



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

MODELO TEÓRICO E PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE ESTRUTURAS EM CASCA DE CONCRETO

Eng^a. Vivian Lima Vieira

Orientador: Prof. Dr. Isaías Vizotto

Campinas, Agosto de 2003.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

MODELO TEÓRICO E PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE ESTRUTURAS EM CASCA DE CONCRETO

Eng^a. Vivian Lima Vieira

Orientador: Prof. Dr. Isaías Vizotto

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Engenharia de Estruturas.

Campinas, Agosto de 2003.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

MODELO TEÓRICO E PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE ESTRUTURAS EM CASCA DE CONCRETO

Eng^a Vivian Lima Vieira

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Isaías Vizotto

Presidente e Orientador – FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Júnior

FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho

DEC/UFSCar

Campinas, 26 de Agosto de 2003.

Dedicatória

Este trabalho é uma homenagem póstuma à minha mãe que contribuiu para minha formação científica e crítica durante a infância e adolescência, permitindo-me chegar até aqui.

Agradecimentos

Este trabalho foi concluído graças ao apoio de várias pessoas durante o processo de elaboração, sem as quais não seria possível a obtenção de resultados apresentados.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família: ao Gualberto, Karen e Roger por me ajudarem nos momentos mais difíceis, incentivando-me a chegar até o final. Ao Eduardo por sua compreensão e carinho durante toda esta jornada.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, que sempre contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, desde o aprendizado dos conceitos básicos na graduação até hoje. Em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Isaías Vizotto por me compreender e ajudar nos momentos mais difíceis, ao Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Jr. por suas contribuições referentes à parte construtiva, e ao Prof. Dr. Vinícius Fernando Arcaro por seu auxílio no processamento computacional.

Esta pesquisa foi desenvolvida com o auxílio do CENAPAD-SP (Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho em São Paulo), projeto UNICAMP / FINEP - MCT e da FAPESP que incentivou este trabalho através de suporte financeiro.

Agradeço à Fundação Memorial da América Latina, em especial à Maristela, Hermínio e Eduardo por disponibilizarem todo o material referente à construção deste local, compartilharem as histórias desde a concepção do projeto até particularidades de algumas modificações pós-ocupação.

Por fim, gostaria de agradecer as pessoas que gentilmente cederam fotos para ilustração desta tese: Koichiro Ishikawa, Bob Brooks, Valerie Sigler, Jonathan Zimmerman e as instituições: Fundação Memorial da América Latina, Universidade da Califórnia, Berkeley e ao Sidney Opera House Trust.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	5
2.1. OBJETIVOS GERAIS	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. INTRODUÇÃO	7
3.2. BREVE HISTÓRICO	8
3.3. ASPECTOS TEÓRICOS	16
3.3.1. TEORIA DAS CASCAS FINAS	16
3.3.2. TEORIA DE MEMBRANA	18
3.3.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	19
3.3.4. ESTABILIDADE DE CASCAS FINAS	20
3.3.5. CASCAS DE FORMAS LIVRES	23
3.4. ASPECTOS CONSTRUTIVOS	25
3.5. ESTADO DA ARTE NO BRASIL	33

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA	37
4.1. MODELO TEÓRICO	37
4.1.1. PROJEÇÃO TRIANGULAR NO PLANO HORIZONTAL	37
4.1.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA FORMA TRIDIMENSIONAL	38
4.1.3. ANÁLISE ESTRUTURAL	40
4.2. PROCESSOS CONSTRUTIVOS	41
CAPÍTULO 5. PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE ESTRUTURAS EM CASCA	43
5.1. INTRODUÇÃO	43
5.2. MÉTODO CONVENCIONAL	44
5.2.1. INTRODUÇÃO	44
5.2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS	44
5.2.3. FASES DO PROCESSO CONSTRUTIVO	45
5.2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.3. MÉTODO "AIR-FORMED"	58
5.3.1. INTRODUÇÃO	58
5.3.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS	58
5.3.3. FASES DO PROCESSO CONSTRUTIVO	59
5.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.4. MÉTODO PRÉ-FABRICADO	71
5.4.1. INTRODUÇÃO	71
5.4.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS	71
5.4.3. FASES DO PROCESSO CONSTRUTIVO	72
5.4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5.5. OUTROS MÉTODOS	76
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78

<u>CAPÍTULO 6. RESULTADOS DO MODELO TEÓRICO</u>	<u>79</u>
6.1. PROJEÇÃO HORIZONTAL	79
6.2. FORMA TRIDIMENSIONAL	81
6.3. RESULTADOS OBTIDOS	84
<u>CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES</u>	<u>91</u>
<u>CAPÍTULO 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>95</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>97</u>
<u>OBRAS CONSULTADAS</u>	<u>101</u>
<u>ANEXO A – ELEMENTO FINITO UTILIZADO</u>	<u>103</u>
<u>ANEXO B – FORMATOS DOS ARQUIVOS PROCESSADOS</u>	<u>107</u>
<u>ANEXO C – AROUVOS DE SAÍDA</u>	<u>117</u>

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – CASCA EXPERIMENTAL CONSTRUÍDA EM JENA, ALEMANHA	9
FIGURA 3.2 – HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA EM MADRI, ESPANHA	10
FIGURA 3.3 – RESTAURANTE XOCHIMILCO, MÉXICO	11
FIGURA 3.4 – TERMINAL DO AEROPORTO DE LAS VEGAS, ESTADOS UNIDOS	12
FIGURA 3.5 – WYSS GARTEN HAUS ZUCHIWIL, ALEMANHA	13
FIGURA 3.6 – OPERA HOUSE EM SIDNEY, AUSTRÁLIA	14
FIGURA 3.7 – MEMORIAL DA AMÉRICA LATINA EM SÃO PAULO, BRASIL	14
FIGURA 3.8 – EMMETT HIGH SCHOOL, ESTADOS UNIDOS	27
FIGURA 5.1 – DETALHE DE CONEXÕES ENTRE FUNDAÇÃO E ESTRUTURA	46
FIGURA 5.2 – DETALHE DAS LIGAÇÕES MESNAGER E CONSIDÈRE	47
FIGURA 5.3 – EXEMPLO DE LIGAÇÃO COM AÇO	47
FIGURA 5.4 – EXECUÇÃO DA FUNDAÇÃO EM CASCA	478
FIGURA 5.5 – DETALHE DO PILAR DA FUNDAÇÃO	49
FIGURA 5.6 – MONTAGEM DA FÔRMA	50
FIGURA 5.7 – EXEMPLO DE OTIMIZAÇÃO DA FÔRMA	50
FIGURA 5.8 – MONTAGEM DA FÔRMA	51
FIGURA 5.9 – DETALHE DA MONTAGEM DA FÔRMA	52
FIGURA 5.10 – VISTA INTERNA E EXTERNA DE UMA FÔRMA DE MADEIRA PARA CASCA	52
FIGURA 5.11 – DETALHE DE ESCORAMENTO DE UMA ESTRUTURA EM CASCA	53
FIGURA 5.12 – DETALHE DA ARMADURA	54
FIGURA 5.13 – EXEMPLO DE ARMADURA PARA PARABOLÓIDE HIPERBÓLICO	54
FIGURA 5.14 – EXEMPLOS DE ABERTURAS NA CASCA	55
FIGURA 5.15 – EXEMPLOS DE CONCRETAGEM DE ESTRUTURAS EM CASCA	56
FIGURA 5.16 – ACABAMENTO INTERNO E EXTERNO DE CASCA CONSTRUÍDA POR ISLER	57
FIGURA 5.17 – ACABAMENTO INTERNO DE UMA CASCA CONSTRUÍDA POR CANDELA	57
FIGURA 5.18 – EXECUÇÃO DO ANEL DE FUNDAÇÃO	60
FIGURA 5.19 – MATERIAL DA FÔRMA	61
FIGURA 5.20 – COLOCAÇÃO DO BALÃO	62

FIGURA 5.21 – DETALHE DA FIXAÇÃO DO BALÃO NO ANEL DA FUNDAÇÃO	62
FIGURA 5.22 – BALÃO INFLADO	63
FIGURA 5.23 – VISTAS INTERNAS	63
FIGURA 5.24 – APLICAÇÃO DA ESPUMA	64
FIGURA 5.25 – FIXADORES PARA ARMADURA	65
FIGURA 5.26 – COLOCAÇÃO DA ARMADURA	65
FIGURA 5.27 – DETALHE DA ARMADURA NO TOPO	66
FIGURA 5.28 – CONCRETAGEM DA CASCA	66
FIGURA 5.29 – ABERTURAS NA CASCA	67
FIGURA 5.30 – DETALHES DAS CAMADAS DA ESTRUTURA EM CASCA	67
FIGURA 5.31 – DETALHES DA EXECUÇÃO DE PAREDES CURVAS	68
FIGURA 5.32 – ACABAMENTO INTERNO	68
FIGURA 5.33 – ACABAMENTO EXTERNO	69
FIGURA 5.34 – CASA PRONTA	69
FIGURA 5.35 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MÉTODO	70
FIGURA 5.36 – ELEMENTO PRÉ-MOLDADO	73
FIGURA 5.37 – MONTAGEM DA CASCA PRÉ-MOLDADA	74
FIGURA 5.38 – DETALHE DA COLOCAÇÃO DO ELEMENTO DE CASCA PRÉ-MOLDADO	74
FIGURA 5.39 – VISTA INTERNA DE CASCA PRÉ-MOLDADA	75
FIGURA 5.40 – VISTA EXTERNA DE UM CASCA PRÉ-MOLDADA (AEROPORTO DE KIEV)	75
FIGURA 5.41 – HANGAR MARIGNANE, FRANÇA	77
FIGURA 5.42 – CONSTRUÇÃO DE CASCA COM STYROFOAM	77
FIGURA 6.1 – PLANTA DA CASCA COM MALHA DE 75,0 CM	79
FIGURA 6.2 – PLANTA DA CASCA COM MALHA DE 37,5 CM	80
FIGURA 6.3 – PLANTA DA CASCA COM MALHA DE 25,0 CM	80
FIGURA 6.4 – DIVERSAS CASCAS GERADAS COM MALHA DE 25,0 CM	82
FIGURA 6.5 – VISTA FRONTAL DO MODELO TRIDIMENSIONAL	83
FIGURA 6.6 – VISTA ISOMÉTRICA DO MODELO TRIDIMENSIONAL	83
FIGURA 6.7 – VISTA LATERAL DO MODELO TRIDIMENSIONAL	83
FIGURA 6.8 – TENSÕES PRINCIPAIS S1 PARA MODELO FINAL	86
FIGURA 6.9 – TENSÕES PRINCIPAIS S3 PARA MODELO FINAL	86
FIGURA 6.10 – DESLOCAMENTOS EM X PARA MODELO FINAL	87
FIGURA 6.11 – DESLOCAMENTOS EM Z PARA MODELO FINAL	87
FIGURA 6.12 – CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DA CASCA	88
FIGURA 6.13 – DETALHAMENTO DA ARMADURA	89

FIGURA A.1 – CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO TRIANGULAR ADOTADO	103
FIGURA A.2 – CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO SHELL 63	105
FIGURA A.3 – CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO SOLID 65	106
FIGURA C.1 – TENSÕES PRINCIPAIS S1 PARA O MODELO 1 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	118
FIGURA C.2 – TENSÕES PRINCIPAIS S2 PARA O MODELO 1 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	118
FIGURA C.3 – TENSÕES PRINCIPAIS S3 PARA O MODELO 1 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	118
FIGURA C.4 – DESLOCAMENTOS EM X PARA O MODELO 1 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	119
FIGURA C.5 – DESLOCAMENTOS EM Y PARA O MODELO 1 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	119
FIGURA C.6 – DESLOCAMENTOS EM Z PARA O MODELO 1 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	119
FIGURA C.7 – TENSÕES PRINCIPAIS S1 PARA O MODELO 2 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	120
FIGURA C.8 – TENSÕES PRINCIPAIS S2 PARA O MODELO 2 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	120
FIGURA C.9 – TENSÕES PRINCIPAIS S3 PARA O MODELO 2 SOB AÇÃO DO PRÓPRIO	120
FIGURA C.10 – DESLOCAMENTOS EM X PARA O MODELO 2 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	121
FIGURA C.11 – DESLOCAMENTOS EM Y PARA O MODELO 2 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	121
FIGURA C.12 – DESLOCAMENTOS EM Z PARA O MODELO 2 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	121
FIGURA C.13 – TENSÕES PRINCIPAIS S1 PARA O MODELO 3 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	122
FIGURA C.14 – TENSÕES PRINCIPAIS S2 PARA O MODELO 3 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	122
FIGURA C.15 – TENSÕES PRINCIPAIS S3 PARA O MODELO 3 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	122
FIGURA C.16 – DESLOCAMENTOS EM X PARA O MODELO 3 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	123
FIGURA C.17 – DESLOCAMENTOS EM Y PARA O MODELO 3 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	123
FIGURA C.18 – DESLOCAMENTOS EM Z PARA O MODELO 3 SOB AÇÃO DO PESO PRÓPRIO	123

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1. BREVE HISTÓRICO	15
TABELA 3.2. CLASSIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CASCA	18
TABELA 3.3. DETALHES CONSTRUTIVOS	33
TABELA 4.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	41
TABELA 6.1. CARACTERÍSTICAS DO MODELO TRIDIMENSIONAL 1	81
TABELA 6.2. CARACTERÍSTICAS DO MODELO TRIDIMENSIONAL 2	82
TABELA 6.3. CARACTERÍSTICAS DO MODELO TRIDIMENSIONAL 3	82
TABELA 6.5. TENSÕES PRINCIPAIS SOB AÇÃO DE PESO PRÓPRIO	84
TABELA 6.6. DESLOCAMENTOS SOB AÇÃO DE PESO PRÓPRIO	85
TABELA 6.7. VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS EM PONTOS DA BORDA	88

LISTA DE SÍMBOLOS

t: espessura da casca

r: raio de curvatura

Pcrit: carga crítica de flambagem

H: altura da casca esférica

A: raio da casca esférica ($r_1=r_2$)

E: módulo de elasticidade do concreto

ρ : densidade do material

ν : coeficiente de Poisson do concreto

α : coeficiente de dilatação térmica do concreto

S1: tensão principal 1

S2: tensão principal 2

S3: tensão principal 3

DX: deslocamento na direção x

DY: deslocamento na direção Y

DZ: deslocamento na direção Z

RESUMO

VIEIRA, V. L. Modelo teórico e processos construtivos de estruturas em casca de concreto. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

As estruturas em casca fina de concreto armado foram desenvolvidas a partir do início do século XX, sendo que vários projetistas têm utilizado estas estruturas em diversas aplicações nas últimas décadas devido à liberdade de formas possíveis. Em particular, na Engenharia Civil, podem ser utilizadas para coberturas de grandes vãos, para reservatórios, etc. Este trabalho tem por objetivo a elaboração de um modelo computacional de uma estrutura em casca para cobertura, de concreto armado de forma livre, com planta triangular, e desenvolver a análise estrutural do modelo teórico e o projeto executivo. A geração da forma livre tridimensional, com projeção triangular no plano horizontal de 15 m de lado, foi realizada inicialmente a partir do programa desenvolvido por Vizotto, e posteriormente, na fase final do trabalho, a partir do programa desenvolvido por Arcaro. Para a análise estrutural será utilizado o programa de elementos finitos ANSYS. Com os valores obtidos será feito o dimensionamento da estrutura. A fim de abordar os aspectos práticos, são apresentadas as diversas etapas dos principais processos construtivos das estruturas em casca. Desta forma, pretende-se contemplar todas as etapas de um projeto desde a concepção até os detalhes construtivos, fornecendo subsídios para que os projetistas possam criar novas obras de estruturas em casca, contribuindo para o conhecimento e o desenvolvimento desta área no país.

Palavras Chave: estruturas em casca, elementos finitos e concreto armado.

ABSTRACT

VIEIRA, V. L. Theoretical modeling and construction methods of concrete thin shells structures. Campinas, Faculty of Civil Engineering, State University of Campinas, 2003.

Thin reinforced concrete shells structures start their development in the beginning of the twenty century, since that a lot of engineers has been using these structures for many applications because of the freedom of forms. Especially at Civil Engineer can be used to cover big spans. This present research intent to design a computational model of free form shell, with triangular projection in plan and develop a structural analysis of it. The generation of the three dimensional free form shell, triangular in plan was done in the beginning, with the program developed by Vizotto and finished with the software developed by Arcaro, and for numerical analysis it was used Ansys Program. With these results, the design of the structure will be elaborated, giving the structural details of the reinforcement and concrete. In order to show the practical aspects, it will be presented all the steps of some construction methods of thin shell structures. Thus, this research intend to contain all the stages of the structural design, giving information and background to any engineer to create new thin shell structures and make a contribution for the knowledge and development of this area of structures in Brazil.

Key words: shell structures, finite elements and reinforced concrete.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

As estruturas em casca são conhecidas por terem sido aplicadas em grandes monumentos da história como, por exemplo, em catedrais, que possuem suas cúpulas em formas de abóbadas, e que se baseiam no princípio de compressão, ou seja, as estruturas são submetidas aos esforços de compressão apenas, gerando um equilíbrio de forças. Apesar de sua eficiência estrutural, as cúpulas com espessuras maiores requeriam um grande consumo de material e de gastos com mão-de-obra.

No início do século XX, alguns pesquisadores, desenvolveram novas teorias e criaram novos conceitos e modelos, aplicando estes princípios para projetar e construir coberturas com cascas mais finas e de aspectos estéticos diferentes do convencional. Um grupo de pesquisadores alemães ganhou destaque a partir de 1920 por construir e divulgar estes novos conceitos.

Nas décadas seguintes de 1930 e 1940, outros projetistas se destacaram na arte de estruturas em casca como Eduardo Torroja Miret, na Espanha, e Felix Candela, no México e Estados Unidos; criando formas baseadas em modelos matemáticos, como parabolóides hiperbólicos e formas cônicas e cilíndricas. No final dos anos 1950, o pesquisador suíço, Heinz Isler, ficou conhecido por projetar estruturas em casca de formas livres, baseadas em analogias físicas, permitindo uma maior liberdade de formas aos projetistas.

O avanço da tecnologia dos computadores a partir de 1960 e o desenvolvimento do método dos elementos finitos aplicados à Engenharia Civil, incentivou os pesquisadores a combinarem modelos de formas geométricas, análise estrutural e programação matemática fazendo parte de uma área interdisciplinar para otimização das estruturas em casca.

Na década de 1990, com a melhoria do acesso a ambientes computacionais mais eficientes e de menor custo, vários foram os trabalhos que resultaram em programas para

geração e análise de estruturas em casca, como os desenvolvidos por Scordellis, Vizotto e Arcaro.

Apesar do avanço de vários estudos sobre a modelagem teórica, pouco se conhece sobre processos construtivos destas estruturas no país, que por suas formas não possuem uma padronização de execução. Tal desconhecimento faz com que muitos as considerem difíceis de serem projetadas e construídas, e também economicamente inviáveis, levando a uma escolha por outros tipos de estruturas. Além disto, são poucos os estudos no Brasil sobre o comportamento destas estruturas, ou seja, se após a construção, as suas características condizem com as obtidas nos modelos teóricos.

Para uma melhor compreensão de fatores tecnológicos e custos envolvidos na execução das estruturas em casca, buscou-se apresentar os principais métodos construtivos, detalhando cada etapa e mostrando exemplos destas estruturas construídas no Brasil, como podemos observar em algumas obras de Oscar Niemeyer, e que se tornaram sinônimos do avanço da arquitetura e engenharia no país.

Segundo Mark Ketchum (2000), as estruturas em casca podem apresentar custos competitivos, desde que se tenham bons projetos, um estudo cuidadoso da construção das fôrmas e uma boa seleção dos materiais utilizados. Para um retorno financeiro satisfatório, os projetos das cascas devem englobar um estudo detalhado dos processos construtivos, com planos adequados de execução, e uma boa supervisão, particularmente com um controle rígido sobre a produção, lançamento e cura do concreto. No entanto, quando da escolha pela estrutura em casca outros fatores devem ser levados em consideração, como por exemplo, o seu diferencial estético.

Alguns trabalhos desenvolvidos nesta área trouxeram importantes contribuições à pesquisa de estruturas em casca de formas livres no país, como o de VIZOTTO (1993), criando um programa para geração computacional das cascas de formas livres, de SEDANO TAPIA (1999), que apresenta um estudo para a contribuição ao projeto destas estruturas, e de TEIXEIRA (1999), onde foram executados protótipos de estruturas em casca com planta quadrada e triangular para comparação com modelos teóricos e avaliação do método construtivo.

Nessa linha, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento e divulgação das estruturas em casca no Brasil, e principalmente, fornecer subsídios para a elaboração de

bons projetos e execução de obras de boa qualidade e menor custo possível, promovendo uma ligação entre estudos acadêmicos e o mercado.

Para atender ao propósito citado, dividiu-se este trabalho em duas partes: a primeira corresponde à modelagem teórica através do método dos elementos finitos, que engloba desde a geração da malha em planta, seguindo-se a simulação tridimensional da forma da casca de forma livre até a análise numérica e o dimensionamento da estrutura; e a segunda refere-se aos processos construtivos, detalhando as diversas etapas de cada método abordado: o método convencional, o método "air-formed" e o método com elementos pré-fabricados.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é contribuir para o desenvolvimento das estruturas em casca de concreto no país, fornecendo à área técnica estudos sobre comportamento estrutural das mesmas, bem como técnicas construtivas que permitam a construção destas estruturas em escala comercial. Os objetivos gerais e específicos são apresentados a seguir.

2.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral é elaborar um projeto de uma estrutura em casca de forma livre de concreto armado de planta triangular, e apresentar os principais detalhes do processo construtivo.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- 1- Gerar através de um processo computacional de otimização uma estrutura em casca de forma livre de planta triangular;
- 2- Analisar numericamente a forma tridimensional gerada através do método dos elementos finitos;
- 3- Dimensionar a estrutura;
- 4- Apresentar os principais processos construtivos utilizados para as estruturas em casca.

CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução

Para melhor entendimento da revisão bibliográfica a respeito do tema deste trabalho, este capítulo foi dividido em 4 partes:

1) Introdução de breve histórico com uma abordagem diferente do usualmente apresentado, onde se expõe o desenvolvimento das estruturas em casca fina ao longo dos seus aproximadamente 90 anos de existência em vários países e seus principais expoentes, e quais as contribuições para o desenvolvimento destas estruturas, mostrando algumas obras em que se possam observar as diversas possibilidades das estruturas em casca finas.

2) Apresentação dos principais conceitos teóricos utilizados nos cálculos das estruturas em casca de formas livres através da metodologia desenvolvida, com algumas análises e considerações dos cálculos das cascas finas projetadas atualmente.

3) Exposição de considerações sobre os processos construtivos, baseados em experiências de projetistas com destaque em estruturas em casca. Uma vez que, por possuírem métodos construtivos diferenciados do convencional, não existem muitas informações consolidadas a respeito e deste modo será estabelecida uma relação entre os pontos abordados.

4) Estado da Arte do projeto de estruturas em casca no Brasil através de trabalhos que iniciaram o desenvolvimento das mesmas no país até os dias atuais onde temos trabalhos de cascas de formas livres.

3.2. Breve Histórico

A denominação estruturas em casca fina começou a ser destacada no início do século XX. Antes já existiam tipos destas estruturas, como em catedrais, que possuíam suas cúpulas em formas de abóbadas, que se baseavam na ocorrência de esforços de compressão, no entanto eram mais espessas que as atuais.

Alguns engenheiros e arquitetos se destacaram nesta arte em todo o mundo. De acordo com Melaragno (1991): "Casca fina é a forma mais lógica de expressão das estruturas de concreto quando a integridade arquitetônica é considerada. Por seus próprios méritos, cascas finas devem à sua geometria especial a capacidade de absorver as forças externas e filtrá-las através de sua superfície para os membros de borda, que as transmitem e encaminham dos apoios à fundação. A geometria que sustenta este processo estrutural é a linguagem básica que o projetista deve aprender primeiro. Depois de adquirir esta capacidade é que o arquiteto pode experimentar outras formas com análises mais precisas. A camada de concreto, a distribuição precisa das armaduras e as configurações dos apoios se tornam fascinantes componentes nas mãos do projetista".

Segundo Scott (1991), uma das primeiras construções de cascas finas foi o Düsseldorf Planetarium na Alemanha, em 1926, seu projetista Dischinger foi um dos precursores do estudo das estruturas em casca. Em várias pesquisas bibliográficas, vemos que as primeiras cascas são do início dos anos 1920, embora não se saiba ao certo o ano, é consenso que um pequeno grupo de alemães foram os primeiros a estudarem detalhadamente estas estruturas. Na Figura 3.1 mostramos uma casca experimental construída em Jena (Alemanha) por este grupo, com 1,5 cm de espessura, em que na cerimônia de inauguração várias pessoas ficaram sobre a estrutura para mostrar que suportava este carregamento.

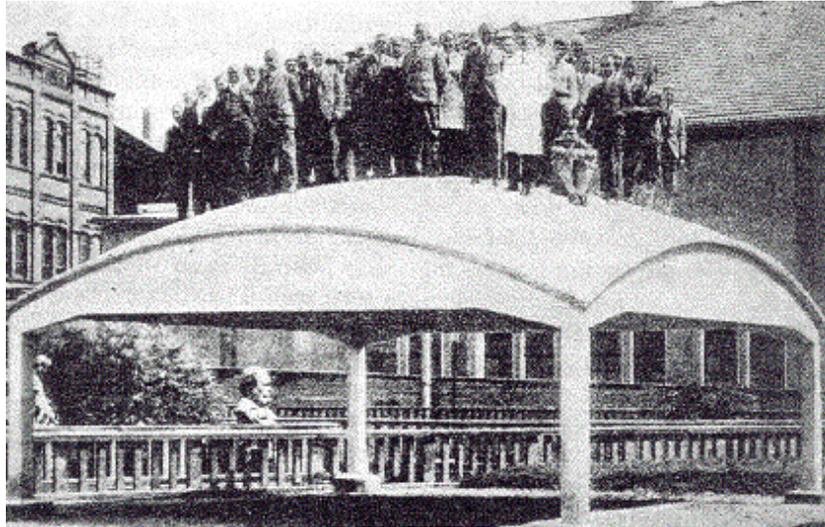


Figura 3.1 – Casca Experimental Construída em Jena, Alemanha

Fonte: Schlaich, 1986, p. 42.

Na Espanha, o arquiteto Antonio Gaudi foi um dos precursores no desenvolvimento das estruturas em casca. Seu trabalho foi intenso na área das estruturas que seguiam formatos geométricos, abrindo caminho ao desenvolvimento do parabolóide hiperbólico, sendo esta uma das formas mais utilizadas pela maioria dos projetistas. Muitos de seus trabalhos também seguiram as formas esculturais, isto é, sem uma preocupação com a forma pré-definida e suas funções estruturais.

Eduardo Torroja Miret, que foi o fundador da Associação Internacional de Estruturas em Casca (IASS) em 1959, com sede em Madri, contribuiu de modo importante para o desenvolvimento das formas cônicas e cilíndricas, com destaque para uma de suas obras, o Hipódromo de la Zarzuela, em Madri, apresentada na Figura 3.2. Este é um exemplo de uma estrutura leve que aparenta simplicidade e atende o requisito de funcionalidade cobrindo um grande vão, ou seja, onde o conceito de arte estrutural foi aplicado.



Figura 3.2 – Hipódromo de la Zarzuela em Madri, Espanha

Fonte: Machado, 1980, p. 222.

Na Itália, temos como destaque Nervi, que foi um dos precursores na utilização do concreto e posteriormente no desenvolvimento das estruturas em casca no seu país. Como obra de destaque tem-se: o Ginásio de Esportes de Roma e o Centro de Exposições de Turim. Melaragno (1991) diz que a preocupação de Nervi em unir arte e engenharia através de sua grande capacidade imaginativa e ao mesmo tempo seguindo sua lógica e rigor matemático, contribuíram para o desenvolvimento de diversas formas geométricas de estruturas em casca, fornecendo uma interpretação lógica de como os materiais podem ser utilizados.

Outro expoente neste tema é o engenheiro Giorgio Baroni que contribuiu para o desenvolvimento do parabolóide hiperbólico, sendo o responsável pela primeira construção deste tipo de estrutura em Milão, em 1934.

Na França, Eugéne Freyssinet destacou-se no início do século XX como um dos primeiros projetistas a aplicar o concreto para estruturas em casca no Aeroporto de Orly, em Paris, sendo que a cobertura em casca cilíndrica tem um vão de 100 m. Neste país, existem várias obras de destaque construídas ao longo do século passado. Podemos citar Le Corbusier como um arquiteto que explorou as cascas em seus projetos e influenciou o brasileiro Oscar Niemeyer, mas que não se dedicou apenas a estas formas.

No México, tivemos o arquiteto Felix Candela, que embora espanhol residia neste país e que também ajudou a introduzir as estruturas em casca nos Estados Unidos, na década de 1930, através de uma empresa de Chicago que utilizava tecnologia desenvolvida na Alemanha. Destacou-se pela introdução da forma do parabolóide hiperbólico na década de 1950 tanto no México como nos Estados Unidos.

Segundo Beles (1976), a Igreja "La Virgen Milagrosa" representa um brilhante exemplo onde Felix Candela explorou as possibilidades de um parabolóide hiperbólico, sendo esta uma de suas formas prediletas. No México, várias foram as suas obras, com destaque para o Laboratório de Raios Cósmicos da Universidade do México e o Restaurante Xochimilco (que tem bordas livres) conforme podemos observar na Figura 3.3.

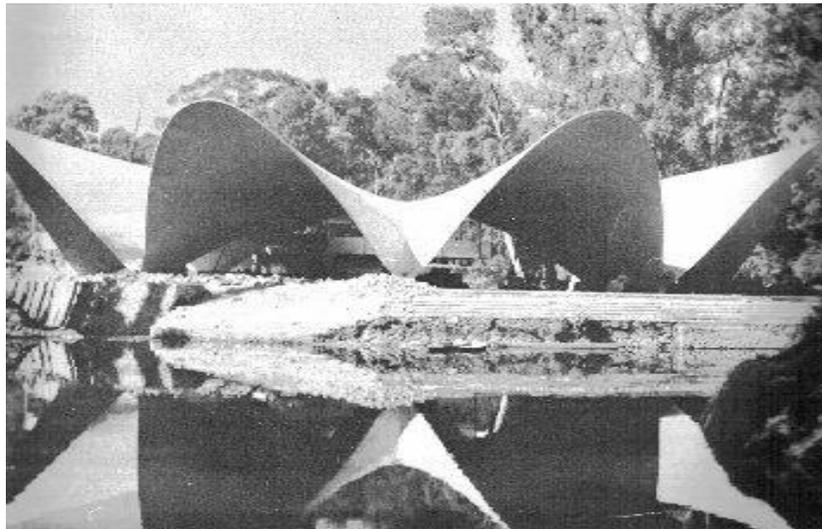


Figura 3.3 – Restaurante Xochimilco, México

Fonte: Beles, 1976, p.41

Nos EUA, as estruturas em casca ganharam destaque com a empresa Roberts & Schaefer que trouxe a tecnologia da Alemanha (desenvolvida pelo grupo de Dischenger), e o engenheiro Anton Tedesko teve uma grande contribuição neste desenvolvimento. Após a segunda guerra mundial o desenvolvimento destas estruturas ganhou bastante destaque e a tecnologia se espalhou por todo país, sendo possível verificar várias aplicações conforme exemplo apresentado na Figura 3.4. Atualmente, a ACI (American Concrete Institute) possui uma norma específica para estruturas em casca, sendo uma referência nesta área.



