida nos seus interstícios, diferentes em ambos os materiais, dá lugar a alterações das tensões capilares. A deformação do concreto resultante desses fatores não obedece a uma lei certa que, como no caso dos sólidos perfeitos, para as temperaturas comuns, possa ser representada pelo produto da diferença de temperatura por um coeficiente de dilatação constante. O coeficiente de dilatação do concreto, assim denominado o quociente da deformação linear pela diferença de temperatura, é extremadamente variável; assim, por exemplo, Hatt encontrou valores entre 0.0072 e 0.0117  $\text{‰}/^{\circ}\text{C}$  e Gehler cita observações que conduziram a valores entre 0.0091 e 0.0123  $\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ .

A natureza do agregado também influi, observando-se com ela, segundo Morsch, variações do coeficiente de dilatação de 0.008 a 0.014  $\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ . Ensaio mais recentes de Bonnell e Harper confirmam essas variações, fornecendo valores (sempre em  $\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ ) de 0.0073 (calcário) a 0.0132 (pedregulho) com cura ao ar e de 0.0061 a 0.0122 com cura úmida.

Não sendo possível, nem necessário, nas obras de concreto, considerar com rigorosa exatidão as deformações oriundas das variações de temperatura, costuma adotar-se um coeficiente médio, considerado em geral igual a 0.01  $\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ .

A variação de temperatura uniforme ao longo da estrutura, decorre da impossibilidade prática de considerar nos cálculos as pequenas diferenças que diariamente se manifestam pela variação das condições ambientes, e mesmo, porque a sua consideração pouco alteraria o valor calculado das tensões, as quais permaneceriam com folga dentro dos limites prescritos na fixação dos coeficientes de segurança. O mesmo não se dará no caso de diferenças acentuadas de temperatura, como, por exemplo, em vigas sobre câmaras frigoríficas.

Entre as amplitudes de 20 °C ou 30 °C adotadas pela NBR - 6118, deve escolher-se a que melhor corresponda às condições climáticas do lugar; assim, nos Estados no Norte do Brasil, onde a própria diferença entre o máximo e o mínimo absolutos, durante todo o ano, de muito pouco ultrapassa 20 °C, deve tomar-se evidentemente o primeiro valor; já nos Estados do Sul, onde aquela diferença atinge 40 °C – mas onde a diferença entre a maior média mensal das máximas e a menor média mensal das mínimas anda em torno de 20 °C – deve tomar-se o segundo valor.

O critério adotado de se admitir como uniforme a temperatura da massa do concreto leva a considerar amplitudes de variação menores nas peças muito espessas; é o que faz a NBR - 6118 reduzindo para  $\pm 5$  °C e  $\pm 10$  °C os limites anteriores, no caso de peças cuja menor dimensão não tenha menos de 70 cm. Para esse fim não se descontam os espaços vazios inteiramente fechados, pois o ar aí funciona como volante térmico.

No concreto protegido contra variações apreciáveis de temperatura, despreza-se a sua influência : é o caso das peças permanentemente envolvidas em terra ou água.

A prática tem mostrado que em edifícios comuns, cujas dimensões, em planta, não ultrapassem 30 m a influência das variações de temperatura da atmosfera é desprezível; daí a dispensa do respectivo cálculo, prescrita pela NBR - 6118. Não se deve esquecer que se trata então de estruturas comuns e não de casos especiais, como, por exemplo, pórticos de grandes vãos ou coberturas de pequena espessura não protegidas contra os raios diretos do sol.

## **APÊNDICE : F**

### **NBR – 6123 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES**

#### **1.- OBJETIVO**

Esta Norma fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas a ação estática do vento, para efeitos de calculo de edificações. É aplicável exclusivamente a edificações em que o efeito dinâmico do vento pode ser desprezado.

#### **1.1.-RESTRICÇÕES**

- 1.1.1 Não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos esses em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos. Resultados experimentais obtidos em túnel de vento com simulação das principais características do vento natural podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes desta norma.
- 1.1.2 Edificações que possam ser submetidas a oscilações importantes causadas pelo vento requerem estudos especiais. Tais oscilações podem ocorrer mesmo com velocidades de vento abaixo da velocidade característica.

#### **2.- DEFINIÇÕES**

##### **2.1.- Barlavento**

Região de onde sopra o vento, em relação à edificação.

## **2.2.- Reticulado**

Toda estrutura constituída por barras retas.

## **2.3.- Vento básico**

Vento a que corresponde a velocidade básica  $V_o$ .

## **2.4.- Vento de alta turbulência**

Vento que obedece as prescrições da Norma.

## **2.5.- Vento de baixa turbulência**

Vento que se verifica em todos os demais casos.

## **2.6.- Sobre pressão**

Pressão efetiva acima da pressão atmosférica de referencia (sinal positivo).

## **2.7.- Sotavento**

Região oposta aquela de onde sopra o vento em relação à edificação.

## **2.8.- Sucção**

Pressão efetiva abaixo da pressão atmosférica de referencia (sinal negativo).

### **3.- PROCEDIMENTO PARA O CALCULO DAS FORÇAS DEVIDAS AO VENTO, NAS EDIFICAÇÕES**

As forças devidas ao vento sobre uma edificação devem ser calculadas separadamente para:

- a) Elementos de vedação e suas fixações (telhas, vidros, esquadrias, painéis de vedação, etc.).
- b) Partes da estrutura (telhados, paredes, etc.).
- c) A estrutura como um todo.

#### **3.1.- Vento sobre estruturas parcialmente executadas**

A força do vento sobre uma estrutura parcialmente executada depende do método e da seqüência da construção. É razoável admitir que a máxima velocidade característica do vento,  $V_k$ , não ocorrerá durante um período pequeno de tempo.

Assim, sendo, a verificação da segurança de uma estrutura parcialmente executada pode ser feita com uma velocidade característica menor.

#### **3.2.- Determinação das forças devidas ao vento**

As forças devidas ao vento são determinadas do seguinte modo:

- a) a velocidade básica do vento, " $V_o$ ", adequada ao local onde a estrutura será construída, é determinada de acordo com o disposto em 4.1.
- b) a velocidade básica do vento é multiplicada pelos fatores " $S_1$ ", " $S_2$ " e " $S_3$ " para ser obtida a velocidade característica do vento, " $V_k$ ", para a parte da edificação em consideração, de acordo com 4.2, 4.3 e 4.4.

$$V_k = V_o * S_1 * S_2 * S_3$$

$V_o$  : velocidade básica do vento em m/s

$V_k$  : veloc. característica do vento em m/s

c) a velocidade característica do vento permite determinar a pressão dinâmica, “q”, pela relação:

$$q = V_k^2 / 16$$

q : pressão dinâmica do vento em Kgf/m<sup>2</sup>

## **4.- VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO**

### **4.1.- Velocidade básica do vento “ $V_o$ “**

A velocidade básica do vento, “ $V_o$  “ é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em Média, uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano.

A Figura F.1 apresenta o gráfico das isopletas da velocidade básica do vento no Brasil, com intervalos de 5 m/s.

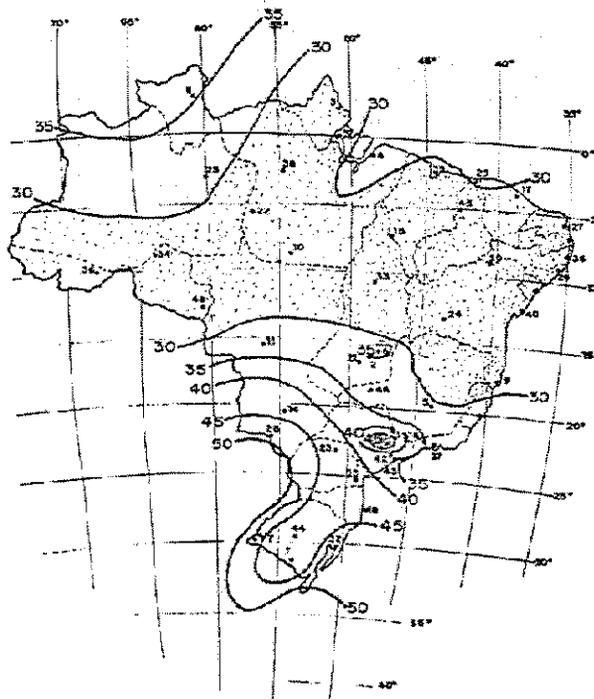


Figura F.1.- Gráfico das Isopletas da velocidade básica do vento;  $V_0$  em m/s.

#### 4.2.- Fator topográfico “ $S_1$ ”

O fator topográfico “ $S_1$ ” leva em consideração as grandes variações locais na superfície do terreno, a Tabela 1 dá os valores do fator topográfico para condições típicas.

Os valores da Tabela 1 devem ser usados com precaução, uma vez que, em certos casos, os valores nela indicados podem estar acima ou abaixo dos reais. Poderão ser adotados valores menores que os indicados na Tabela 14, desde que devidamente justificados.

**TABELA 14 - FATOR TOPOGRÁFICO “S<sub>1</sub>”**

	TOPOGRAFIA	S <sub>1</sub>
a	todos os casos (exceto os casos b e c)	1.0
b	Encostas e cristas de morros em que ocorre aceleração do vento. Vales com efeito de afunilamento	1.1
c	Vales profundos, protegidos de todos os ventos	0.9

#### **4.3.- Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno: Fator “S<sub>2</sub>”**

O fator “S<sub>2</sub>” considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte componente em consideração.

Em ventos fortes, a velocidade do vento aumenta usualmente com a altura acima do terreno. Este aumento depende da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. Este intervalo de tempo está relacionado com as dimensões da edificação, pois edificações pequenas e elementos de edificação são mais afetados por rajadas de curta duração do que grandes edificações.

Para o estudo dos elementos de vedação é recomendado usar o fator “S<sub>2</sub>” correspondente ao topo da edificação. Esta recomendação é baseada no fato de que na fachada de barlavento e nas fachadas laterais o vento é defletido para baixo, com um conseqüente aumento da pressão dinâmica na parte inferior da edificação. Na Tabela 15 são mostrados os valores do fator “S<sub>2</sub>”.

**TABELA 15 - FATOR “S<sub>2</sub>” Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura acima do terreno.**

Altura acima do terreno	1			2			3			4		
	Terreno aberto sem obstruções			Terreno aberto com poucas obstruções			Terreno com muitas obstruções; pequenas cidades; subúrbios de grandes cidades			Terreno com grandes obstruções. Ex.: centro de grandes cidades		
H (m)	CLASSE			CLASSE			CLASSE			CLASSE		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 3	.83	0.78	0.73	0.72	0.67	0.63	0.64	0.60	0.55	0.56	0.52	0.47
5	.88	0.83	0.78	0.79	0.74	0.70	0.70	0.65	0.60	0.60	0.55	0.50
10	1.00	0.95	0.90	0.93	0.88	0.83	0.78	0.74	0.69	0.67	0.62	0.58
15	1.03	0.99	0.94	1.00	0.95	0.91	0.88	0.83	0.78	0.74	0.69	0.64
20	1.06	1.01	0.96	1.03	0.98	0.94	0.95	0.90	0.85	0.79	0.75	0.70
30	1.09	1.05	1.00	1.07	1.03	0.98	1.01	0.97	0.92	0.90	0.85	0.79
40	1.12	1.08	1.03	1.10	1.06	1.01	1.05	1.01	0.96	0.97	0.93	0.89
50	1.14	1.10	1.06	1.12	1.08	1.04	1.08	1.04	1.00	1.02	0.98	0.94
60	1.15	1.12	1.08	1.14	1.10	1.06	1.10	1.06	1.02	1.05	1.02	0.98
80	1.18	1.15	1.11	1.17	1.13	1.09	1.13	1.10	1.06	1.10	1.07	1.03
100	1.20	1.17	1.13	1.19	1.16	1.12	1.16	1.12	1.09	1.13	1.10	1.07
120	1.22	1.19	1.15	1.21	1.18	1.14	1.18	1.15	1.11	1.15	1.13	1.10
140	1.24	1.20	1.17	1.22	1.19	1.16	1.20	1.17	1.13	1.17	1.15	1.12
160	1.25	1.22	1.19	1.24	1.21	1.18	1.21	1.18	1.15	1.19	1.17	1.14
180	1.26	1.23	1.20	1.25	1.22	1.19	1.23	1.20	1.17	1.20	1.19	1.16
200	1.27	1.24	1.21	1.26	1.24	1.21	1.24	1.21	1.18	1.22	1.21	1.18

Obs. :

1.- "l" (em m.) é a maior dimensão horizontal ou vertical da edificação.

2.- Classe "A" -  $l \leq 20$  m.

Classe "B" -  $20 \text{ m.} < l < 50$  m.

Classe "C" -  $l \geq 50$  m.

#### 4.4.- Fator estatístico "S<sub>3</sub>"

O fator estatístico "S<sub>3</sub>" é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Segundo a definição dada em 4.1, a velocidade básica "V<sub>0</sub>" é a velocidade do vento que apresenta um período de recorrência médio de 50 anos. A probabilidade de que a velocidade "V<sub>0</sub>" seja igualada ou excedida neste período é de 63 por cento.

O nível de probabilidade (0,63) e a vida útil (50 anos) adotados, são considerados adequados para edificações normais destinadas a moradias, hotéis, escritórios, etc. Para estas edificações o coeficiente "S<sub>3</sub>" vale 1,00, conforme consta na Tabela 16.

**TABELA 16 - Valores mínimos do fator estatístico "S<sub>3</sub>"**

GRUPO	DESCRIÇÃO	S <sub>3</sub>
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicações, etc.)	1.10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1.00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósito, silos, construções rurais, etc.)	0.95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0.88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0.83

## 5.- COEFICIENTES AERODINÂMICOS PARA COBERTURAS CURVAS

### 5.1.- Abóbadas cilíndricas de seção circular

As pressões externas em superfícies curvas dependem da localização dos pontos de separação do fluxo, os quais variam com a velocidade do vento, características de sua turbulência, curvatura da superfície externa da cobertura e sua rugosidade.

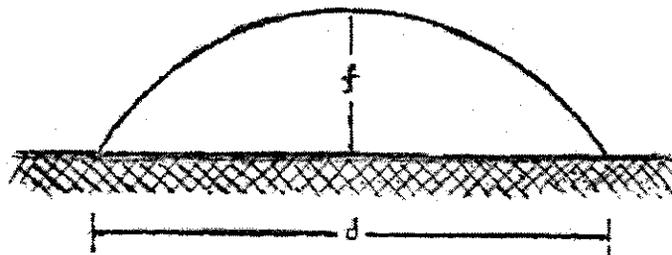
### 5.2.- Cúpulas

Do mesmo modo que para as abóbadas cilíndricas de seção circular, somente valores aproximados de " $C_{pe}$ " podem ser dados para as cúpulas, devido à variação da distribuição das pressões com as características do vento e da superfície externa da cúpula.

Estudos especiais devem ser feitos no caso de cúpulas de grandes dimensões.

#### 5.2.1.- Cúpulas sobre o terreno

Distribuições típicas das isóbaras (linhas de igual " $C_{pe}$ ") para cúpulas assentes diretamente sobre o terreno são dadas na figura seguintes para  $f/d = 1/2$  e  $1/4$ .



a) Elevação



Para relações intermediárias os coeficientes são atribuídos por interpolação. A mesma tabela apresenta os valores do coeficiente de sustentação, "C<sub>s</sub>", sendo a força de sustentação calculada pela expressão :

$$F_s = C_s q \Pi d^2/4$$

Sendo :

q : pressão dinâmica do vento no topo da cúpula

d : diâmetro do círculo da base da cúpula.

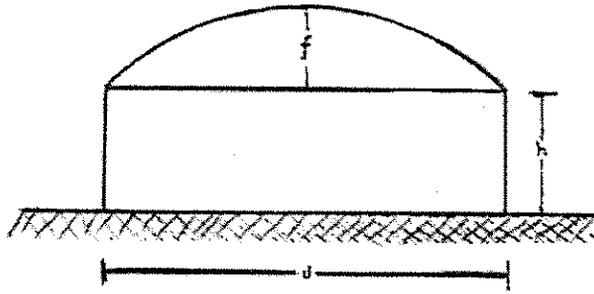
**5.2.1.2** Todas as forças calculadas a partir dos coeficientes de pressão atuam perpendicularmente a superfície externa da cobertura. A força de sustentação atua na direção vertical de baixo para cima.

**TABELA 17 - Valores limites dos coeficientes de pressão externa "C<sub>pe</sub>" e coeficientes de sustentação "C<sub>s</sub>" das cúpulas sobre o terreno.**

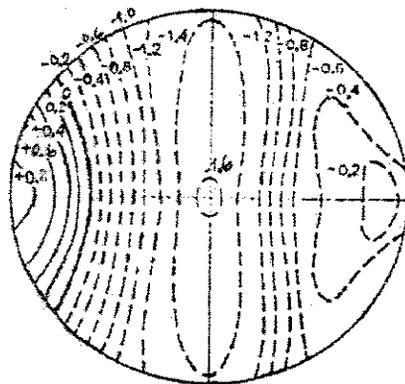
F/d	C <sub>pe</sub>		C <sub>s</sub>
	Sobrepessão	Sucção	
1/15	+0.1	-0.3	0.15
1/10	+0.2	-0.3	0.2
1/8	+0.2	-0.4	0.2
1/6	+0.3	-0.5	0.3
1/4	+0.4	-0.6	0.3
1/2	+0.6	-1.0	0.5

### 5.2.2.- Cúpulas sobre paredes cilíndricas

Uma cúpula sobre uma parede cilíndrica apresenta uma variação maior dos valores do coeficiente de pressão externa do que quando assente diretamente sobre o terreno. Distribuições típicas das isóbaras são dadas na figura seguinte. Não há zona em sobrepessão nas cúpulas com f/d menor que 1/5 e com parede de altura a partir de h/4.



a) Elevação



b) Vista superior : linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para  $f/d = 1/2$  e  $h/d = 1/2$

Figura F.3.- Linhas Isobáricas das cúpulas sobre paredes cilíndricas.

