

MURILO SCHMIDT OLIVEIRA SOTO

Sobre o emprego de fôrmas flexíveis para execução de cascas em concreto

São Paulo

2023

MURILO SCHMIDT OLIVEIRA SOTO

Sobre o emprego de fôrmas flexíveis para execução de cascas em concreto

Versão Corrigida

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

Área de Concentração: Engenharia de Estruturas.

Orientadores:

Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

Profa. Dra. Leila Cristina Meneghetti

Valverdes

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 06 de outubro de 2023

Assinatura do autor:

Murilo Soto

Assinatura do orientador:

[Assinatura]

Catálogo-na-publicação

Soto, Murilo Schmidt Oliveira

Sobre o emprego de fôrmas flexíveis para execução de cascas em concreto / M. S. O. Soto -- versão corr. -- São Paulo, 2023.
158 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Fôrmas flexíveis 2.Cascas de concreto 3.Análise computacional
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

Nome: SOTO, Murilo Schmidt Oliveira

Título: Sobre o emprego de fôrmas flexíveis para execução de cascas em concreto

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

Aprovado em: 09/08/2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

Instituição: Universidade de São Paulo – USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwin

Instituição: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Monica Regina Garcez

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Julgamento: Aprovado

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Profa. Dra. Leila Cristina Meneghetti e Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti, pelos ensinamentos preciosos e pelo suporte contínuo ao longo de todo o curso.

À empresa Art-Spray na pessoa do Eng. Carlos Eduardo Carbone, e ao Robson Marques, pelo apoio fundamental no fornecimento e aplicação da argamassa projetada.

Aos colaboradores do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica (PEF), Antônio Coelho Jacomini, Rui Coelho Jacomini e Gilvan Palmeira da Silva, meu sincero agradecimento pelo apoio nas experimentações e montagem dos modelos físicos.

Também desejo agradecer à Arquiteta Alessandra Pissardo pela habilidosa confecção do modelo em escala reduzida da membrana do Anfiteatro do Memorial dos Povos de Belém do Pará.

Agradeço aos meus pais, José Luiz e Elisabete, pelo amor incondicional, pelo esforço e pela dedicação em proporcionar o melhor para os seus filhos.

Aos meus irmãos, Rafael e Julia, que estão sempre ao meu lado, sendo meus exemplos e conselheiros em muitas decisões.

À minha companheira Beatriz, pelo apoio e carinho.

RESUMO

SOTO, Murilo Schmidt Oliveira. **Sobre o emprego de fôrmas flexíveis para execução de cascas em concreto**. 2023. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

A busca pela racionalização do uso dos materiais e pela eficiência dos processos produtivos se apresenta cada vez mais como um parâmetro de projeto na construção civil, onde se destacam as estruturas em casca de concreto em função de seu eficiente comportamento estrutural. Embora os sistemas de cimbramento convencionais apresentem custos altos e impeditivos à sua adoção como solução estrutural, alternativas construtivas têm surgido nos últimos anos para a execução de estruturas em casca de concreto. Uma das técnicas promissoras nesta área é o uso de fôrmas flexíveis, cujo processo construtivo permite a conformação do concreto na geometria pretendida, economizando tempo e materiais para a montagem do sistema temporário de sustentação. O propósito desta pesquisa é estudar e analisar os detalhes construtivos envolvidos no uso de diferentes tipos de fôrmas flexíveis para execução de cascas de concreto, viabilizando assim seu uso como solução estrutural viável frente aos demais sistemas estruturais existentes. Dentre os objetivos específicos que esta pesquisa se propõe está a revisão histórica do tema, a experimentação empírica a partir de modelos de bancada e a formulação de um modelo computacional do processo construtivo utilizando o programa Ansys Mechanical APDL, versão Acadêmica “Student”.

Palavras-chave: fôrmas flexíveis; cascas de concreto; análise computacional.

ABSTRACT

SOTO, Murilo Schmidt Oliveira. **On the use of flexible formworks for the execution of concrete shells**. 2023. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

The search for rationalization of the use of materials and efficiency of production processes is increasingly presented as a design parameter in civil construction, where concrete shell structures stand out due to their efficient structural behavior. Although conventional formwork systems have high costs and hinder their adoption as a structural solution, construction alternatives have emerged in recent years for the execution of structures in concrete shell. One promising technique in this area is the use of flexible formworks, whose construction process allows the concrete to conform to the intended geometry, saving time and materials for the assembly of the temporary support system. The purpose of this research is to study and analyze the constructive details involved in the use of different types of flexible molds for the execution of concrete shells, thus enabling its use as a viable structural solution compared to the other existing structural systems. Among the specific objectives that this research proposes is the historical review of the theme, empirical experimentation based on tabletop models, and the formulation of a computational model of the constructive process using the program Ansys Mechanical APDL, Academic version 'Student'.