Figura 3.4 – Terminal do Aeroporto de Las Vegas, Estados Unidos

Fonte: Cortesia W. Godden Collection – University of California, Berkeley

Na Suíça, destacou-se Heinz Isler, não só pelo desenvolvimento destas estruturas com seus estudos, mas por sua grande contribuição neste assunto definindo e projetando estruturas de formas livres, onde não mais seriam concebidas unicamente por modelos matemáticos, mas podendo ser determinadas por analogias físicas, o que permitia uma maior liberdade de formas aos projetistas.

Por analogias físicas Isler idealizou vários modelos que foram criados para avaliar o comportamento destas estruturas, tendo como objetivo a concepção de projetos de cascas sob o estado de tensões de membrana. Além disto, sua vasta experiência na construção de cascas de formas livres o colocaram como referência neste assunto. Melaragno (1991) cita que os trabalhos de Isler representam o estado da arte nos projetos de estruturas em casca.

Segundo Vizotto (1993), Isler classificou as estruturas em casca em três grandes grupos:

- **Geométricas:** aquelas em que as definições das superfícies são determinadas através de expressões matemáticas, como por exemplo, superfícies esféricas e cilíndricas, parabolóides elípticos e hiperbólicos, etc...;

- **Estruturais:** são definidas por analogias físicas através de modelos criados das mais diversas formas; no caso Isler projeta estas formas com membranas pneumáticas sob pressão, fluídos viscosos extrudados e membranas pênseis invertidas;

- **Esculturais:** têm formas arbitrárias, e são esculpidas livremente tendo como principal característica a estética e a arte.

Na Figura 3.5 é apresentada uma estrutura em casca projetada por Isler e construída na Alemanha.



Figura 3.5 – Wyss Garten Haus Zuchiwil, Alemanha

Fonte: Cortesia Koichiro Ishikawa

Na Austrália temos o Opera House, uma obra muito conhecida, mas que devido à inexperiência do arquiteto designado para projetá-la passou por vários problemas, desde refazer parte das fundações, como ter o colapso de parte da estrutura em 1964, e internamente foi necessário colocar vigas pré-moldadas para suportar a estrutura. Depois da troca de arquitetos e de algumas mudanças realizadas, a obra foi finalizada em 1973, e conforme podemos observar na Figura 3.6, o resultado final foi bastante satisfatório. Segundo os especialistas, o grande problema foi a forma livre (por não possuir uma forma geométrica convencional, não conseguiram estimar adequadamente seus esforços) e a falta de detalhamento do projeto apresentado pelo jovem arquiteto. Hoje este tem seu trabalho bastante reconhecido.



Figura 3.6 – Opera House em Sidney, Austrália

Fonte: Cortesia Sidney Opera House Trust

No Brasil, o arquiteto Oscar Niemeyer é o profissional mais destacado pela aplicação destas estruturas em seus projetos. Sua obra sofreu influências do francês Le Corbusier, com quem iniciou seu trabalho na década de 1950 e que estava engajado em vários projetos de estruturas em casca em seu país. Como obras de destaque temos vários locais na cidade de Brasília, como a catedral e o prédio do Senado, a Pampulha em Belo Horizonte e o Memorial da América Latina em São Paulo, apresentado na Figura 3.7.

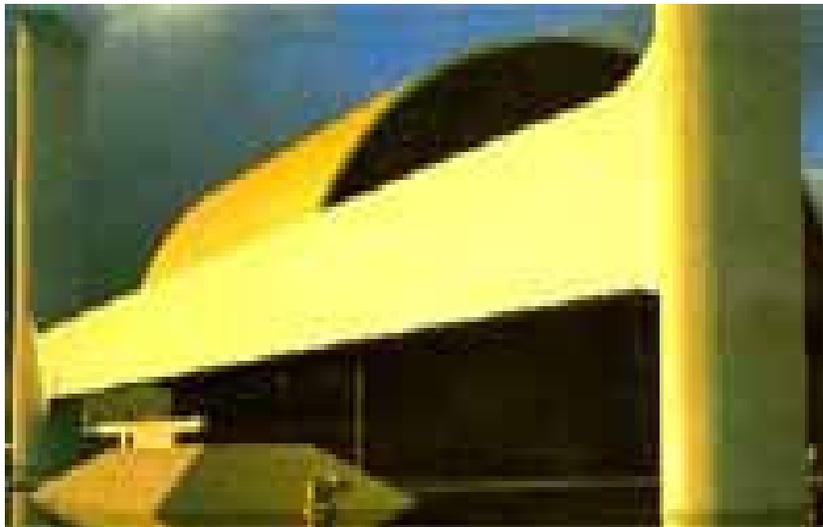


Figura 3.7 – Memorial da América Latina em São Paulo, Brasil

Fonte: Cortesia Fundação Memorial da América Latina

Na Tabela 3.1 é apresentado um histórico sucinto a respeito do desenvolvimento das estruturas em casca nos últimos noventa anos.

Tabela 3.1. Breve Histórico

Período	Avanços	Fato Marcante
1920-1929	Primeiros desenvolvimentos teóricos, principalmente para cascas geométricas de formas cilíndricas	Construção do Düsseldorf Planetarium em 1926, uma das primeiras construções de cascas finas
1930-1939	Primeiros estudos com cascas experimentais e introdução destas estruturas nos Estados Unidos	Construção em Jena (Alemanha) de um protótipo a ser ensaiado sob ação de carregamento
1940-1949	Muitas cascas são construídas após II Guerra Mundial, que teve neste período o seu grande crescimento. Desenvolvimento de Parabolóides Hiperbólicos e Conóides	Várias obras de Felix Candela no México
1950-1959	Desenvolvimento de novas formas de estruturas em cascas, com destaque para o trabalho de Heinz Isler	Fundação da Associação Internacional de Estruturas em Cascas (IASS) em Madri
1960-1969	Construção de várias cascas não-geométricas	Dante Bini solicita patente do método "automatizado" para construção de cascas através da técnica de inflar balões
1970-1979	Início da aplicação de análise computacional aos estudos de estruturas em cascas	Conclusão do Opera House em Sidney – uma das estruturas em cascas mais conhecidas mundialmente
1980-1989	Vários estudos para tornar a construção destas estruturas mais econômicas e competitivas em relação às outras técnicas e materiais	Construção do Memorial da América Latina, mostrando aplicabilidade das cascas no Brasil
1990-1999	Enfoque para a modelagem computacional das estruturas, devido aos avanços nas máquinas e diminuição do tempo de processamento tivemos a otimização do processo de cálculo	Criação de programas para geração de formas livres via computacional por Scordellis e Vizotto
2000-Atual	Desenvolvimentos nas áreas de análise não-linear e otimização no cálculo destas estruturas	Aplicação destes novos conceitos em outras aplicações, como um complexo de prédios na Alemanha elaborado em estruturas em cascas

3.3. Aspectos Teóricos

As considerações teóricas sobre estruturas em casca são muito diversas, de maneira que nesta revisão bibliográfica o enfoque será dado às principais teorias utilizadas na elaboração do programa de geração tridimensional de estruturas em casca desenvolvido por Vizotto.

3.3.1. Teoria das Cascas Finas

Os primeiros estudos teóricos para cascas finas foram realizados por Aron em 1874 quando ele derivou as equações de energia potencial adaptando-as ao caso das cascas. Neste mesmo período Kirchhoff também desenvolvia a teoria de placas, que foi utilizada dez anos mais tarde como base para o trabalho de Love, que derivou as equações de equilíbrio para as cascas, alterando algumas condições estudadas por Aron. O desenvolvimento obtido neste período serviu como base para a criação da Teoria de Cascas Finas.

Pflüger (1965) diz que “é importante definir o conceito de cascas de forma exata para poder entender a Teoria das Cascas Finas”. Assim, primeiramente deve-se entender o que define uma estrutura como sendo casca, e qual o limite para considerá-la fina ou espessa, e de acordo com estas informações, é possível determinar se a estrutura obedece a Teoria de Cascas Finas.

Sua definição é bastante simples, considerando como casca uma estrutura portante superficial curva. Para Molmann (1981), uma casca é um corpo que tem como contorno duas superfícies curvas, sendo considerada fina quando a espessura é pequena comparada com as outras dimensões da casca. Gould (1988), segue o mesmo pensamento de que uma casca fina é um corpo curvo com uma dimensão pequena em relação as demais.

Pereira (1986) define casca como “um corpo limitado por duas superfícies curvas, em que à distância entre as superfícies é pequena diante das outras dimensões (o lugar geométrico dos pontos igualmente distantes dessas superfícies é a superfície média da casca)”. O limite estabelecido para t/r (espessura/raio de curvatura) define se a casca é espessa ou fina.

Ramaswamy (1968) sintetiza quais os limites para uma casca fina: "O esforço no projeto é fazer a casca o mais fina possível quanto os requisitos práticos permitem, desta forma o peso próprio é reduzido e a estrutura funciona como uma membrana (e não possui tensões de flexão). Por isto, se utiliza o mínimo de material e tem-se a máxima vantagem estrutural".

As equações da Teoria Geral de Cascas Finas são adaptadas a cada tipo geométrico, como cascas cilíndricas, esféricas, de dupla curvatura, etc. Por este estudo relacionar-se às estruturas em casca de formas livres, não há um equacionamento específico, apesar de seguir esta Teoria.

Quando se considera uma estrutura em casca, um dos principais pontos a serem abordados é a espessura que determinará se é possível utilizar a Teoria de Cascas Finas. De acordo com esta Teoria, tem-se que a relação entre espessura e raios de curvaturas principais da superfície média deve estar entre os limites de $1/1000$ e $1/20$; caso contrário, é necessário utilizar a Teoria da Elasticidade. Novozhilov (1970) foi o primeiro a definir uma casca fina quando a relação t/r em qualquer ponto é menor que $1/20$.

Os valores ideais para espessura são variáveis e baseados nas experiências dos projetistas. Como se pode observar na definição anterior, os limites são muito variáveis. Melaragno (1991) diz que as cascas devem ter espessura variando de 3,75 cm (1,5 polegadas) a 15,0 cm (6 polegadas), para não se preocupar com a relação "espessura x raio de curvatura". No entanto, Felix Candela construiu no México, cascas de 2,5 cm (1 polegada), pois a norma do país era menos restritiva em relação aos Estados Unidos.

Nos EUA, a ACI (American Concrete Institute) limita a construção de cascas tão finas. De acordo com Teixeira (1999), a norma ACI-344 recomenda que a espessura mínima de uma cúpula deve ser de 7,5 cm (3 polegadas), e que em caso de cúpulas de concreto projetado admite-se o valor mínimo de 6,5 cm (2,5 polegadas).

As cascas finas podem ser classificadas de acordo com vários critérios, sendo que apresentaremos um dos critérios mais usuais, que é através da curvatura gaussiana, mostrando a diferença dos vários tipos quanto à propagação do efeito de borda. Esta definição considera o inverso do produto das curvaturas principais, e a Tabela 3.2 é baseada em Billington (1982).

Tabela 3.2. Classificação de Estruturas em Casca

Nome	Gaussiano	Definição	Exemplos
Sinclástica	>0	Formada por duas famílias de curvas com curvaturas na mesma direção	Cascas esféricas e parabolóides elípticos
	$=0$	Formada apenas por 1 família de curvas	Cascas cilíndricas e cônicas
Anticlástica	<0	Formadas por duas famílias de curvas com curvaturas em direções opostas	Parabolóides hiperbólicos

Gould (1988) considera que uma casca em particular pode ter regiões com valores positivos, nulos e negativos para a curvatura gaussiana, entretanto apenas um destes predomina na estrutura para a maioria dos casos.

3.3.2. Teoria de Membrana

Segundo Ramaswamy (1965), pela Teoria de Membrana a casca é idealizada como uma membrana incapaz de resistir às tensões de flexão. É utilizada em muitos casos, ganhando destaque para o comportamento estrutural das cascas.

Para Rekach (1978), de acordo com esta teoria as forças internas em uma casca se reduzem às forças normais e cisalhantes que atuam planos tangentes da superfície média.

A Teoria de Membrana considera que ocorrem apenas as tensões no plano tangente a um ponto, sendo que os momentos fletores e as tensões cisalhantes são nulos. A partir desta hipótese, Billington (1982) conclui que:

- 1) O estado de tensões na casca é completamente determinado pelas equações de equilíbrio, ou seja, determinado estaticamente;
- 2) As vinculações devem fornecer à estrutura em casca as forças que completarão as equações de equilíbrio;
- 3) As condições de contorno devem permitir que os deslocamentos na casca (rotações e translações) sejam computados pelas forças encontradas pela Teoria de Membrana.

3.3.3. Método dos Elementos Finitos

Em 1943, Courant aplicou o conceito de divisão de elementos em sub-regiões para analisar a torção de Saint-Venant. Seguindo este estudo, em 1956 Turner et al, ampliou estes conhecimentos e aplicou à análise de estruturas bidimensionais. E finalmente Clough definiu o termo "elementos finitos" em 1960.

Segundo Carrijo (1995), desde então o Método dos Elementos Finitos tem sido utilizado amplamente, somando até 1986 mais de 20.000 artigos sobre o assunto.

Assan (1998) define o método dos elementos finitos como sendo "baseado no método de Rayleigh-Ritz, que prevê a divisão do domínio de integração contínuo em um número finito de pequenas regiões denominado elementos finitos, tornando o meio contínuo em discreto".

O Método dos Elementos Finitos é o método numérico mais difundido e utilizado atualmente, e permitiu aos projetistas criar vários modelos para análise de estruturas em casca, sem o qual não seriam viáveis os cálculos realizados hoje. O grande desafio atual é criar elementos que permitam análises mais adequadas quanto ao comportamento de estruturas com fissuras, e também para a análise da estabilidade.

Vafai e Estekanchi (1999) estudaram a influência da modelagem de elementos finitos para o cálculo de fissuras em cascas e placas. Foram modeladas 40 cascas de plantas quadradas com 2,0 x 2,0m de lado e 1cm de espessura, variando-se o refinamento da malha. Os resultados são muito próximos aos analíticos, e verificou-se que para uma casca de malha discretizada 5 vezes mais na região da fissura, os valores variam 0,544 a 0,5094. Os campos de tensões não foram afetados de maneira significativa em regiões afastadas da fissura. Outros parâmetros foram avaliados como: variação de coeficiente de Poisson (a tensão de compressão e os deslocamentos permaneceram praticamente constantes), condições de contorno (os efeitos das condições de contorno diminuem quando o comprimento excede 2 vezes a largura), efeitos do tamanho da fissura (é uma relação linear, a tensão de membrana aumenta com o aumento da fissura), efeitos da curvatura (em cascas cilíndricas os deslocamentos das fissuras aumentam com a curvatura).

3.3.4. Estabilidade de Cascas Finas

Nos anos de 1932 e 1933, vários estudos foram realizados sobre a estabilidade de cascas, dentre elas as cônicas, por Tokogawa em 1932. No mesmo ano Flügge e Timoshenko estudaram as cascas cilíndricas, e em 1951 Leibenzon verificou a estabilidade de cascas esféricas. Nestes estudos todos utilizaram a análise linear, ou seja, considerando as estruturas com pequenas deformações e pequenos deslocamentos.

A análise não-linear para estudo de estabilidade de cascas teve seu primeiro desenvolvimento em 1934, por Kármán. Devido a grande dificuldade de se resolverem grandes equações matemáticas na época seu estudo se concentrou em cascas esféricas abatidas. Vários estudos foram realizados, comparando-se os modelos teóricos com os experimentais, e estes mostravam grandes diferenças.

Billington (1982) afirmou que ainda não existiam naquela época muitos estudos experimentais em cascas de concreto, para que pudessem desenvolver critérios específicos de análise; destacando que o projetista deveria ter cuidado com os valores obtidos de acordo com a teoria clássica, pois as espessuras são finas e há diferenças entre os valores teóricos e os obtidos na prática decorrente do processo construtivo. A Fórmula 3.1 apresenta a fórmula clássica desenvolvida para o estudo da estabilidade de um tubo de espessura constante submetido à carga axial de compressão:

$$P_{crit} = \sigma_{crit} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{h}{a} \quad (3.1)$$

A ACI recomenda que para a análise de estabilidade de cascas deve ser considerada uma possível redução do valor da carga crítica de flambagem, causadas por grandes deflexões, efeitos de deformação lenta do concreto, e desvio entre a superfície atual e a teórica.

Confirmando esta informação, Arbocz (2002) afirma que o governo americano, devido a problemas com mísseis em seu programa espacial, resolveu investir em grandes projetos para estudar a estabilidade de cascas a partir da década de 1960. Como resultado, foram desenvolvidos alguns programas computacionais que são excelentes ferramentas para

se criar modelos de análise do comportamento do colapso das estruturas de cascas finas com grande precisão, além de gerar procedimentos para avaliar os efeitos das imperfeições geométricas para a flambagem. Apesar destes avanços, continuamos usando a mesma teoria criada a mais de 70 anos, que considera fatores de redução empíricos, que multiplicados pelo valor ideal da flambagem fornecem o resultado "real".

Após vários estudos nesta área, ainda há muita divergência quanto às análises experimentais em relação aos modelos teóricos. Várias formas geométricas diferentes das esféricas e cilíndricas foram pouco exploradas, de maneira que muito deve ser pesquisado nos próximos anos, representando este um dos tópicos a serem mais estudados para estruturas em casca juntamente com a otimização do cálculo de estruturas.

Apresentam-se a seguir os principais estudos em destaque na área, como subsídio para melhor compreensão do comportamento destas estruturas. Devido à pequena espessura, a análise da flambagem é um fator muito importante com relação à segurança, e mesmo sem formulações amplamente consolidadas, devem ser consideradas no cálculo.

Em contrapartida, Rekach (1978), diz que a primeira Teoria de Estabilidade para sistemas elásticos aplicados às cascas foi desenvolvida por Bryan e Love em 1988.

Em 1992, a ACI emg um documento sobre aspectos teóricos e práticos sobre estruturas em casca de concreto, faz algumas considerações interessantes com relação ao aspecto de estabilidade aqui apresentada:

- Quando uma estrutura em casca se deforma pela ação de um carregamento, forças de membrana se desenvolvem. Se uma das tensões é de tração, esta tende a retornar a casca à posição original, permitindo assim que a casca suporte carga 10% a mais que a carga inicial de flambagem. Por outro lado, se as duas tensões são de compressão, estas tendem a aumentar a deformação da casca. Após a flambagem inicial, a casca pode apenas transmitir cargas menores que a carga inicial de flambagem; sendo especialmente verdade para cascas de concreto, devido as duas últimas causas citadas como fatores de redução da carga;

- O comportamento pós-flambagem que considera a teoria de pequenas deformações não é possível se prever, mas foram descobertas como consequência de tentativas de relacionar resultados experimentais com previsões analíticas;

- ACI indica o seguinte procedimento para estimar o efeito de deformação lenta do concreto (similar à diminuição do valor de E): admitir um valor menor de E , ou sabendo a força de membrana principal em qualquer ponto de uma determinada casca, determine o módulo tangente da elasticidade. Este índice não deve ser menor que dois. O uso de E reduzido alcança os mesmos resultados que o fator de redução para a carga crítica de flambagem.

Em seu artigo, Morris (1996) enfatiza que muito se tem estudado em estabilidade para estruturas em casca, mas com aplicação predominante na área aeroespacial, e que seu enfoque será para estruturas da Engenharia Civil. Analisou especificamente as cascas esféricas submetidas a pressões internas, que tiveram um desenvolvimento teórico de flambagem linear, e que o autor investigou através de métodos computacionais aplicando a análise não-linear. As diferenças entre os valores teóricos e práticos em vários casos são consideráveis, e as razões são os efeitos das condições de contorno, o efeito da plastificação na área de flexão em torno dos apoios, e os efeitos das imperfeições iniciais (decorrente do grau de precisão na construção da estrutura). Concluindo que, para projetistas que possuem a visão teórica e prática do problema, os sofisticados avanços nesta área podem ajudar, no entanto para aqueles que não tenham a visão do todo, estes desenvolvimentos computacionais podem ter pouca aplicação ou até mesmo ser perigoso.

Chryssanthopoulos (1998) criou um programa computacional para realizar a análise de flambagem em estruturas em casca cilíndricas, considerando a análise não-linear e fatores probabilísticos para imperfeições geométricas.

Em seu trabalho, Arbocz (2002) desenvolveu uma teoria baseada em métodos estatísticos e apresenta formulações para análise de estabilidade para cascas metálicas, utilizadas na indústria aeroespacial. Segundo este pesquisador, o sucesso do método está em possuir previamente informações obtidas experimentalmente sobre imperfeições iniciais, e em usar um elemento finito que permita reproduzir da melhor forma possível os diferentes modelos de flambagem, considerando os parâmetros geométricos e as condições de contorno.

3.3.5. Cascas de Formas Livres

Por este trabalho focar a geração de estruturas em casca de formas livres, iremos neste item apresentar alguns trabalhos desenvolvidos nesta área. Todas as teorias apresentadas anteriormente são válidas para cascas livres, no entanto não há equacionamentos específicos justamente devido à liberdade de forma, e por não seguirem modelos matemáticos.

Ramm (1991) afirma que muitos projetistas utilizam as estruturas em casca convencionais devido maior facilidade de cálculo e a inércia de usar algo já consolidado. Para ele, as qualidades da estrutura em forma livre é que num modelo computacional, fornecendo poucos parâmetros como tamanho do vão, altura e as cargas atuantes, a forma "natural" é gerada, evitando arcos de suporte nas laterais, levando a uma forma esteticamente mais interessante.

Em seu trabalho, Ramm testou o programa computacional criado por Scordellis para a geração da forma livre tridimensional, e os resultados obtidos para as tensões. A conclusão é que deste modo diminui as chances de ocorrer uma flambagem da estrutura tornando-a mais segura; além de comprovar a eficácia do programa criado por Scordellis, que apresentou resultados bastante satisfatórios quando comparados com outros programas comerciais de cálculo de estruturas e também com ensaios experimentais.

Popov (1991) cita também o trabalho de Scordellis simulando as cascas computacionalmente e confirma o sucesso dos trabalhos de Isler na modelagem experimental de novas formas de estruturas em casca.

Sem dúvida, o trabalho de Isler inspirou vários pesquisadores, dentre eles o próprio Scordellis e Vizotto. Suas experiências com a construção de várias cascas e a percepção estrutural das mesmas foram um dos motivos que o levaram ao seu sucesso.

Vizotto (1993) cita Popov para definir estruturas em casca: "As cascas de formas livres são aquelas que têm suas formas geométricas selecionadas por critérios absolutamente arbitrários, ou por meio de requisitos artísticos, ou ainda para minimizar o peso próprio que corresponde precisamente às condições de contorno e de carregamentos

atuantes. Estas cascas não podem ser definidas geometricamente de modo simples por equações matemáticas analíticas”.

Isler (1997) afirma que em nenhum outro tipo de estrutura a qualidade estrutural é tão dependente da forma, e que há muitos exemplos de cascas que depois de construídas apresentaram problemas devido às formas inconvenientes, e que apesar de vários reparos ainda não estão adequadas.

Segundo Isler (1997) os métodos experimentais levam às cascas mais eficazes e a superfícies mínimas, ou seja, com energia mínima ou outro critério. E que os modelos fornecem informações sobre tensões e deformações. Posteriormente, se cria um modelo em escala reduzida para se avaliar a carga e seu comportamento. Esta etapa permite termos mais detalhes sobre deformações, “caminho” das forças, instabilidade e também sobre arquitetura.

Sedlak (1997), um pesquisador da Austrália e membro da Associação Australiana de Estruturas Espaciais Leves, também desenvolveu um banco de dados com informações sobre os vários tipos de cascas, sejam geométricas ou de formas livres, para auxiliar aos projetistas a criarem novas formas e também calcular, sabendo, por exemplo, o “caminho” seguido pelas forças ou informações sobre estruturas semelhantes já construídas.

Como podemos observar, Isler é o pesquisador que mais desenvolveu as estruturas em casca de formas livres, principalmente com relação à criação de modelos experimentais para geração de novas formas. Com o aumento da capacidade dos processadores dos computadores, diversos pesquisadores em todo o mundo procuraram desenvolver programas que pudessem gerar formas livres o mais próximo possível dos modelos reais. Este é um dos assuntos mais estudados atualmente, na tentativa de se criar modelos tão reais, de modo que a execução dos mesmos, em escalas reduzidas ou protótipos seja apenas para se avaliar algumas questões específicas ou método construtivo.

Segundo Isler (1994), em muitos casos a casca tem, ao mesmo tempo, a função de ser a cobertura e o suporte dela mesma. Estas estruturas devem seguir rigorosamente as leis da estética para serem seguras e econômicas, aliás, a geração de cascas através de métodos experimentais leva a estas características. De acordo com sua definição são os seguintes tipos:

- **Método Pneumático:** onde uma membrana elástica presa pelas bordas é inflada com ar pressurizado definindo uma forma. Tem a vantagem de ter as cargas de flambagem iguais em todos os pontos, atingindo um estado ideal de estabilidade.

- **Método de Membranas Pênséis Invertidas:** onde se prende um "tecido" (que contém alguns aditivos) em alguns pontos que serão os apoios da estrutura, e depois é colocada à baixa temperatura, quando este congela inverte-se a forma e tem-se o estado natural da estrutura. Por ter predominantemente esforços de compressão, sofre menos efeitos de deterioração por ser mais difícil à abertura de fissuras, e pela mesma razão pode apresentar problemas com relação à instabilidade. Este tipo tem limites de vão e espessura para serem projetados.

- **Método de Fluxo:** onde uma espuma expansiva passa através de um tubo de abertura da forma que se deseja cobrir, produzindo a forma da casca.

- **Método Combinado:** onde duas formas acima são combinadas gerando novos tipos de estruturas.

3.4. Aspectos Construtivos

Inicialmente, salienta-se que toda e qualquer análise técnica construtiva terá como parâmetros iniciais de avaliação a facilidade e a rapidez de execução do projeto e o custo envolvido. Muitos trabalhos encontrados tratam da viabilidade econômica da estrutura em casca.

Muitos dizem que as estruturas não são econômicas quando comparadas às estruturas convencionais, seja em concreto ou metálica, mas isto depende muito da finalidade, da forma e do vão (para o caso de coberturas). Vários pontos serão abordados a seguir, desde o comprometimento de se fazer um controle rigoroso do processo, até a consideração de fatores não mensuráveis, como a vantagem de se ter uma estrutura aparentemente mais cara, mas com um grande apelo estético e que poderá ser considerado um símbolo de marketing.

Ramaswamy (1965) considera que o entusiasmo com as vantagens estruturais e estéticas das cascas finas é desfavorecido em relação ao aspecto econômico, e que, além disso, para serem competitivas em relação a outras estruturas, várias unidades idênticas devem ser construídas. Neste caso há reuso de formas o que garantirá economia. Do

mesmo modo que outros autores, afirma que o custo das formas tende a ser tão significativo, que mesmo o baixo consumo de materiais (cimento e aço) não compensa.

Melaragno (1991) afirma que a estratégia de construção se constitui no fator principal do sucesso ou fracasso econômico de uma estrutura em casca. Alguns fatores que não são considerados no custo como: seguro para a estrutura, custos de manutenção pós-construção e mecanismos de proteção da estrutura contra incêndio deveriam ser considerados quando da viabilidade econômica, tornando-se assim mais competitivas quando comparadas a outras estruturas.

Isler (1995) em sua análise de 50 anos de estruturas em casca apresenta a interessante informação de que estas estruturas foram bastante usadas no período entre guerras, e que desde de 1960 sua utilização vinha decrescendo. Relata ainda que agora são novamente bem vistas por serem altamente ecológicas e permitirem uma grande liberdade para ser projetada. Esta visão aborda não somente o aspecto financeiro, mas como dito anteriormente, um fator social na decisão de construir tal tipo de estrutura.

No Brasil, Teixeira (1999) comenta que muitos fatores concorrem para a pouca utilização das estruturas em casca, dentre os quais se podem destacar as dificuldades matemáticas para análise estrutural de cascas e o custo elevado de fôrmas e cimbramentos para execução do processo convencional. A falta de conhecimento sobre o assunto, por sua vez, pode ser visto como causa e conseqüência da pouca utilização destas estruturas.

Ketchum (2000) define que o termo economia (para uma construção) pode ser entendido como o projeto e construção da melhor obra com o menor custo, mas este critério nem sempre pode ser utilizado, por ser difícil definir qual é a melhor obra especialmente se não puder ser avaliada em termos financeiros, quanto aos aspectos de economia de energia, melhores condições térmicas e acústicas, etc. Algumas das vantagens intangíveis citadas pelo autor são: espaço livre, luminosidade, entre outros, dizendo que alguns tipos específicos de indústrias precisam de locais com estas características, e que as estruturas em casca podem melhorar o estado de espírito dos trabalhadores no local.

Tais afirmações podem ser comprovadas em trabalhos que vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo nesta direção. Em 1965, Dante Bini construiu a primeira estrutura em casca usando um método "automático" que consistia em inflar balões para servirem como fôrmas e depois realizar a concretagem sobre estes. Várias foram a suas

experiências, e o método foi patenteado como **Binishell**. O autor comprova a eficácia do processo construtivo mostrando que apenas 3, de aproximadamente 1600 estruturas deste tipo construídas em 23 países em todo mundo, apresentaram sérios problemas e tiveram de ser reconstruídas entre as décadas de 70 e 90.

Um trabalho importante nesta área está sendo desenvolvido pelo Monolithic Dome Institute, coordenado por SOUTH (1999). Este instituto trabalha na construção de estruturas em casca utilizando este método construtivo, bem como na divulgação e pesquisas deste assunto.

A mecanização é tal, que vários são os exemplos de casas, indústrias e ginásios construídos neste padrão nos Estados Unidos. Na Figura 3.8 mostramos um exemplo de uma escola construída por este método, que é considerado hoje um dos mais rápidos e de menor custo para estruturas em casca de forma esférica.



Figura 3.8 – Emmett High School, Estados Unidos

Fonte: Monolithic Dome Institute

As duas cascas maiores têm diâmetro de 54,8 m e abrigam as salas de aulas e o ginásio esportivo. As três cascas menores comportam atividades extracurriculares. Dados comparativos com escolas locais mostram que houve economia de 66% no consumo de energia, sendo que na escola com estruturas em casca com 110.000 m² foi gasto durante o ano escolar de 1995-1996 a quantia de \$10.100,00 em energia, e em outra escola de formato convencional, no mesmo período foi gasto \$9.000,00 para uma área de 27.000 m².

A economia de energia é decorrente da retenção do ar quente e, portanto poderia ser considerada uma desvantagem em países quentes. No entanto, este tipo de estrutura foi construído em locais de clima quente e submetida a verificações de temperaturas internas e seus resultados foram satisfatórios. Para tal, podem ser adotadas duas soluções: a primeira consiste em usar material adequado a estas características, conforme processo construtivo descrito no item 5.3 e a segunda seria a colocação de domos na parte superior da casca, como se pode observar na casca do canto inferior direito da Figura 3.8.

Uma outra forma de construção para tornar o processo viável economicamente, foi publicada por Kaplunovich e Meyer (1982) em um artigo que mostra um sistema de construção de estruturas em casca com elementos pré-moldados, tornando o processo mais otimizado e de menor custo. Este método está baseado num sistema desenvolvido por um instituto de pesquisas de Kiev, situado na antiga União Soviética.