5.2.2.1 Valores limites coeficientes de pressão externa positivos (sobre pressões) e negativos (sucções) são dados na Tabela 18. Para relações intermediárias de  $f/d$  e de  $h/d$  os coeficientes são obtidos por interpolação.

**TABELA 18 Valores limites dos coeficientes de pressão externa  $C_{pe}$  . Cúpula sobre paredes cilíndricas.**

F/d	H/d	$C_{pe}$		
		Barlavento	No topo	Lateralmente
1/2	1/4	+0.9	-1.5	-0.4
	1/2	+0.8	-1.7	-0.4
	1	+0.8	-1.7	-0.5
1/6	1/4	-0.1	-0.9	-0.4
1/10		-1.2	-0.6	-0.3
1/15		-1.4	-0.5	-0.3
1/20		-1.4	-0.4	-0.2
1/6	1	-1.4	-1.1	-0.4
1/10		-1.7	-0.8	-0.4
1/15		-1.5	-0.5	-0.4
1/20		-1.4	-0.5	-0.4

## 6.- EFEITOS DE INTERAÇÃO

Há certas situações em que é necessário considerar a influência de edificações situadas nas vizinhanças daquelas em estudo. Essas edificações podem causar aumento das forças do vento de três modos diferentes :

### 6.1.- Por efeito Venturi

Edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um “afunilamento” do vento, acelerando o fluxo de ar, com uma conseqüente alteração nas pressões. Este efeito pode aparecer também em edificações muito próximas, caso em que já foram observados coeficientes de pressão negativos (sucções) excedendo, em módulo, o valor 2.0. Estas pontas de sucção verificaram-se nas paredes confrontantes das duas edificações, próximo às arestas de barlavento.

## **6.2.- Por deflexão do vento na direção vertical**

Edificações altas defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo. Edificações mais baixas, situadas nestas zonas, poderão ter as cargas do vento aumentadas por este efeito, com os coeficientes de forma atingindo valores entre  $-1.5$  e  $-2.0$ .

## **6.3.- Pela turbulência da esteira**

Uma edificação situada a sotavento de outra pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, causando efeitos dinâmicos e alterações nas pressões. Estas são particularmente importantes em construções com coberturas e painéis de vedação feitos de materiais leves.

## **APÊNDICE : G**

### **NBR 8681 AÇÕES E SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS**

#### **1.- Objetivo**

Esta norma fixa as condições exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da Construção Civil e estabelece as definições e os critérios de quantificação das ações e das resistências a considerar no projeto das estruturas de edificações, quaisquer que sejam sua classe e destino, salvo os casos previstos em normas especiais.

Os critérios de verificação da segurança e os de quantificação das ações adotados nesta Norma são válidos para as estruturas e para as peças estruturais construídas com quaisquer dos materiais usualmente empregados na Construção Civil.

Nota : Além destes, devem ser respeitados os critérios que constem de normas referentes a tipos particulares de construção e os símbolos gráficos, conforme indicados na NBR 7808.

#### **2.- Norma complementar**

Na aplicação desta Norma é necessário consultar :  
NBR 7808 - Símbolos gráficos para projetos de estruturas - Simbologia.

#### **3.- Definições**

Para os efeitos desta Norma são adotadas as definições de 3.1 a 3.8

### **3.1.- Estados limites de uma estrutura**

Estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção.

### **3.2.- Estados limites últimos**

Estados que pela sua simples ocorrência determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção.

### **3.3.- Estados limites de utilização**

Estados que por sua ocorrência, repetição ou duração causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura.

### **3.4.- Ações**

Ações são as causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. Do ponto de vista prático, as forças e as deformações impostas pelas ações são consideradas como se fossem as próprias ações. As deformações impostas são por vezes designadas por ações indiretas e as forças, por ações diretas.

### **3.5.- Ações permanentes**

Ações permanentes são as que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua Média, durante praticamente toda a vida da construção. A variabilidade das ações permanentes é medida num conjunto de construções análogas.

### **3.6.- Ações variáveis**

Ações variáveis são as que ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua Média, durante a vida da construção.

### **3.7.- Ações excepcionais**

Ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas.

### **3.8.- Cargas acidentais**

Cargas acidentais são as ações variáveis que atuam nas construções em função de seu uso (pessoas, mobiliário, veículos, materiais diversos, etc.)

## **4.- CONDIÇÕES ESPECÍFICAS**

### **4.1.- Coeficiente de Ponderação para combinações últimas**

#### **4.1.1.- Coeficiente de Ponderação para as ações permanentes**

Os coeficientes de ponderação  $\gamma_g$  das ações permanentes majoram os valores representativos das ações permanentes que provocam efeitos desfavoráveis e minoram os valores representativos daquelas que provocam efeitos favoráveis para a segurança da estrutura. Para uma dada ação permanente, todas as suas parcelas são ponderadas pelo mesmo coeficiente  $\gamma_g$ , não se admitindo que algumas de suas partes possam ser majoradas e outras minoradas. Para os materiais sólidos que possam provocar empuxos, a componente vertical é considerada como uma ação e a horizontal como outra ação, independente da primeira.

Os coeficientes de ponderação  $\gamma_g$  relativos às ações permanentes que figuram nas combinações últimas, salvo indicação em contrário, expressa em norma relativa ao tipo de construção e de material considerados, devem ser tomados com os valores básicos a seguir indicados :

a) Ações permanentes de grande variabilidade,

Para as ações constituídas pelo peso próprio das estruturas, dos elementos construtivos permanentes não estruturais e dos equipamentos fixos, todos considerados globalmente, quando o peso próprio da estrutura não supera 75% da totalidade destes pesos permanentes e para outras ações permanentes de grande variabilidade, adotam-se os valores indicados na Tabela 19;

**TABELA 19 - Ações permanentes de grande variabilidade**

Combinações	Para efeitos	
	desfavoráveis	favoráveis
Normais	$\gamma_g = 1.4$	$\gamma_g = 0.9$
Especiais ou de Construção	$\gamma_g = 1.3$	$\gamma_g = 0.9$
Excepcionais	$\gamma_g = 1.2$	$\gamma_g = 0.9$

b) Ações permanentes de pequena variabilidade,

Para as ações permanentes, quando o peso próprio da estrutura supera 75% da totalidade dos pesos permanentes e para outras ações permanentes de pequena variabilidade, adotam-se os valores indicados na Tabela 20.

**TABELA 20 - Ações permanentes de pequena variabilidade**

Combinações	Para efeitos	
	desfavoráveis	favoráveis
Normais	$\gamma_g = 1.3$	$\gamma_g = 1.0$
Especiais ou de Construção	$\gamma_g = 1.2$	$\gamma_g = 1.0$
Excepcionais	$\gamma_g = 1.1$	$\gamma_g = 1.0$

c) Efeitos de recalques de apoio e de retração dos materiais,

Neste caso adotam-se os valores indicados na Tabela 21.

**TABELA 21 - Efeitos de recalques de apoio e de retração dos materiais**

Combinações	Para efeitos	
	desfavoráveis	favoráveis
Normais	$\gamma_\varepsilon = 1.2$	$\gamma_\varepsilon = 1.0$
Especiais ou de Construção	$\gamma_\varepsilon = 1.2$	$\gamma_\varepsilon = 1.0$
Excepcionais	$\gamma_\varepsilon = 0$	$\gamma_\varepsilon = 0$

#### 4.1.1.2.- Coeficiente de ponderação para as ações variáveis

Os coeficientes de ponderação  $\gamma_q$  das ações variáveis majoram os valores representativos das ações variáveis que provocam efeitos desfavoráveis para a segurança da estrutura. As ações variáveis que provocam efeitos favoráveis não são consideradas nas combinações de ações, admitindo-se que sobre a estrutura atuem apenas as parcelas de ações variáveis que produzam efeitos desfavoráveis. As ações variáveis que tenham parcelas favoráveis e desfavoráveis, que fisicamente não possam atuar separadamente, devem ser consideradas conjuntamente como uma ação única. Os coeficientes de ponderação  $\gamma_q$  relativos às ações variáveis que figuram nas combinações últimas, salvo indicação em contrário, expressa em norma relativa ao tipo de construção e de material considerados, devem ser tomados com os seguintes valores básicos indicados na Tabela 22.

**TABELA 22 - Coeficientes de ponderação para ações variáveis**

Combinações	Ações variáveis em geral incluída as cargas acidentais móveis	Efeitos de temperatura
Normais	$\gamma_q = 1.4$	$\gamma_e = 1.2$
Especiais ou de Construção	$\gamma_q = 1.2$	$\gamma_e = 1.0$
Excepcionais	$\gamma_q = 1.0$	$\gamma_e = 0$

#### 4.1.1.3.- Valores dos fatores de combinação

Os fatores de combinação  $\Psi_0$ , salvo indicação em contrário, expressa em norma relativa ao tipo de construção e de material considerados, estão indicados na Tabela 23 juntamente com os fatores de redução  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  referentes às combinações de utilização.

**TABELA 23 - Valores dos fatores de combinação e dos fatores de utilização**

<i>Ações em geral</i>	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Variações uniformes de temperatura em relação à Média anual local	0.6	0.5	0.3
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0.4	0.2	0
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em que a ação variável principal tem pequena variabilidade durante grandes intervalos de tempo (ex. : edifícios de habitação)	0.6	0.2	0
<i>Cargas acidentais dos edifícios</i>			
Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas	0.4	0.3	0.2
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0.7	0.6	0.4
Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0.8	0.7	0.6
<i>Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos</i>			
Pontes de pedestres	0.4	0.3	0.2(A)
Pontes rodoviárias	0.6	0.4	0.2(A)
Pontes ferroviárias (ferrovias não especializadas)	0.8	0.6	0.4(A)

(A) Admite-se  $\Psi_2 = 0$  quando a ação variável principal corresponde a um efeito sísmico.

APÊNDICE : H

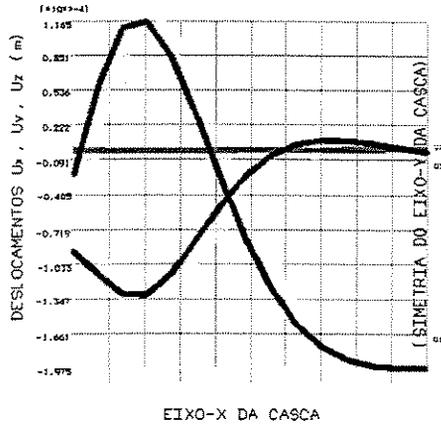


Figura 1 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada sem domo

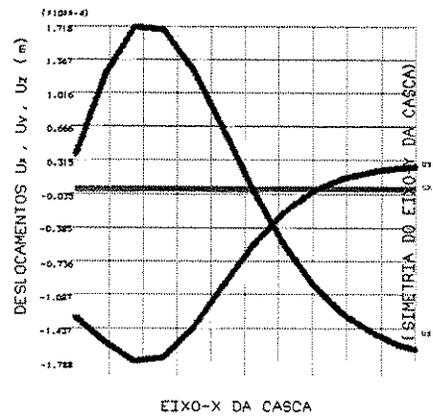


Figura 4 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

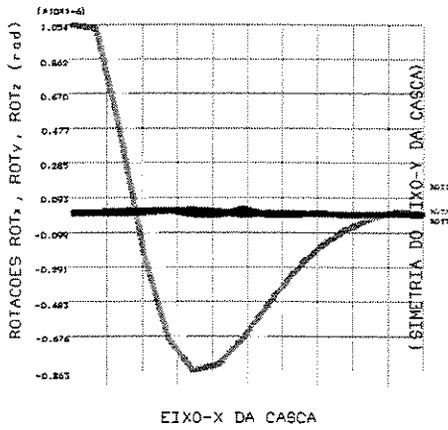


Figura 2 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada sem domo

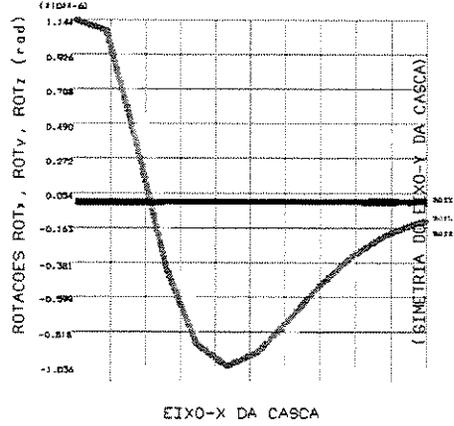


Figura 5 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada com domo

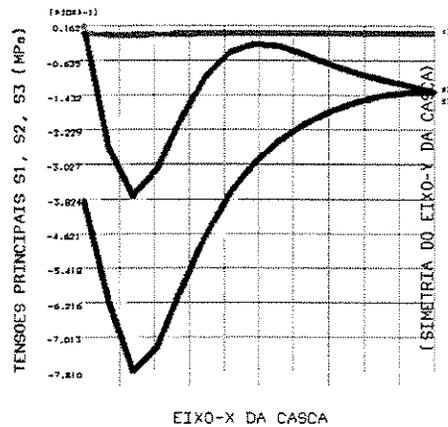


Figura 3 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada sem domo

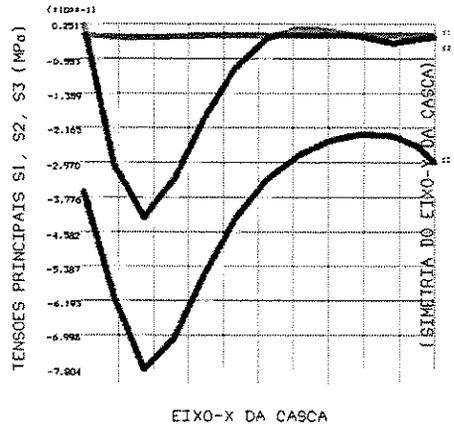


Figura 6 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada com domo

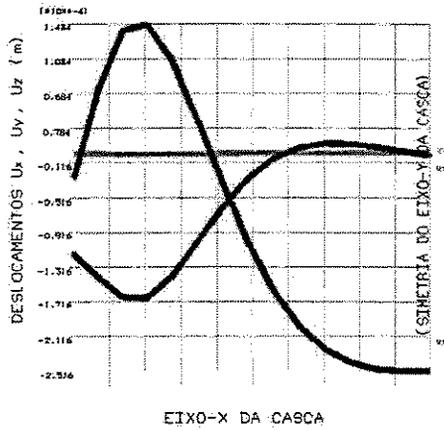


Figura 7 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada sem domo

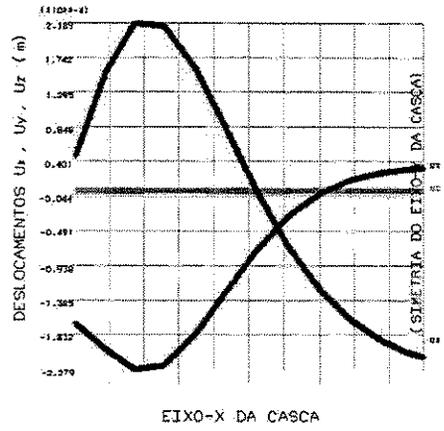


Figura 10 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

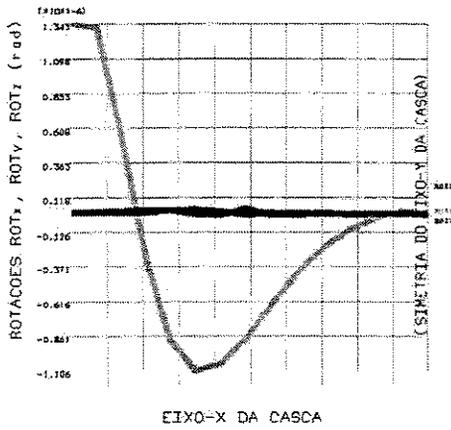


Figura 8 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada sem domo

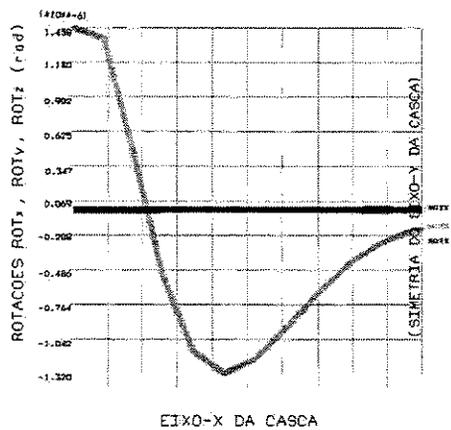


Figura 11 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada com domo

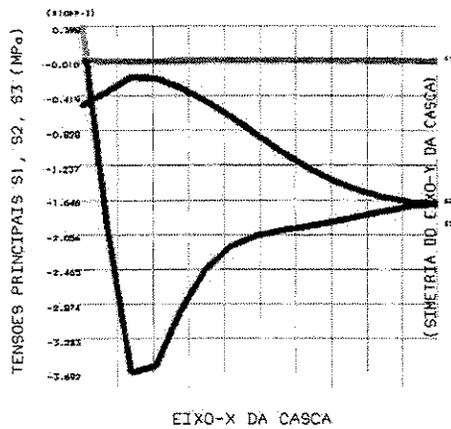


Figura 9 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada sem domo

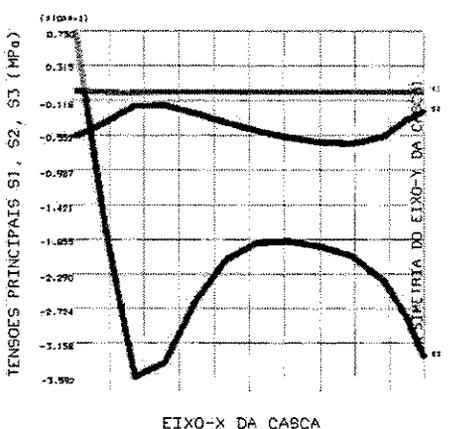


Figura 12 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada com domo

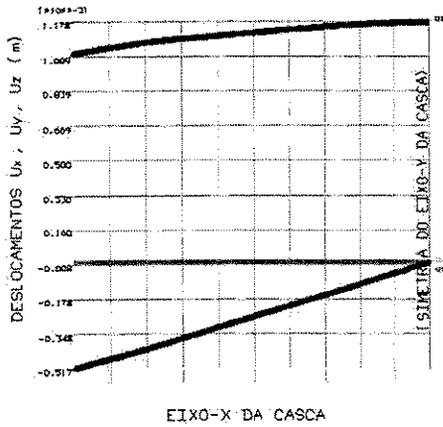


Figura 13 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada sem domo

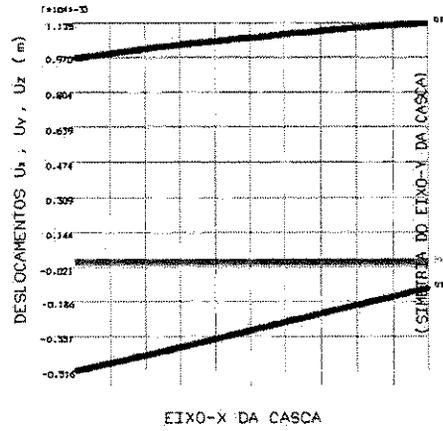


Figura 16 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

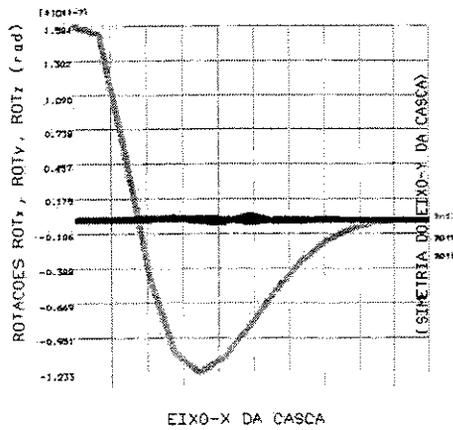


Figura 14 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada sem domo

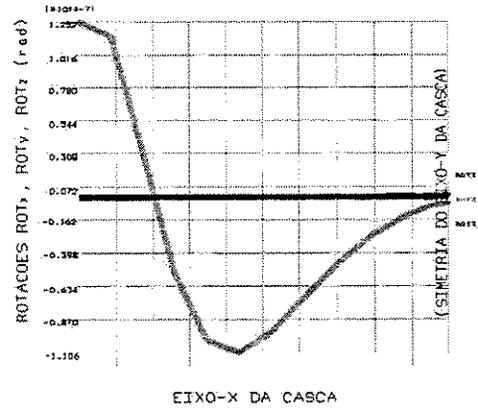


Figura 17 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada com domo

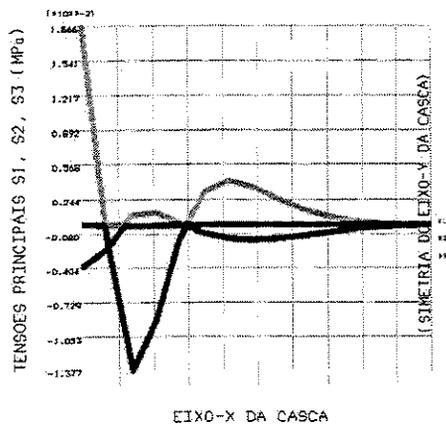


Figura 15 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada sem domo

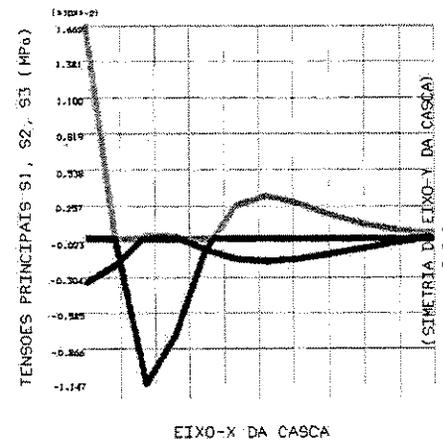


Figura 18 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada com domo

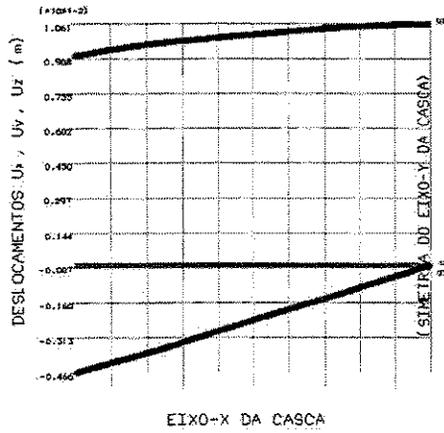


Figura 19 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada sem domo

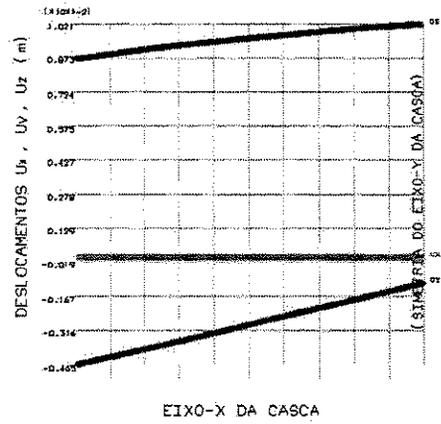


Figura 22 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

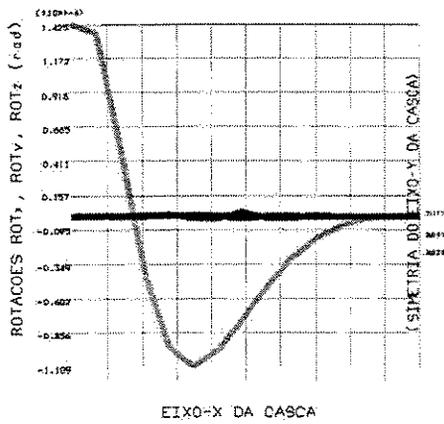


Figura 20 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada sem domo

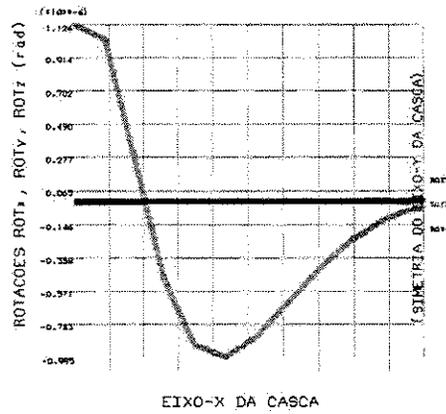


Figura 23 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada com domo

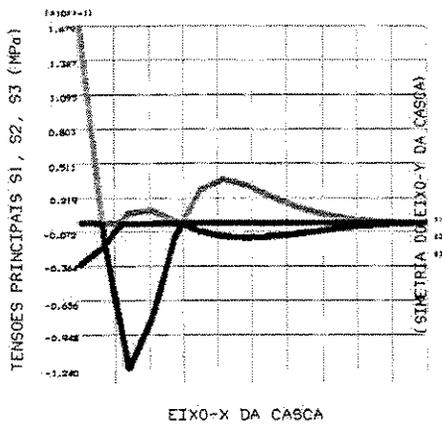


Figura 21 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada sem domo

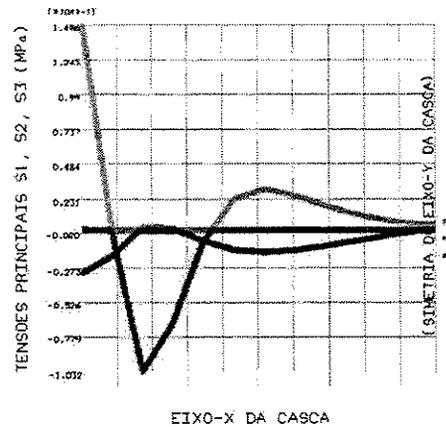


Figura 24 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada com domo

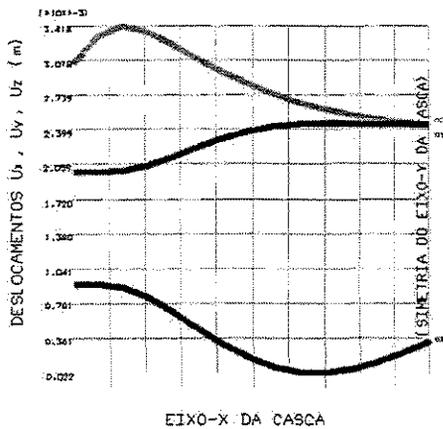


Figura 25 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