Melaragno (1991) considera que uma colaboração intensa entre projetistas e construtores deve ocorrer durante todo o processo para garantir a máxima eficiência, visto que devido aos métodos de construção específicos e o grau de subjetividade nas estimativas de custo podem causar problemas na estrutura e no desenvolvimento da obra, além de aumentar gastos. Pode-se citar como exemplo o caso do Opera House em Sidney.

Devemos sempre analisar com muito cuidado todas as etapas do processo para que estas sejam viáveis economicamente, visto que exigem uma série de preocupações no processo construtivo, que serão detalhadas a seguir.

Na execução dos projetos, temos que considerar em primeiro lugar as fôrmas. Segundo Ketchum (2000), o projeto e a construção de fôrmas têm a maior contribuição no custo da estrutura em casca, não só em relação ao custo do material em si, mas a forma de montagem e como levar em consideração a curvatura num mesmo elemento. Em seu texto o autor acha muito importante avaliar os mais variados tipos de fôrmas e suas vantagens e desvantagens, e descreve os principais métodos:

- **Painéis desmontáveis:** onde a fôrma é construída com painéis suportados por escoras combinadas, para que alguns painéis possam ser removidos em um ou dois dias sem afetar as escoras. Este método exige maior quantidade de mão-de-obra, sendo mais usual quando três ou quatro unidades serão construídas.

- **Fôrma de Superfície:** onde se usa madeira compensada que será curvada na forma solicitada, se não dividir as placas de madeira em tamanhos menores; um problema que pode surgir é com relação às fendas entre as placas, que podem ser resolvidas colocando-se algumas ripas de madeira nestes locais. Este método é o mais conveniente e econômico para adquirir a forma da superfície.

O autor reforça que o custo pode ser reduzido utilizando a mesma fôrma diversas vezes, nem sempre possível em caso de estruturas de formas livres, e também de grandes dimensões que não possam ter a etapa da concretagem realizada em uma única vez. Devem ser previstas juntas, que deverão ser calculadas para transferir os esforços adequadamente, tal qual fazemos para uma estrutura convencional de grande porte.

Segundo Vizotto (1993), Isler executou várias obras na Suíça incorporando a fôrma como parte da estrutura para reduzir custos. Em outros casos, como algumas obras em formatos de parabolóides hiperbólicos, reutilizou fôrmas em obras diferentes com o mesmo intuito.

Em segundo lugar, temos o tipo de material a ser utilizado. Neste trabalho o enfoque é para estruturas de concreto. Em um dos poucos livros que além de tratar a parte teórica, também destaca os principais aspectos do processo construtivo, Ramaswamy (1965) apresenta as seguintes proporções na dosagem de concreto de acordo com os vãos:

- Moderado: 1:2:4
- Grande: 1:1 ½ : 3 (necessidade de um maior módulo de elasticidade, pois em cascas maiores o problema da estabilidade é crítico e um maior módulo aumentará a resistência contra flambagem)
- Com fator água/cimento de 0,5 e resistência média a 28 dias de 17,25 MPa.

Estes valores refletem as práticas de projetos realizados na época, e conforme mostraremos a seguir experimentos realizados por Kolleger e Teixeira obtiveram valores próximos aos apresentados por Ramaswamy.

Kolleger (1989) fez um estudo na Alemanha construindo um protótipo, sendo este o melhor trabalho encontrado sobre o assunto, onde todo o processo construtivo é apresentado detalhadamente, mostrando o tipo de concreto utilizado, sua dosagem, o processo construtivo e os problemas enfrentados.

Na sua experiência ele utilizou um cimento CPII, areia e água, com o fator água/cimento 0,4. Não se fez alusão a quaisquer tipos de aditivos, entretanto KETCHUM (2000) comenta que alguns aditivos fluidificantes podem ser usados, sendo necessário cuidado para que este não fique muito líquido e prejudique a concretagem. Mas a indicação de usar um fator água/cimento baixo parece ser unânime entre os especialistas.

No trabalho de Teixeira (1999) a concretagem foi realizada através de jateamento por via seca e o fator água/cimento de 0,45, e utilizou-se uma argamassa de elevado desempenho e sem nenhum aditivo. Os corpos de prova, aos 28 dias, atingiram resistência de até 28 Mpa.

Isler (1994) compartilha da opinião que os aditivos plastificantes são importantes, podendo ajudar a tornar as cascas mais duráveis. Outro ponto convergente é que a trabalhabilidade do concreto é fator fundamental.

O grande desafio é fazer um concreto trabalhável o suficiente para construir a casca, mas não tão fluido que possa prejudicar na etapa de retirada das fôrmas, e nem que seja poroso a ponto de permitir danos às estruturas, tornando-as permeável e permitindo a carbonatação do concreto e causando sérios problemas.

A carbonatação é um dos principais problemas encontrados em reservatórios de concreto de acordo com o estudo de Matoski (1999). Esta informação é relevante, pois muitos dos reservatórios de concreto são estruturas em casca e embora estejamos tratando de coberturas de formas livres, os problemas construtivos podem ser idênticos. O problema é causado principalmente pelo alto fator de umidade nos reservatórios, no entanto uma estrutura com fatores menores também está sujeita à carbonatação devido à porosidade. É importante lembrar que uma estrutura de cobertura estará sujeita a todos os tipos de intempéries físicas e químicas, e que não será fácil à manutenção freqüente das mesmas. Novamente, nos deparamos com idéia de que o uso de aditivos pode melhorar o concreto, e ser mais adequado a utilizar nas estruturas em casca.

Em terceiro lugar, temos as fases do processo construtivo, ou seja, o lançamento, vibração, cura e retirada das fôrmas.

O lançamento do concreto é uma fase muito importante, usualmente feita através de jateamento, onde são necessários os cuidados com a não segregação do material e a forma de lançamento para não "escorrer" sobre a estrutura. Esta etapa é bastante complicada devido à ação da gravidade, como cita Ketchum (2000) em seus estudos sobre construção de cascas, destacando que a vibração deve ser um processo com controle cuidadoso, e que é adequada para produzir uma textura lisa e cobrir toda a estrutura.

Ainda com relação ao concreto, Isler (1994) aconselha que a data de concretagem seja escolhida após uma séria análise das condições climáticas, pois não é adequado executar esta etapa abaixo de 4° C e em dias chuvosos. Para locais de clima quente, como o Brasil, a situação mais crítica é quando tivermos gradientes de temperaturas elevados, e que podem causar uma grande retração, sendo que tal consideração é confirmada no trabalho de Teixeira (1999) onde foram observadas fissuras quando a superfície externa ficou exposta; como solução fez-se a caiação do protótipo e o autor sugere pintar a superfície de branco para redução do gradiente de temperatura (seus ensaios confirmam esta afirmação).

Com relação à cura do concreto, Ketchum (2000) diz que as estruturas em casca seguem o mesmo padrão das estruturas convencionais e que em climas quentes, estas superfícies estão mais sujeitas à fissuração e, portanto, deve-se tomar cuidados especiais, conforme citamos anteriormente. Ramaswamy também aconselha cuidados na cura em países de clima quente e, em alguns casos, o uso de retardador de pega é recomendado.

Por fim, Ketchum (2000) e Isler (1994) concordam que o tempo para retirada das fôrmas depende muito do construtor, e que esta operação geralmente será determinada por ensaios de deflexão da estrutura, e que se forem retiradas muito cedo podem trazer problemas de deformações às estruturas. A causa de retirada rápida das fôrmas em geral decorre de economia por parte do construtor que poderá fazer a concretagem de uma área maior em menos tempo. E neste instante a estrutura estará pronta e sujeita a todos os esforços previstos.

A ACI (1992) recomenda que para a retirada da fôrma, devem ser elaborados projetos com procedimentos de retirada das fôrmas, previamente estudados para evitar carregamentos temporários e reações no apoio.

Quanto à retirada da fôrma, Ramaswamy recomenda que esta "... deve começar com o ponto de máxima deflexão e seguir simetricamente aos pontos de mínima deflexão... É essencial garantir que as fôrmas não grudem na casca, para não resultar em grandes cargas sendo aplicadas ao concreto úmido".

Na estrutura em casca, que cobre um vão com noventa metros de comprimento, na biblioteca do Memorial da América Latina pode-se observar internamente que houve este problema de restos de concreto que grudaram na casca em vários pontos, e também notamos algumas fissuras, no entanto não podemos afirmar que são decorrentes desta falha construtiva.

RAMASWAMY (1968) cita algumas práticas para uma melhor concretagem:

- iniciar a concretagem dos pontos inferiores e ir subindo;
- desejável realizar toda a concretagem de modo simétrico, caso contrário os apoios estarão submetidos a cargas assimétricas;
- juntas de concretagem (caso necessárias) devem estar localizadas preferencialmente em zonas de tensões de compressão, e indicadas em projeto;
- caso se necessite de mais de um dia para a concretagem, esta deve ser planejada de modo a ser dividida em partes com intervalos de dois ou três dias cada, para minimizar as tensões devidas à retração.

Para auxiliar os projetistas elaboramos a Tabela 3.3, onde são indicados sucintamente os principais detalhes a serem verificados nas etapas de construção das estruturas em casca.

Tabela 3.3. Detalhes Construtivos

Etapas	Características
Fôrmas	- Painéis desmontáveis - Fôrmas de superfícies Cuidados: juntas de concretagem Obs: otimização para redução do custo
Concreto	- Fator água/cimento: 0,40 a 0,45 - Aditivos: superfluidificantes - Resistência: variável de 17 a 35 Mpa Cuidados: porosidade, lembrando-se que estas estruturas têm pouca manutenção
Lançamento	- Jateado Cuidado: segregação de material, para não afetar distribuições de tensões na estrutura
Vibração	- Garantir uma textura lisa
Cura	- Segue padrão de estruturas convencionais
Retirada da Fôrma	- Necessário realizar ensaio de deflexão, devido à pequena espessura. Obs: Etapa muito crítica para estruturas em casca, podendo levar à ruptura

Por fim, considerando a reflexão de Isler (1995) que "boas estruturas em casca são elegantes, simples e muito duráveis, utilizando o mínimo de material e energia e podem ser consideradas como uma contribuição muito útil para se resolverem os problemas hoje conhecidos", como sendo o objetivo de qualquer engenheiro projetista de estruturas.

3.5. Estado da Arte no Brasil

Zagottis (1973) publica livro com os conceitos básicos da teoria de cascas e placas, apresentando Equações de Lagrange para placas isotrópicas e Teoria de Membrana para estruturas em casca. É a primeira publicação no país enfocando o assunto e foi baseado no curso ministrado por este professor na Escola Politécnica da USP.

Lima (1974) realiza um estudo experimental da ruína de estruturas laminares, reproduzindo em laboratório vários modelos de estruturas em casca com formato parabolóide invertido apoiado em pilar central e que contribuiu tanto para avaliar o comportamento das tensões na estrutura até a ruptura, como também para mostrar uma metodologia para execução de modelos experimentais.

Machado (1980) apresenta em seu livro "Desenho na Engenharia e Arquitetura" os diversos tipos de estruturas em casca geométricas, separando-as por tipo como parabolóides hiperbólicos, conóides, entre outros; mostrando de maneira detalhada através das figuras geométricas como distribuir os esforços e o cálculo das cargas nas estruturas. Além de possuir vários exemplos de cascas construídas no Brasil e no mundo.

Pereira (1986) tem livro póstumo publicado, onde são mostradas algumas aplicações de estruturas em casca construídas pelo autor no Rio Grande do Norte, basicamente na área de reservatórios de água. Desenvolve os principais conceitos de Teoria de Membrana e formulações específicas para as cascas geométricas: esféricas, cilíndricas e cônicas.

Hanai (1992) publica livro sobre argamassa armada, apresentando informações detalhadas para projeto e execução de estruturas utilizando este material. Sua pesquisa desde a década de 1970 teve influência do professor Martinelli e tem apresentado grandes contribuições a aplicação da argamassa armada no país.

Vizotto (1993) apresenta em seu trabalho de doutorado um histórico sobre as estruturas em casca e detalha o trabalho de Heinz Isler com suas formas livres, e baseado nas analogias físicas desenvolve um programa computacional para gerar formas tridimensionais de estruturas em casca finas, utilizando os conceitos de Teoria de Membrana e o Princípio da Mínima Energia Potencial Total. Os valores obtidos foram confrontados com os resultados conhecidos na literatura e considerados satisfatórios. É um programa inovador e foi o primeiro a apresentar esta abordagem no país.

Carrijo (1995) fez uma análise numérica mostrando que o elemento finito DKT utilizado para placas também pode ser aplicado para cascas apresentando resultados satisfatórios.

No trabalho de Sedano Tapia (1999), modelos de casca quadrangular em planta com e sem domo, geradas através do programa desenvolvido por Vizotto (1993) foram analisados detalhadamente comprovando a eficácia do método utilizado. Neste trabalho alguns detalhes foram considerados, apenas como informação adicional sem medições, como: conforto térmico e acústico; sendo um dos primeiros trabalhos a ter este tipo de abordagem.

Teixeira (1999) em sua tese de doutorado executou dois protótipos com seção “tipo sanduíche” propondo um novo modelo para construção de estruturas em casca de formas livres. As formas também foram geradas através do programa computacional desenvolvido por Vizotto (1993). Este é o primeiro trabalho no Brasil em que se construíram dois protótipos para serem levados à ruptura e se compararem os valores teóricos. No primeiro modelo de planta triangular, foi estudado apenas a técnica construtiva, e no segundo modelo quadrangular, com viga de borda, os ensaios de deslocamento real na estrutura e o valor calculado mostram resultados muito próximos.

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA

A metodologia neste trabalho dividiu-se em duas partes: uma correspondente à modelagem computacional, onde se apresenta o desenvolvimento de um projeto de uma estrutura em casca de planta triangular detalhando as etapas de cálculo. E a outra parte mostrando as principais características construtivas.

4.1. Modelo Teórico

4.1.1. Projeção Triangular no Plano Horizontal

A primeira etapa deste projeto consistiu em gerar a forma plana da área a ser coberta através do programa gráfico MTool (1997), que é utilizado para geração de malhas de elementos finitos. A forma em planta escolhida foi a triangular, devido ao resultado estético e também pelos desafios a enfrentar por fugir dos modelos quadrangulares convencionais, com qual espera-se enfrentar problemas não encontrados em estruturas simétricas.

As dimensões do triângulo equilátero são de 15 metros de lado, valor considerado adequado para nossas análises. Entretanto, para uma melhor discretização dos apoios, que funcionam como ligação com outro elemento estrutural (no caso, um bloco de fundação), faremos um corte em todas as extremidades do triângulo externo, para que internamente tenhamos triângulos equiláteros menores.

No programa gráfico MTool (1997), foram utilizados somente os parâmetros geométricos para efeito de geração da malha de elementos finitos, considerando a distribuição trilinear T3, uma vez que depois de gerada e discretizada a malha, é necessário fornecer o tipo de elemento finito a ser utilizado por ser esta uma hipótese do programa Vizotto, que tem as seguintes características:

[elemento_id] [material_id] [espessura_id] [integração_id] [nó_i_id] [nó_j_id] [nó_k_id]

Depois de criado o arquivo pelo programa MTool (1997), a projeção da casca no plano horizontal já está definida.

A escolha do programa MTool (1997) deve-se à sua utilização em outros trabalhos desenvolvidos na mesma linha de pesquisa na Unicamp. No entanto, podem ser utilizados outros programas gráficos para o desenho da malha de elementos finitos em planta, e através de programação gerar um arquivo no formato texto (*.txt) com as informações referentes aos elementos desenhados. Um exemplo deste procedimento pode ser verificado em Teixeira (1999).

4.1.2. Simulação Computacional da Forma Tridimensional

A partir do modelo computacional desenvolvido por Vizotto (1993), geramos a forma tridimensional da estrutura em casca de forma livre, projetada anteriormente no plano horizontal através do programa MTool (1997). Com o arquivo de dados correspondente para o programa de elementos finitos ANSYS (1995), para posterior análise estrutural.

Segundo Vizotto (1993), foram considerados as seguintes hipóteses para a formulação do programa:

- o elemento finito adotado é triangular plano com 3 graus de liberdade, ou seja, deslocamentos lineares em cada um dos três pontos nodais situados nos vértices, para o qual a deformação é considerada constante;
- são consideradas as ações dos carregamentos concentrados, uniformemente distribuídos, peso próprio e de pressão;

- para as condições de contorno podem ser considerados quaisquer tipos de vinculações, com deslocamentos nulos ou não-nulos;

Consideradas estas hipóteses, o uso do programa pode ser feito de maneira relativamente simples, sendo necessário o conhecimento de linguagens de programação e interpretar os resultados da análise computacional. Para auxiliar neste processo, apresentamos no **Anexo B** todas as etapas da montagem do arquivo de dados no programa Vizotto (1993), além dos demais arquivos utilizados para execução deste trabalho.

É possível através do programa Vizotto, 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.

Para a montagem do arquivo de entrada utilizamos como modelo básico o descrito na tese de Sedano Tapia (1999), e nas características dos elementos apresentados na biblioteca do programa Ansys (1995), onde cada elemento finito de casca é mostrado com as hipóteses adotadas quando da formulação usada pelo software.

Após o desenvolvimento inicial deste trabalho, concluiu-se que seria mais adequada a modelagem no programa Ansys, utilizando um elemento de sólido específico para concreto armado ("Solid 65 - 3D Reinforced Concrete Solid"), por estar mais próximo a ao comportamento real da estrutura apresentando informações referentes aos diversos pontos da estrutura e não de casca ("Shell 63 - Elastic Shell") que apresenta o comportamento da superfície média.

Desta maneira, voltamos a esta etapa e modelamos novamente a forma tridimensional da estrutura em casca através do programa desenvolvido por Arcaro (2003) que utiliza os mesmos conceitos apresentados anteriormente para Vizotto (1993), mas que tem a estrutura do arquivo de saída definida para a utilização do elemento sólido.

4.1.3. Análise Estrutural

A modelagem da forma da casca tridimensional foi realizada através do programa Arcaro (2003), conforme apresentado anteriormente, e para se ter visualizações gráficas e desenvolvimento das análises estruturais optou-se por utilizar o programa Ansys (1995).

Há uma grande disponibilidade de outros programas comerciais para o cálculo de estruturas e a escolha de se utilizar o programa Ansys (1995) se deve a vários fatores, dentre os quais: resultados comprovados de outras análises de problemas de cascas obtidos através deste programa, disponibilidade de uso deste software nesta Universidade e a vasta biblioteca de elementos finitos, o que nos permite uma análise mais adequada ao nosso problema.

O elemento escolhido para o cálculo foi o "Solid 65" denominado de "sólido de concreto armado". Sua escolha foi baseada nas principais características que se adequavam ao problema deste trabalho, representar a estrutura em casca levando-se em consideração os materiais utilizados que são o concreto e as barras de aço, além de permitir a análise de fissuras e ação de temperatura. No **Anexo A** são apresentadas informações detalhadas sobre as características do elemento finito utilizado.

São aplicados diversos tipos de carregamentos que podem agir sobre as estruturas, como o carregamento gravitacional e de sobrecarga. Com relação aos carregamentos de vento, não será considerado neste trabalho por não serem predominantes em estruturas de pequenas alturas, e também por não haver uma formulação específica para este caso nas normas brasileiras.

Para a sobrecarga é considerado o valor de 15 MPa. O peso próprio é calculado automaticamente considerando-se a aceleração da gravidade de $9,8 \text{ m/s}^2$ atuando na massa da estrutura. Como características do concreto, é considerado o valor de resistência de 20 MPa.

Para a entrada de dados e definição do elemento, foram utilizados os valores da Tabela 5.4 de caracterização do material, no caso concreto e aço.

Tabela 4.1. Propriedades dos Materiais

	Concreto	Aço
E	$2,88 \times 10^4$ MPa	$2,10 \times 10^5$ MPa
ν	$2,00 \times 10^{-1}$	$3,00 \times 10^{-1}$
ρ	$2,50 \times 10^3$ kg/m ³	$7,89 \times 10^3$ kg/m ³
α	$1,00 \times 10^{-5}$ °C ⁻¹	$1,20 \times 10^{-5}$ °C ⁻¹

Com relação à parte estética e estrutural, a espessura da casca é definida após análise estrutural. Inicialmente, são considerados dois valores de espessura: 5 e 10 cm em toda extensão da casca, e após verificação dos esforços são feitas várias simulações de modo a se determinar a espessura mais adequada, considerando também que deve ter um aumento gradual da mesma nas regiões dos apoios.

Após a análise estrutural será apresentado um projeto executivo do modelo gerado, com apresentação de plantas referentes às armaduras.

4.2. Processos Construtivos

Por ser uma estrutura não convencional, têm-se poucas informações específicas sobre os processos construtivos das estruturas em casca. Deste modo, buscamos na literatura e em exemplos de obras construídas quais são os principais métodos utilizados para se construir estas estruturas. Estas informações são apresentadas com detalhes no Capítulo 6.

CAPÍTULO 5. PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE ESTRUTURAS EM CASCA

5.1. Introdução

Durante a escolha dos temas a serem abordados neste trabalho, vários foram os aspectos considerados como: definição do modelo estrutural, análise numérica, ensaios de protótipos para verificação do processo construtivo, realização de ensaios para comparação com modelos numéricos, dentre outros. A opção pelo aprofundamento na área de processo construtivo se deu por não haver muitas informações consolidadas no Brasil sobre as estruturas em casca e concluímos que esta seria uma grande contribuição deste estudo ao meio acadêmico e de projetos para o melhor entendimento das mesmas.

Após análise de vários trabalhos realizados, foi observado que os projetistas que se destacaram no desenvolvimento de projetos e na construção de estruturas em casca; dominavam não só a análise teórica, mas também as características do processo construtivo e a maneira como influenciam na geração de formas e na maior eficiência estrutural.

Desta maneira, este trabalho apresenta uma descrição detalhada de cada etapa da construção das estruturas em casca: fundação, execução de fôrmas, colocação da armadura, concretagem e acabamento, para os principais métodos utilizados em todo o mundo: método convencional, método "*air-formed*" e método pré-fabricado.

5.2. Método Convencional

5.2.1. Introdução

Este foi o primeiro método utilizado para a construção de cascas, por seguir o mesmo processo construtivo de estruturas convencionais utilizando fôrmas e escoramentos de madeira. Vêm sendo utilizado desde a década de 1920, quando surgiram as primeiras cascas, até os dias atuais, embora seu uso tenha decrescido em países desenvolvidos devido ao alto custo e ao surgimento de outros métodos. No Brasil este é o mais utilizado, mesmo com custo mais elevado.

O método apresenta algumas variações de acordo com o construtor, como por exemplo, à diferença de montagem da fôrma por Isler e Candela. Deste modo, pretende-se aqui desenvolver uma exposição com foco nas etapas do processo e não no projetista. Sempre que possível serão mostradas opções aplicadas na prática.

5.2.2. Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens deste método são:

- **formas:** como a madeira pode ser adaptada a qualquer formato, permite uma grande liberdade de formas, ainda que seja necessários um bom serviço de marcenaria e um controle bastante rígido na execução;
- **mão-de-obra:** por seguir o método convencional, não são necessários mão-de-obra específica nem treinamento para conhecimento de nova tecnologia;
- **durabilidade:** se bem construídas possuem grande durabilidade, no entanto deve se ter cuidado aonde existir juntas, para evitar infiltrações.

As principais desvantagens deste método são:

- **custo elevado em relação a outros métodos:** devido a grande quantidade de fôrmas de madeiras e escoramentos necessários, o custo torna-se mais elevado podendo tornar

inviável economicamente a construção de cascas;

- **tempo de execução:** para execução das fôrmas, como corte de material e montagem no formato da casca é necessário muito tempo em comparação com outros métodos, como o "air-formed", que pode ser montado em alguns dias;
- **desperdício de material:** a madeira utilizada na fôrma não tem utilizações posteriores, sendo necessário prever um destino a este material.

5.2.3. Fases do Processo Construtivo

Por ser este um método que permite uma grande liberdade de formas e que é usado há mais tempo, apresentaremos os passos que são similares a todos os tipos de construções, e em alguns casos poderemos mostrar algumas especificidades exclusivas de um determinado tipo de casca.

- Fundação

A definição da fundação de uma estrutura em casca segue os métodos convencionais, sendo necessária à execução de sondagens para escolha do tipo mais adequado. Um fator muito importante na avaliação deste processo é como será a conexão entre o bloco da fundação e a estrutura em casca.

Em geral, apesar de espessuras da ordem de 10 cm ao longo da casca, utiliza-se uma espessura maior nas bordas aonde haverá a transmissão de esforços da estrutura para a fundação. Segundo Melaragno (1991), esta é uma solução adotada para aproximar a condição de apoio para ser isostática e assim reduzir a incompatibilidade entre o comportamento estrutural da casca e dos elementos de apoio. Em alguns tipos de cascas, estas estruturas possuem vigas de borda que serão responsáveis por transmitir os esforços aos pilares, que por sua vez descarregam no bloco de fundação, como uma estrutura convencional.

Melaragno (1991) apresenta os três principais tipos de ligações: rótula de aço ou concreto, a conexão definida por Mesnager e a de Considère.

A primeira está apresentada na Figura 5.1, em (a) tem-se um modelo em aço e em (b) um esquema para o concreto. Em (c) é mostrado um exemplo real do modelo descrito em (a) de uma rótula de aço, para um parabolóide construído em Denver (USA) que pode ser observado em (d).

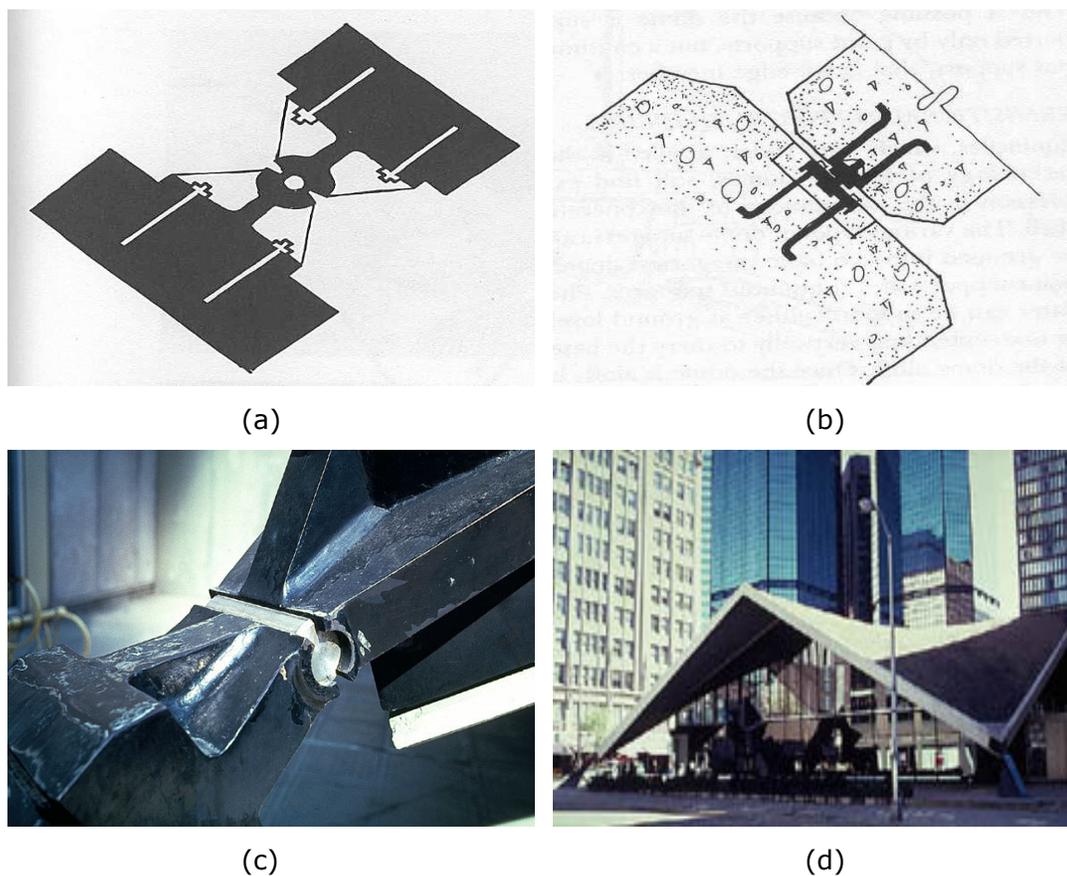


Figura 5.1 – Detalhe de Conexões entre Fundação e Estrutura

Fonte: Melaragno, 1991, p.208/209 e W. Godden Collection – University of California, Berkeley

A segunda e a terceira ligações são apresentadas na Figura 5.2, e são sugestões de configurações de armadura na região dos apoios de modo a transmitir os esforços de maneira mais adequada, definidas por Mesnager e a de Considère.

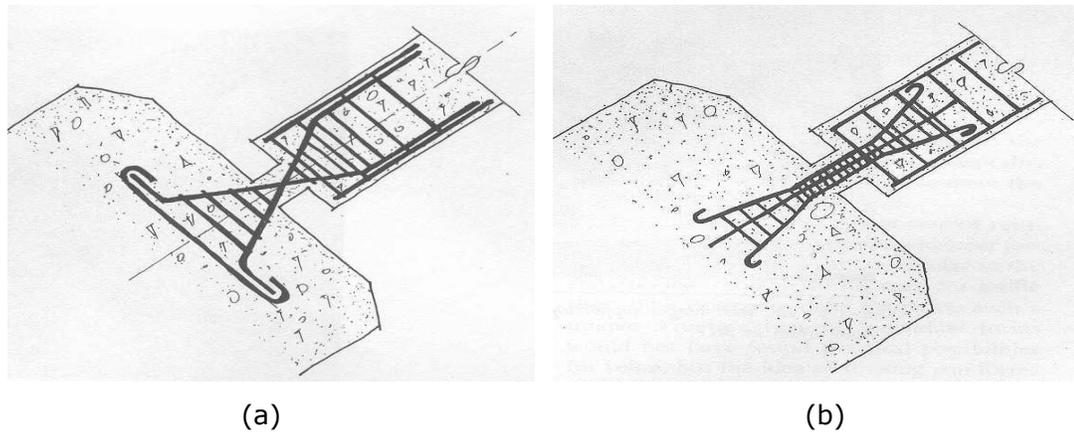


Figura 5.2 – Detalhe das Ligações Mesnager e Considère

Fonte: Melaragno, 1991, p. 209

Uma outra solução é a utilização de mecanismos articulados de aço que são mais eficientes por permitirem mais flexibilidade. Na Figura 5.3 é mostrado um exemplo deste tipo de conexão adotado para uma casca formada por elemento de seção de uma esfera apoiado em três pontos e com um vão de aproximadamente 47m entre apoios.

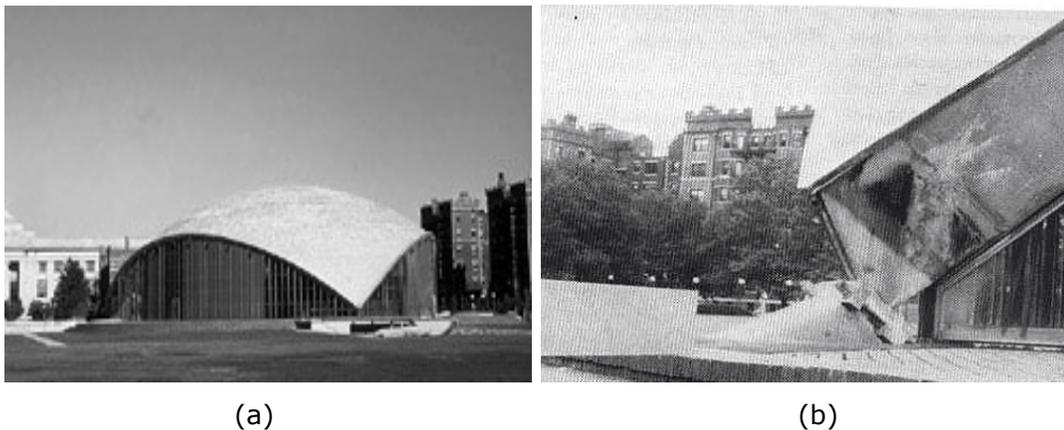


Figura 5.3 – Exemplo de Ligação com Aço

Fonte: W. Godden Collection – University of California, Berkeley e Melaragno, 1991, p.210

Para resolver o problema de fundações das cascas a serem construídas nos pobres solos de argilas orgânicas, que são muito compressíveis devido a grande quantidade de água; Felix Candela, segundo FABER (1970) utilizou pequenos parabolóides hiperbólicos como elementos de fundação. Conforme se pode observar na Figura 5.4, em (a) é

apresentada à fôrma padrão utilizada para o elemento de fundação, em (b) a execução do bloco de fundação para receber a casca, em (c) a casca de concreto com 15 cm de espessura que será sobreposta na terra compactada e por fim em (d) o bloco de fundação pronto e com os ferros que servirão de engate para a estrutura. No caso específico da estrutura mostrada na Figura 5.5, os pilares irão descarregar nestes blocos de fundações.

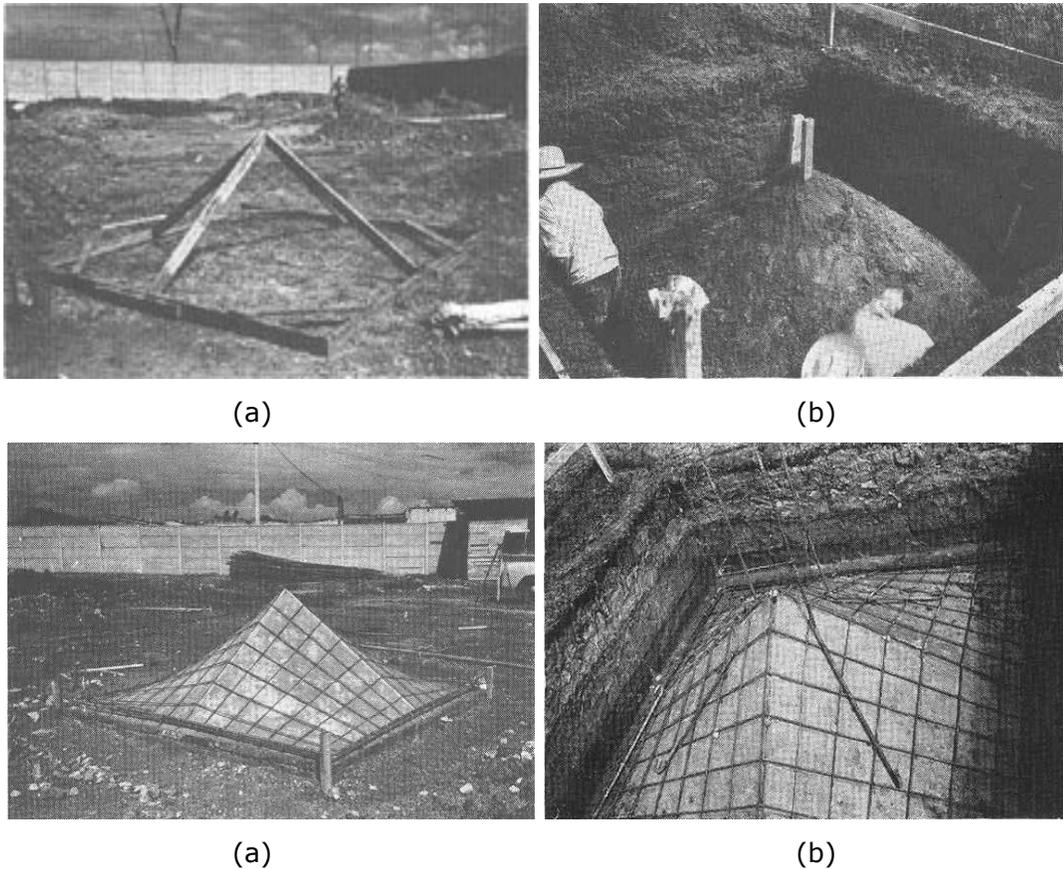


Figura 5.4 – Execução da Fundação em Casca

Fonte: Faber, 1970, p.115

Na Figura 5.5 são apresentadas fotos de pilares ligados a fundações em cascas mostradas na Figura 5.4, sendo que em (a) temos o detalhe do pilar na base e, em (b) a conexão com a casca no topo do pilar.

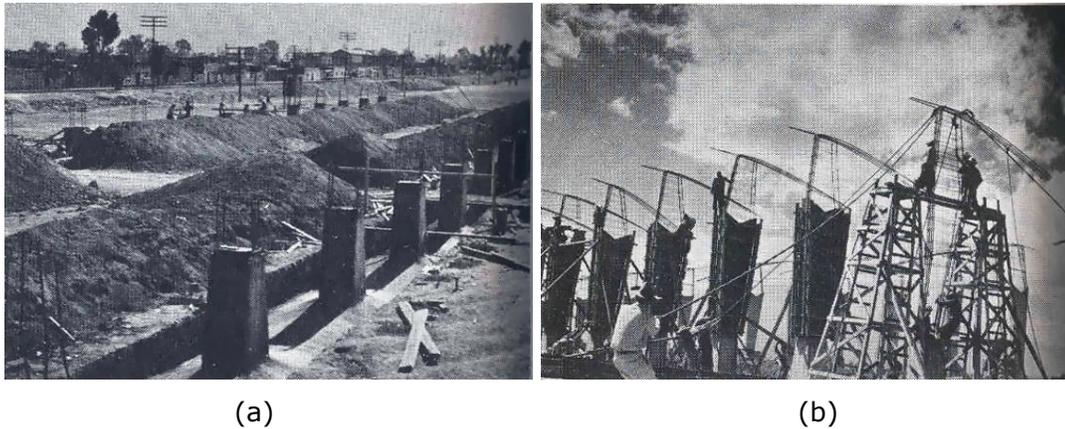


Figura 5.5 – Detalhe do Pilar da Fundação

Fonte: Faber, 1970, p.90

- Fôrmas

Definida e executada a fundação e sua ligação com a casca, inicia-se a execução das fôrmas que neste processo é feita de modo artesanal, ou seja, o projetista detalha as dimensões e colocações de cada componente e deve haver em campo uma equipe de marcenaria para sua execução. A solução mais utilizada atualmente é a aplicação de placas de "madeirit" que se moldam mais facilmente à curvatura das cascas, e também permitem uma textura mais adequada quando da retirada da fôrma.

A primeira etapa para montagem da fôrma é o corte da madeira e colocação das "vigas" que estarão escoradas, conforme podemos observar na Figura 5.6 em (a) na direção longitudinal e posteriormente são colocados os caibros de madeira na direção transversal. Na seqüência em (b) é mostrada a etapa seguinte onde estão sendo colocados as ripas e os painéis de "madeirit", que deve ser cortado um a um para adequação à geometria da casca. Segundo Isler (1994) este procedimento de cortar cada painel em diferentes ângulos torna o processo mais caro e trabalhoso, mas que de acordo com sua experiência podem ser colocados painéis sem os cortes, desde que se encontre a linha exata onde se deseja iniciar.

O exemplo mostrado na Figura 5.6 (a) é de uma estrutura em casca projetada por Isler com várias estruturas repetidas de mesmo formato. Desta maneira, para redução de custo se a técnica chamada de painéis removíveis, onde os painéis estão apoiados por escoras, e depois de alguns dias movidos para servir de fôrma a outra unidade. Segundo

Ketchum (2000) deve se ter o cuidado em manter alguns painéis, até o concreto atingir a resistência adequada e não provocar deflexões excessivas.

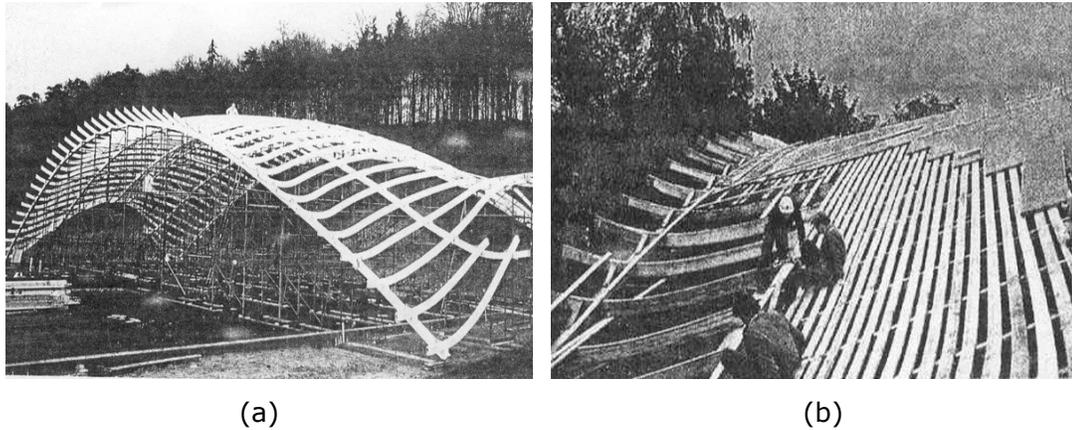


Figura 5.6 – Montagem da Fôrma

Fonte: Isler, 1989, p. 77 e 68

Na Figura 5.7 apresentamos outro caso de otimização da utilização das fôrmas. Em (a) pode-se observar a primeira fôrma sendo montada, em (b) nota-se abaixo uma unidade onde a etapa de concretagem já foi realizada, e na unidade acima apenas a fôrma e a terceira parte aguarda a montagem da fôrma.

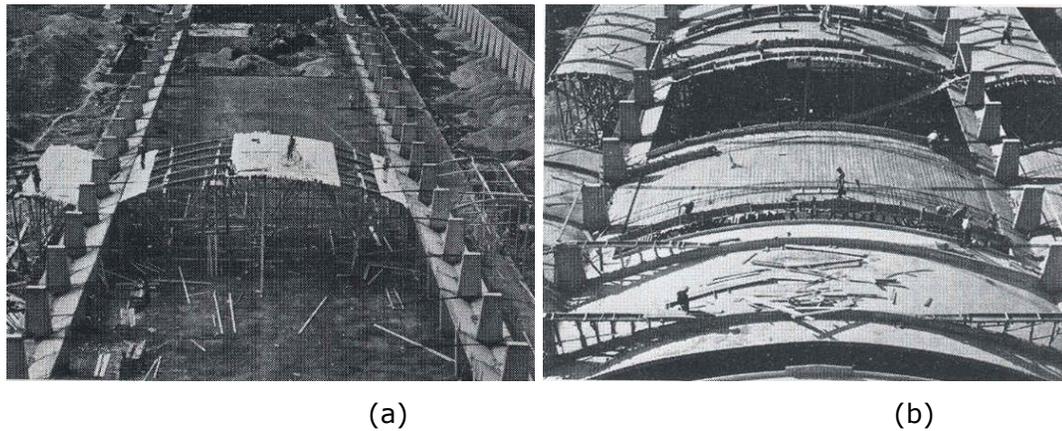


Figura 5.7 – Exemplo de Reutilização da Fôrma

Fonte: Faber, 1970, p.90

Na Figura 5.8, tem-se o exemplo de uma casca onde se optou por montar a fôrma sobre painéis, mas sem reutilização da mesma. Pode-se observar ainda que neste caso os painéis foram cortados de vários tamanhos de modo a se adaptarem à geometria da casca.

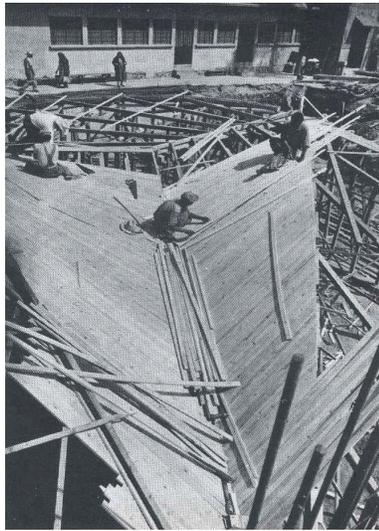


Figura 5.8 – Montagem da Fôrma

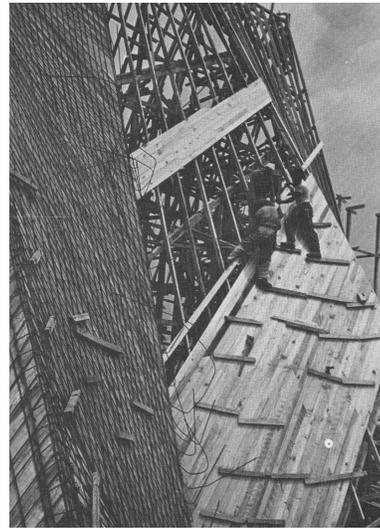
Fonte: Mark Ketchum, 2003.

Uma outra maneira de se montar uma fôrma de madeira foi adotado por Candela. A montagem inicial é a mesma apresentada anteriormente, no entanto ao invés de se utilizarem painéis retangulares, foram utilizadas ripas colocadas lado a lado para depois receber a armadura e o concreto. Este é um processo ainda mais trabalhoso que o primeiro e que exige mais cuidado na execução, pois em virtude da maioria das estruturas em casca que cobrem grandes vãos serem em concreto aparente, o aspecto estético no interior destas estruturas é bastante importante. Na Figura 5.9 em (a) mostramos o início do trabalho de colocação das ripas, e como se pode notar é bastante artesanal e demorado, em (b) tem-se outra casca em formato de parabolóide hiperbólico, e podemos notar a dificuldade para colocação das ripas e também aos riscos a que estes trabalhadores eram submetidos.

Como vantagem em utilizar esta técnica verifica-se que não é necessário se preocupar com a logística da montagem e concretagem, como no caso de Isler, e também por se adaptar a qualquer tipo de estrutura em casca, por outro lado os gastos com material e o tempo de execução são maiores.



(a)



(b)

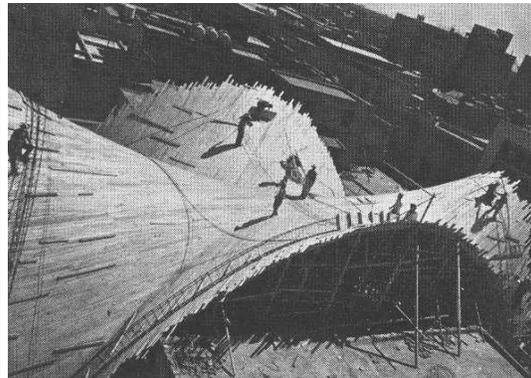
Figura 5.9 – Detalhe da Montagem da Fôrma

Fonte: Faber, 1970, p. 203 e 106

Na Figura 5.10 é apresentado em (a) uma vista interna da fôrma e do escoramento de uma em casca construída por Candela e em (b) uma vista externa de uma estrutura pronta para receber a armadura e depois o concreto, com destaque para a excelente qualidade do trabalho de marcenaria.



(a)



(b)

Figura 5.10 – Vista Interna e Externa de uma Fôrma de Madeira para Casca

Fonte: Faber, 1970, p. 53 e 156

Na Figura 5.11 temos o exemplo de uma estrutura em casca construída no Brasil, o Memorial da América Latina, onde se utilizou este método construtivo, e onde se pode notar

a quantidade de escoramento e fôrma necessária para esta estrutura de grande porte. O Salão de Atos é composto de uma casca com 65 metros de vão livre e está apoiada de um lado a uma viga de 4,5 m de altura, e do outro há uma parede e sua espessura no centro é de 25 cm. Informações obtidas junto a Fundação do Memorial da América Latina dizem que muita madeira foi utilizada e não se sabia o que fazer com este material depois de concluída a obra. Segundo o Engenheiro-Chefe do Canteiro, Walter Makassian, "... Os dias de concretagem das cascas foram verdadeiros dias de aflição: teve que ser criado um deslizamento das fôrmas, as usinas de concreto tiveram que trabalhar continuamente, graças à segurança de geradores...".



Figura 5.11 – Detalhe de Escoramento de uma Estrutura em Casca

Fonte: Cortesia Fundação Memorial da América Latina

Pode-se notar que esta é uma etapa lenta e trabalhosa e que, se mal planejada, pode levar a um grande desperdício de material e aumento do tempo de execução, e por conseqüência a um aumento do custo.

- **Armadura**

Com a fôrma pronta, segue-se a execução da casca, ou seja, a colocação de armadura e concretagem.

Em geral, as estruturas em casca requerem somente armaduras construtivas, e apenas em algumas situações as estruturas necessitam um reforço maior. Isto se deve ao fato, de as cascas serem submetidas predominantemente a esforços de membrana e não sofrerem flexões.

Na Figura 5.12, em (a) temos a planta da armadura onde se pode notar a presença de armadura de reforço nas seções de inflexão da casca e, em (b) a estrutura real. A armadura de borda pode ser observada na Figura 5.10. Na Figura 5.13 é apresentado outro exemplo desta etapa de execução da casca.

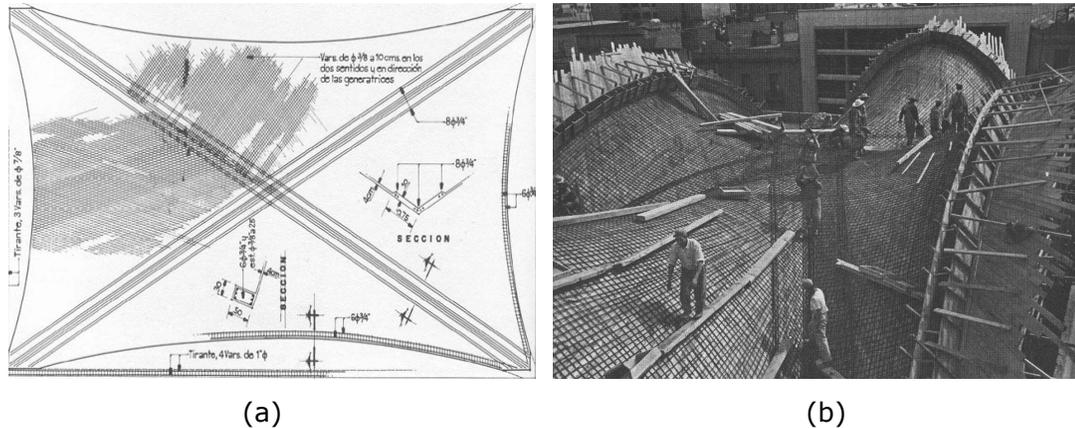


Figura 5.12 – Detalhe da Armadura

Fonte: Faber, 1970, p. 155

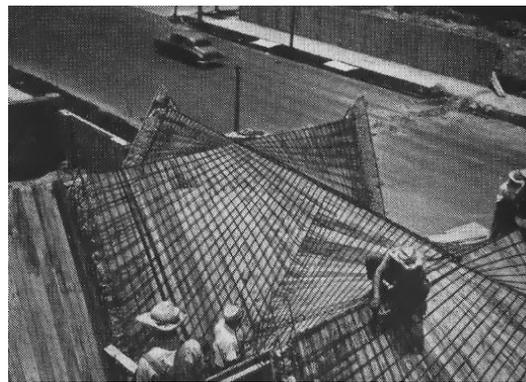


Figura 5.13 – Exemplo de Armadura para Parabolóide Hiperbólico

Fonte: Faber, 1970, p. 106

Em algumas situações são projetadas aberturas na parte superior destas estruturas, para a execução segue-se o mesmo procedimento da estrutura convencional, ou seja, delimitam-se as bordas com madeiramento e não se concretiza esta região conforme podemos ver na Figura 5.14. Em geral, nestas regiões se projeta algum tipo especial de reforço na armadura, desta forma podem ser evitadas fissuras.

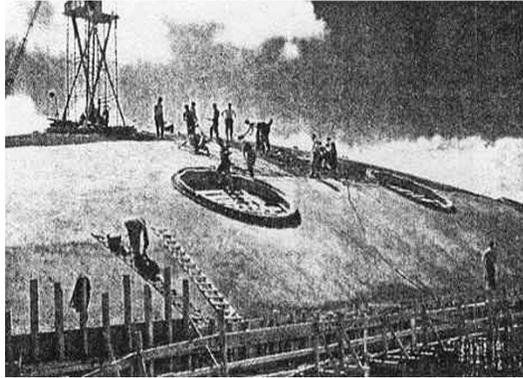


Figura 5.14 – Exemplo de Aberturas na Casca

Fonte: Isler, 1989, p. 51

- Concretagem

Com a armadura colocada, inicia-se a fase de concretagem. Esta é uma fase bastante crítica e requer um planejamento cuidadoso para que não se tenham custos maiores do que o previsto e nem problemas estruturais.

O primeiro aspecto a ser considerado é o tipo de concreto a ser utilizado, este deverá ser definido pelo engenheiro de acordo com a resistência desejada. Conforme apresentado há informações na bibliografia de que se deve ter um fator água-cimento entre 0,40 e 0,50 para manter a trabalhabilidade e várias sugestões quanto à composição do concreto.

A característica do concreto a ser utilizado está relacionada à espessura da casca. De acordo com Isler (1994), muito se discute sobre qual o volume de concreto necessário, e que de acordo com sua experiência, cascas com no mínimo 2,0 cm de espessura podem ser construídas sem problemas com a carbonatação. Há que se considerar que alguns utilizam argamassa armada para a construção de estruturas em casca.

O ideal é que a definição da espessura seja considerando todos os esforços que atuam na estrutura. Atualmente, com os programas de cálculo em que é possível realizar quaisquer simulações, este trabalho é facilitado. Tal procedimento foi utilizado na elaboração do modelo teórico deste trabalho.

Definido o material a ser utilizado, inicia-se a concretagem que, se possível, deve ser feita continuamente, caso contrário devem ser previstas juntas em projeto. É importante que a equipe esteja preparada para uma longa concretagem, e se o concreto for usinado prever o fornecimento para todo o período. Como podemos observar na Figura 5.15 (a) e (b) a concretagem pode ser feita manualmente por muitos homens que ficam sobre a casca em posições difíceis e algumas vezes perigosas. Além disso, nota-se que a recomendação de que se execute a concretagem de baixo para cima para se evitar que o concreto escorra está sendo respeitada.

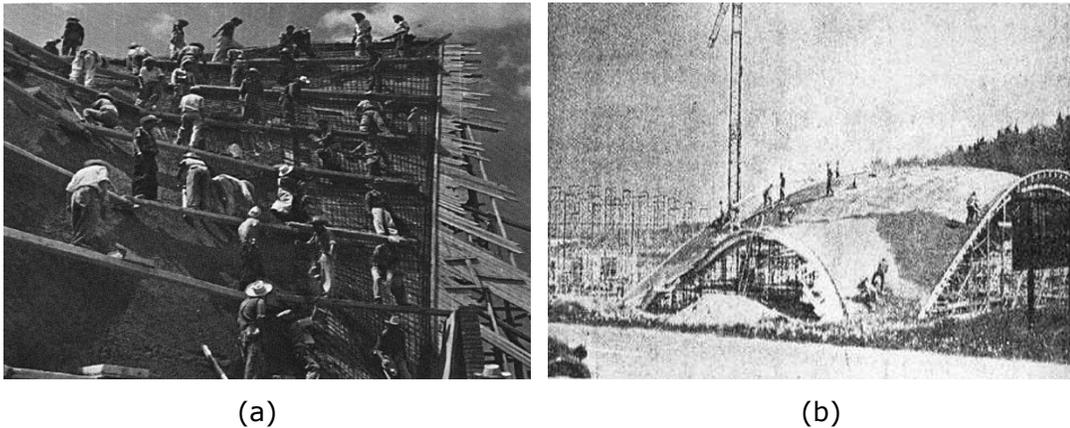


Figura 5.15 – Exemplos de Concretagem de Estruturas em Casca

Fonte: Faber, 1970, p. 107 e Isler, 1989, p.77

Atualmente é muito utilizado o concreto jateado. Neste caso deve se ter cuidado com a execução, para que não se tenham pontos de concreto segregado e que possam causar esforços adicionais em pontos localizados da estrutura que podem levar a uma instabilidade local, além de precauções para garantir que toda a estrutura tenha a espessura definida em projeto.

- Acabamentos

As estruturas construídas por este método não têm necessidade de um acabamento, como em outros casos. A maioria fica em concreto aparente, e algumas estruturas recebem pinturas externas. Estas pinturas têm finalidades estéticas e também de proteção contra a ação do sol, refletindo a luz e assim diminuindo o efeito da temperatura na estrutura. As Figuras 5.16 e 5.17 mostram dois exemplos de obras construídas respectivamente por Isler e Candela, e que utilizaram técnicas diferentes de execução de

fôrmas conforme descrito anteriormente, comprovam não ser necessária a manutenção das cascas, salvo algum problema não previsto.

Na Figura 5.16 mostramos em (a) a vista interna de uma casca de várias unidades, e que podemos ver a qualidade do concreto aparente, bem como a instalação das luminárias na estrutura, em (b) uma visão externa da casca que foi pintada de branco.



Figura 5.16 – Acabamentos Interno e Externo de Casca Construída por Isler

Fonte: Cortesia Koichiro Ishikawa



Figura 5.17 – Acabamento Interno de uma Casca Construída por Candela

Fonte: Faber, 1970, p. 221

5.2.4. Considerações Finais

A construção de estruturas em casca utilizando este método foi bastante difundida e aplicada para as mais diversas formas geométricas, em várias obras construídas em todo o mundo, provando sua eficácia; no entanto seus altos custos devidos a grande quantidade de material, mão-de-obra e tempo de execução fizeram com que sua utilização fosse diminuída à medida que novas formas de se construir foram desenvolvidas.

5.3. Método "air-formed"

5.3.1. Introdução

Este método foi desenvolvido para tentar resolver um dos principais problemas das estruturas em casca que é o alto custo das fôrmas e o tempo de execução. Em 1965, o italiano Dante Bini patenteou este método. Em seu artigo "Construction Automation" o autor relata o primeiro teste realizado para concretagem de uma casca sobre um balão inflável. Este ocorreu em Bologna, na Itália, em 4 de julho de 1965, às 16:00, e que após 3 horas a casca estava pronta. Sua forma era circular e tinha dimensão de 12 metros de diâmetro, e os resultados obtidos foram satisfatórios quanto à colocação de armaduras, mas a distribuição final do concreto foi inadequada. Apesar disto, os resultados dos testes de carregamentos realizados na estrutura foram satisfatórios e por mais de 20 anos este local foi utilizado como escritório antes de ser demolido.

Vários pesquisadores fizeram testes com este método, alguns optaram por proceder a concretagem da casca no lado externo do balão inflado, outros tentaram fazê-lo com o balão ainda no solo e depois quando inflado a estrutura já estaria pronta, mas o método mais utilizado atualmente é o que será apresentado a seguir com a concretagem internamente ao balão.

5.3.2. Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens deste método são:

- **redução de custo em relação ao método convencional:** devido à fácil execução da fôrma (apenas um balão inflável e não vários pedaços de madeira que precisam ser cortados e encaixados) tem-se uma redução de custo tanto no consumo de material quanto na necessidade de mão-de-obra;
- **rapidez na execução:** estudos realizados mostram que cascas com 12m de diâmetro podem ter a estrutura pronta em 4 horas;
- **durabilidade:** se bem construídas, podem durar no mínimo 20 anos, sendo necessária pouca ou nenhuma manutenção;
- **economia de energia:** como estas cascas tem um formato esférico, o ar quente sobe e se redistribui para o interior da mesma. Este fator é bastante considerado em países

frios, onde se necessitam aquecedores dentro das edificações. Segundo Zimmerman (1986), as baixas perdas por infiltração, os altos valores de insolação (grande área de contato) e as propriedades térmicas do material combinadas produzem uma estrutura que requer 1/3 a 1/2 da energia necessária para um prédio convencional;

- **estruturas mais resistentes a cargas dinâmicas:** como estas estruturas tem uma aerodinâmica adequada, o vento se distribui ao longo de toda a superfície atuando de modo menos intenso. Em regiões dos Estados Unidos onde cascas sofreram ações de vendavais e abalos sísmicos, estas resistiram mais que as estruturas convencionais e não foram levadas à ruína.

As principais desvantagens deste método são:

- **limitação das formas:** por terem como base a utilização de balões, são possíveis apenas as formas semelhantes aos balões ou que se consiga simular através destas. Normalmente são formas esféricas, cilíndricas, cônicas. Atualmente se conseguem bons efeitos com a junção de vários balões, ou com o corte de algumas seções, entretanto deve se ter especial atenção à transferência de tensões nestes pontos de transição para não haver instabilidade local ou abertura de fissuras;

- **mão-de-obra especializada:** este é um método em que os profissionais que irão trabalhar devem ser bem treinados, além de serem necessários equipamentos específicos.

5.3.3. Fases do Processo Construtivo

- **Fundação**

A primeira etapa deste processo construtivo é a colocação de uma viga curva de concreto armado no solo onde será fixado o balão a ser inflado, funcionando como fundação, denominado de "*foundation ring*", e que tem o diâmetro da estrutura desejada. Uma das vantagens destas estruturas é que podem ser aplicadas a vários tipos de solos, sem necessidade de fundações profundas. Na Figura 5.18 observamos as diversas etapas para execução deste anel da fundação: primeiro a locação da fundação com formas de madeira, depois o detalhe da armadura com os estribos e mais quatro ferros seguido da concretagem e por fim a dobra dos ferros verticais.