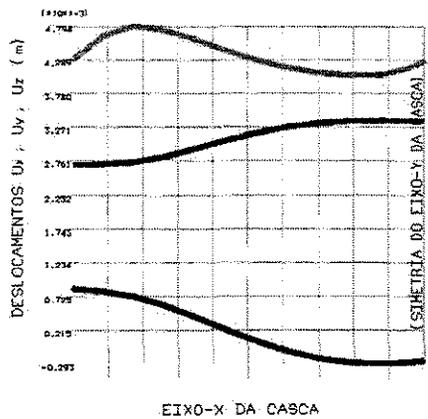


Figura 28 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

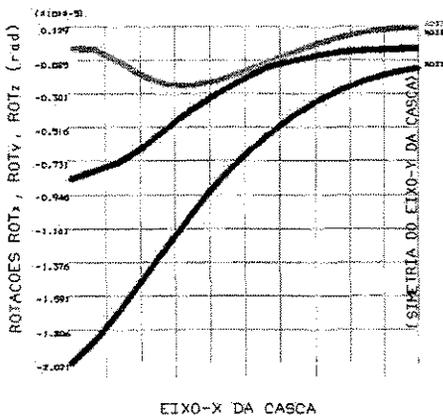


Figura 26 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada sem domo

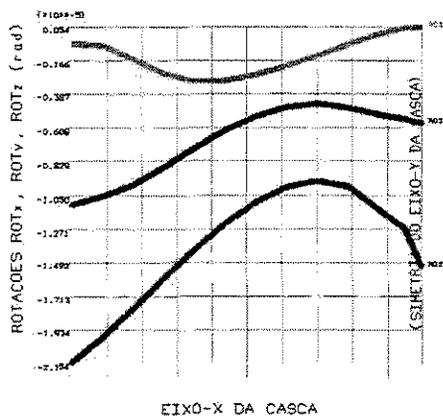


Figura 29 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada com domo

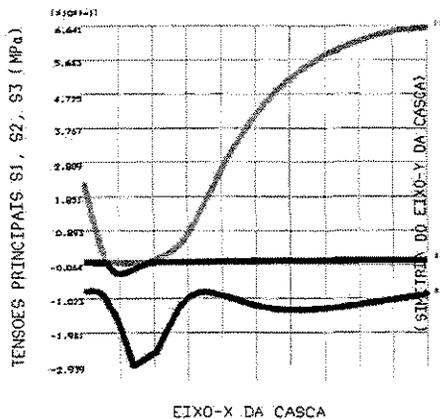


Figura 27 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada sem domo

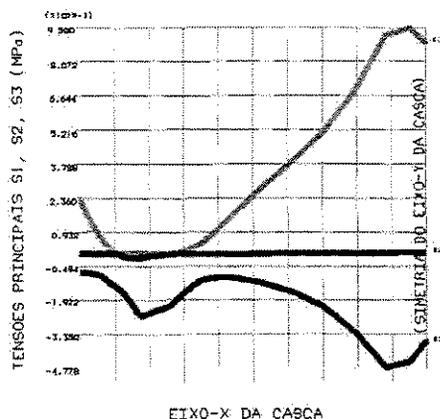


Figura 30 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada com domo

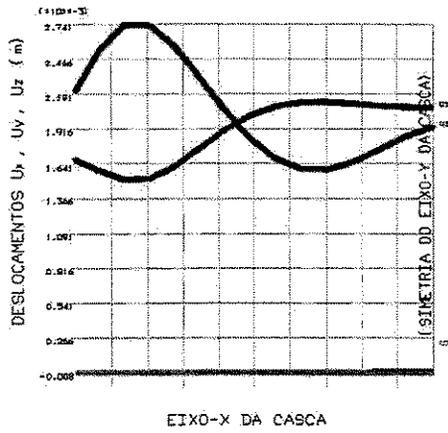


Figura 31 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada sem domo

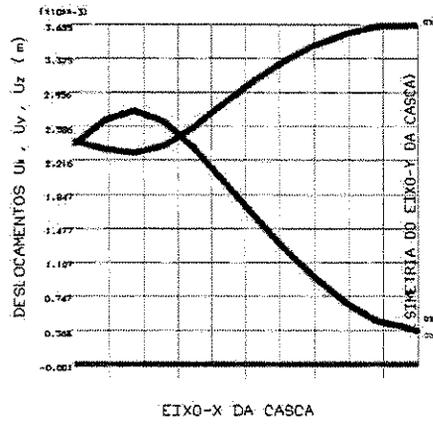


Figura 34 - Deslocamentos UX, UY, UZ da casca quadrada com domo

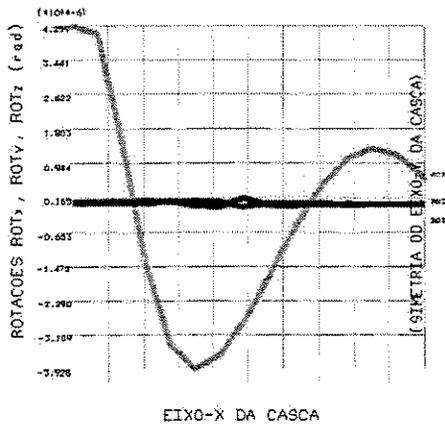


Figura 32 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada sem domo

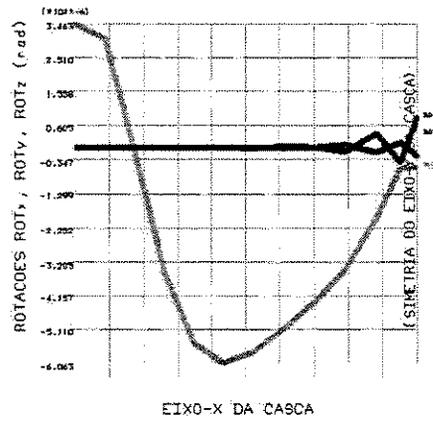


Figura 35 - Rotações ROTX, ROTY, ROTZ da casca quadrada com domo

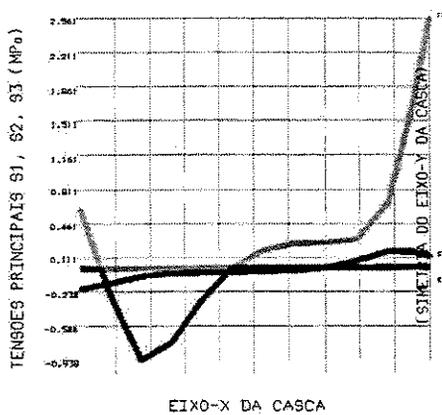


Figura 33 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada sem domo

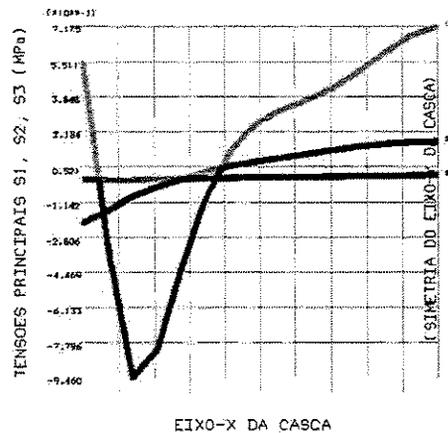


Figura 36 - Tensões Principais S1, S2, S3 da casca quadrada com domo

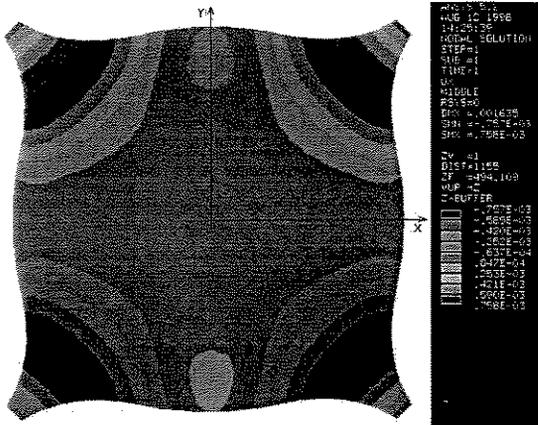


Figura 37 – Deslocamentos da superfície Média devido ao peso próprio

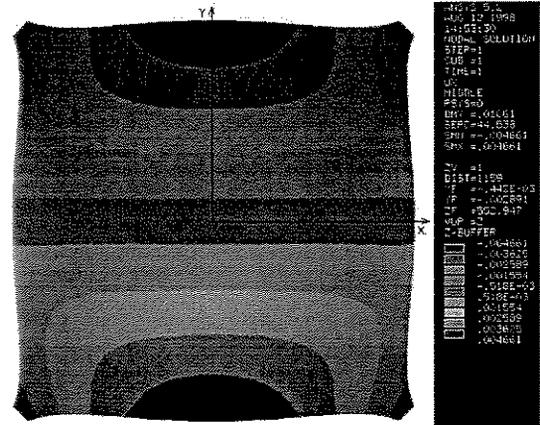


Figura 40 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

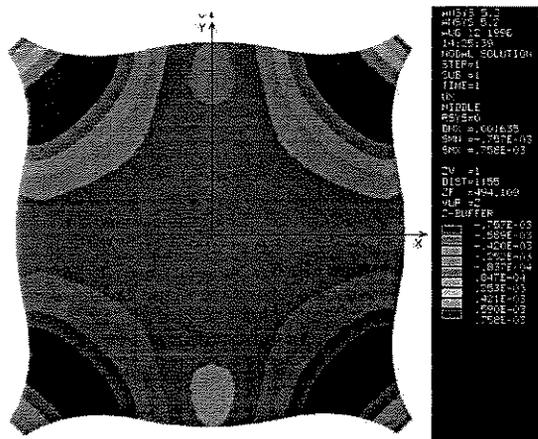


Figura 38 – Deslocamentos da superfície Média devido à sobrecarga

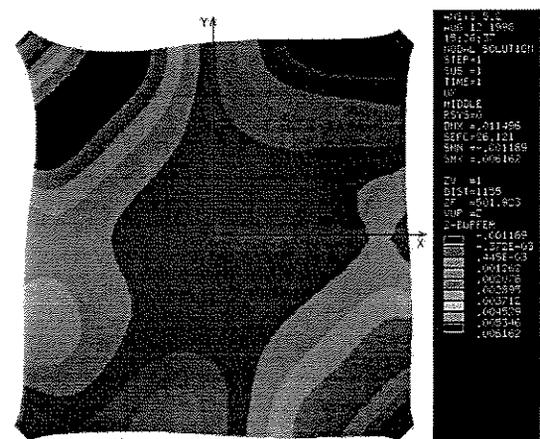


Figura 41 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

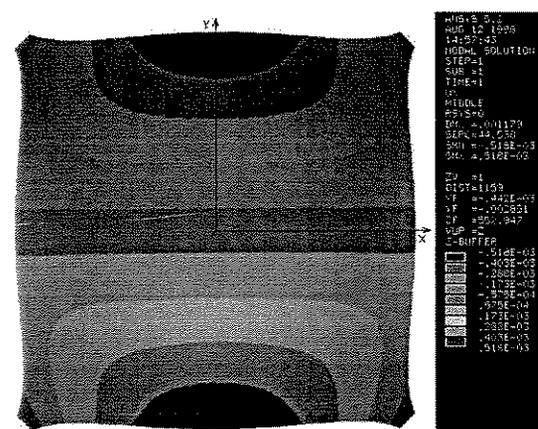


Figura 39 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

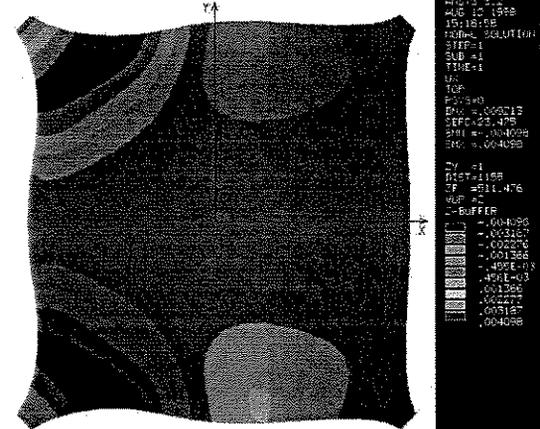


Figura 42 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção lateral

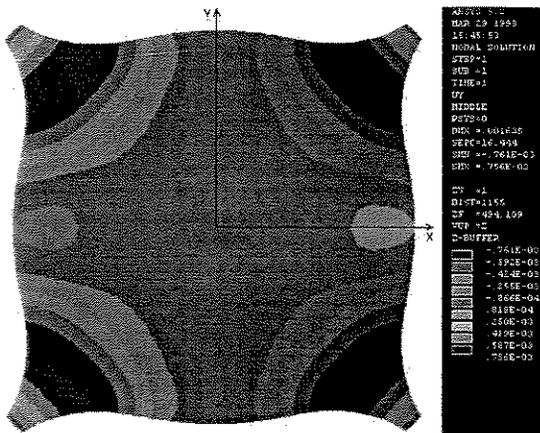


Figura 43 – Deslocamentos da superfície Média devido ao peso próprio

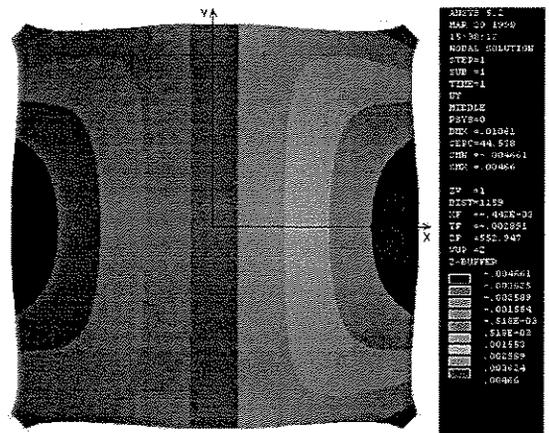


Figura 46 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

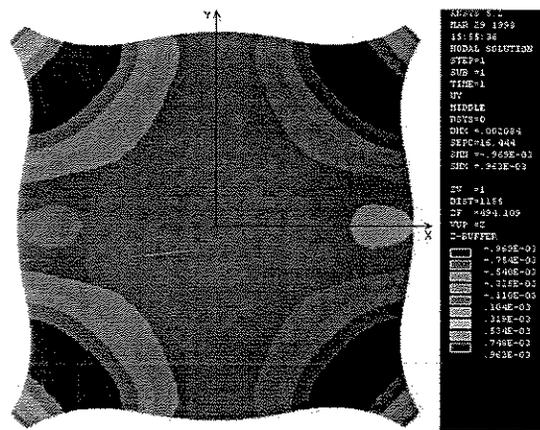


Figura 44 – Deslocamentos da superfície Média devido à sobrecarga

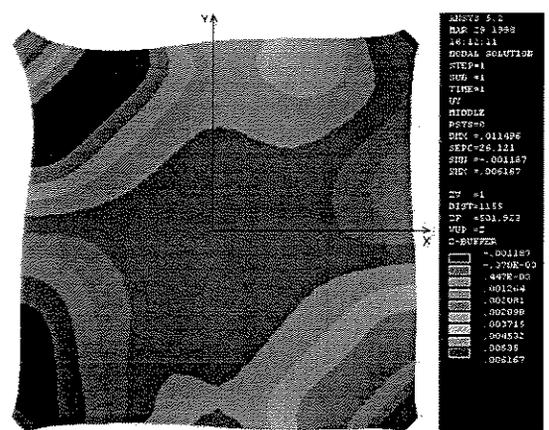


Figura 47 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

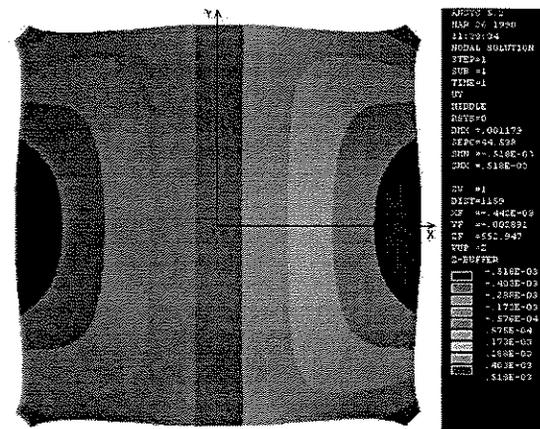


Figura 45 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

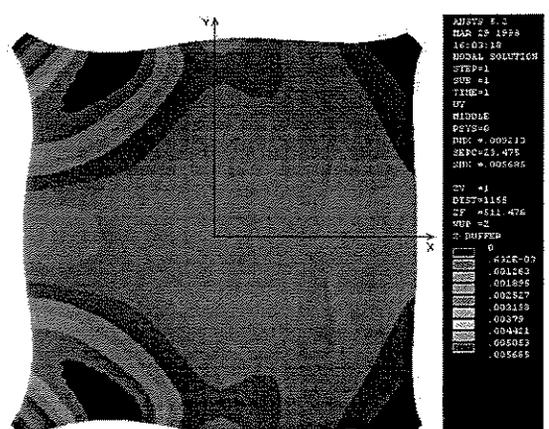


Figura 48 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção lateral

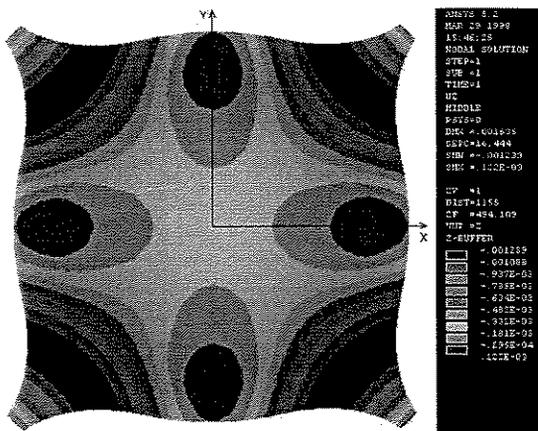


Figura 49 – Deslocamentos da superfície Média devido ao peso próprio

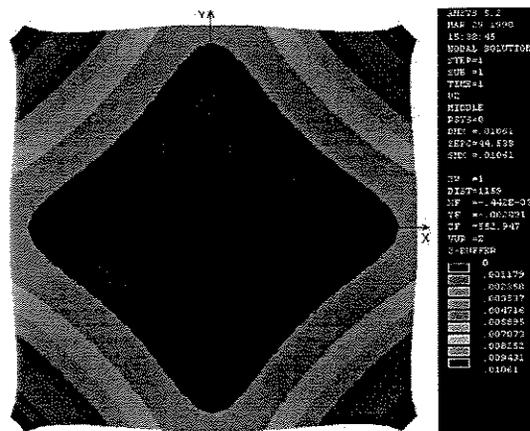


Figura 52 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

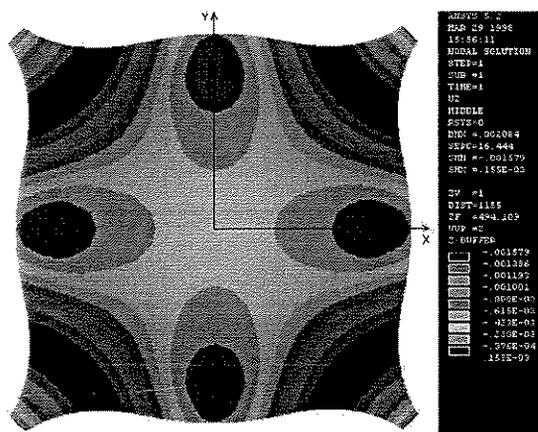


Figura 50 – Deslocamentos da superfície Média devido à sobrecarga

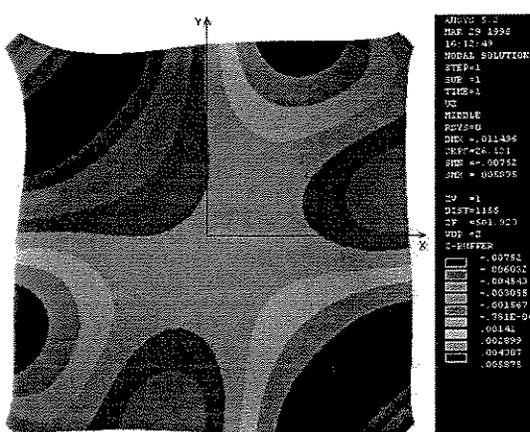


Figura 53 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

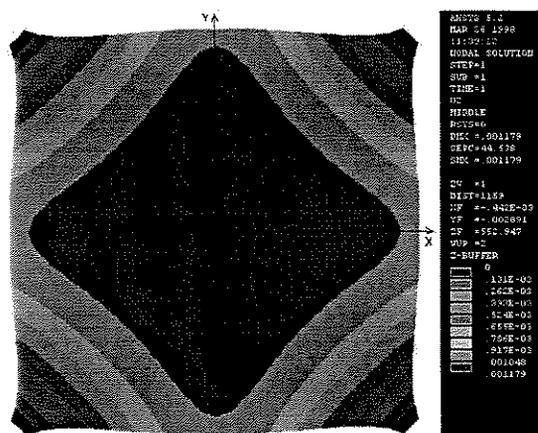


Figura 51 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

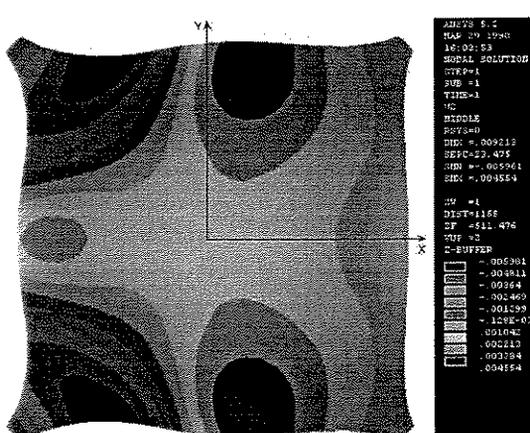


Figura 54 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção lateral

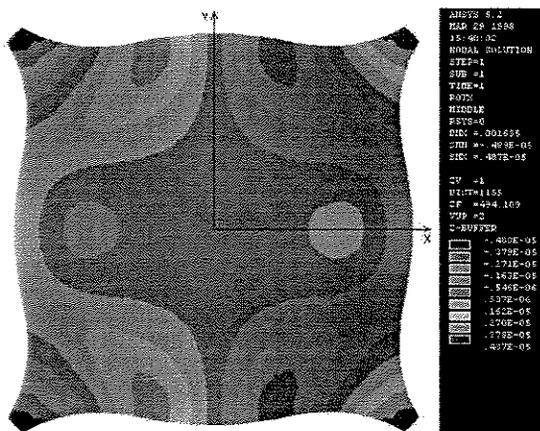


Figura 55 – Rotações da superfície Média devido ao peso próprio

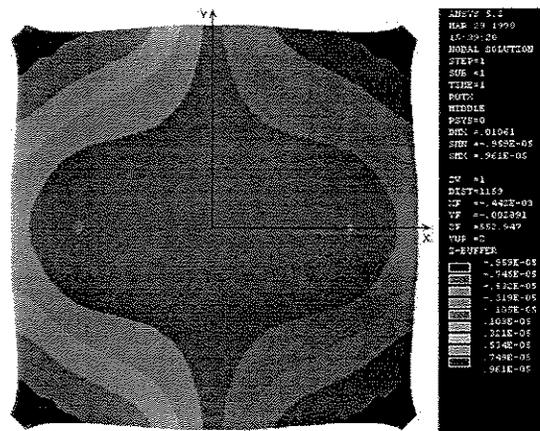


Figura 58 – Rotações da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

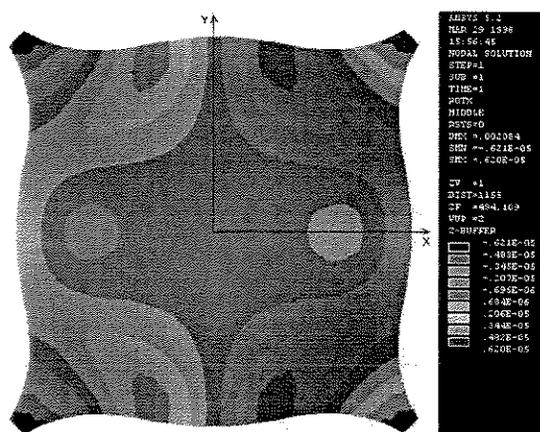


Figura 56 – Rotações da superfície Média devido à sobrecarga

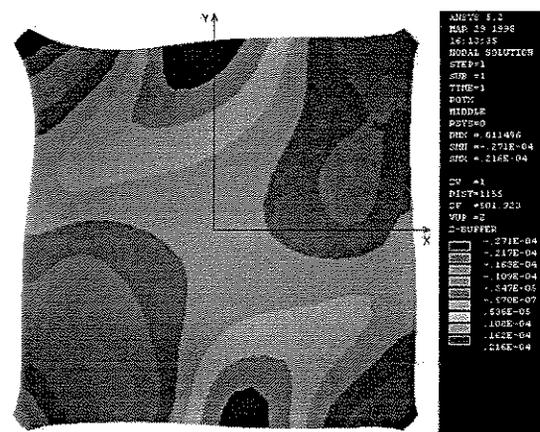


Figura 59 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

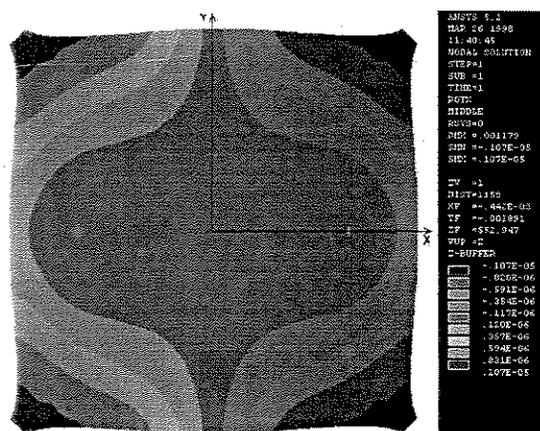


Figura 57 – Rotações da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

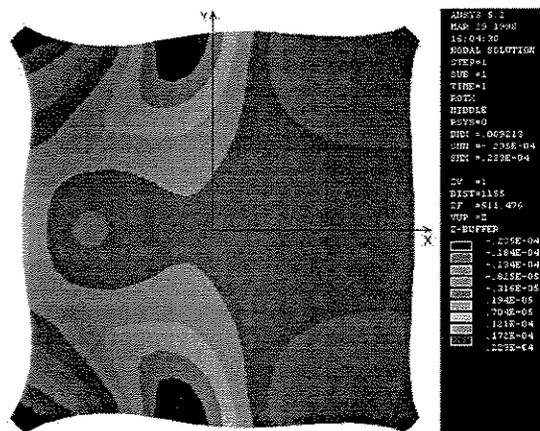


Figura 60 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção lateral

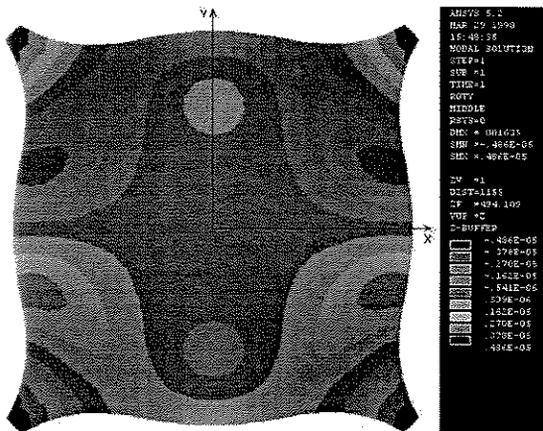


Figura 61 – Rotações da superfície Média devido ao peso próprio

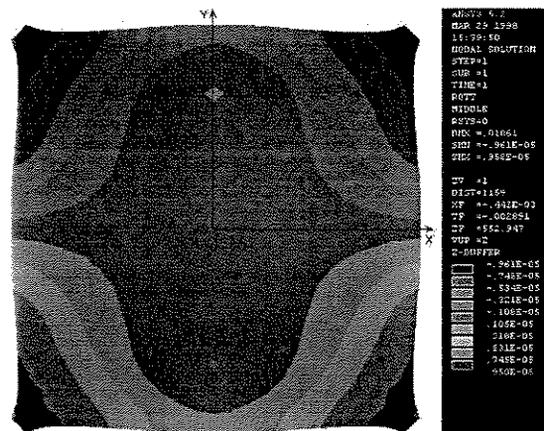


Figura 64 – Rotações da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

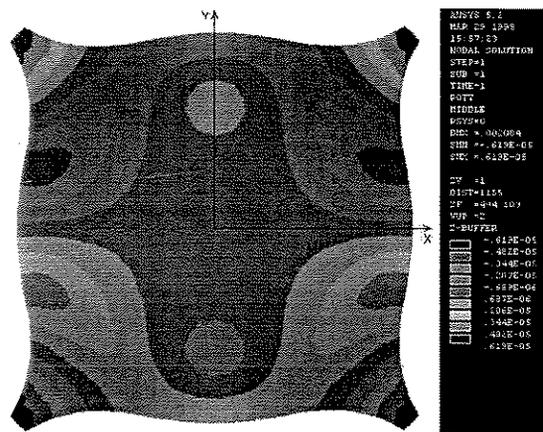


Figura 62 – Rotações da superfície Média devido à sobrecarga

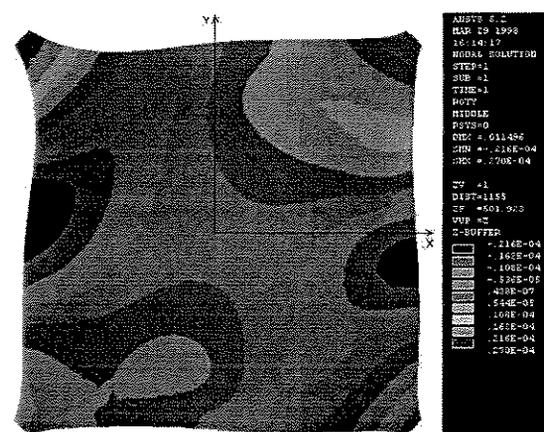


Figura 65 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

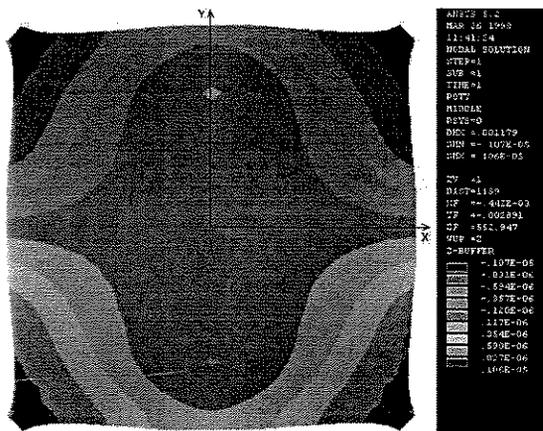


Figura 63 – Rotações da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

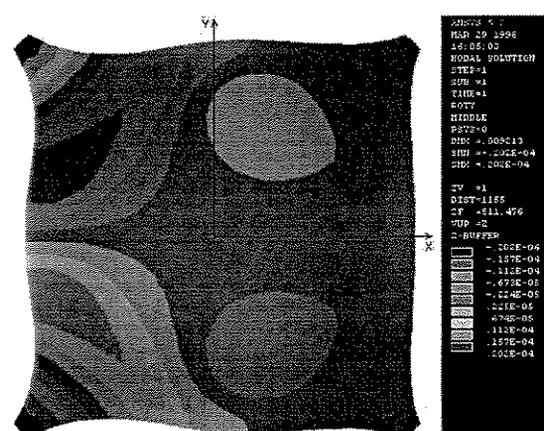


Figura 66 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção lateral

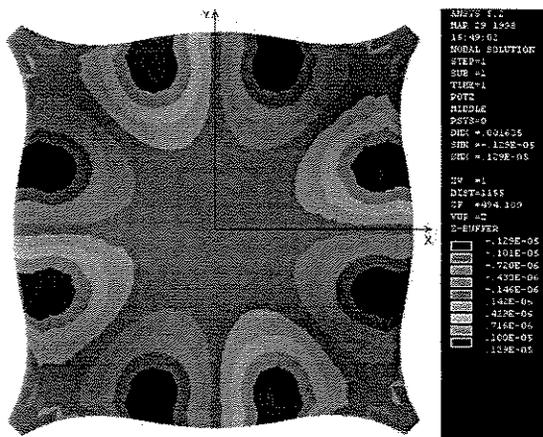


Figura 67 – Rotações da superfície Média devido ao peso próprio

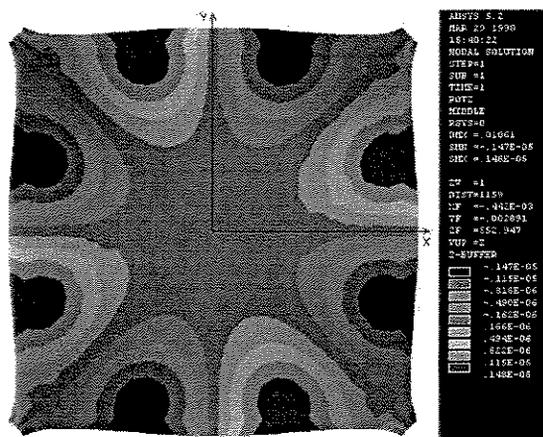


Figura 70 – Rotações da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

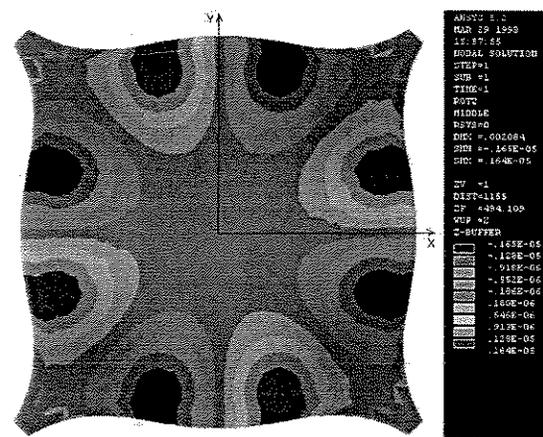


Figura 68 – Rotações da superfície Média devido à sobrecarga

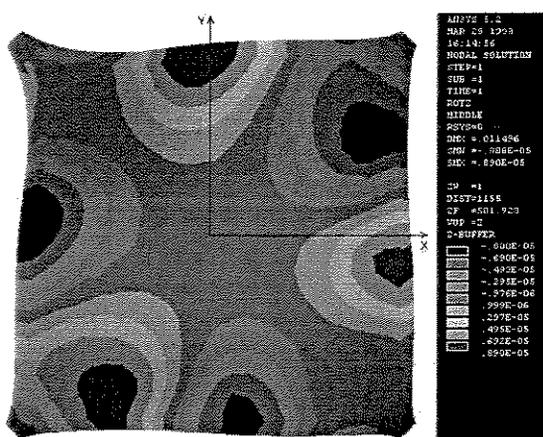


Figura 71 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

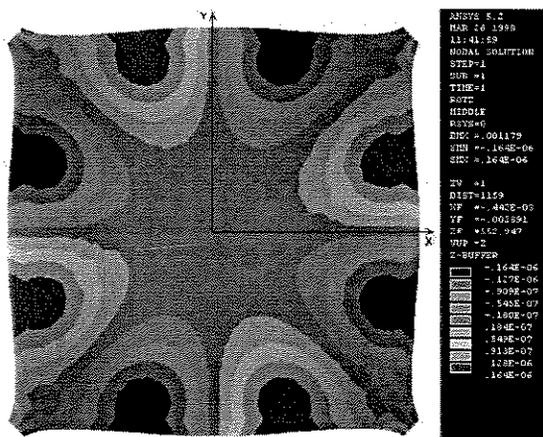


Figura 69 – Rotações da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

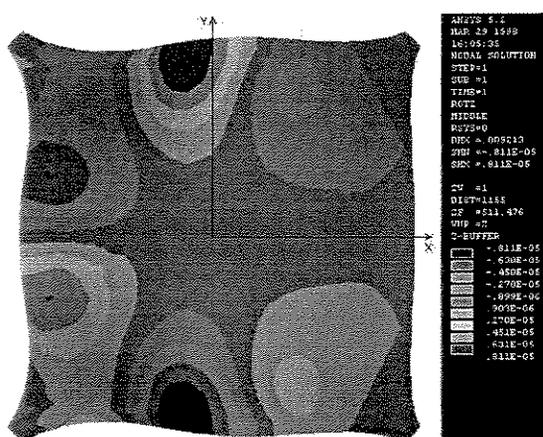


Figura 72 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção lateral

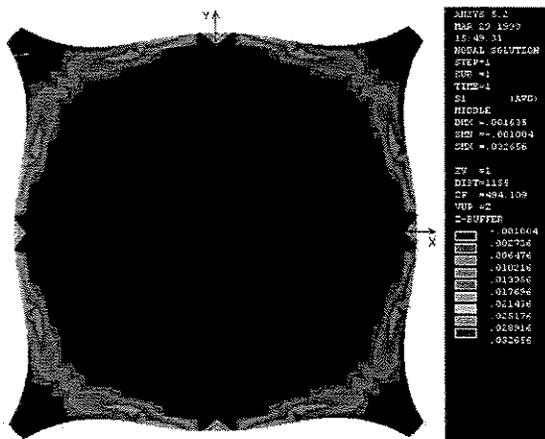


Figura 73 – Tensões na superfície Média devido ao peso próprio

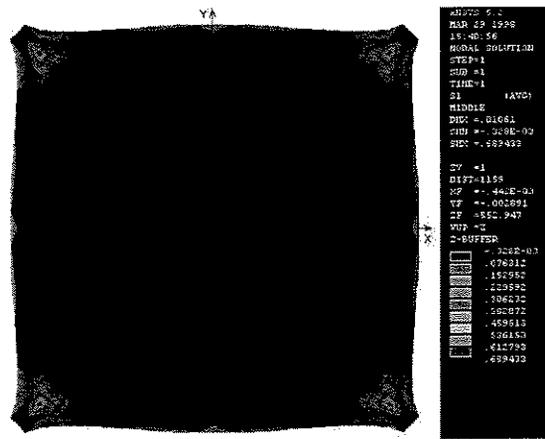


Figura 76 – Tensões na superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

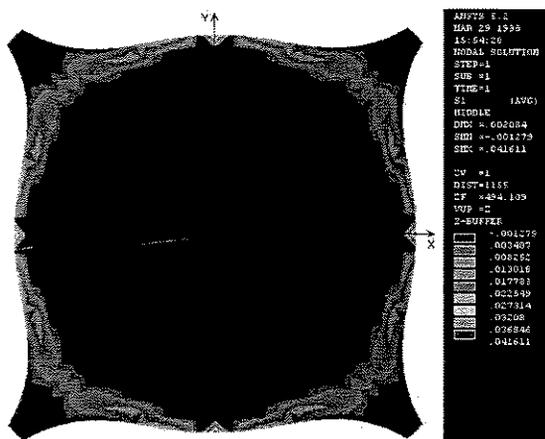


Figura 74 – Tensões na superfície Média devido à sobrecarga

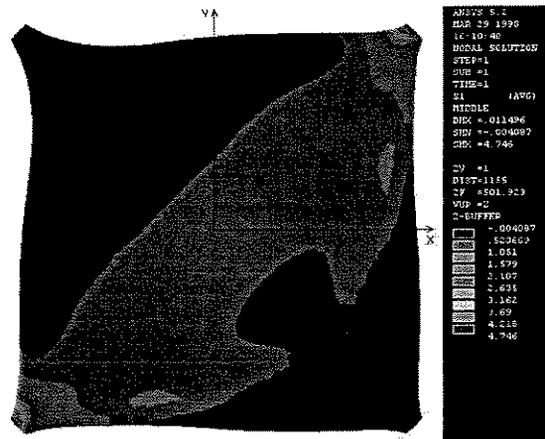


Figura 77 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção diagonal

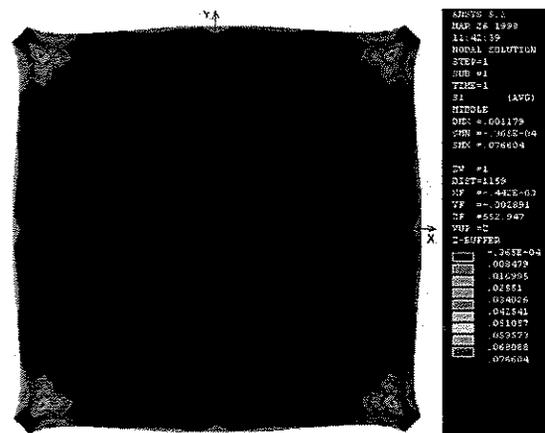


Figura 75 – Tensões na superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