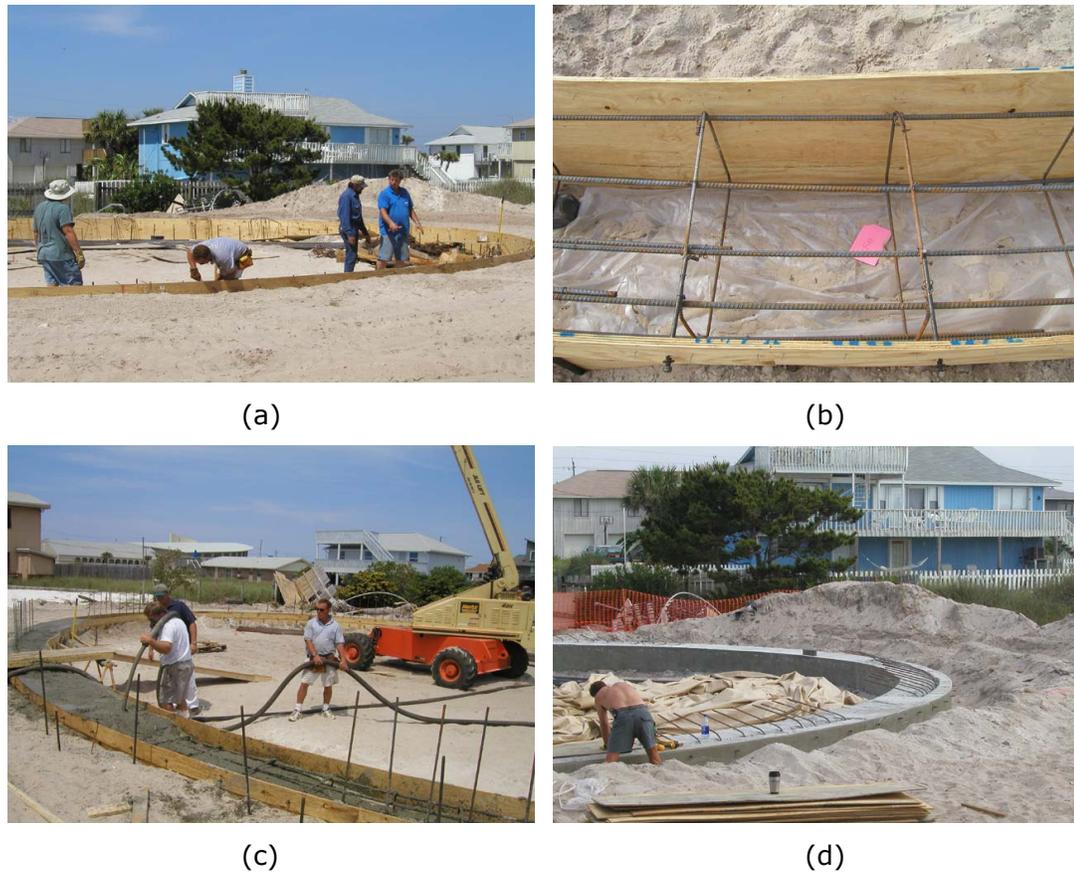


Figura 5.18 – Execução do Anel de Fundação

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2002.

Segundo instruções do Monolithic Dome Institute (2003), o concreto utilizado na fundação deve ter resistência mínima aos 28 dias de 20,6 MPa. É importante ressaltar que esta é uma informação referente a projetos nos Estados Unidos e que foram considerados como carregamentos: peso próprio, sobrecarga, ação do vento e de abalos sísmicos.

Um detalhe muito importante é a ferragem que está na vertical na Figura 5.18(c) e sendo dobrada na Figura 5.18 (d), esta tem a função de encaixar a casca de concreto com a viga da fundação.

- Fôrma

Em seguida faz-se a preparação para inflar o material que servirá de fôrma, em geral um plástico de polivinil (PVC) com náilon ou poliéster, conforme apresentado na Figura 5.19. O balão deverá ser fabricado especialmente para a construção, exceto em casos

planejados onde várias cascas de mesmas dimensões serão executadas em série. Nesta etapa alguns cuidados devem ser tomados como:

- estudo prévio para definição da pressão necessária para inflar o balão de modo que se tenha uma transição suave, e que ao final este apresente uma superfície rígida e sem oscilações para que a concretagem ocorra de maneira adequada;

- colocação de uma porta de entrada no balão ligada a um túnel com outra porta, de modo que os funcionários entrem no ambiente para concretagem sem alterar a pressão interna do balão;

- outro cuidado é para que o balão não se desprenda do anel, o que se denomina "*uplift of the footing*" destruindo a cobertura. A maior causa deste problema é a utilização de uma pressão excessiva no balão, considerando que depois de inflado o ar continua sendo mantido até a concretagem.

Inicialmente o plástico a ser inflado é espalhado e estendido até o anel, esta etapa pode ser feita com muitas pessoas ou com a ajuda de um guindaste, conforme se pode observar na Figura 5.20. Na Figura 5.21 apresentamos alguns detalhes da fixação do balão na fundação e o túnel de transição entre o meio exterior e o interior do balão. Este processo é mais demorado do que do que o procedimento de inflar o balão. Em especial, no caso do anel mostrado na Figura 5.19 e 5.20 (a), foram cinco dias para a preparação e apenas 30 minutos para inflar o balão completamente.



Figura 5.19 – Material da Fôrma

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2002



(a)

(b)

Figura 5.20 – Colocação do Balão

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2002 e Bob Brooks, 2003.



(a)

(b)

Figura 5.21 – Detalhe da Fixação do Balão no Anel da Fundação

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2002.

Na Figura 5.22 são apresentadas duas cascas em fases diferentes: em (a) o balão está sendo inflado, e em (b) a forma está pronta para início da execução da concretagem. Na Figura 5.23 mostra-se o ambiente interno do balão.



(a)

(b)

Figura 5.22 – Balão Inflado

Fonte: Cortesia Bob Brooks, 2003 e Valerie Sigler, 2002.



(a)

(b)

Figura 5.23 – Vistas Internas

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2002.

- Execução da Casca

Após se inflar o balão, inicia-se o processo de execução da estrutura em casca, visto que o balão funciona como uma fôrma. O método que apresentaremos aqui considera a concretagem internamente ao balão. Alguns executores o fazem externamente, mas é consenso de que a primeira maneira é, mas eficaz por proteger o concreto de retração e permitir o trabalho mesmo em condições climáticas adversas.

Wilson (1986) afirma que a camada de poliuretano tem as funções de fornecer isolamento da estrutura externa, garantir estabilidade à estrutura inflada e permitir a colocação da armadura e que para tal deve ter espessura mínima de 5,1 cm.

Deste modo, primeiramente deve-se aplicar uma camada de espuma de poliuretano no balão. Este material é um líquido formado de dois compostos químicos (MDI e POLIOL) que reagem entre si e como produto final resulta uma espuma. Esta deve ser aplicada através de um gás que, após contato com o ar, se expande e endurece, sua expansão chega a 200% do volume inicial. Este produto é utilizado devido a suas vantagens como: excelente adesão a vários tipos de materiais, como concreto, PVC e alvenaria; isolante térmico e acústico, permitindo pintura sobre sua superfície. Há tipos específicos de espuma para regiões de climas quentes e frios. A aplicação deste material é apresentada na Figura 5.24.



Figura 5.24 – Aplicação da Espuma

Fonte: Cortesia Poly-urethane, 2003 e Buildart, 2003.

Durante a aplicação devem ser tomados alguns cuidados como:

- apenas aplicar a espuma em superfícies secas, caso contrário haverá problemas de aderência com o plástico;
- aplicar 1/3 da espessura desejada, para após a expansão chegar ao valor adequado,
- proteger o chão com plástico, para não ter problemas com umidade.

Com a secagem do material, que demorará algumas horas, forma-se uma superfície rígida que servirá como base para a armadura e posterior concretagem. Para a colocação da armadura, são usados pequenos fixadores de metal e sobre estes se distribuem os ferros da maneira desejada. O detalhe de um fixador é mostrado na Figura 5.25.

A Figura 5.26 mostra a colocação de armadura em duas cascas diferentes, em (a) vemos que são traçadas as direções horizontais e a partir destas as verticais. Na seqüência

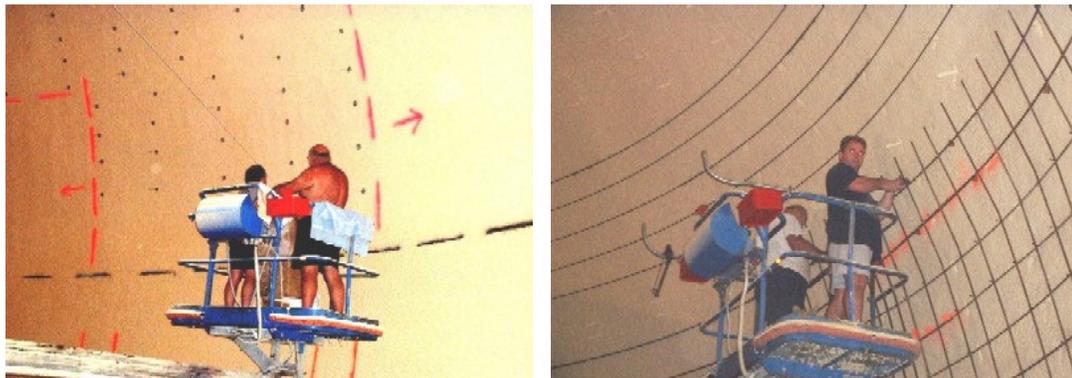
pode-se observar que as barras na direção horizontal já estão colocadas, seguindo-se a colocação das barras na vertical. Em (c) apresenta-se como se a delimitação das armaduras nas futuras aberturas e em (d) o mesmo local com a armadura já colocada e reforçada.



Figura 5.25 – Fixadores para Armadura

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2002.

O Monolithic Dome Institute (2003) aconselha que as barras não devem ter espaçamento superior a 38 cm ou 5 vezes a espessura da casca.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 5.26 – Colocação da Armadura

Fonte: Cortesia Bob Brooks, 2003 e Valerie Sigler, 2003

Um detalhe importante na colocação da armadura é o reforço no topo da estrutura. Como se pode observar na Figura 5.27, em a) tem-se um reforço radial e em b) uma casca onde não se fez o reforço por haver neste local uma abertura.

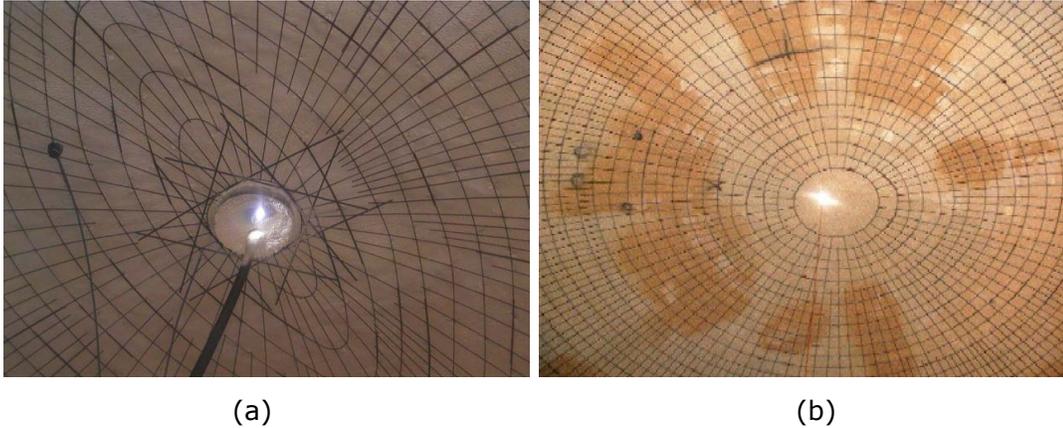


Figura 5.27 – Detalhe da Armadura no Topo

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2003 e Bob Brooks, 2003

Depois de colocada a armadura, tem-se o processo de concretagem, utilizando-se concreto jateado. Na Figura 5.28 mostramos o início de uma concretagem.

O concreto definido pelo Monolithic Dome Institute (2003), é composto de cimento, areia, agregado menor que 0,375 cm e água, de maneira a ter resistência superior a 27,5 MPa. A relação água/cimento deve estar entre 0.41 e 0.48, valor que está de acordo com o descrito na Tabela 3.3.



Figura 5.28 – Concretagem da Casca

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2003

Após a concretagem da casca, inicia-se o processo de corte da lona para se fazerem as aberturas, como portas e janelas. Este processo é realizado de maneira mecânica devido à dureza da espuma depois de expandida. Na Figura 5.29 é mostrado em (a) algumas partes da casca já cortadas e seus resíduos, em (b) temos a casca com todas as suas aberturas completas sem qualquer acabamento.



Figura 5.29 – Aberturas na Casca

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2003

A casca apresentada na Figura 5.29, depois de construída têm 10 cm de espessura na camada de espuma expandida e 12,5 cm de espessura de concreto, conforme se pode observar na Figura 5.30.



Figura 5.30 – Detalhes das Camadas da Estrutura em Casca

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2003

As estruturas em casca são curvas e muitos projetistas criam paredes internas curvas em alguns pontos para seguir o estilo da edificação. Neste caso, como podemos observar na Figura 5.31, são chumbados no chão o Flex C Trac, feito de material galvanizado onde serão encaixadas as paredes.



Figura 5.31 – Detalhes da Execução de Paredes Curvas

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2003.

- Acabamentos

Com a estrutura pronta, segue-se o acabamento interno e externo. Para a parte interna é necessário um revestimento, como o chapisco realizado em estruturas convencionais utilizando-se o trabalho manual, conforme mostra a Figura 5.32.



Figura 5.32 – Acabamento Interno

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2003.

Após 28 dias de concretagem, quando o concreto atinge a resistência desejada, inicia-se o processo da retirada da fôrma de PVC e posterior desligamento do sistema de ar. As fôrmas podem ser mantidas ou retiradas, neste projeto, especificamente, adotou-se por manter a fôrma. Apesar da espuma ter grandes qualidades, esta apresenta uma grande capacidade de combustão, de modo que alguns preferem colocar uma fina camada de concreto na superfície inferior, enquanto faz a pintura com material protetor e depois a pintura do acabamento.

Uma solução adotada para melhorar o conforto térmico, é a adoção de aditivos de cerâmica junto à tinta de látex. Este aditivo não é tóxico, é resistente ao fogo, e sua consistência de pó contém micro-esferas que refletem a luz e assim dissipam o calor. Na Figura 5.33 é mostrada a aplicação da tinta para acabamento externo.



Figura 5.33 – Acabamento Externo

Fonte: Cortesia Valerie Sigler, 2003.

E por fim, na Figura 5.34 (a) é apresentado projeto arquitetônico inicial e em (b) tem-se a estrutura em seu aspecto final.



(a)



(b)

Figura 5.34 – Casa Pronta

Fonte: Cortesia Jonathan Zimmerman, 2002 e Valerie Sigler, 2003.

5.3.4. Considerações Finais

Desde o primeiro protótipo criado em 1965, até os dias de hoje, muitas foram as evoluções neste método, devido a sua principal vantagem de ser uma estrutura monolítica, o que leva a resistir melhor a cargas dinâmicas como furacões, tornados e terremotos, isto induz a uma maior utilização, e como consequência, um desenvolvimento contínuo destas estruturas.

Atualmente as empresas que constroem estes tipos de estruturas atuam desde a concepção, projeto, execução até a venda de equipamentos para construção. Seu crescimento pode ser comprovado através da utilização em países com Estados Unidos, Itália e Austrália em virtude de menores custos e maior rapidez de execução em comparação com os outros processos construtivos, na Figura 5.34 podemos observar cascas construídas por este método para várias finalidades como: ginásios, escolas e casas.

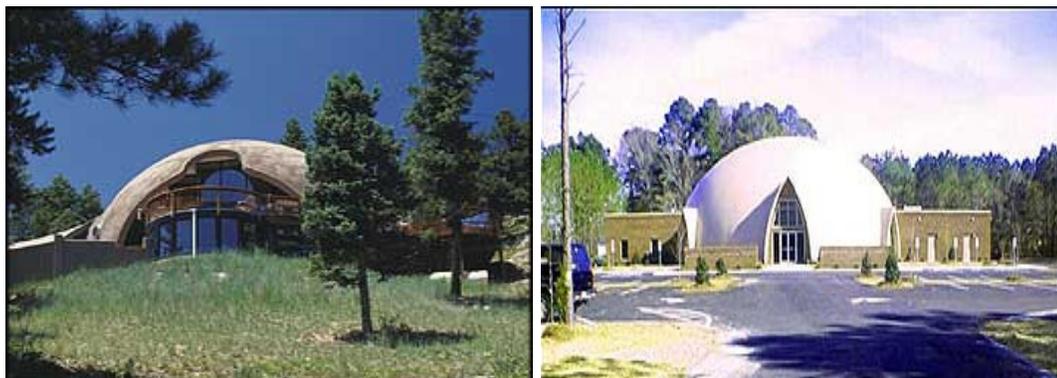


Figura 5.35 – Exemplos de Aplicação do Método

Fonte: Cortesia Jonathan Zimmerman, 2002 e Valerie Sigler, 2003.

Um exemplo de que este método tem seu lugar no futuro é um projeto em desenvolvimento pelo Monolithic Dome na Índia, onde uma grande área no estado de Andhra Pradesh terá quatro mil casas feitas de cascas de concreto com 8 metros de diâmetro e 10 metros de altura com uma área de aproximadamente 250 m². A idéia é abrigar uma empresa de software americana e que pretende nesta local abrigar a empresa, seus funcionários, escritórios, lojas, igrejas e complexo de entretenimento. Este projeto nos mostra que as cascas são competitivas quando tem um processo construtivo que utiliza a mesma fôrma várias vezes e de fácil execução em curto espaço de tempo.

5.4. Método Pré-Fabricado

5.4.1. Introdução

Uma outra maneira desenvolvida pelos projetistas para se criar estruturas em casca com custos reduzidos foi à utilização de elementos pré-fabricados. Desta maneira se economiza em custos de material e execução de fôrmas, e embora exista custo de transporte das peças a economia final é favorável.

Há diversas maneiras de se construir com elementos pré-moldados e será apresentada neste capítulo a estrutura geral aplicada a este método. Este apresenta algumas limitações decorrentes de aspectos práticos como transporte e levantamento das peças prontas e a dificuldades de montagem da estrutura para algumas formas geométricas ou de cascas de formas livres.

Ramaswamy (1968) comenta que para aplicação em larga escala, é necessário um certo grau de padronização, esta tecnologia foi utilizada com sucesso na Rússia e em países do leste europeu. Segundo o autor, este método pode ser aplicado para cascas cilíndricas e de dupla curvatura.

5.4.2. Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens deste método são:

- **redução de custo em relação ao método convencional:** por serem utilizados elementos fabricados em série e não ser necessária a execução de fôrmas em canteiro há uma grande redução de custo em mão-de-obra e material;

- **rapidez na execução:** é mais rápido que o método convencional, por não ter o trabalho com a elaboração da fôrma e por ser de fácil execução;

- **durabilidade:** se bem construídas estas estruturas possuem grande durabilidade. Deve-se ter grande cuidado na execução para que a ligação entre os elementos seja o mais monolítica possível, a fim de que não existam infiltrações que possam afetar não somente a qualidade estrutural, mas também o conforto;

- **redução de fissuras:** por serem elementos pequenos (em comparação com uma estrutura em casca monolítica) e com controle de qualidade durante o processo de fabricação as fissuras são praticamente inexistentes, caso existam devem ocorrer na ligação entre os elementos (juntas de ligação);

- **controle de qualidade:** como as peças são fabricadas em escala industrial, neste processo são realizados ensaios que garantem a qualidade do material.

As principais desvantagens deste método são:

- **limitação das formas:** nem todas as formas podem ser construídas por este método, em geral se aplica bem a cascas cilíndricas e em cascas que não tenham variação de curvatura no próprio elemento;

- **controle rigoroso:** este método exige mais que os anteriores em relação a controle na execução, para que não cause perigo ao operário. Deve ser feitos um controle rigoroso desde o planejamento de transporte das peças, içamento e montagem.

5.4.3. Fases do Processo Construtivo

- Fundação

Em geral, quando adotado o método que utiliza elementos pré-fabricados às cascas estão apoiadas sobre vigas, que por sua vez transmitem os esforços aos pilares. Desta maneira, as fundações seguem o usual.

- Execução da Fôrma

Por serem elementos pré-moldados não é necessária a utilização de fôrmas, entretanto o escoramento pode ser usado em alguns pontos para evitar deflexões e garantir a estabilidade da estrutura até estar pronta.

- Execução da Casca

De acordo com Melaragno (1991), a construção de cascas pré-moldadas pode ser dividida em três métodos de montagem:

- 1) Os elementos podem ser montados ao longo das linhas meridianas, se estendendo da base ao topo.
- 2) Os elementos são montados definidos por seus meridianos e arcos ao longo do perímetro.
- 3) Montagem dos elementos ao longo de arcos circulares concêntricos para criar a cobertura em duas camadas.

Na Figura 5.36, Melaragno (1991) mostra como deve ser a ligação dos elementos pré-moldados. Esta configuração foi utilizada por Kaplunovich (1982) para construção da casca apresentada na Figura 5.37. No caso, os elementos pré-moldados têm 20 cm de altura, sendo 3 cm a parte cheia, e mais as nervuras com 17 cm de altura, e a resistência do concreto é de 34,5 MPa.

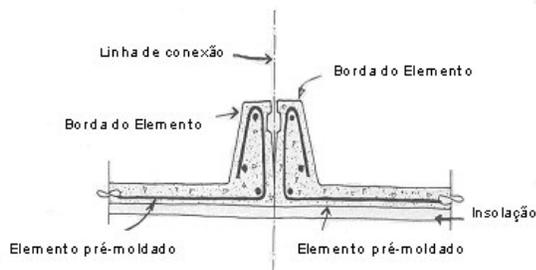


Figura 5.36 – Elemento Pré-Moldado

Fonte: Melaragno, 1991, p. 211

O processo utiliza a idéia de que cada elemento será circundado por outros três e funcionará como suporte para as unidades seguintes. Para que funcione, é necessário começar pelos apoios, e se colocar vigas nas laterais para suporte, sendo esta uma limitação da aplicação do método em algumas estruturas em casca. É importante considerar no projeto a deflexão que os painéis adjacentes causam no elemento que funciona como suporte. Na Figura 5.37, é mostrado em (a) a colocação dos painéis através de um guindaste e alguns operários ficam sobre a estrutura para coordenar o processo e posteriormente para fazer a junção entre os elementos, conforme apresentado em (b).

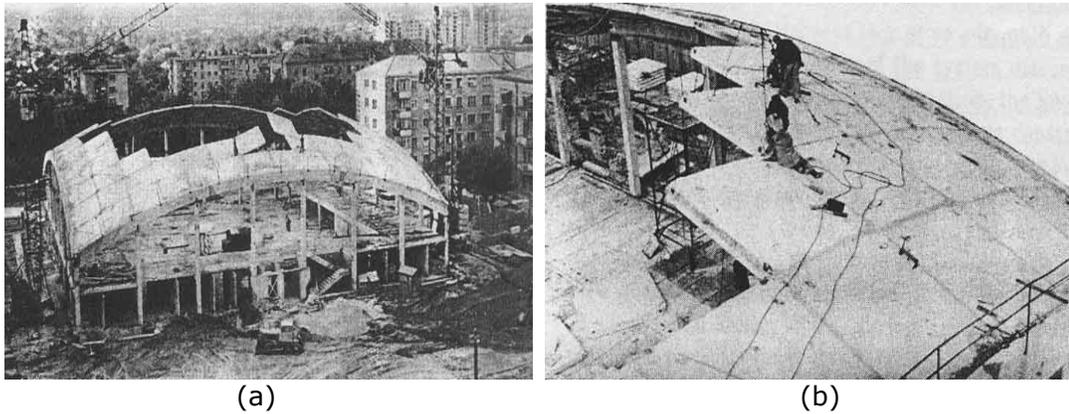


Figura 5.37 – Montagem da Casca Pré-Moldada

Fonte: Kaplunovich, 1982.

Outra maneira adotada para a construção de estruturas em casca, composta de elementos pré-moldados é a utilização de grandes elementos que são apoiados diretamente sobre as vigas de apoio da estrutura.

Neste caso, tem-se a limitação de extensão dos vãos, ou seja, deve-se ter cuidado ao projetar peças muito grandes principalmente com relação à viabilidade de transporte e içamento desta estrutura; em contrário a vantagem de custo pode não ocorrer.



Figura 5.38 – Detalhe da Colocação do Elemento de Casca Pré-Moldado

Fonte: Ramaswamy, 1970, p.536.

- Acabamentos

As estruturas em casca pré-moldadas utilizando pequenos elementos quadrangulares apresentam aspectos estéticos favoráveis, principalmente no interior da estrutura. Não sendo necessários acabamentos posteriores. Com relação à superfície externa costuma-se utilizar algum produto para isolamento e depois uma pintura, assim como ocorre com os demais métodos.

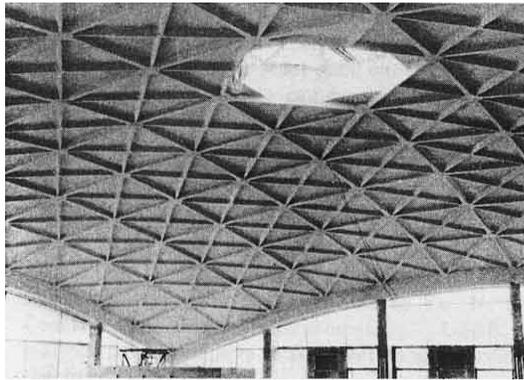


Figura 5.39 – Vista Interna de Casca Pré-Moldada

Fonte: Kaplunovich, 1982, 42.



Figura 5.40 – Vista Externa de um Casca Pré-Moldada (Aeroporto de Kiev)

Fonte: Kiev Airport, 2003.

5.4.4. Considerações Finais

As estruturas em casca formadas por elementos pré-moldadas foram bastante utilizadas na Rússia e Leste Europeu e durante a década de 1980 teve seu auge. Apesar das vantagens de custo em relação ao método convencional, o transporte das peças e a montagem da estrutura podem tornar seu custo mais elevado que o método "*air-formed*" que tem sido bastante utilizado para substituir o método convencional.

5.5. Outros Métodos

Durante o desenvolvimento das estruturas em cascas, várias foram às tentativas de tornar o processo mais ágil e com menor custo. Uma das primeiras maneiras de se tentar fugir do processo convencional foi adotada a partir de 1940, que são as chamadas cascas geodésicas.

Estas estruturas são construídas utilizando montes de terra como fôrma, onde esta superfície recebe o concreto e após a estrutura estar adequada, este monte é escavado, ficando assim apenas a casca fina. A grande vantagem é permitir que qualquer forma seja construída, no entanto para vãos muito grandes as movimentações de terra podem tornar o processo inviável.

Segundo Ketchum (2000) muitas estruturas foram construídas este método nos Estados Unidos. O método "*air-formed*" é uma evolução deste processo construtivo, que atualmente é muito pouco utilizado.

Outra maneira adotada similar ao método geodésico é construir ou montar a estrutura em casca no chão e depois levantá-la. Este método foi adotado para construir um hangar na França, conforme se pode observar na Figura 5.41, que cobre uma área de aproximadamente 6.000m².



Figura 5.41 – Hangar Marignane, França

Fonte: Ramaswamy, 1968, p. 538.

A empresa Dow Chemical, com a intenção de entrar neste mercado de fôrmas, criou um material chamado *Styrofoam®* construção de cascas de concreto. Este material era vendido em peças com formato de tiras retangulares, que eram sobrepostas formando o elemento desejado. A Figura 5.42 mostra a montagem de uma casca circular utilizando este material.



Figura 5.42 – Construção de Casca com *Styrofoam®*

Fonte: Melaragno, 1991, p. 199.

De acordo com Melaragno (1991), aproximadamente 200 cascas foram construídas com este material, apesar de ser pouco utilizada para esta finalidade atualmente. O autor afirma que a razão de um ciclo pequeno se deve mais a dinâmicas comerciais de uma empresa do que a qualidade do processo, que é comprovada por suas aplicações.

5.6. Considerações Finais

Como se pode observar, além da variação dos diferentes métodos há modificações na execução dentro da mesma categoria. Procurou-se mostrar as mais diversas possibilidades para construção de estruturas em casca utilizadas em todo o mundo.

É importante ressaltar que as estruturas em casca de concreto armado, tem tido o seu uso reduzido devido aos altos custos das formas, principalmente quando utilizado este método convencional em países desenvolvidos onde os custos da mão-de-obra e concreto são mais caros. Utilizando-se estas estruturas quando se deseja fazer uma obra de grande destaque. No Brasil, com o custo de mão-de-obra mais barato e a larga utilização do concreto em comparação com os países desenvolvidos, entendo que estas estruturas são viáveis em relação a outros materiais e projetos para cobertura de grandes vãos.

O método "*air-formed*" mostra que soluções criativas podem tornar o uso das cascas mais difundido, combinando as vantagens estruturais, ambientais e financeiras. E o método de pré-fabricado garante economia de custos aliada a um melhor controle de qualidade.

Os processos construtivos diferentes do convencional deveriam ser mais utilizados no Brasil, entretanto devido à falta de conhecimentos faz com que seja pouco utilizado. Para o caso de estruturas em casca pré-moldadas, sua utilização pode ser facilitada adaptando a tecnologia já existente no país de estruturas convencionais pré-fabricadas as cascas.

No que diz respeito ao método "*air-formed*", se faz necessário a adaptação de alguns equipamentos e materiais a este processo no Brasil. Entretanto, com algumas pesquisas para adequação a realidade dos materiais e equipamentos existentes no país e um intercâmbio de tecnologia, em pouco tempo o Brasil pode ter várias estruturas em cascas construídas com este método.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS DO MODELO TEÓRICO

6.1. Projeção Horizontal

As estruturas em casca geradas neste trabalho têm planta triangular com 15 m de lado e apoios com 75 cm. As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram a malha de elementos finitos, com os respectivos nós. Os números indicam os nós com maiores valores de altura nas bordas, e a seta indica o nó onde ocorre à altura máxima da casca.

Modelo 1

- número de nós: 228
- número de elementos: 397
- tamanho da malha: 75,0 cm

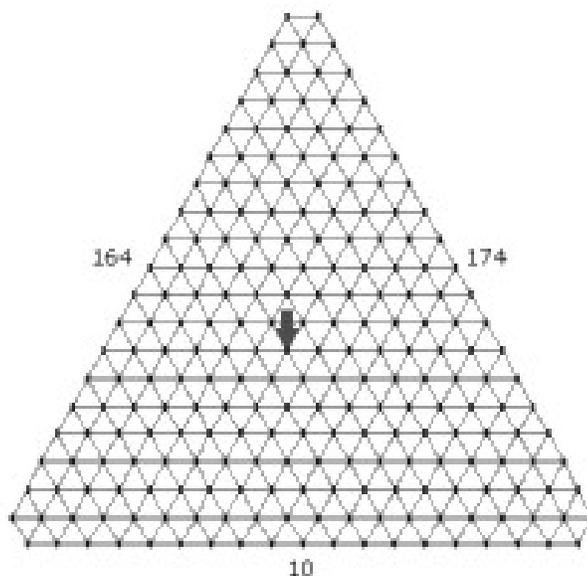


Figura 6.1 – Planta da Casca com Malha de 75,0 cm

Modelo 2

- número de nós: 852
- número de elementos: 1588
- tamanho da malha: 37,5 cm

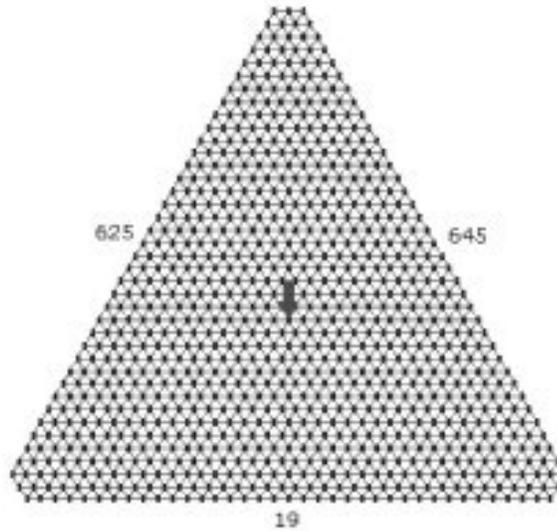


Figura 6.2 – Planta da Casca com Malha de 37,5 cm

Modelo 3

- número de nós: 1873
- número de elementos: 3573
- tamanho da malha: 25,0 cm

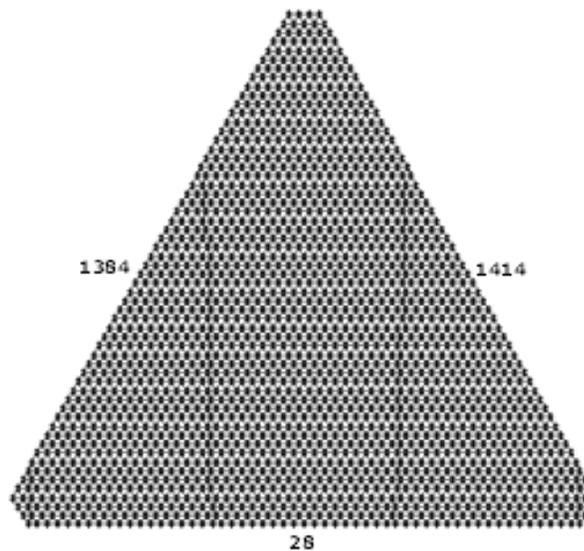


Figura 6.3 – Planta da Casca com Malha de 25,0 cm

6.2. Forma Tridimensional

Conforme descrito na metodologia, após geração da forma em planta (ver figuras do item anterior) procedemos à geração tridimensional. A seguir, mostramos as formas obtidas para três discretizações da malha de elementos finitos, e também as variações de densidade da membrana para uma mesma malha. É importante ressaltar que este valor é um parâmetro utilizado pelo programa para geração da forma tridimensional referente à rigidez da membrana e não está relacionada à densidade do concreto, que será utilizado posteriormente como parâmetro inicial para a análise numérica no programa Ansys.