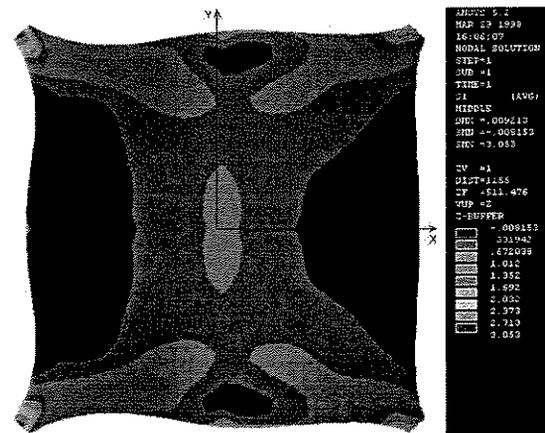


Figura 78 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção lateral

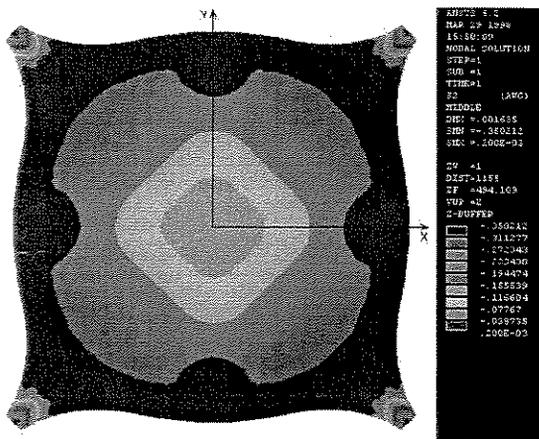


Figura 79 – Tensões na superfície Média devido ao peso próprio

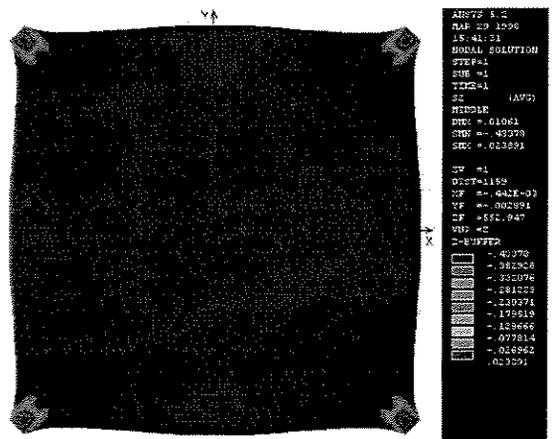


Figura 82 – Tensões na superfície Média devido a temperatura mínima de 5 ° C

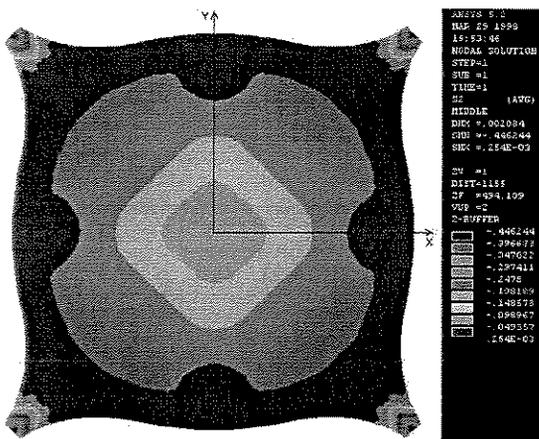


Figura 80 – Tensões na superfície Média devido a sobrecarga

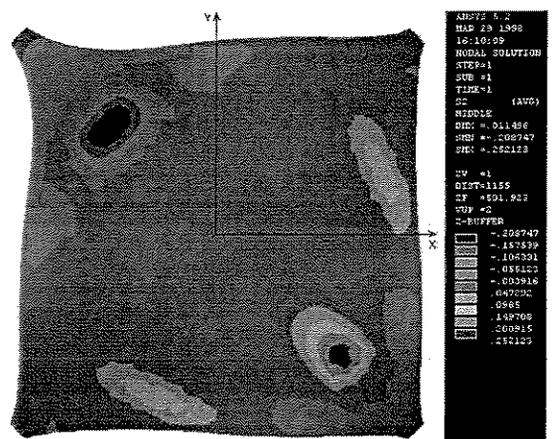


Figura 83 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção diagonal

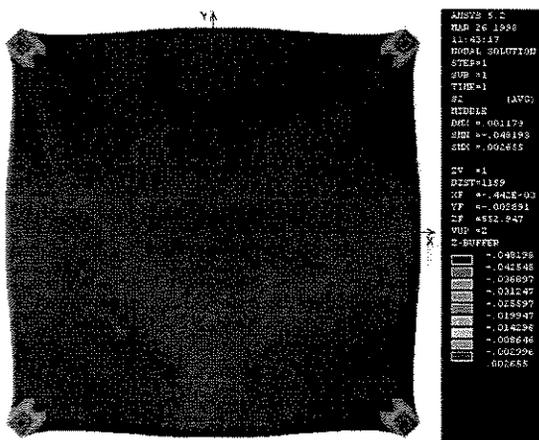


Figura 81 – Tensões na superfície Média devido a temperatura máxima de 45 ° C

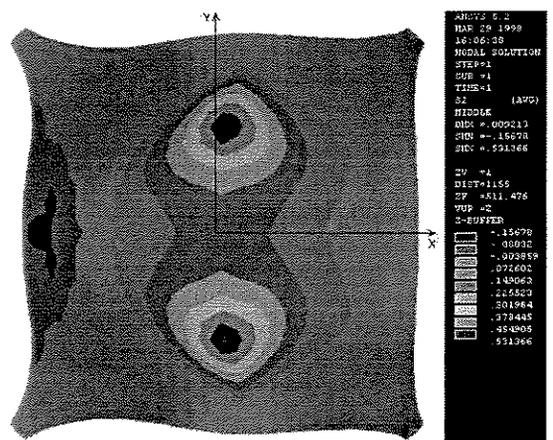


Figura 84 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção lateral

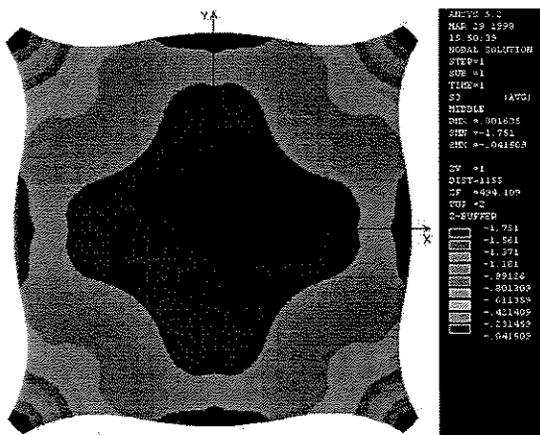


Figura 85 – Tensões na superfície Média devido ao peso próprio

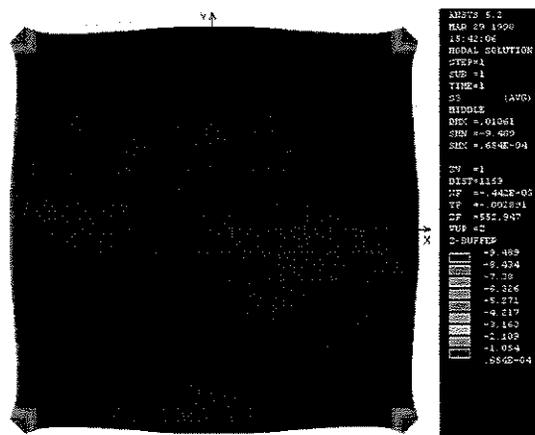


Figura 88 – Tensões na superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

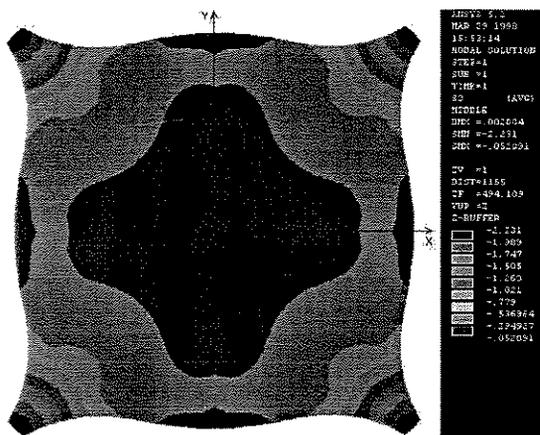


Figura 86 – Tensões na superfície Média devido a sobrecarga

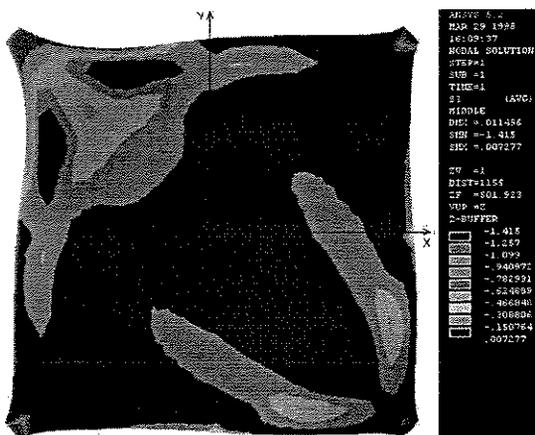


Figura 89 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção diagonal

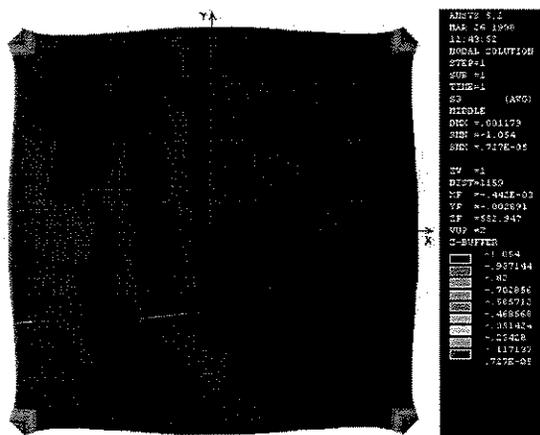


Figura 87 – Tensões na superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

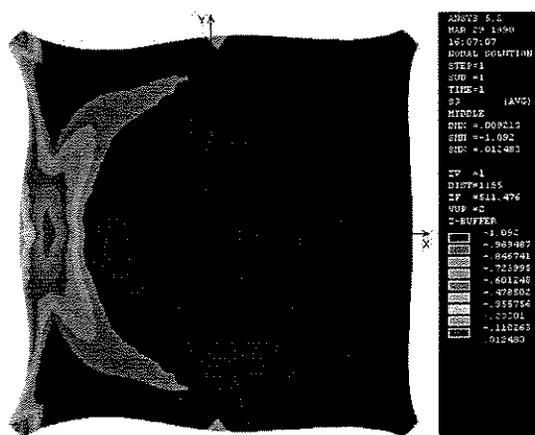


Figura 90 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção lateral

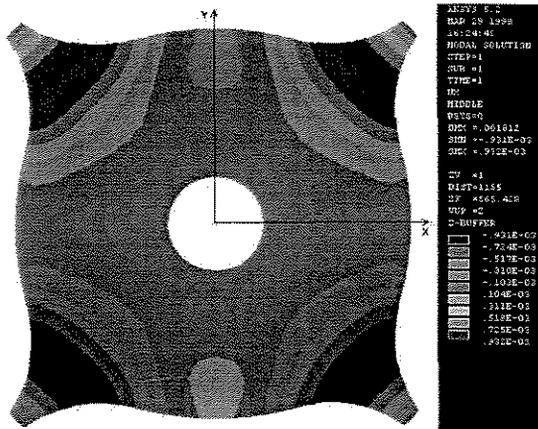


Figura 91 – Deslocamentos da superfície Média devido ao peso próprio

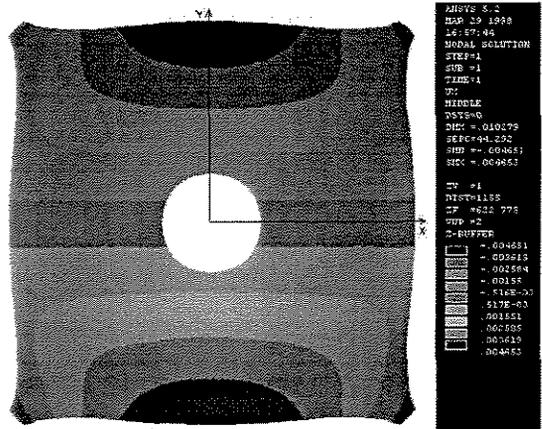


Figura 94 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

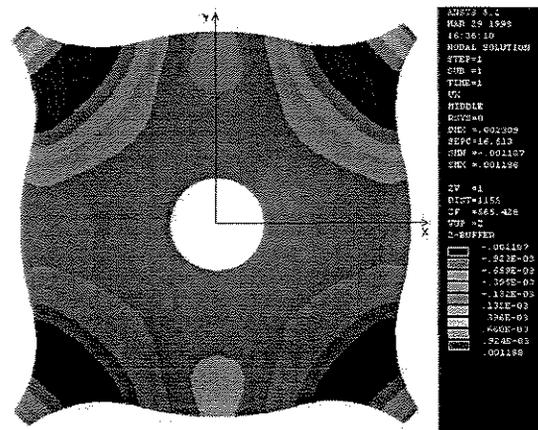


Figura 92 – Deslocamentos da superfície Média devido à sobrecarga

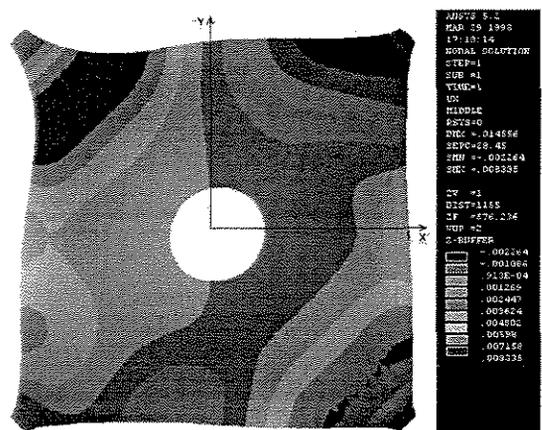


Figura 95 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

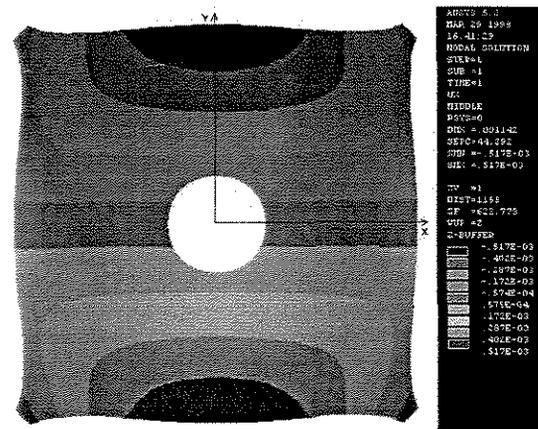


Figura 93 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

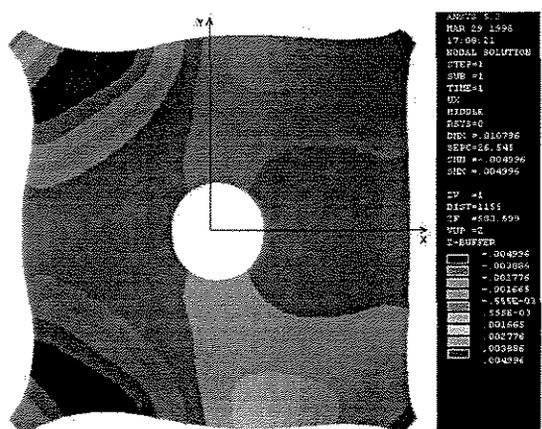


Figura 96 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção lateral

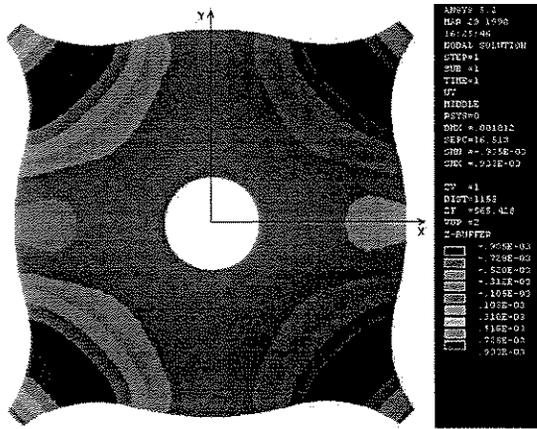


Figura 97 – Deslocamentos da superfície Média devido ao peso próprio

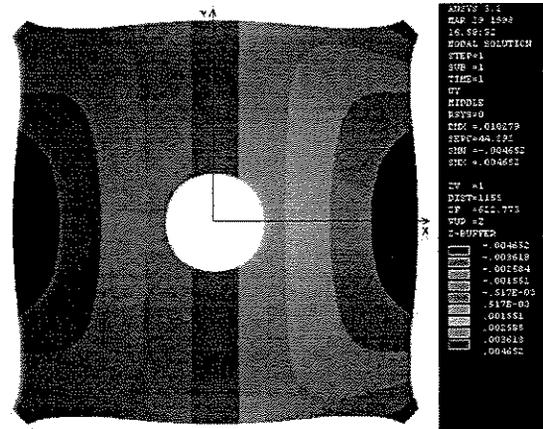


Figura 100 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

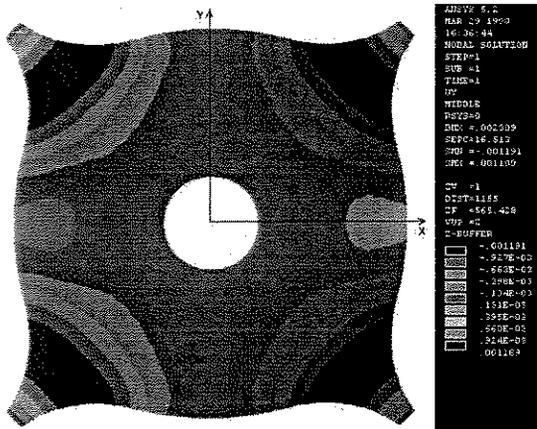


Figura 98 – Deslocamentos da superfície Média devido à sobrecarga

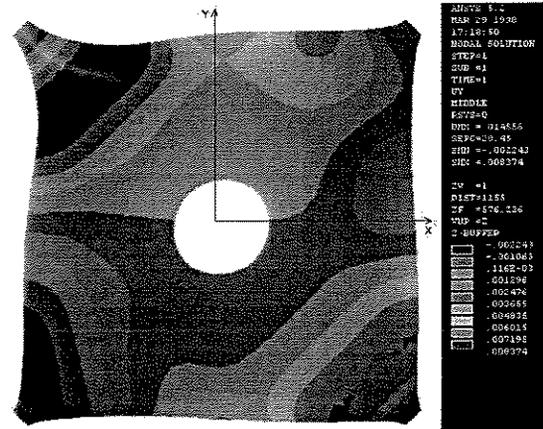


Figura 101 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

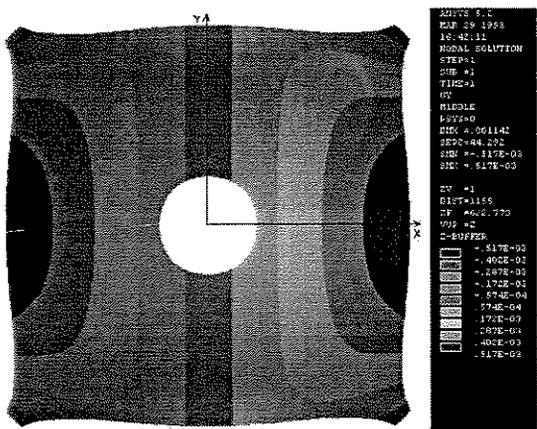


Figura 99 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

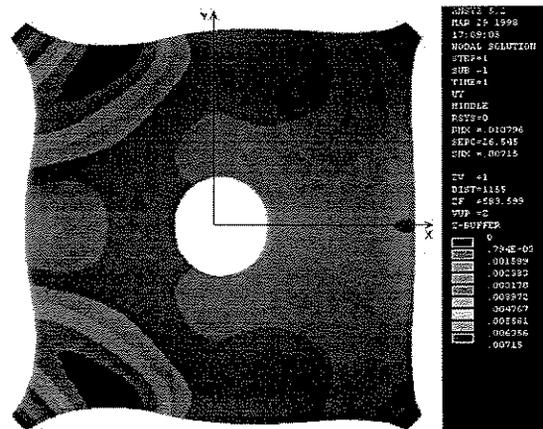


Figura 102 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção lateral

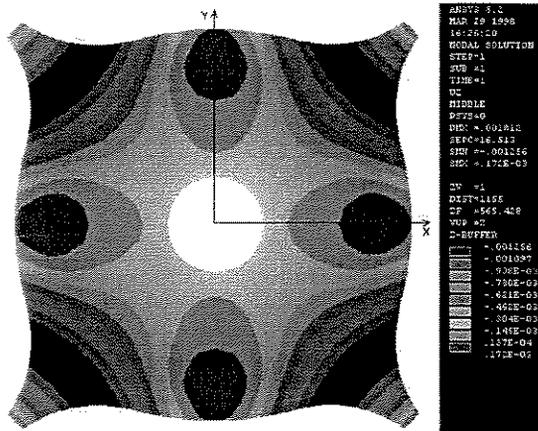


Figura 103 – Deslocamentos da superfície Média devido ao peso próprio

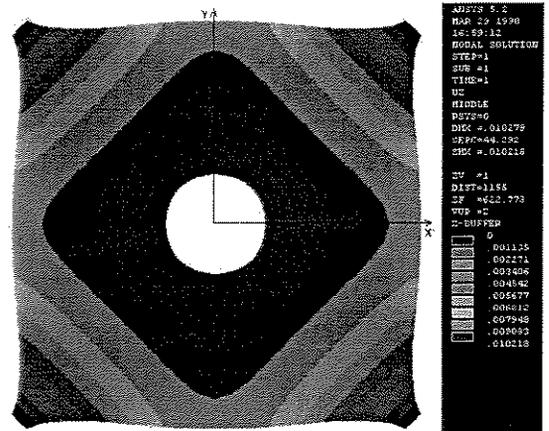


Figura 106 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

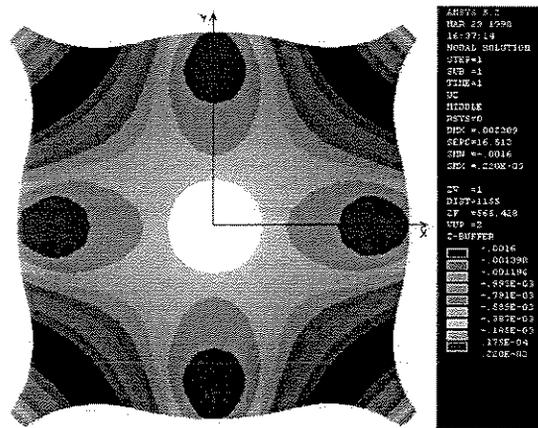


Figura 104 – Deslocamentos da superfície Média devido à sobrecarga

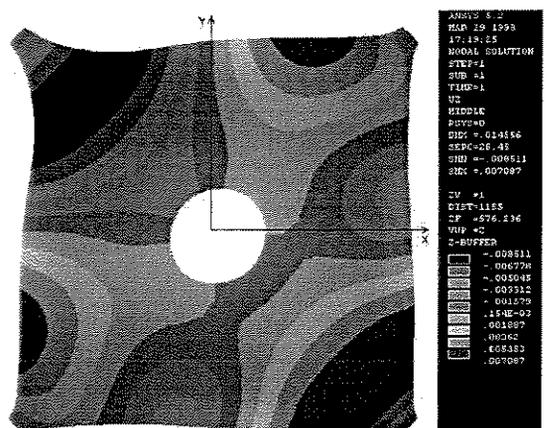


Figura 107 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

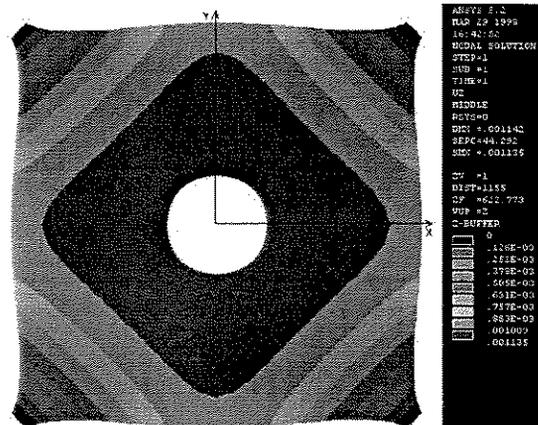


Figura 105 – Deslocamentos da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

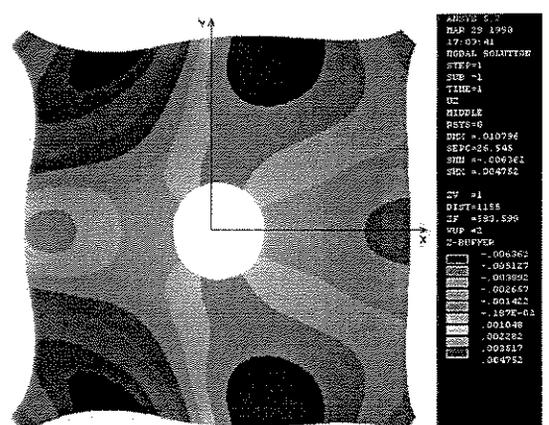


Figura 108 – Deslocamentos da superfície Média devido ao vento na direção lateral

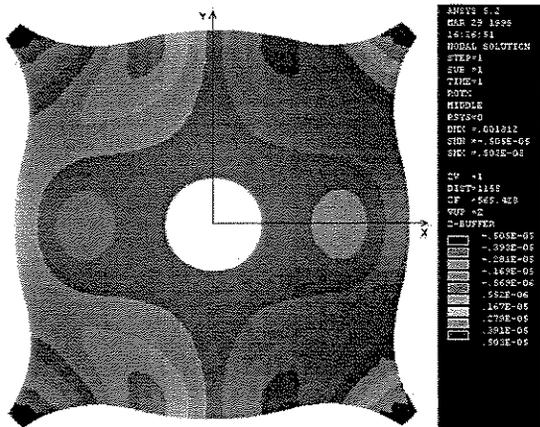


Figura 109 – Rotações da superfície Média devido ao peso próprio

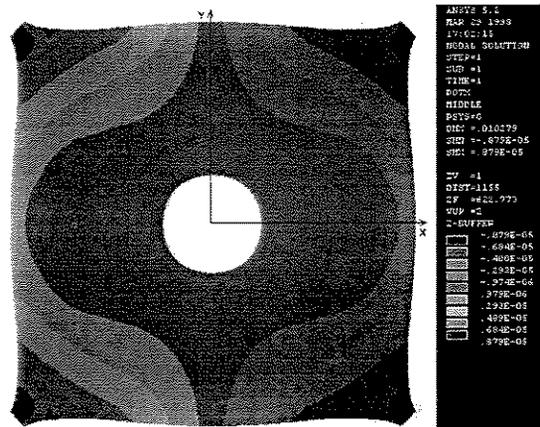


Figura 112 – Rotações da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

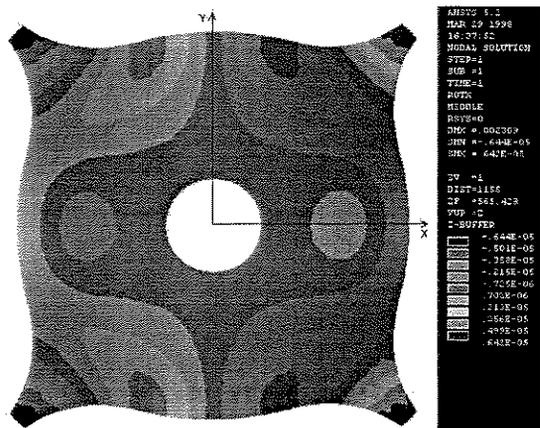


Figura 110 – Rotações da superfície Média devido à sobrecarga

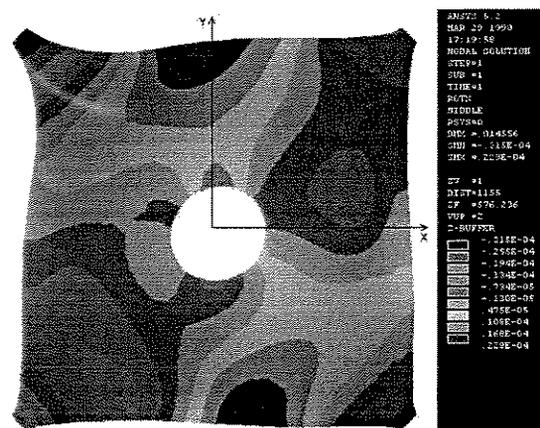


Figura 113 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

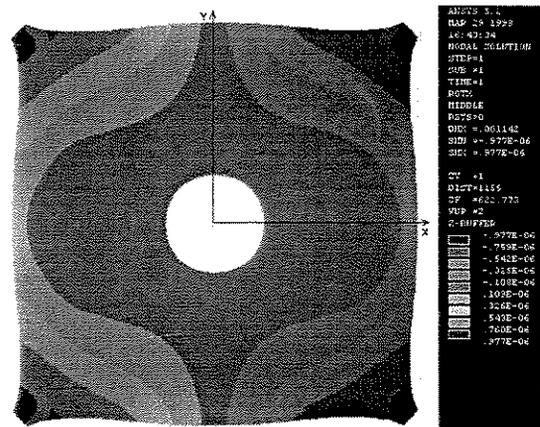


Figura 111 – Rotações da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

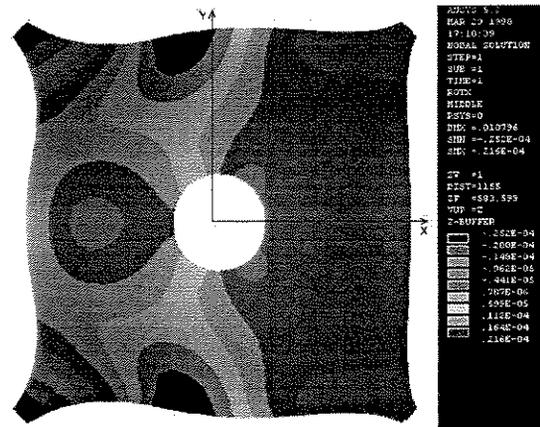


Figura 114 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção lateral

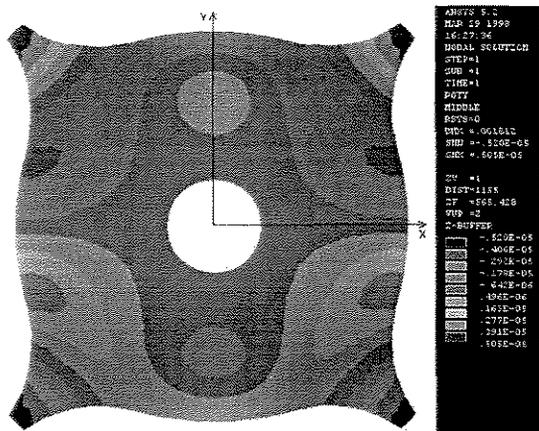


Figura 115 – Rotações da superfície Média devido ao peso próprio

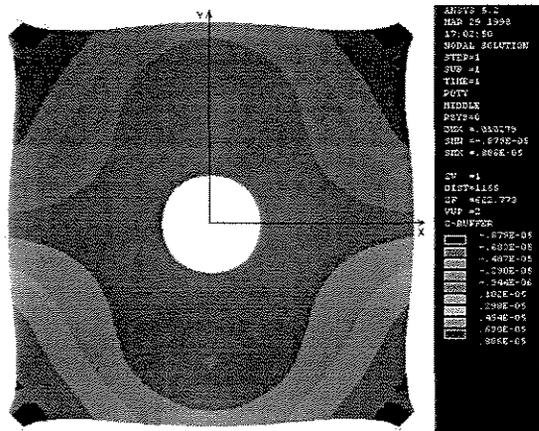


Figura 118 – Rotações da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

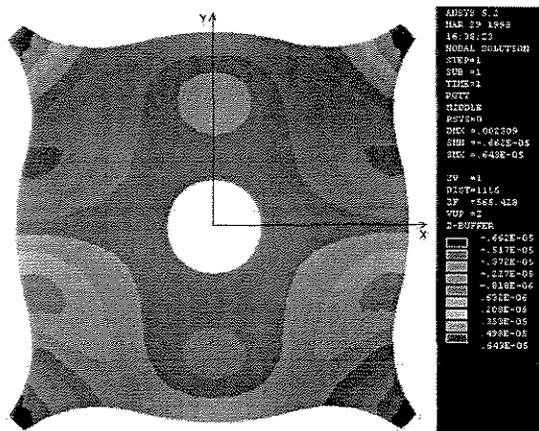


Figura 116 – Rotações da superfície Média devido à sobrecarga

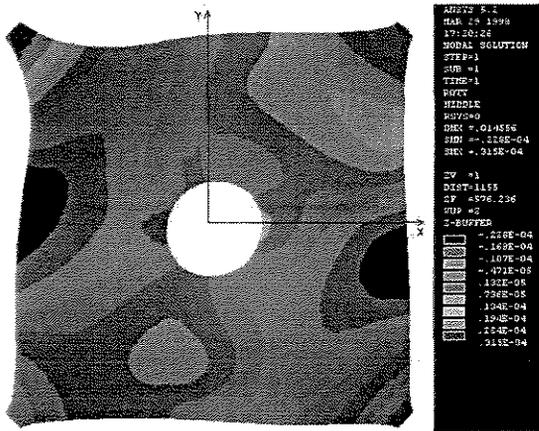


Figura 119 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

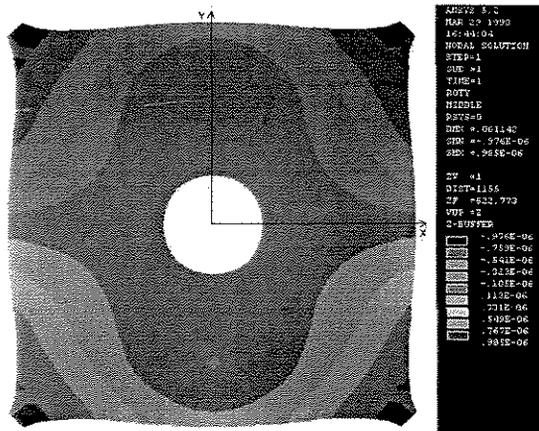


Figura 117 – Rotações da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

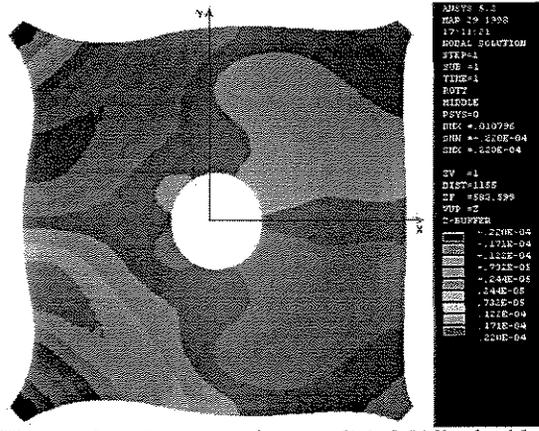


Figura 120 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção lateral

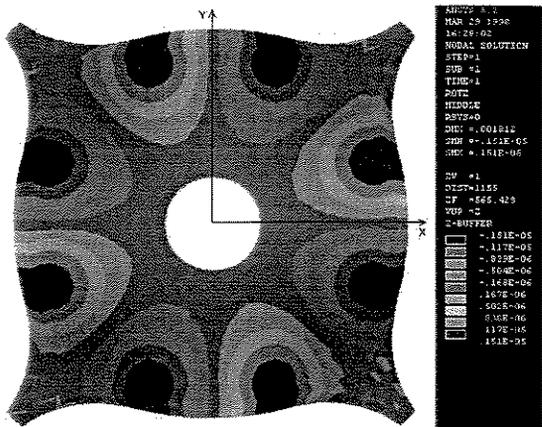


Figura 121 – Rotações da superfície Média devido ao peso próprio

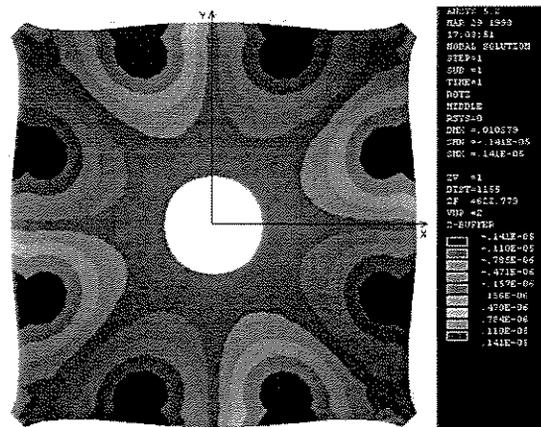


Figura 124 – Rotações da superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