Para a geração da forma tridimensional, para cada tamanho de divisão de malha de elementos finitos foram alterados os valores de densidade da membrana, que determina a altura de estrutura em casca e foram escolhidos de maneira aleatória. Inicialmente utilizamos os valores 0.050, 0.075, 0.100, 0.125 e 0.150 para saber as alturas que estavam sendo obtidas; depois interpolamos o valor na região que mais se aproximou da relação 0,20. As Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 mostram os valores comparativos para cada modelo.

A escolha do modelo ideal a se trabalhar foi baseada na altura mais adequada ao vão de 15m. Em Teixeira (1999) utiliza-se o critério de que a razão ideal entre a altura máxima da lateral pelo lado do triângulo deve ser de 1/5, fizemos esta verificação para todos os modelos, no entanto devido à altura máxima no centro do vão optamos pelo modelo F, que tem um valor mais próximo deste critério.

As pequenas variações entre pontos simétricos da casca mostrado nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 são decorrentes de aproximações do método numérico na geração da forma tridimensional e não afetam os resultados finais.

Tabela 6.1. Características do Modelo Tridimensional 1

Modelo	Densidade da membrana	Alt. Max. (m) Ponto 133	Altura (m) Ponto 10	Altura (m) Ponto 164	Altura (m) Ponto 174	Alt.lateral / vão
A	0,050	2.8924	2.5497	2.5503	2.5502	0.1700
B	0,075	3.3019	2.9100	2.9107	2.9107	0.1940
C	0,100	3.6279	3.1968	3.1976	3.1976	0.2131
D	0,125	3.9031	3.4390	3.4399	3.4399	0.2293
E	0,150	4.1437	3.5826	3.6517	3.6517	0.2434
F	0,085	3.4399	3.0314	3.0322	3.0322	0.2021

Tabela 6.2. Características do Modelo Tridimensional 2

Modelo	Densidade da membrana	Alt. Max. (m) Ponto 499	Altura (m) Ponto 19	Altura (m) Ponto 625	Altura (m) Ponto 645	Alt.lateral / vão
A	0,050	2.9209	2.5764	2.5769	2.5769	0.1718
B	0,075	3.3341	2.9400	2.9406	2.9406	0.1960
C	0,100	3.6630	3.2294	3.2300	3.2300	0.2153
D	0,125	3.9406	3.4737	3.4744	3.4744	0.2316
E	0,150	4.1833	3.6872	3.6880	3.6880	0.2459
F	0,085	3.4733	3.0625	3.0631	3.0631	0.2042

Tabela 6.3. Características do Modelo Tridimensional 3

Modelo	Densidade da membrana	Alt. Max. (m) Ponto 994	Altura (m) Ponto 28	Altura (m) Ponto 1384	Altura (m) Ponto 1414	Alt.lateral / vão
A	0,050	2,9270	2,5842	2,5846	2,5846	0,1723
B	0,075	3,3409	2,9488	2,9493	2,9493	0,1966
C	0,100	3,6702	3,2388	3,2394	3,2394	0,2160
D	0,125	3,9483	3,4837	3,4844	3,4844	0,2323
E	0,150	4,1914	3,6977	3,6985	3,6985	0,2466
F	0,085	3,4803	3,0715	3,0721	3,0721	0,2048

Pode-se observar nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 que os valores de alturas máximas obtidas para os três modelos apresentados são bastante próximos, e o modelo 3 mostra valores pouco maiores, como deveríamos esperar devido ao refinamento da malha. A Figura 6.4 mostra as várias cascas geradas até encontrarmos o modelo adequado.

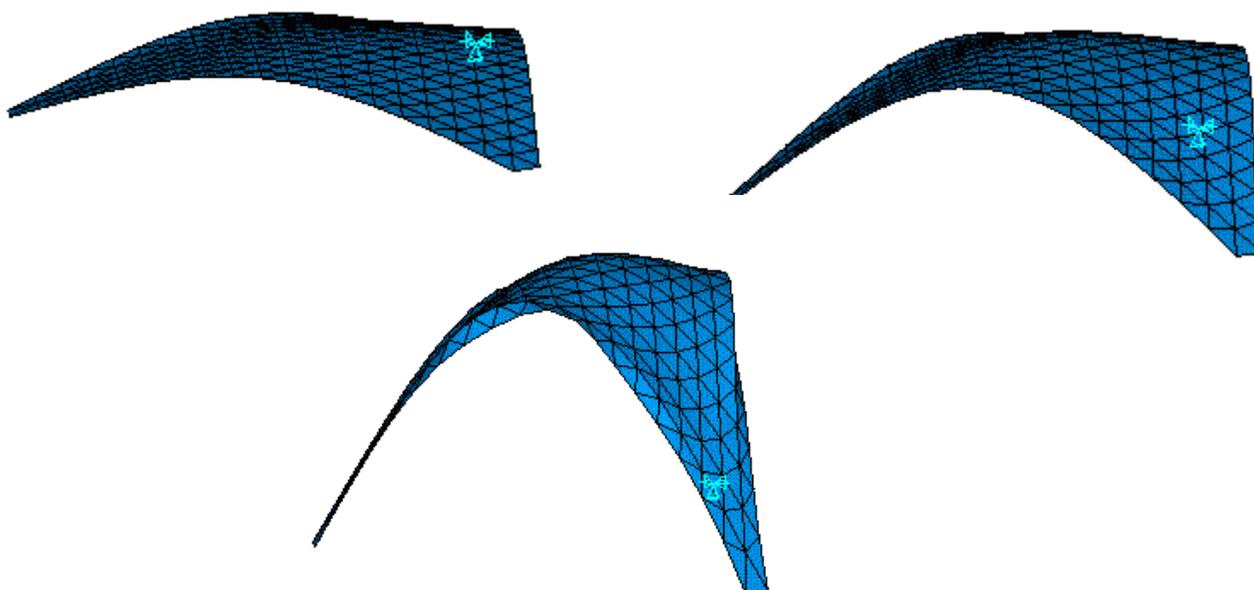


Figura 6.4 – Diversas Cascas Geradas com Malha de 25,0 cm

Após avaliação da melhor relação altura máxima e lado da casca, optou-se pelo modelo F com os três tamanhos de malhas de elementos finitos a fim de podermos comparar a influência deste parâmetro nos resultados finais das tensões e deformações da casca.

As Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 mostram diversas vistas da estrutura em casca tridimensional do modelo escolhido.

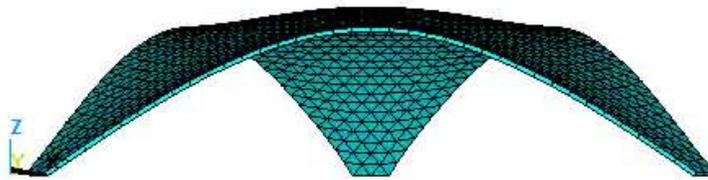


Figura 6.5 – Vista Frontal do Modelo Tridimensional

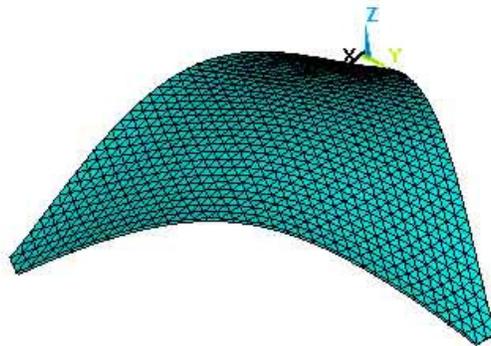


Figura 6.6 – Vista Isométrica do Modelo Tridimensional

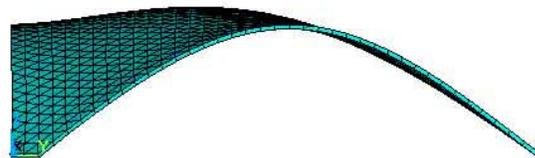


Figura 6.7 – Vista Lateral do Modelo Tridimensional

6.3. Resultados Obtidos

Conforme descrito na metodologia, em primeiro lugar foram realizados vários processamentos para se comparar os resultados para diferentes espessuras numa mesma malha de elementos finitos para se escolher o valor mais adequado, e também quais as variações destes parâmetros com o refinamento da malha.

Para facilitar a análise, os resultados serão apresentados para as tensões e deslocamentos separadamente e também divididos de acordo com a ação de cada tipo de carregamento.

Na Tabela 6.5, é mostrada a variação das tensões principais S1, S2 e S3 máximas e mínimas, variando a discretização da malha para uma mesma espessura. Conforme é possível observar, as tensões aumentam de modo considerável com a malha mais refinada, que é o modelo mais apropriado de discretização.

As tensões mínimas tiveram maiores variações que a máximas quando se variou a malha de elementos finitos. E conforme era esperado a maioria das tensões são de compressão, representadas pelo sinal negativo. O comportamento da estrutura sob o efeito do peso próprio pode ser observado através dos gráficos apresentados no **Anexo C**.

Tabela 6.5. Tensões Principais sob Ação de Peso Próprio (Unidade: 10^{-1} MPa)

Malha		e = 0,05 m				e = 0,10 m			
		75,0	37,5	25,0	Variação	75,0	37,5	25,0	Variação
S1	máx	1,3840	1,4180	1,6780	21%	1,4340	1,5230	1,8030	26%
	mín	-2,5850	-3,5290	-4,0490	57%	-2,6800	-3,6500	-4,2300	58%
S2	máx	0,0675	0,0133	0,0316	53%	0,0707	0,0375	0,0559	21%
	mín	-3,1050	-3,9410	-4,5390	46%	-3,1900	-4,0470	-4,6820	47%
S3	máx	-0,9240	-1,0870	-1,1510	25%	-0,8433	-1,0140	-1,1190	33%
	mín	-14,9920	-19,0620	-21,7090	45%	-15,3180	-19,5630	-22,3460	46%

Para uma mesma malha de elementos finitos, quando variamos a espessura os valores sofreram variação média de 5% para a malha de 75,0 cm e de aproximadamente 15% para a malha de 37,5 cm e 25,0 cm. É importante ressaltar que os valores são pequenos, embora variem.

Como se pode avaliar, um refinamento da malha de elementos finitos altera muito o resultado, enquanto que a variação de espessuras é menos significativa para o cálculo da estrutura. Este resultado confirma as informações de Vasconcelos, descrita em Teixeira (1999) de que *"a espessura da casca deve ser a mínima possível, pois como os esforços são de membrana e o carregamento predominante é o peso próprio, aumentando-se a espessura não se reduz o valor da tensão, lembrando que há limites inferiores por questões de durabilidade e técnica construtiva"*.

Para os deslocamentos, após análise de dados da Tabela 6.6 concluímos que os deslocamentos sofreram variações pequenas tanto para variação da malha de elementos finitos quanto para diferentes espessuras.

Em uma mesma discretização de malha, quando aumentamos a espessura os valores ficam praticamente constantes, as maiores diferenças foram de 4%. E para mesma espessura se refinar a malha de elementos finitos observa-se diferenças da ordem de 18% para a espessura de 5 cm e de aproximadamente 8% para a de 10 cm. Este valor está de acordo com o esperado, pois se aumentando a espessura a estrutura deve ser mais rígida e ter menos deslocamentos, no entanto deve-se ter a preocupação de que está espessura não ultrapasse os limites da teoria de cascas finas.

Tabela 6.6. Deslocamentos sob Ação de Peso Próprio (Unidade: 10^{-2} m)

Malha		e = 5				e = 10			
		75,0	37,5	25,0	Variação	75,0	37,5	25,0	Variação
DX	máx	0,0023	0,0022	0,0019	18%	0,0023	0,0024	0,0021	8%
	mín	-0,0023	-0,0022	-0,0019	18%	-0,0023	-0,0024	-0,0021	8%
DY	máx	0,0024	0,0024	0,0020	17%	0,0025	0,0026	0,0023	9%
	mín	-0,0016	-0,0015	-0,0019	19%	-0,0016	-0,0016	-0,0018	10%
DZ	máx	0,0275	0,0274	0,0264	4%	0,0275	0,0283	0,0269	2%

A partir destes resultados, criamos o modelo final onde irão atuar as ações de sobrecarga e peso próprio, para o qual iremos dimensionar a estrutura. Para tal, utilizamos a malha de elementos finitos de 25 cm, que por ser mais refinada espera-se que apresente os resultados mais próximos da estrutura real. Para a espessura foi escolhida a espessura de 10 cm, por questões construtivas.

Nas Figuras 6.8 e 6.9 são apresentadas às tensões principais e nas Figuras 6.10 e 6.11 os deslocamentos obtidos para o modelo final.

Como é possível observar, os valores são predominantemente de compressão em toda a casca, com alguns valores de tração em pequenas regiões, o comportamento conforme era esperado é igual para três regiões próximas aos apoios. Além disto, as tensões têm valores baixos e variam de maneira suave ao longo da estrutura.

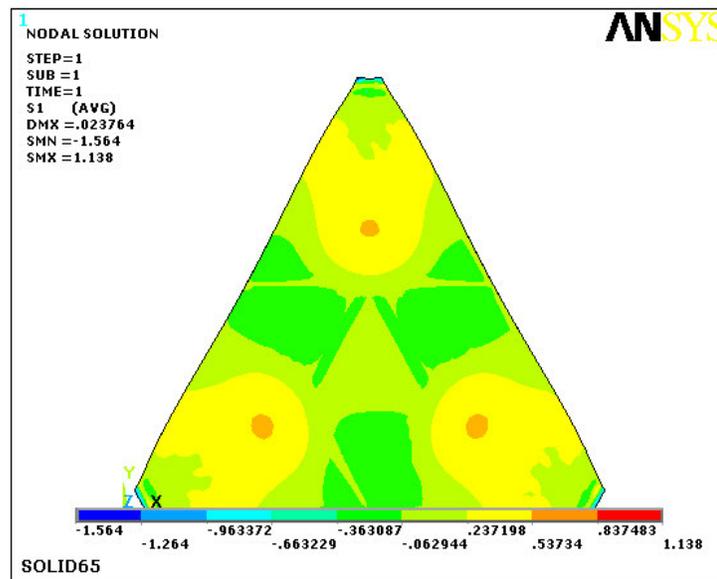


Figura 6.8 – Tensões Principais S1 para Modelo Final (Unidade: 10^{-1} MPa)

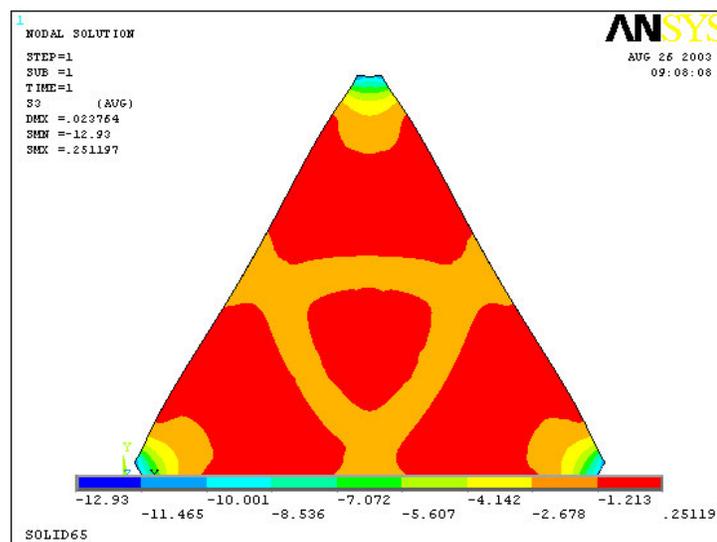


Figura 6.9 – Tensões Principais S3 para Modelo Final (Unidade: 10^{-1} MPa)

Os deslocamentos são muito pequenos, da ordem de 10^{-3} cm na direção do eixo x e de 10^{-2} cm na direção z, neste caso os valores são mais elevados na medida em que se afastam dos apoios.

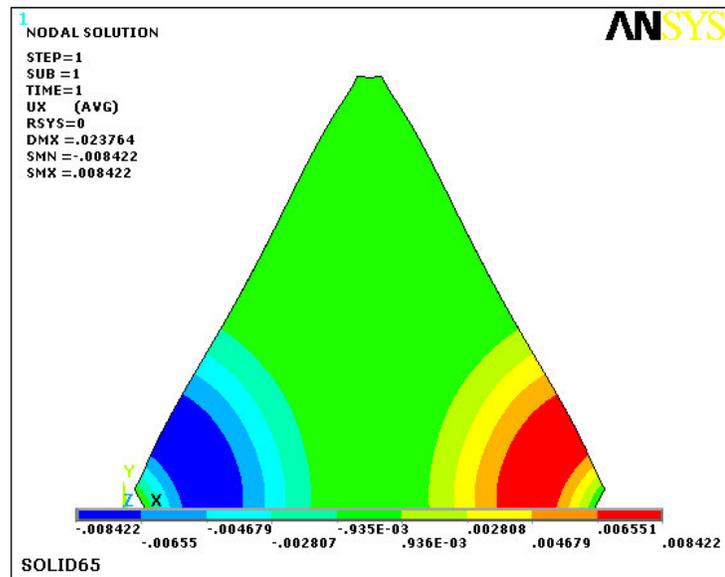


Figura 6.10 –Deslocamentos em x para Modelo Final (Unidade: 10^{-2} m)

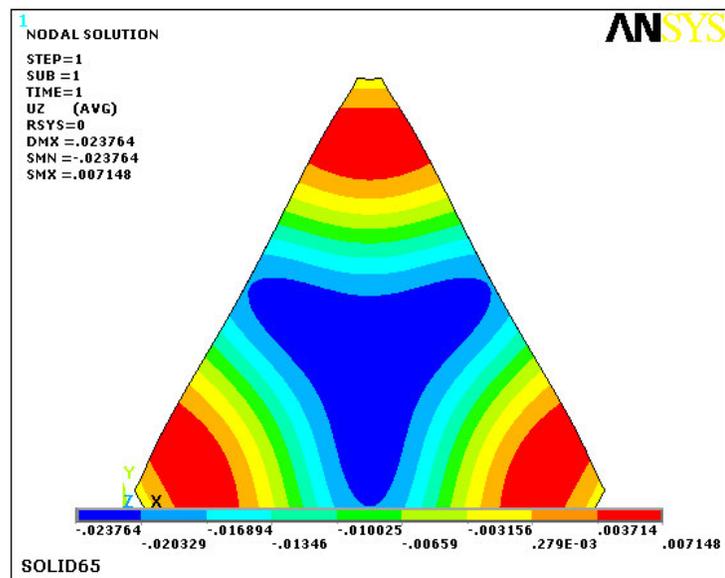


Figura 6.11 –Deslocamentos em z para Modelo Final (Unidade: 10^{-2} m)

Nos pontos das bordas destacados na Figura 6.3, que são os extremos das bordas e o ponto de altura máxima na casca, tem-se as tensões principais conforme mostra Tabela 6.7. Os valores para as tensões nos três lados da casca são praticamente os mesmos, apenas o ponto 28 tem uma pequena variação para a tensão S1 e que deve ser por posicionamento dos eixos.

Tabela 6.7. Valores das Tensões Principais em Pontos da Borda (10^{-2} MPa)

Pontos	994	28	1384	1414
S1	-0,0344	0,0345	0,0621	0,0621
S2	-0,6849	-0,3850	-0,3567	-0,3568
S3	-0,8166	-1,4216	-1,4037	-1,4039
D	0,0237	-0,1991	-0,0200	-0,0200

Os valores apresentados para deslocamento, podem ser melhor interpretados na Figura 6.12 que mostra a configuração deformada da casca, a parte azul representa a posição original e a branca o quanto deformou.

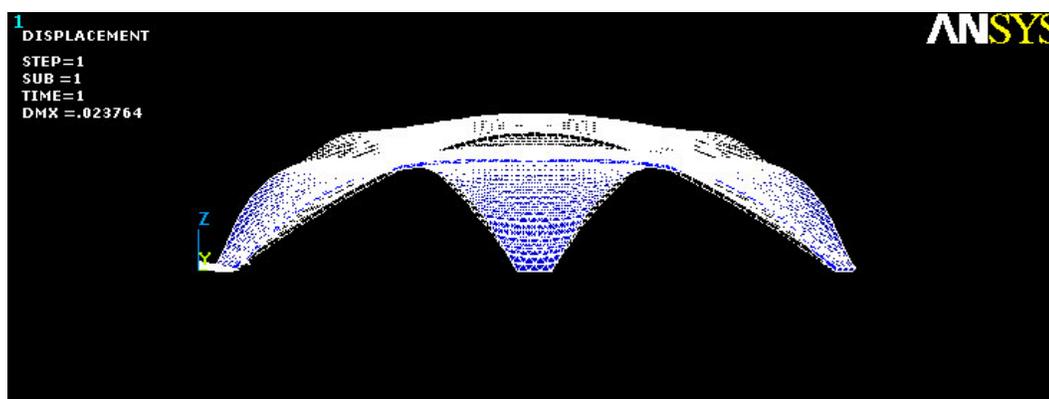


Figura 6.12 – Configuração Deformada da Casca

Com estes valores apresentados de tração, tendo máximo de 0,1138 MPa tem-se que é um valor aceitável para o concreto de F_{ck} igual a 20 MPa. Uma vez que a resistência à tração é aproximadamente 10% da resistência a compressão, sendo maior que os máximos apresentados. Portanto, não seria necessária a armadura. No entanto, por questões construtivas e de segurança a cargas não previstas será dimensionada armadura mínima, conforme mostra Figura 6.13.

Como os valores apresentados estão abaixo da resistência do concreto, seria possível imaginar uma estrutura sem armaduras. Para tal, seria aconselhável a criação de um protótipo com os carregamentos previstos da estrutura e assim verificar se não haveria danos a estrutura ao longo do tempo.

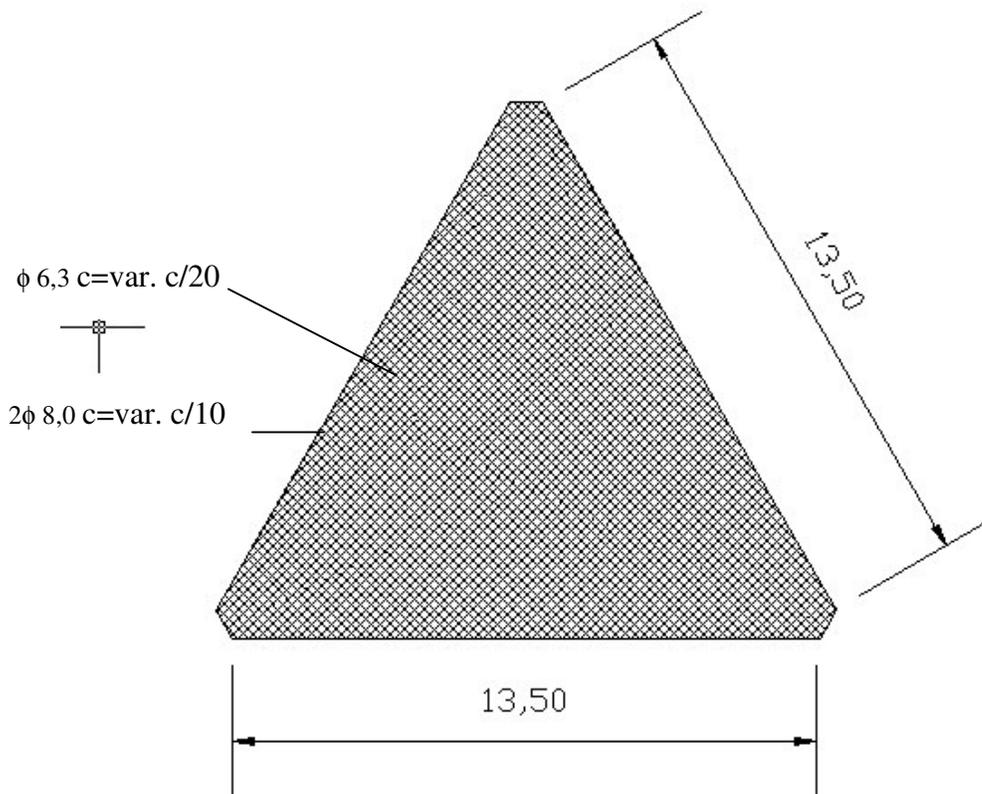


Figura 6.12 – Detalhamento da Armadura

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES

Após a revisão bibliográfica, foi criada uma tabela contendo informações sobre os principais desenvolvimentos das estruturas em casca no último século, e apresentada uma lista com as principais informações referentes aos processos construtivos, que podem ser usadas tanto para o projetista para auxiliar seus cálculos como para verificação em obra se as etapas estão sendo realizadas adequadamente.

Para geração da forma tridimensional foram utilizados diferentes tamanhos de malhas de elementos finitos para a mesma dimensão da casca a fim de se verificar em quanto à variação deste parâmetro afeta a precisão dos resultados

Inicialmente, variamos a densidade da casca, solicitada como parâmetro de entrada para geração da forma tridimensional e que afeta a altura da casca. Desta maneira, trabalhamos com 5 valores para cada tamanho de malha de elementos finitos, a fim de determinarmos qual estaria mais próximo da relação ideal entre altura e lado da casca, definindo assim o modelo F, apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Para procedermos à análise estrutural, utilizamos os três modelos F gerados para as diferentes discretizações. Com a forma tridimensional da casca, foram definidos dois novos modelos com espessuras constantes de 5 e 10 cm para comparação dos valores de tensões e deslocamentos, e definição do modelo mais adequado para o dimensionamento da estrutura final e que mais se aproxime de uma estrutura em casca real.

Os resultados mostram que um refinamento da malha em 3 vezes melhorou o resultado em aproximadamente 40% para as tensões principais de uma casca submetida ao peso próprio, que é o carregamento mais atuante neste tipo de estrutura.

Quando variada a espessura, os resultados para a casca de 10 cm ficaram um pouco acima quando comparada com a de 5 cm, mas optamos por trabalhar com este modelo por ser mais adequado a situação real.

Para os deslocamentos, um refinamento da malha alterou em 10% os resultados, e a variação de espessura influenciou aproximadamente 1% no valor final.

Com estas informações, foi elaborado o modelo final com a malha mais discretizada e os resultados ficaram dentro do esperado, ou seja, as tensões predominantes foram de compressão e com pequenos valores. As tensões de tração são aceitáveis para o concreto e a armadura deve ser dimensionada apenas por questões construtivas.

Após análise numérica, foi apresentada detalhadamente cada etapa dos três principais métodos construtivos das estruturas em cascas e concluímos que o Brasil tem tecnologia para construção de cascas finas através do método convencional e de pré-fabricado. Acreditamos que as dificuldades possam ser superadas com um controle de qualidade mais rigoroso na execução, e uma atuação conjunta entre os projetistas e construtores em todas as etapas da obra, bem como um detalhamento mais amplo dos projetos elaborados.

Com relação ao método "*air-formed*", pouco se tem conhecimento, ainda que existam poucas estruturas construídas por este método no país. Entende-se que com poucas pesquisas e desenvolvimento de materiais e equipamentos adequados possamos em pouco tempo atingir o conhecimento adequado para execução de novas obras e estarmos no mesmo patamar de países como Estados Unidos e Itália.

Espera-se que os resultados deste trabalho possam auxiliar no desenvolvimento de novas pesquisas nesta área, principalmente quanto à análise experimental do modelo teórico avaliado para comparação dos resultados teóricos e experimentais.

Além disso, a abrangente revisão sobre o processo construtivo visa contribuir para um melhor conhecimento sobre a execução de estruturas em cascas finas e incentivar a construção deste tipo de estrutura.

CAPÍTULO 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A área de pesquisa das estruturas em casca apresenta muitos temas a serem abordados. Durante a pesquisa para este trabalho, alguns aspectos foram bastante difíceis de se encontrar na literatura, como:

- estudos de modelos experimentais onde se possam confrontar os resultados da modelagem computacional, sendo exploradas apenas as formas em plantas triangulares e quadrangulares;
- avaliar o comportamento teórico de cascas com dimensões maiores e submetidas a outras ações como temperatura e vento;
- desenvolvimento teórico sobre ações e segurança das estruturas aplicado às cascas;
- análise destas estruturas quanto aos comportamentos térmicos, acústicos e de iluminação;
- desenvolvimento de estudos sobre as principais técnicas construtivas e a viabilidade de aplicação destas no Brasil.

As pesquisas envolvendo estes trabalhos devem contribuir para o desenvolvimento das estruturas em casca no país, e permitir que esta seja uma alternativa viável técnica e economicamente.

Como proposição final, acreditamos que seria muito interessante um trabalho que utilizasse as contribuições aqui apresentadas: modelo teórico envolvendo geração da forma otimizada e análise numérica, detalhamento, projeto executivo e técnicas construtivas. E assim tornar possível a construção de um protótipo para confrontar os resultados obtidos, e validar as informações referentes ao processo construtivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI. **Concrete shell structures: Practice and Commentary** (Reported by ACI Committee 334) 1992.
- ARBOCZ, J.; STARNES, J. H. **Future directions and challenges in shell stability analysis**. Thin Walled Structures, v. 40, n.9, Sep. 2002.
- ARCARO, V. F. **Shell Roofs Structures** Disponível em: <http://www.arcaro.org>. Acesso em: 12 de maio de 2003.
- ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos - primeiros passos**. 1 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1999.
- ANSYS **Ansys program**, version 5.2: finite elements software. [S.I.]: Ansys Incorporation, 1995. Conjunto de programas. 1 CD-ROM.
- BECKER, E. B.; CAREY, G. F.; ODEN, J. T. **Finite elements – an introduction**. Vol 1. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1981.
- BELES, A. A.; SOARE, M. V. **Elliptic and hyperbolic paraboloidal shells used in constructions**. 4 ed. London: SP Christie & Partners Consulting Engineers, 1976.
- BILLINGTON, D. P. **Thin shell concrete structures**. 2 ed. New York: Mc Graw-Hill, 1982.
- BINI, D. **Construction Automation – historical facts about self-shaping structures**. Disponível em www.binisystems.com/ca.html .Acesso em: 22/02/1999.
- CHRYSSANTHOPOULOS, M. K. **Probabilistic buckling analysis of plates and shells**. Thin- Walled Structures, v. 30, n. 1-4, Jan.-Apr. 1998.
- CARRIJO, E. C. **Aplicação do elemento finito DKT à análise de cascas**. 1995.89p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- FABER, C. **Las estructuras de Candela**. 1 ed. México: Compañía Editorial Continental S.A., 1970.