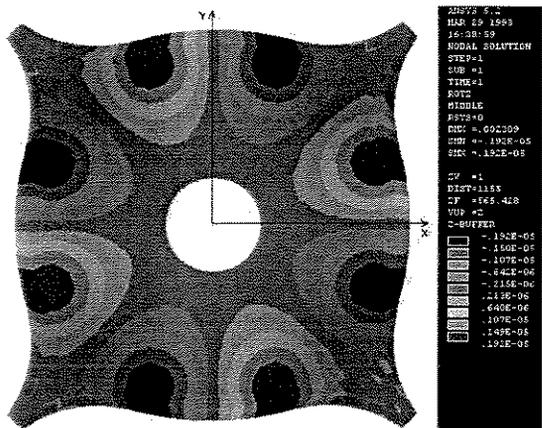


Figura 122 – Rotações da superfície Média devido à sobrecarga

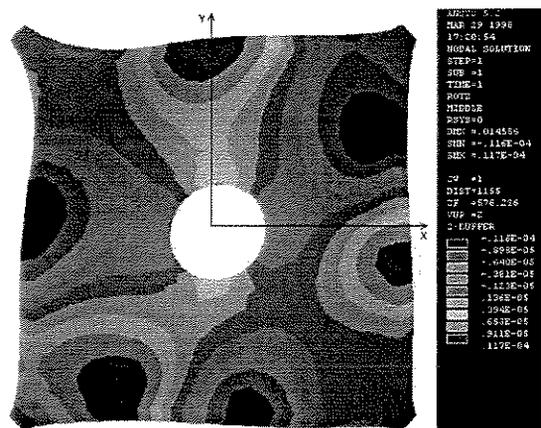


Figura 125 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção diagonal

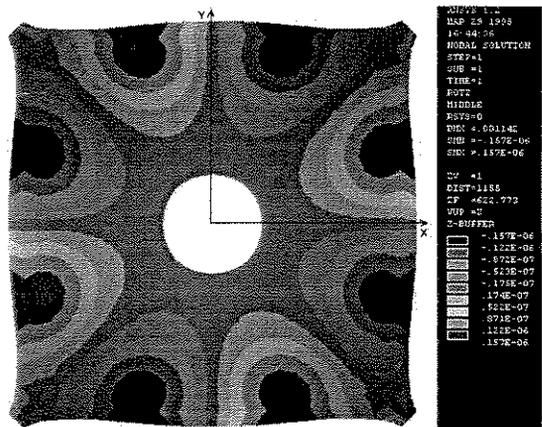


Figura 123 – Rotações da superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

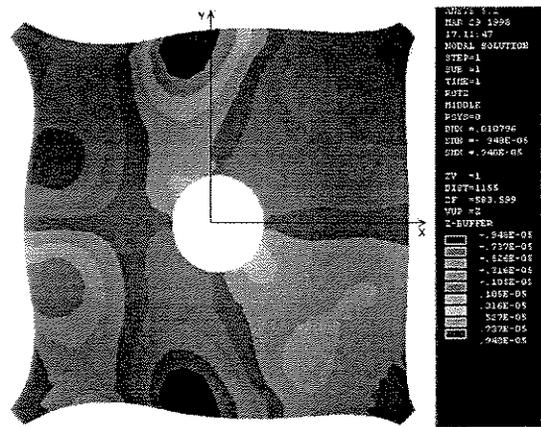


Figura 126 – Rotações da superfície Média devido ao vento na direção lateral



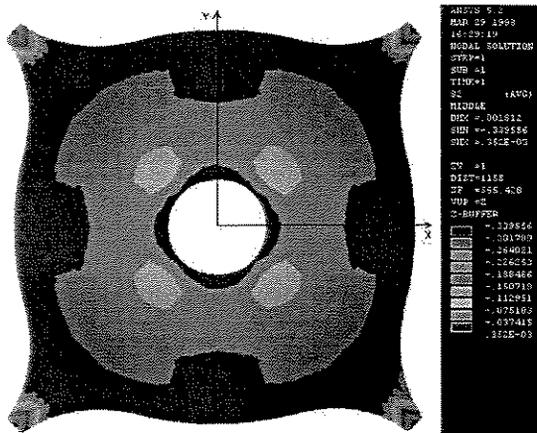


Figura 133 – Tensões na superfície Média devido ao peso próprio

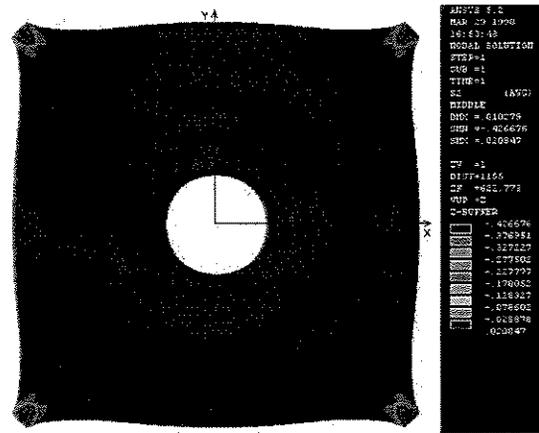


Figura 136 – Tensões na superfície Média devido à temperatura mínima de 5 °C

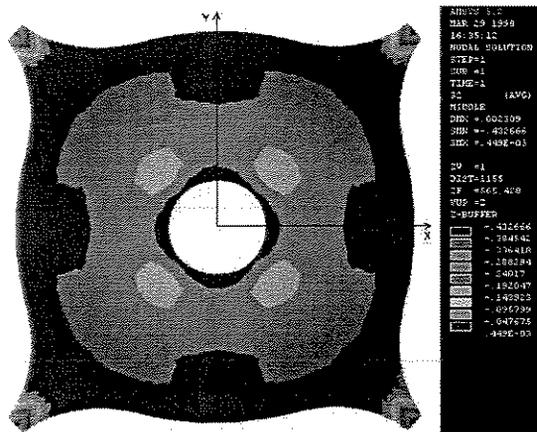


Figura 134 – Tensões na superfície Média devido à sobrecarga

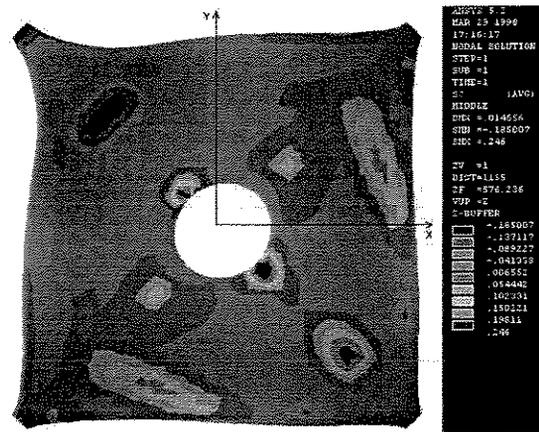


Figura 137 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção diagonal

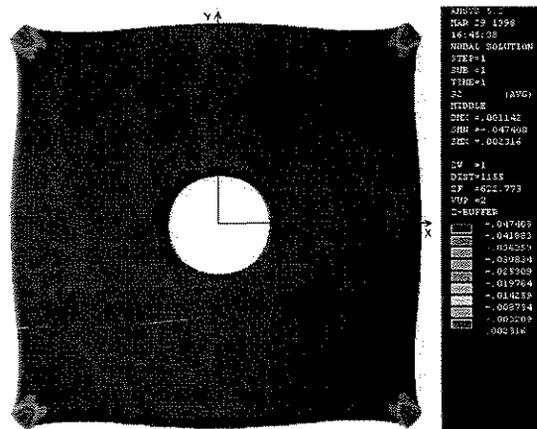


Figura 135 – Tensões na superfície Média devido à temperatura máxima de 45 °C

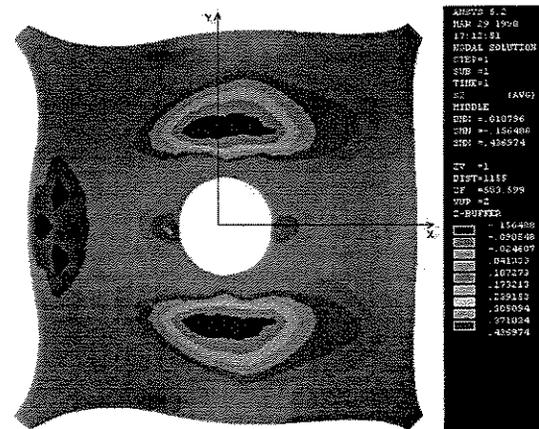


Figura 138 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção lateral

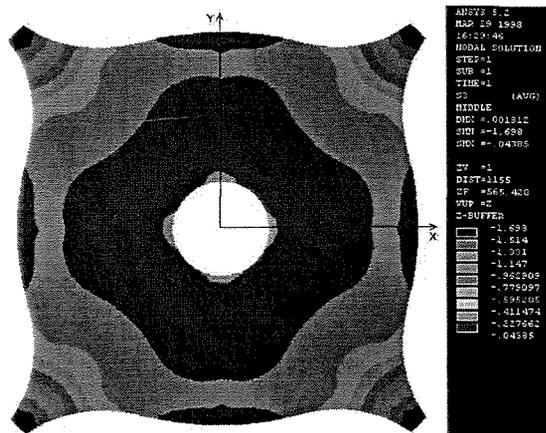


Figura 139 – Tensões na superfície Média devido ao peso próprio

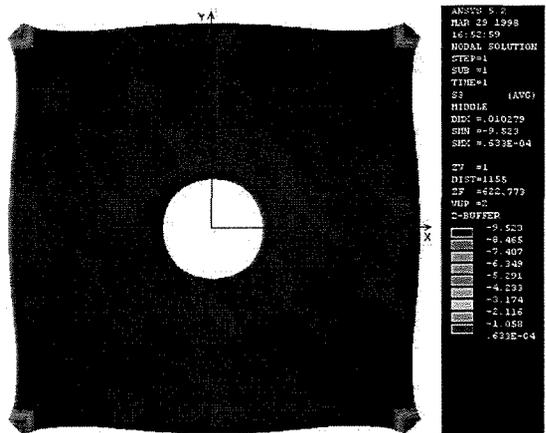


Figura 142 – Tensões na superfície Média devido à temperatura mínima de 5 ° C

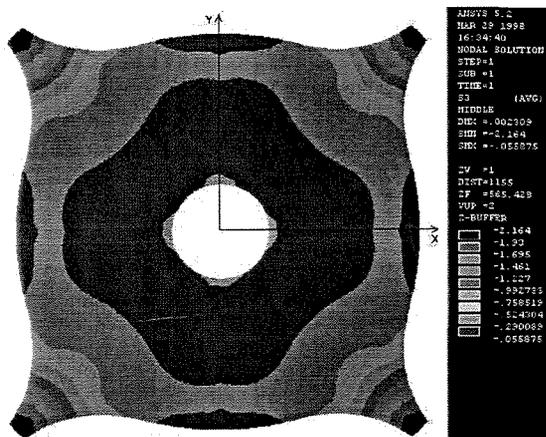


Figura 140 – Tensões na superfície Média devido à sobrecarga

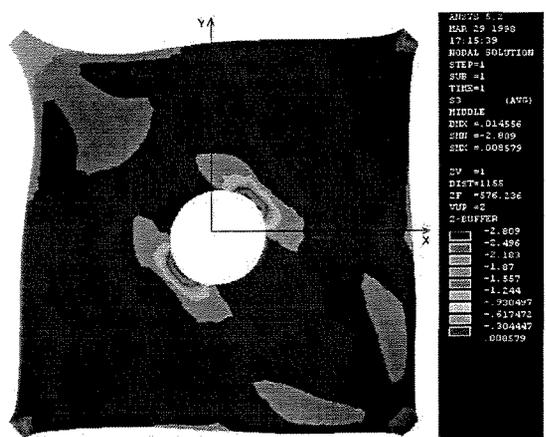


Figura 143 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção diagonal

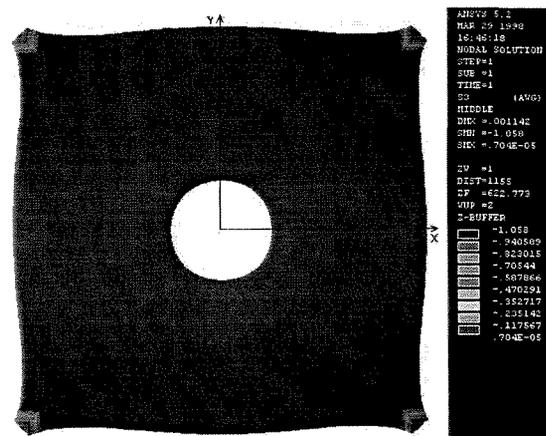


Figura 141 – Tensões na superfície Média devido à temperatura máxima de 45 ° C

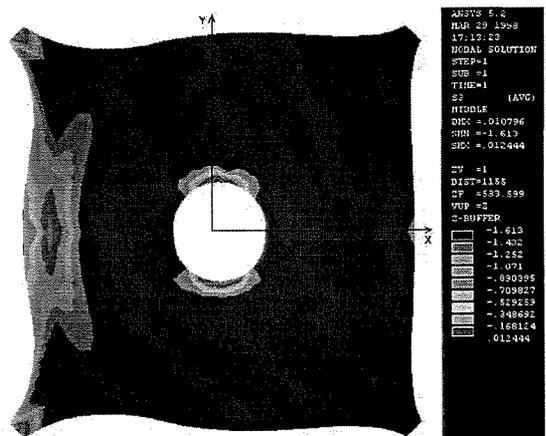


Figura 144 – Tensões na superfície Média devido ao vento na direção lateral

## **ABSTRACT**

Sedano Tapia, Miguel Angel. Contribution to the project of structures in shells in free form shells of armed concrete–square plants. Campinas, Faculty of Civil Engineering, State University of Campinas, 1998. P. 164.

Dissertation.

The present work has as objective the generation of free form shell structures, being used a denominated graphic program MTOOL for the initial drawing of the plane meshes of finite elements. The program also supplies the discretize of the mesh of finite elements, and the file of exit of this program is made in neutral format. Then, the starting from the model computacional developed by Vizotto (1993), proceeded the generation of the geometries in different free form shells structures, concentrating on this work in forms of great interest in Civil Engineering, peels with projection in square plants, with and without dome. The program developed by Vizotto supplies an exit file that is read by the program of numeric analysis ANSYS.

The geometries obtained for structures in free form shells are those in that the ideal states of tensions are of pure compression for the main solicitations atuantes. For the other secondary solicitations, it is desirable that happens the possible minimum of bending load of the peels, once the ideal state, that it is the bending load absence for all the shipments, it is practically impossible.

This way it is possible to project free forms and slender of structures in shell for coverings, with any formats in the horizontal projection and that, in essence, possess a behavior approached in agreement with the Theory of Membrane.

The static behaviors of the different structures will be analyzed under the actions as own weight, distributed shipments, maximum and minimum temperature and wind in the diagonal and lateral direction.

With the previous result, they will be made detail structural of the two shells (considering the material as armed concrete).