FUNG, Y. C.; SECHKER, E. E. **Thin-shell structures: Theory, experiment and design**. 1 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1974.

GOULD, P. L. **Analysis of shells and plates**. New York: Springer – Verlag, 1988.

HANAI, J. B. **Construções de argamassa armada – fundamentos tecnológicos para projeto e execução**. 1 ed. São Paulo: Pini Editora, 1992.

HOLMES, J. D.; DENOON, R.; KWOK, K. C. S.; GLANVILLE, M. J. *Wind loading and response of large stadium roofs. IASS International Symposium '97 on Shell & Spatial Structures, p.317-324, Singapore, Nov. 1997.*

ISLER, H. **50 years of shells**. International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, part 1 Architectural Concepts, p. 31-42, Warsaw, Sep. 1995.

ISLER, H. **Concrete shells derived from experimental shapes**. Structural Engineering International - Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), v. 4, n. 3, p. 142-147, Aug. 1994.

ISLER, H. **Experience with non-geometrical shells**. Proceedings of the IASS International Symposium '97, v.1, p. 345-354, Singapore, Nov. 1997.

ISLER, H. **Schalen: katalog zur Ausstellung**. Stuttgart: Krämer, 1989.

KAPLUNOVICH, E. N.; MEYER, C.; **Shell Construction with precast elements**. Concrete International, v.4, n.4, p. 37-43, April 1982.

KETCHUM, MARK. A. **A careful compendium of curious concrete construction: concrete shells**. Final version. Disponível em: <<http://www.ketchum.org/milo/index.html>> Acesso em: 3 dezembro 2000.

KETCHUM, MILO. S. **Construction of Concrete Shells**. Disponível em: <http://www.ketchum.org/-milo/constr.html>. Acesso em: 3 dezembro 2000.

KETCHUM, MILO. S. **What Happened to Shells?** . Disponível em: <http://www.ketchum.org/-milo/constr.html>. Acesso em: 3 dezembro 2000.

KOLLEGGER, J.; MEHLHORN, G. **Traglastversuch na einer freigeformten stahlbetonschale**. Gestamthochschule Kassel Universität, 1989.

KONCZ, T. **Manual de la construcción prefabricada – Tomo 2: naves y construcciones de una planta – construcciones de usos varios**. 2 ed. Madrid: H. Blumes Ediciones, 1978.

- LIMA, R. L. R. **Contribuição ao estudo experimental de ruína de estruturas laminares**. 1974. Paginação Irregular. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MACHADO, A. **Desenho na engenharia e arquitetura**. 3 ed. Vol 1. São Paulo: Editora McGraw Hill do Brasil, 1980.
- MATOSKI, A. **Patologias em reservatórios de concreto**. V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones VII Congreso de control de calidad, p. 921-928, Montevideo, Oct. 1999.
- MELARAGNO, M. **An introduction to shell structures – The art and science of vaulting**. 1 ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- MOLLMANN, H. **Introduction to the theory of thin shells**. Denmark: John Wiley & Sons, 1981.
- MONOLITHIC DOME INSTITUTE. **Performance specification For Monolithic Dome construction: Section 13160 – Pre engineered concrete dome**. Division 13 – Special Construction. <http://www.monolithicdome.com>. Acesso em: 20/06/2003.
- MORRIS, N. F. **Shell stability; the long road from theory to practice**. Engineering Structures, vol.18, n. 10, p. 801-806, 1996.
- NOOR, F.A.; BOSWELL, L. F. **Small Scale Modelling of Concrete Structures**. London: Elsevier Applied Science, 1992.
- NOVOZHILOV, V. V. **Thin shell theory**. 2d. Groninger: Wolters-Noordhoff, 1970.
- PEREIRA, A. J. R. P. **Introdução ao estudo das cascas**. 1 ed. Recife: Editora Universitária (UFPE), 1986.
- PFLÜGER, A. **Estatica elemental de las cascaras**. 2 ed. Buenos Aires: Editorial Universitaria, 1965.
- POPOV, E. P. **Progress in analysis and design of RC shells**. Engineering Structures, vol. 13 issue 2, April 1991.
- PUC-RJ **MTool**, versão 1.97. [S.I.]: Copyright Rational Systems Incorporation, 1997.
- RAMASWAMY, G. S. **Design and construction of concrete shell roofs**. 1 ed. New York: Mc Graw-Hill, 1968.
- RAMM, E; MEHLHORN, G. **On shape finding methods and ultimate load analyses of reinforced concrete shells**. Engineering Structures, v. 13, p. 178 – 197, April 1991.

- REKACH, V. G. **Static theory of thin walled space structures**. 1 ed. Moscow: Mir Publishers, 1978.
- SCHLAICH, J., Sobrk, W. **Suitable shell shapes**. Concrete International, v. 8, n.1, p.41-45. Jan. 1986.
- SCOTT, J. S. **Dictionary of civil engineering**. 4 ed. London: Penguin Books, 1991.
- SEDANO TAPIA, M. A. **Contribuição ao projeto de estruturas em casca de formas livres de concreto armado (plantas quadradas)**. 1999. 163f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SEDLAK, V. **A Computer-Aided Conceptual Structural Design Aid**. IASS International Symposium '97 on Shell & Spacial Structures, v. 2, p. 745 – 754, Singapore, Nov. 1997.
- SOUTH, D. B. **Introducing the EcoShell II**. Disponível em: <http://monolithicdome.com/design/ecoi/ecoiihtm> Acesso em: 22/02/1999.
- SVESHNIKOV, G. V. **Fabrication and erection of precast-monolithic roofs of short cylindrical shells**. Proceedings of the IASS Congress on the Problems of Interdependence between Design and Erection of Shells for Large Span Industrial and Public Buildings ` 1966, v.II, p. 103-111, Leningrad, Sep. 1966.
- TEIXEIRA, P. W. G. N. **Projeto e execução de coberturas em casca de concreto com forma de membrana pênsil invertida e seção tipo sanduíche**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- VAFAI, A.; ESTEKANCHI, A. **A parametric finite element study of cracked plates and shells**. Thin- Walled Structures, v.33, n.3, Mar. 1999.
- VIZOTTO, I. **Geração computacional de formas livres de estruturas em casca**. 1993. Paginação irregular. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- WILDE, B. **Down town on the horizon – Comments**. Concrete International, v. 23, n. 12, p. 84, Dec. 2001.
- ZAGOTTIS, D. **Pontes e Grandes Estruturas – Introdução à teoria das placas e das cascas**, v.5. 1ed. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1973.
- ZIMMERMAN, J. **A dome in the mountains**. Concrete International, v. 8, n. 1, p. 23-27. Jan. 1986.

OBRAS CONSULTADAS

FARKAS, L. **Concrete is beautiful- from Panteon to the Orsay museum.** Concrete International, v.10, n.9, p.32-38, Sep. 1988.

HEIERNMANN, K. S. **Kolnarena.** Betonwerk Fertigteil Technik, v. 65, p. 69-72, Jan. 1999.

HOLMES, J. D.; DENOON, R.; KWOK, K. C. S.; GLANVILLE, M. J. *Wind loading and response of large stadium roofs.* **IASS International Symposium '97 on Shell & Spatial Structures, p.317-324, Singapore, Nov. 1997.**

JONAS, A. **Formen fordern Ideen.** Betonwerk Fertigteil Technik, v. 66, p. 20-27, April 1991.

MEDWADOWSKI, S. J. **Multidirectional membrane reinforcement.** ACI Structural Journal – Technical Paper, v. 86, n.5, p. 563-569. Sep.-Oct. 1989.

MIYAZAKI, T.; IWASHITA, K. **Research on advanced construction and management techniques for large-scale spatial structure.** IASS Internacional Symposium '97 on Shell & Spatial Structures, p.609-615, Singapore, Nov. 1997.

ROTTER, J. M. **Shells structures: the new European standard and current research needs.** Thin-Walled Structures, n. 31, p. 3-23, 1998.

SMITH, P.G.; WILSON, E.L. **Automatic design of shells structures.** Journal of Structural Division (ASCE), London, p 191-201, Jan 1971.

SUSAYA, W. V. **Análise não linear de casca cilíndrica circular de concreto armado utilizando o método de Quase-Newton.** 2001. 100 p .Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TEDESKO, A.; BILLINGTON, D. P. **The engineer's: personality and the influence it has on his work – an historical perspective.** Concrete International, v.4, n.12, p. 20-26, Dec. 1982

YAMAMOTO, T.; VECCHIO, F. J. **Analysis of reinforced concrete shells for transverse shear and torsion.** ACI Structural Journal – Technical Paper, v. 98, n.2, p. 191-200, Mar. - April, 2001.

ANEXO A – ELEMENTO FINITO UTILIZADO

A escolha do elemento finito de cálculo para este trabalho baseou-se na hipótese adotada pelo programa Vizotto, ou seja, de um elemento triangular plano, com três nós e três graus de liberdade por nó, conforme Figura A.1.

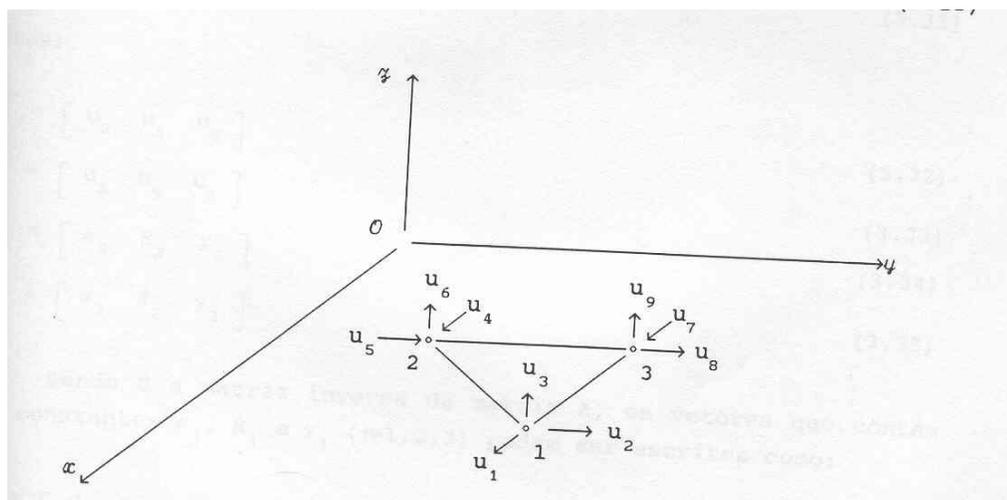


Figura A.1 – Características do Elemento Triangular Adotado

Fonte: Vizotto, 1993, p. 3-5

O programa Ansys possui vários elementos de casca que podem ser utilizados para análises estruturais. De modo que buscamos em sua biblioteca o que mais se aproximasse do apresentado da Figura A.1, e também que melhor se adaptasse às condições estruturais desejadas. São apresentados ao usuário dez elementos de cascas:

Shell 28 – Shear/ Twist Panel

Shell 41 – Membrane Shell

Shell 43 – Plastic Large Strain Shell

Shell 63 – Elastic Shell

Shell 91 – Nonlinear Layered Structural Shell

Shell 93 – Node Structural Shell

Shell 99 – Linear Layered Structural Shell

Shell 143 – Node Plastic Small Strain Shell

Shell 150 – Node Structural Shell p-element

Shell 181 – Finite Strain Shell

Dos elementos apresentados, previamente podemos descartar alguns sem análises mais profundas, pois não estão de acordo com as hipóteses que iremos utilizar. Este é o caso dos elementos: "**Shell 28**" que é ideal para transmitir força cortante não sendo este um fator preponderante a analisar em nosso estudo; "**Shell 43**" e "**Shell 143**" que utilizam os conceitos de plasticidade que não estão sendo considerados neste trabalho; "**Shell 91**" por não estarmos trabalhando com estruturas sanduíche; "**Shell 93**" e "**Shell 99**" apresentam características ortotrópicas, diferindo das hipóteses adotadas para material isotrópico; e "**Shell 181**" não se aplica por ser utilizado para cascas espessas.

Desta forma reduzimos a três elementos que podem ser adequados para análise das cascas finas:

- "**Shell 150**": É um elemento de 8 nós que pode ser simplificado para 6, e apesar de ser indicado para a análise de modelos de cascas e ter a possibilidade de variação de espessura no próprio elemento, não podemos utilizá-lo, pois os nós dos pontos médios não podem ser retirados e na formulação de geração da estrutura em casca usamos um elemento de 3 nós sem subdivisões nos pontos intermediários.

- "**Shell 41**": É um elemento 3D que possui membrana de rigidez no plano, mas não será utilizado neste trabalho, pois não tem rigidez a curvatura fora deste plano, o que é importante para casos em que a curvatura dos elementos é de fundamental importância.

- "**Shell 63**": É um elemento de 4 nós que pode ser simplificado para 3, que pode ter carregamentos no plano e normais a este, e possui 6 graus de liberdade por nó (translações e rotações nas três direções x, y e z). Apesar de ser definido por quatro nós, a opção triangular existe através da duplicação dos pontos K e L conforme é mostrado Figura A.2.

Escolheu-se utilizar este elemento por ser o mais próximo da hipótese adotada, além disto é um dos elementos mais completos da biblioteca permitindo desde variação de espessura dentro do elemento, consideração de temperatura no corpo do elemento, consideração da rigidez à flexão, inclusão de deslocamentos, entre outros. Além disto,

outros trabalhos desenvolvidos na área como VIZOTTO (1993), SEDANO TAPIA (1999) e TEIXEIRA (1999) utilizaram este elemento.

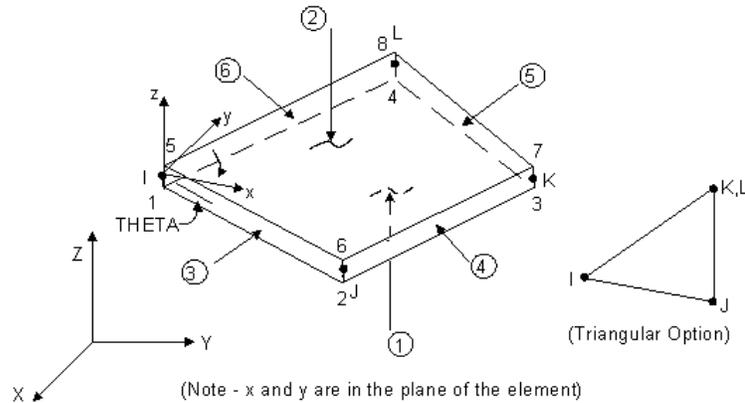


Figura A.2 – Características do Elemento Shell 63

Fonte: Ansys Documentation (Help Online)

Define-se este elemento por 4 nós, espessura diferente em cada nó e rigidez elástica. A espessura varia suavemente no elemento, mas no caso de valor constante, apenas é indicado um dado de espessura. Em nosso problema iremos variar a espessura ao longo da casca, e não no elemento. Da mesma forma ocorre para o efeito de temperatura.

As seguintes hipóteses e restrições para o elemento **"Shell 63"** constam do manual do programa ANSYS (1995):

- Não é permitida área igual a zero, geralmente decorrente de numeração inadequada dos nós;
- Os elementos planos de cascas produzem uma boa aproximação da superfície curva da casca, sendo que cada elemento não ultrapassa 15° ;
- O elemento triangular é obtido pela duplicação dos nós K e L, sendo que os valores extras são automaticamente apagados e a rigidez se reduz a formulação de tensão constante.

Para efeito de comparação, optou-se também por analisar a mesma estrutura utilizando um elemento sólido.

Para tal, utilizamos o programa desenvolvido por Arcaro (2003) que considera a utilização do elemento **"Solid 65 – 3D Reinforced Concrete Solid"**.

Na documentação do programa ANSYS (1995) constam as seguintes características deste elemento:

- Adequado para modelagem de estruturas sólidas tridimensionais com ou sem armadura;
- Elemento com oito nós (pode ser reduzido a seis nós), conforme mostra Figura A.3;
- Permite análise não-linear da estrutura, bem como avaliar comportamento da estrutura com relação à fissuração, esmagamento, deformação plástica e deformação lenta do concreto;

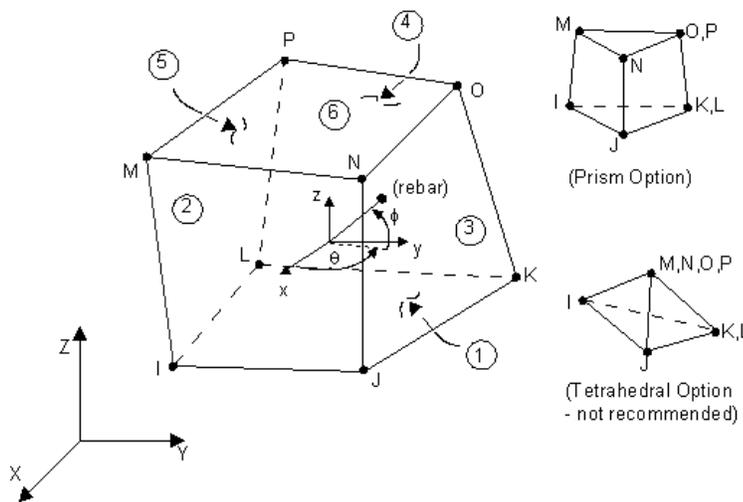


Figura A.3 – Características do Elemento Solid 65

Fonte: Ansys Documentation (Help Online)

As seguintes hipóteses e restrições para o elemento "**Solid 65**" são apresentadas:

- Não é permitido volume igual a zero;
- Assume-se haja aderência total da armadura ao concreto;
- Para a análise não-linear, sempre que se for considerar a fissuração e o esmagamento do concreto, deve-se ter o cuidado de aplicar a carga aos poucos para prevenir esmagamento fictício do concreto antes de a carga correta ser transmitida e causar uma fissura.

ANEXO B – FORMATOS DOS ARQUIVOS PROCESSADOS

Este anexo tem por finalidade apresentar o formato dos arquivos de entrada nos programas utilizados, para auxiliar a compreensão do processo de cálculo.

Para chegar no resultado final das tensões e deformações atuantes nas cascas foram utilizados três programas computacionais:



1) Arquivo de Saída MTool

A entrada da forma em planta é feita inserindo as coordenadas de cada ponto do contorno da estrutura e posteriormente dividindo estes limites para definição da malha de elementos finitos.

O programa armazena estes dados em um arquivo neutro contendo dados que definem a forma geométrica e a malha criada, para gerar subsídios aos programas de cálculo, funcionando como um pré-processador. O MTool (1997) apresenta o arquivo de saída de acordo com as seguintes informações:

```
%HEADER  
File created by mtool program
```

```
%NODE  
Número de nós  
1
```

```
%NODE.COORD  
Número de nós  
1  
Nó      Coord. X      Coord. Y      Coord. Z  
1      0.000000     0.000000     0.000000
```

```
%MATERIAL  
Número de materiais diferentes considerados (Aqui foi considerado um único  
tipo de material: Concreto Armado)  
1
```

```

%MATERIAL.LABEL
Número do material
1
Número      Definição do tipo de material
              1      'mat1'

%MATERIAL.ISOTROPIC
Quantidade de material a ser definido
1
Definição do material
Número      Módulo de      Coeficiente
              Elasticidade  de Poisson
1              30000          0.25

%THICKNESS
Quantidade de espessuras (A espessura aqui considerada é unitária apenas para
geração da forma em planta. A real definição da espessura em todos os pontos
será definida após resultados obtidos na análise estrutural)
1
Número da    Espessura
Espessura
1              1

%INTEGRATION.ORDER
1
1      2      2      1      2      2      1

%ELEMENT
Número de elementos
1
%ELEMENT.T3
Número de elementos
1
Elemento      Material      Espessura      Ordem de      Nó X      Nó Y      Nó Z
              Material      Espessura      Integração
1              1              1              1              1              2              33

%END

```

Uma condição importante é a restrição de apoio, que é definida pelo comando *edge* e também em *support*, para selecionar onde serão as restrições, tendo sido consideradas as direções globais X, Y e Z . Com isso, na saída de dados do programa, têm-se quais nós estão restritos conforme mostramos abaixo:

```

%NODE.SUPPORT
Número de nós restritos
Nó      Dir X      Dir Y      Dir Z      Rot X      Rot Y      Rot Z
1        1          1          1          1          0          0          0

```

onde: impedido = 0

livre = 1

2) Arquivo de Entrada Vizotto

Para o arquivo de dados de entrada neste programa, deve-se adaptar o arquivo de resultados obtidos do processamento do programa MTool, de acordo com a ordem de leitura. Abaixo é apresentada parte da listagem do programa referente a este assunto a fim de justificarmos a ordem escolhida, e permitir a criação rápida e adequada deste arquivo.

1º) O programa lê o nome do arquivo de entrada:

Begin {setup}

Reset (io, file);

2º) O programa lê os dados principais que caracterizam a malha de elementos finitos que compõem a estrutura plana:

readln (io, nn, ne, nr, nln, young, poisson, thickness, density, maxminor);

{ler: (io: nome do arquivo)

(nn: número de nós)

(ne: número de elementos)

(nr : número de restrições)

(nln: número de nós carregados)

(young: módulo de elasticidade)

(thickness: espessura)

(density: densidade)

(maxminor: número máximo de interações)}

3º) O programa lê as coordenadas dos nós:

readln (io);

for k: =1 to nn do readln (io, glob, initial[glob,1], initial[glob,2];

{coordenadas}

{ler: (arquivo, nó, coordenada X, coordenada Y)}

4º) O programa lê as coordenadas dos elementos:

Neste item, como o programa considera o sentido de rotação anti-horário para a incidência nodal dos elementos, temos que inverter os dados, pois no arquivo de saída do MTool (1997) a incidência nodal para os elementos gerados é em sentido horário, e também com a ordem de leitura diferente, conforme mostrada abaixo:

Saída do programa MTool

<i>Elemento</i>	<i>Material</i>	<i>Espessura</i>	<i>Ordem de</i> <i>Integração</i>	<i>Nó 1</i>	<i>Nó 2</i>	<i>Nó 3</i>
1	1	1	1	1	2	33

Entrada no programa Vizotto

<i>Elemento</i>	<i>Nó 1</i>	<i>Nó 2</i>	<i>Nó 3</i>
1	1	33	2

readln (io);***for k: = 1 to ne do******begin******readln(io, e, link1, link2, link3);******...******end;******{ Elementos }******{ler: (arquivo, número do elemento, nó 1, nó 2, nó 3)}***

5º) O programa lê as condições de contorno e as restrições nodais:

readln (io);***for k: =1 to nr do******begin******readln(io, glob, axe, dnode);******...******end******{ Restrições dos Nós }******{ler: (arquivo, nó, eixo, deslocamento)}***

A seguir apresentamos um exemplo de arquivo de entrada, que foi utilizado para a geração de uma casca com malha de elementos finitos de 50 em 50 cm. É importante destacar que o módulo de elasticidade e a espessura são considerados com valor unitário, pois este programa considera como hipótese uma membrana flexível sujeita a grandes deslocamentos e grandes deformações. Os valores referentes aos dados reais serão considerados posteriormente para o cálculo das tensões da estrutura a ser construída, onde neste caso é de fundamental importância saber quais as características reais do material a ser utilizado. O último parâmetro, *maxminor*, é o número de iterações máximas que o programa poderá realizar para convergir para a solução, sendo adotado com base em diversos processamentos o valor de 30 vezes o número de nós.

816, 1525, 18, 0, 1.0, 0.2, 1.0, 0.0001, 24480

1	250,00	0,00
2	300,00	0,00
3	350,00	0,00
4	400,00	0,00
5	450,00	0,00

.
.

.

1	1	33	2
2	4	32	5
3	5	34	6
4	2	39	3
5	3	40	4

.
.

.

1	1	0.0
1	2	0.0
1	3	0.0
31	1	0.0
31	2	0.0
31	3	0.0

Nesta modelagem usaremos como material o concreto, com os seguintes parâmetros:

- módulo de elasticidade: $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
- coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$
- coeficiente térmico: $\alpha = 1,0 \times 10^{-5} 1/^\circ \text{C}$
- densidade da membrana: dependente dos resultados do programa Vizotto para melhor configuração.

Após o processamento, o programa Vizotto (1993) gera três arquivos de resultados: "**output**" que contém as coordenadas dos nós e elementos em três dimensões; o "**drawfile**" que contém os dados para visualização gráfica do formato gerado, e o "**ansysfile**" que é o arquivo de dados de entrada para o programa ANSYS, onde se deve acrescentar alguns dados específicos para realizar a análise estrutural.

O formato do arquivo de entrada do programa Arcaro (2003), segue o mesmo padrão utilizado para Vizotto (1993), alterando-se apenas a linha inicial. No caso, são colocados outros parâmetros. Conforme mostra o arquivo abaixo.

```

    mntol  maxminor  maxmajor
:
    1.0E-05    600    2

    young  Poisson  thickness  maxweight  maxpressure
:
    1000.0    0.2    1.0    0.0    -0.07

node coordinates
:
    197

1  -283.8  -266.2
2  -270.0  -242.0
3  -256.0  -212.0
.

incidences
:
    324

1   33   18   1
2   18   2   1
3   18   19   2
.

known displacements
:
    24

1   1   0.0
1   2   0.0
1   3   0.0
17  1   0.0
17  2   0.0
17  3   0.0

nodal forces
:
    0

```

3) Arquivo de Entrada Ansys

Os arquivos de saída gerados pelo programa Vizotto (1993) e Arcaro (2003) já estão no formato de entrada para o ANSYS, considerando o elemento "**Shell 63**" e "**Solid 65**" respectivamente.

Saída do Programa Vizotto (1993)

```
/PREP7
KAN,0
ET,1,63
R,1,5
MP,EX,1,2.1e6
MP,NUXY,1,0.2
MP,DENS,1,0.0025
N, 1, 75.0000, 0.0000, 0.0000
N, 2, 114.5162, 11.6109, 39.5878
N, 3, 153.2038, 17.3212, 75.1384
.
.
.
REAL,1
E, 10, 9, 50, 50
E, 11, 10, 55, 55
E, 12, 11, 56, 56
.
.
.
D,1,UX
D,1,UY
D,1,UZ
.
.
.
/VIEW,1,1,1.5,0.4
/VUP,1,Z
/PBC,ALL,1
EPL0T
```

Saída do Programa Arcaro (2002)

```

/TITLE, SOLID65

! ENTER THE MODEL CREATION PREPROCESSOR
/PREP7

! DEFINE NODES
N,      1, -2.82985323E+02, -2.65336623E+02, -2.20020058E+00
N,      2, -2.67806995E+02, -2.40365656E+02,  1.34805135E+01
N,      3, -2.53677813E+02, -2.10280704E+02,  3.02563160E+01
.
.
.

! DEFINE MATERIAL PROPERTY - CONCRETE
MP,  EX,      1,  2.80000000E+05
MP,  NUXY,     1,  1.50000000E-01
MP,  DENS,     1,  2.50000000E-03
MP,  ALPX,     1,  1.20000000E-05
MP,  REFT,     1,  0.00000000E+00

! ACTIVATE A DATA TABLE
TB,  CONCR,    1,      1

! DEFINE A TEMPERATURE FOR THE DATA TABLE
TBTEMP,  0.00000000E+00,  1

! DEFINE DATA FOR THE DATA TABLE
TBDATA,  1,  5.00000000E-01,  7.00000000E-01,  1.80000000E+01,  1.80000000E+02

! DEFINE MATERIAL PROPERTY - STEEL
MP,  EX,      2,  2.10000000E+06
MP,  DENS,     2,  7.89000000E-03
MP,  ALPX,     2,  1.20000000E-05
MP,  REFT,     2,  0.00000000E+00

! DEFINE REAL CONSTANTS SET
R,      1,      2,  2.00000000E-03,  0.00000000E+00,  2.06840959E+01
RMODIF,  1,      5,      2,  2.00000000E-03,  9.71115305E+01,  1.81546042E+01
R,      2,      2,  2.00000000E-03,  0.00000000E+00,  1.99489206E+01
RMODIF,  2,      5,      2,  2.00000000E-03,  9.74428181E+01,  1.96409067E+01
R,      3,      2,  2.00000000E-03,  0.00000000E+00,  1.93151095E+01
RMODIF,  3,      5,      2,  2.00000000E-03,  9.67208280E+01,  1.84645746E+01
.
.
.

! DEFINE ELEMENT TYPE
ET,      1, SOLID65

! SET THE MATERIAL PROPERTY ATTRIBUTE POINTER
MAT,      1

```

```

! SET THE ELEMENT TYPE ATTRIBUTE POINTER
TYPE, 1

! DEFINE ELEMENTS
REAL, 1
EN, 1, 33, 18, 1, 1, 230, 215, 198, 198
REAL, 2
EN, 2, 18, 2, 1, 1, 215, 199, 198, 198
REAL, 3
EN, 3, 18, 19, 2, 2, 215, 216, 199, 199

FINISH

! ENTER THE SOLUTION PROCESSOR
/SOLU

! STATIC ANALYSIS
ANTYPE, STATIC, NEW

! DEFINE CONSTRAINTS
D, 1, UX, 0.00000000E+00
D, 198, UX, 0.00000000E+00
D, 1, UY, 0.00000000E+00
D, 198, UY, 0.00000000E+00
D, 1, UZ, 0.00000000E+00
D, 198, UZ, 0.00000000E+00
.
.
.

! DELETE FORCE LOADS ON NODES
FDELE, ALL, ALL

! ASSIGN UNIFORM TEMPERATURE TO ALL NODES
TUNIF, 0.00000000E+00

! SPECIFY ACCELERATION
ACEL, 0.00000000E+00, 0.00000000E+00, 1.00000000E+00

! SPECIFY PRESSURE LOAD
NSEL, S, NODE, , 198, 394
SF, ALL, PRES, 1.50000000E-02
NSEL, ALL, NODE

! START A SOLUTION
SOLVE

FINISH

```


ANEXO C – ARQUIVOS DE SAÍDA

Este anexo apresenta todos os dados de saída da análise numérica realizada com o programa ANSYS. Optamos por considerar no corpo do texto apenas os resultados relevantes para o dimensionamento e análise da estrutura. Sendo que os gráficos apresentados podem auxiliar em outros trabalhos subseqüentes a este projeto ou mesmo outros tipos de análises aqui não consideradas.

É importante destacar que todos os valores aqui apresentados são puros, ou seja, não consideram qualquer tipo de coeficientes de majoração. Todos os gráficos apresentados neste anexo estão na unidade de **10^{-1} MPa**.

Modelo 1 – Ação de Peso Próprio

Tensões Principais – S1, S2 e S3

Espessura = 5 cm

Espessura = 10 cm

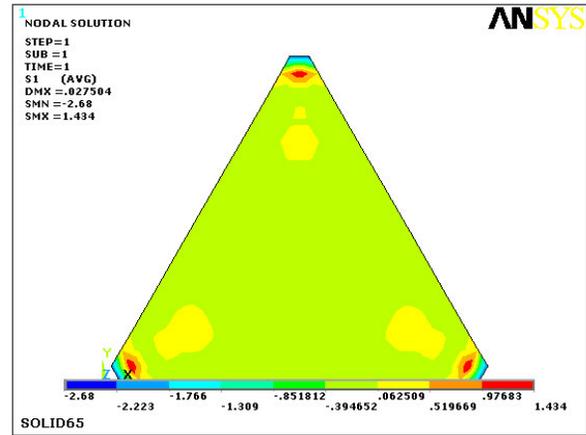
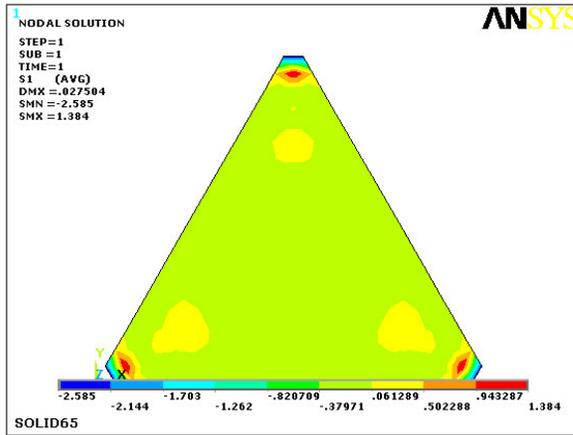


Figura C.1 - Tensões Principais S1 para o Modelo 1 sob Ação do Peso Próprio

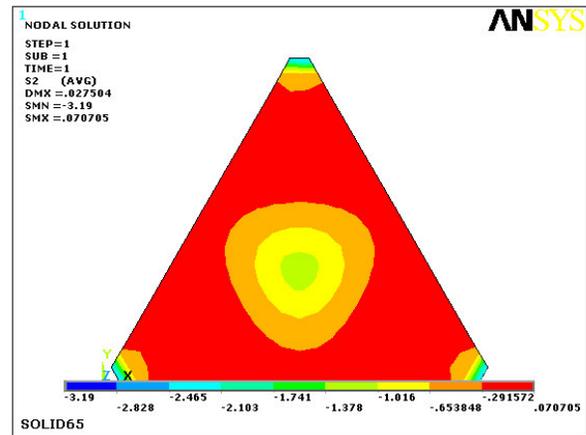
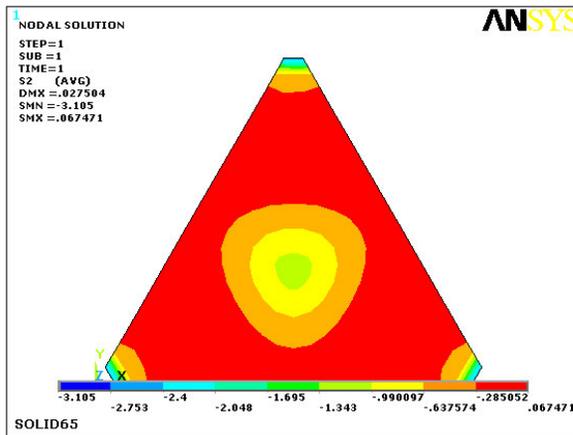


Figura C.2 – Tensões Principais S2 para o Modelo 1 sob Ação do Peso Próprio

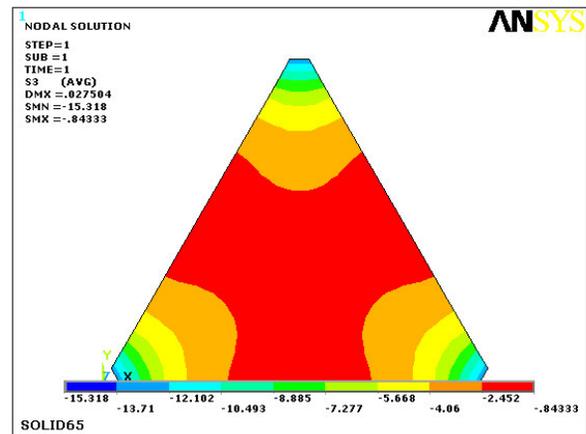
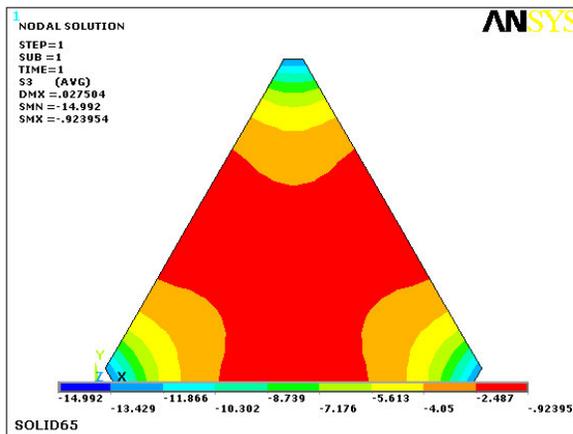


Figura C.3 – Tensões Principais S3 para o Modelo 1 sob Ação do Peso Próprio

Deslocamentos – DX, DY e DZ

Espessura = 5 cm

Espessura = 10 cm

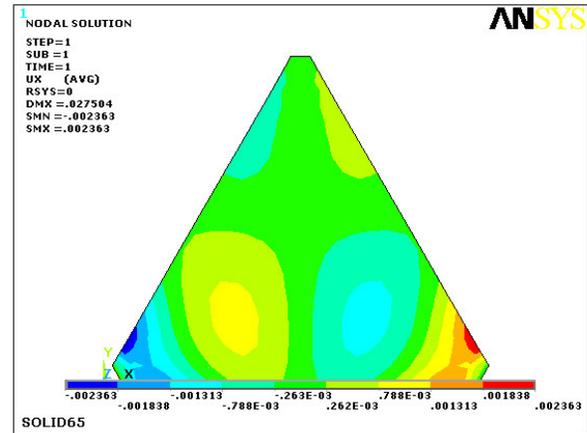
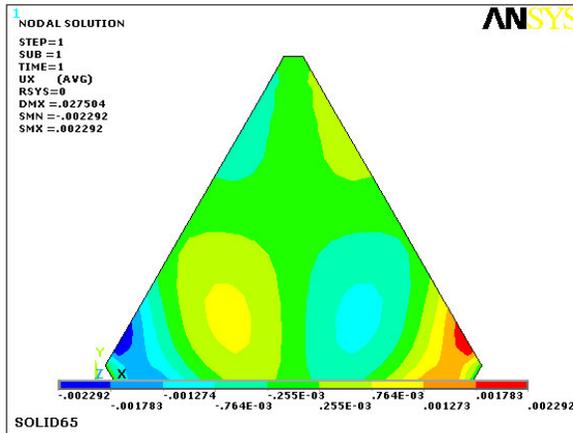


Figura C.4 – Deslocamentos em x para o Modelo 1 sob Ação do Peso Próprio

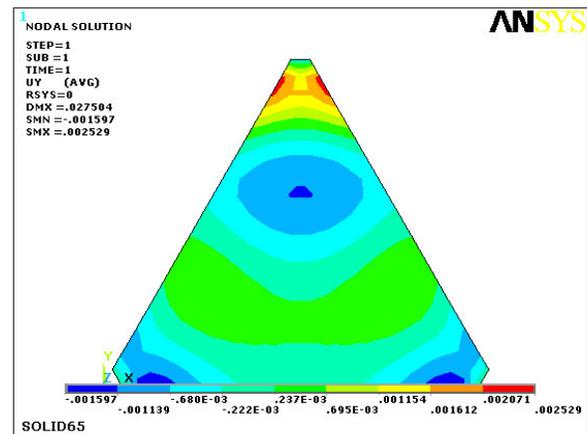
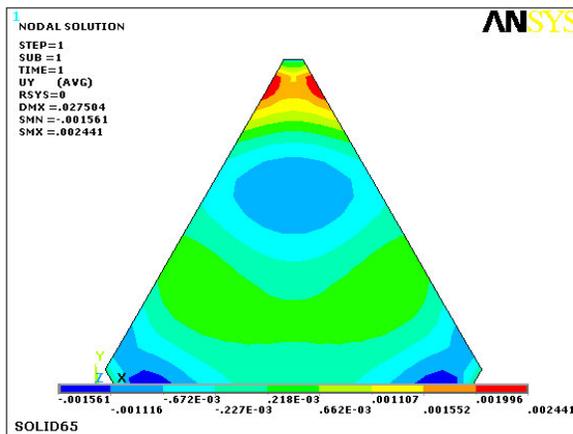


Figura C.5 – Deslocamentos em y para o Modelo 1 sob Ação do Peso Próprio

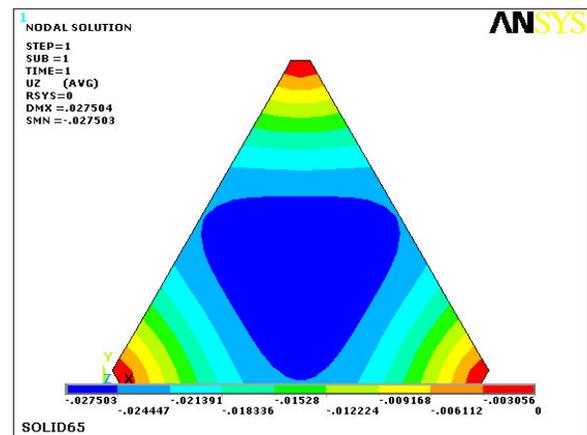
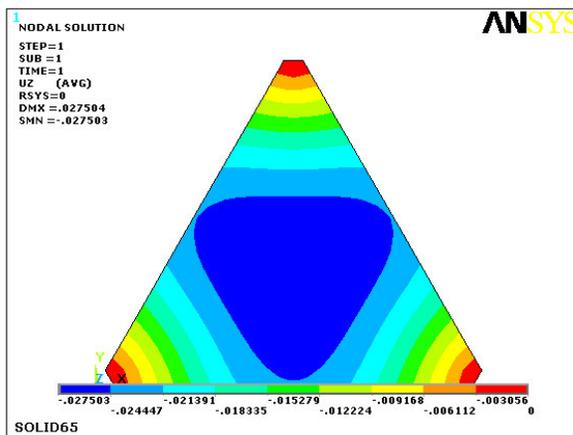


Figura C.6 – Deslocamentos em z para o Modelo 1 sob Ação do Peso Próprio

Modelo 2 – Peso Próprio

Tensões Principais – S1, S2 e S3

Espessura = 5 cm

Espessura = 10 cm

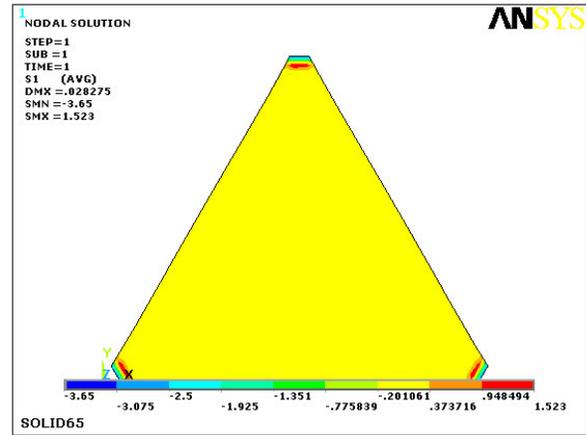
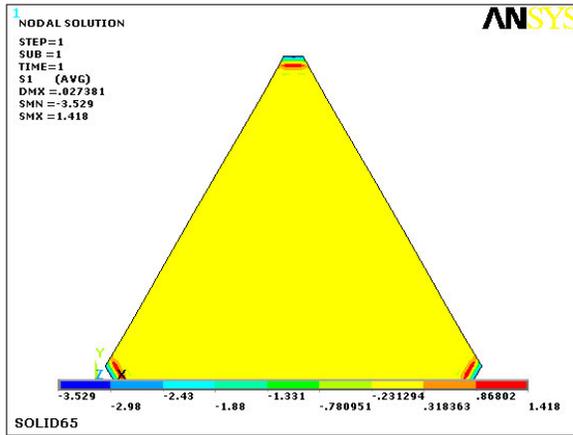


Figura C.7 – Tensões Principais S1 para o Modelo 2 sob Ação do Peso Próprio

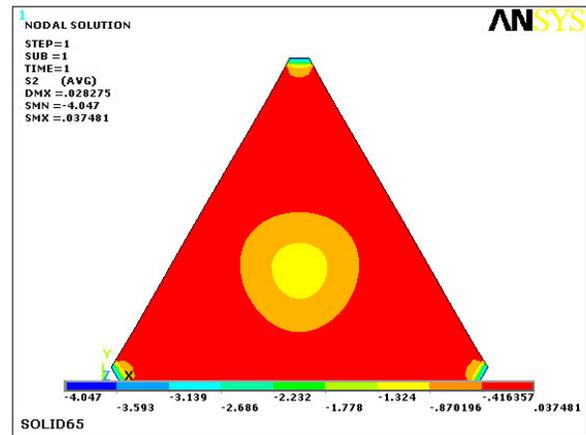
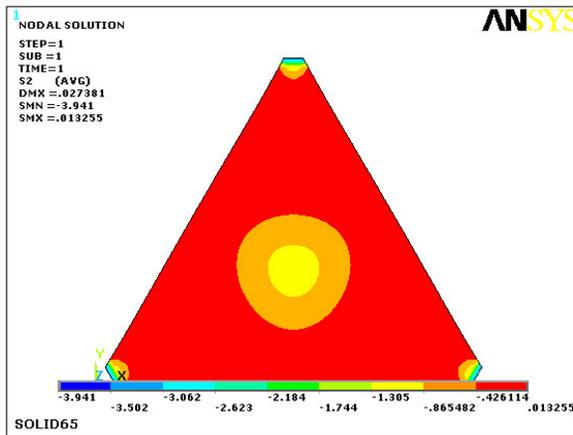


Figura C.8 – Tensões Principais S2 para o Modelo 2 sob Ação do Peso Próprio

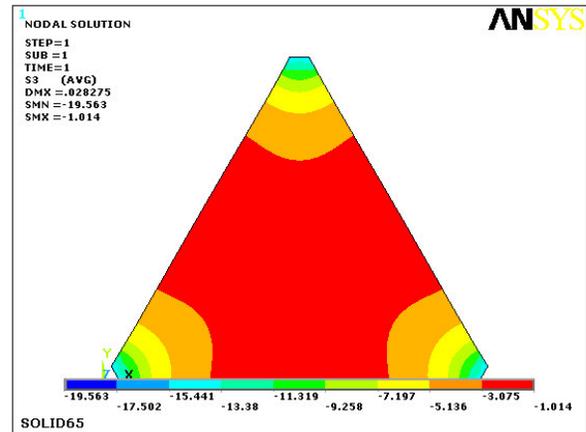
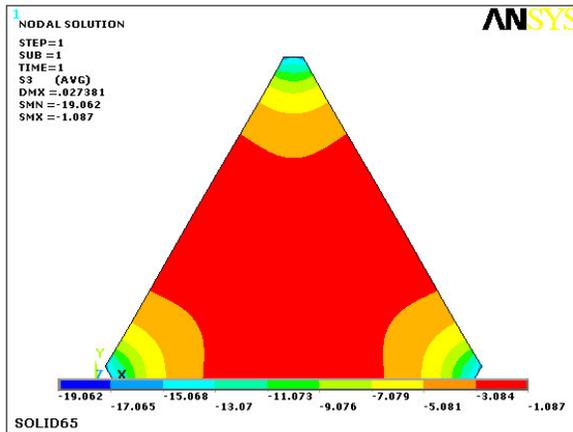


Figura C.9 – Tensões Principais S3 para o Modelo 2 sob Ação do Próprio

Deslocamentos – DX, DY e DZ

Espessura = 5 cm

Espessura = 10 cm

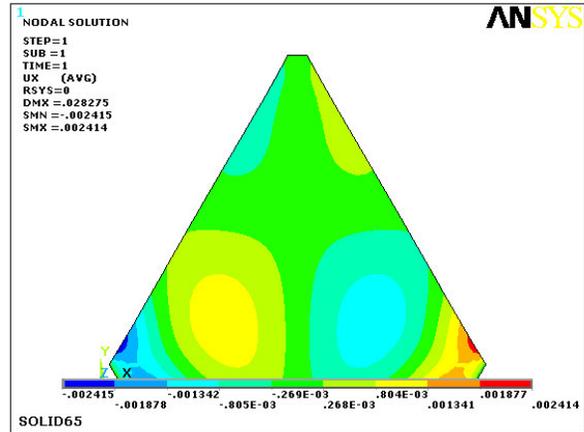
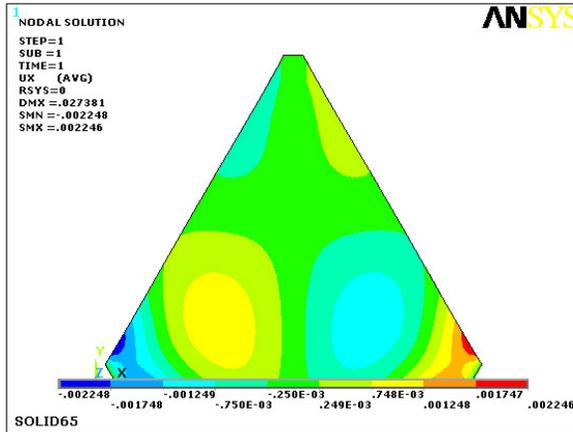


Figura C.10 – Deslocamentos em x para o Modelo 2 sob Ação do Peso Próprio

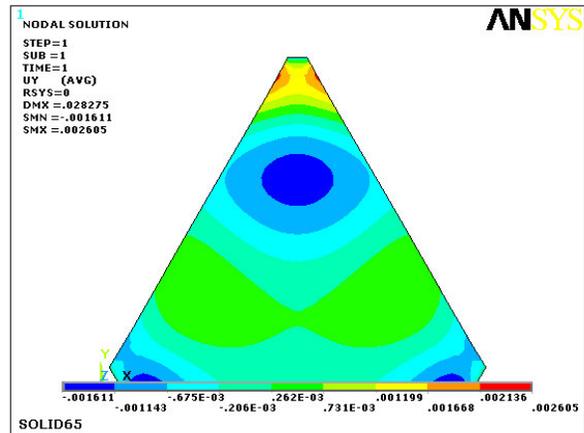
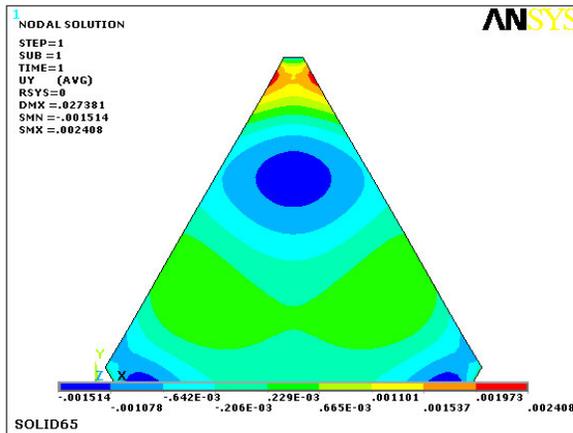


Figura C.11 – Deslocamentos em y para o Modelo 2 sob Ação do Peso Próprio

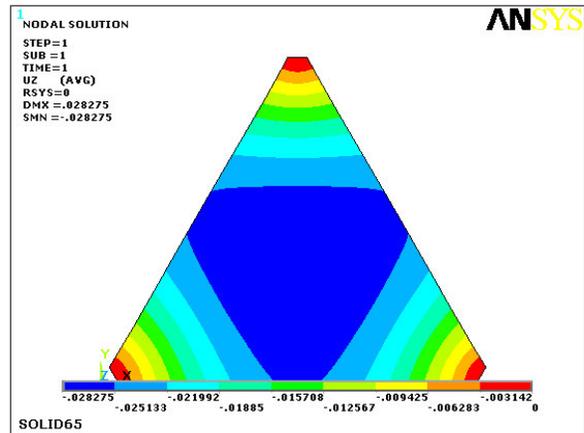
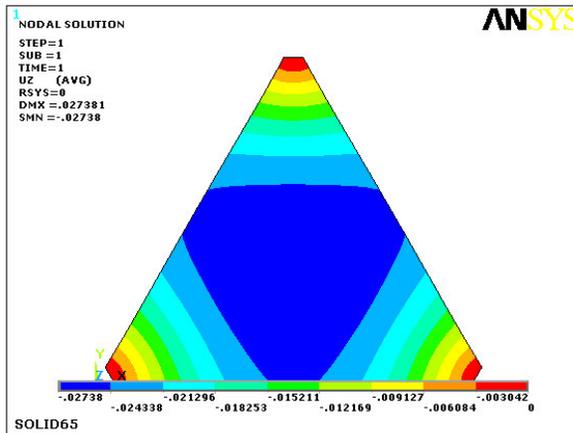


Figura C.12 – Deslocamentos em z para o Modelo 2 sob Ação do Peso Próprio

Modelo 3 – Peso Próprio

Tensões Principais – S1, S2 e S3

Espessura = 5 cm

Espessura = 10 cm

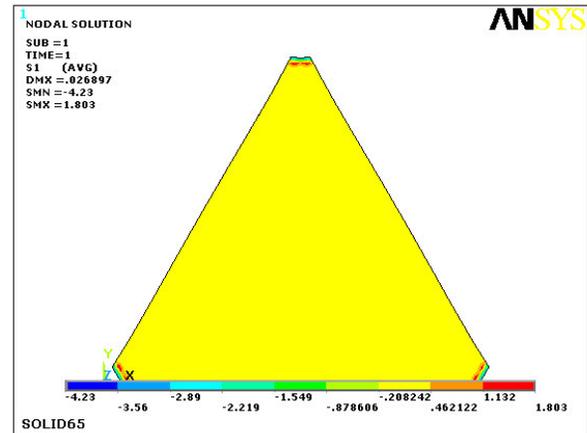
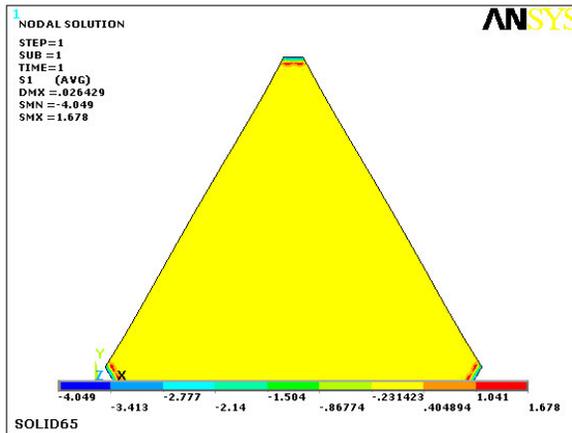


Figura C.13 – Tensões Principais S1 para o Modelo 3 sob Ação do Peso Próprio

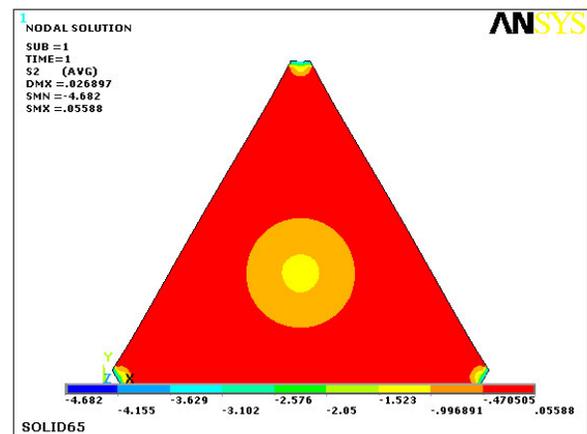
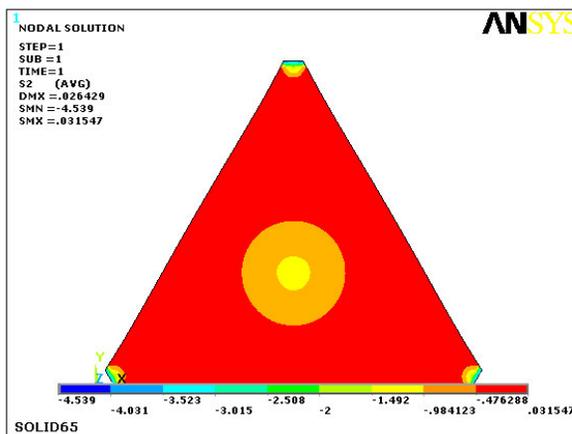


Figura C.14 – Tensões Principais S2 para o Modelo 3 sob Ação do Peso Próprio

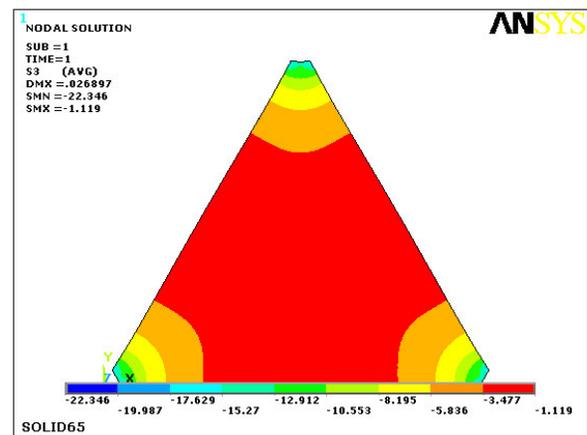
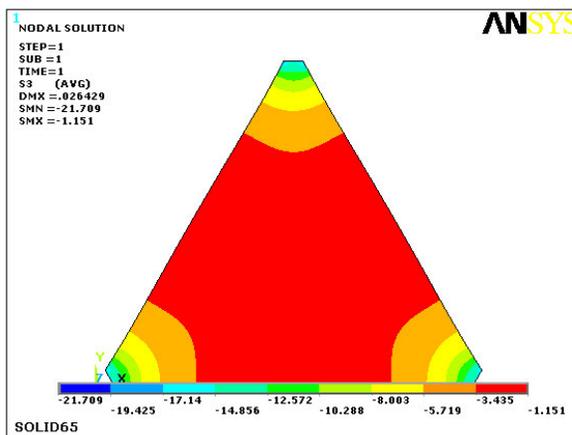


Figura C.15 – Tensões Principais S3 para o Modelo 3 sob Ação do Peso Próprio

Deslocamentos – DX, DY e DZ

Espessura = 5 cm

Espessura = 10 cm

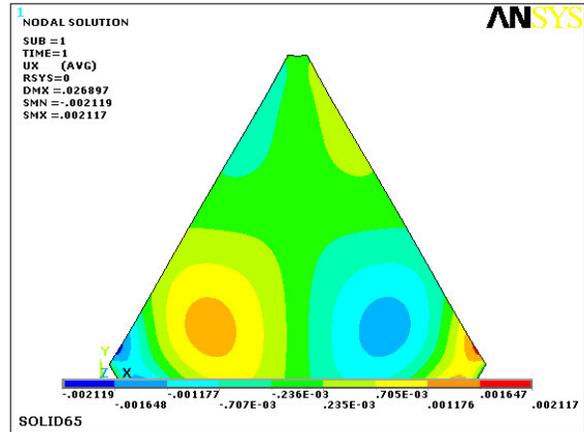
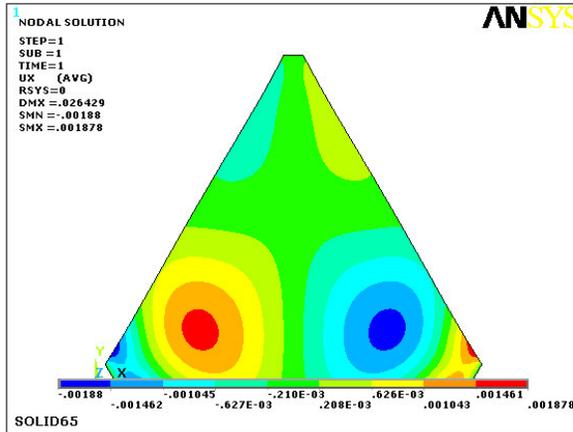


Figura C.16 – Deslocamentos em x para o Modelo 3 sob Ação do Peso Próprio

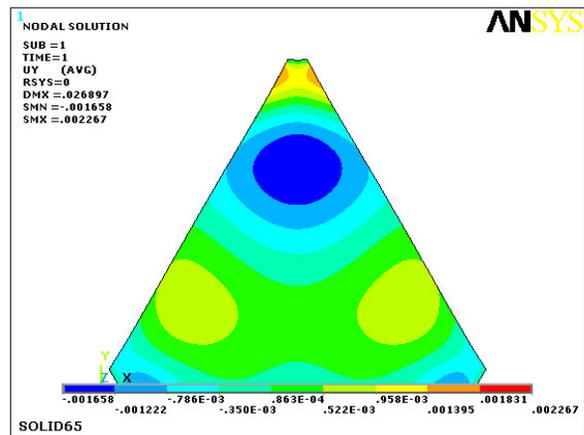
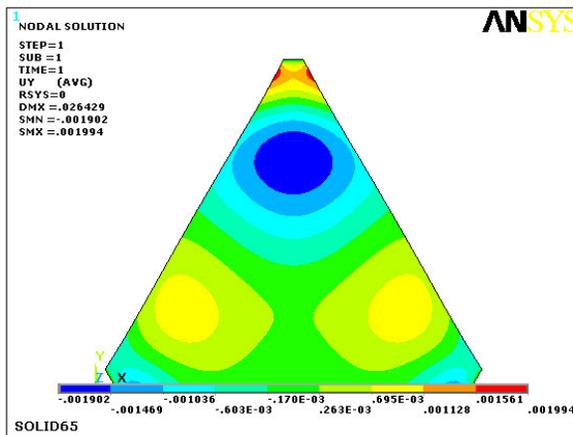


Figura C.17 – Deslocamentos em y para o Modelo 3 sob Ação do Peso Próprio

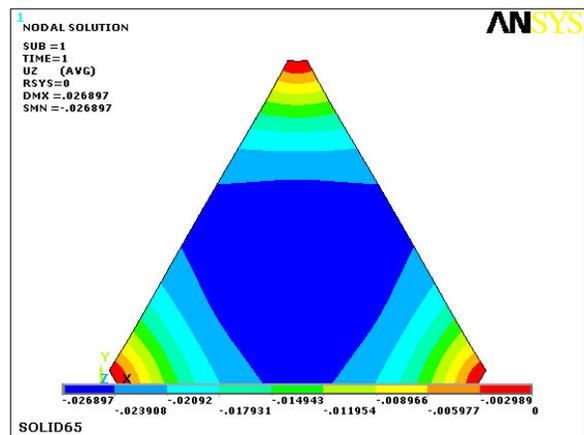
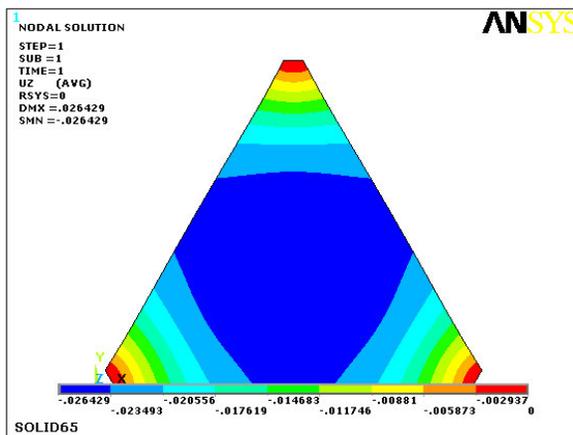


Figura C.18 – Deslocamentos em z para o Modelo 3 sob Ação do Peso Próprio