Keywords: flexible formworks; concrete shell; computational analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 FÔRMAS FLEXÍVEIS.....	16
2.1.1 Desenvolvimento Histórico	17
2.1.2 Classificação	34
2.1.3 Tecidos e Membranas	38
2.2 CASCAS EM CONCRETO.....	42
2.2.1. Conceituação	42
2.2.2. Breve Histórico	45
2.2.3. Aspectos Construtivos de Cascas de Concreto	48
3 DESENVOLVIMENTO	52
3.1 EXPERIMENTOS DE BANCADA	52
3.1.1 Membrana retesada pneumáticamente	53
3.1.2 Membrana sem retesamento inicial – membrana suspensa	57
3.1.3 Membrana retesada mecanicamente	59
3.1.4 Membrana retesada mecanicamente por esforços internos – “tensegrity” 63	
3.1.5 Membrana retesada mecanicamente – Modelo reduzido da membrana do Anfiteatro do Memorial dos Povos de Belém do Pará	66
3.2 DA MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	79
3.2.1 Parâmetros do modelo	80
3.2.2 Carregamentos	83
3.2.3 Resultados	85
3.2.3.1 Da Proposta 1 (alteração da geometria inicial)	97
3.2.3.2 Da Proposta 2 (aumento da tensão de retesamento)	105

4 DISCUSSÃO.....	115
4.1 DOS MODELOS DE BANCADA	115
4.2 DO MODELO COMPUTACIONAL	119
5 CONCLUSÃO.....	133
REFERÊNCIAS.....	135
APÊNDICE - CÓDIGO APDL COMENTADO	142

1 INTRODUÇÃO

A busca pela racionalização do uso dos materiais, caracterizada pela eficiência no consumo energético e de matérias-primas, tem sido uma constante nos últimos anos, motivada pelo crescente impacto das ações humanas no meio ambiente.

No âmbito da construção civil, a UN Environment and International Energy Agency (2017) aponta que este setor é responsável por mais de 35% do consumo global de energia, correspondendo à aproximadamente 40% do consumo de energia associada às emissões de CO₂. Ainda conforme a UN Environment and International Energy Agency (2017), estima-se que o setor da construção civil precise reduzir em média 30% do uso de energia por metro quadrado construído até 2030 para cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris.

No contexto nacional, o Brasil reafirmou, em dezembro de 2020, por meio da nova Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) ao Acordo de Paris o compromisso de redução das emissões de gases de efeito estufa em 37% em 2025 e 43% em 2030, em relação aos níveis de emissão de 2005, enunciando ainda o objetivo de atingir a neutralidade climática, ou seja, emissões líquidas nulas, em 2060.

Para concretizar o crescimento previsto e mitigar os impactos ambientais decorrentes de sua atividade, em harmonia com os acordos internacionais estabelecidos, serão demandadas reduções nas emissões de gases de efeito estufa ao longo de toda a cadeia produtiva da construção, desde a produção dos insumos básicos, como o cimento e o aço, até a idealização e materialização das estruturas, perpassando pelo projeto, pelos processos construtivos empregados, pelas ações de manutenção exigidas, e pelos recursos consumidos em sua operação.

Além do alto consumo de energia e elevadas emissões de gás carbônico, o setor da construção civil apresenta ainda um elevado desperdício de materiais para materialização de suas estruturas. Wise (2010) aponta que, numa edificação típica

de quatro andares, apenas 40% do concreto existente está realmente atuando para resistir aos esforços que solicitam a estrutura.

Wise (2010) atribui este desperdício ao processo construtivo, em função da padronização das geometrias dos elementos, mas também ao comportamento mecânico da estrutura. Tomando-se as lajes, por exemplo, Wise (2010) aponta que 20% do concreto existente poderia ser removido sem que as normas e códigos de construção fossem violados. Além disso, apenas 50% do concreto remanescente é realmente útil, posto que o restante se encontra alocado em regiões de tração e contribui apenas para aumentar o peso próprio da estrutura e robustecer os demais elementos, como pilares e fundações.

Nesse contexto, a racionalização do uso do concreto pode ser aprimorada com o uso de outros tipos estruturais mais eficientes, como as estruturas em casca, onde o concreto é alocado de modo a mobilizar sua propriedade física preponderante: a resistência à compressão.

Por meio do uso deste tipo de estrutura, o consumo de concreto é reduzido e otimizado, apresentando as melhores relações vão/espessura quando comparada aos demais tipos estruturais.

Embora as cascas remontem à antiguidade, as primeiras estruturas de concreto em casca surgiram apenas no século XX. Em virtude de sua eficiência estrutural, o uso de casca em concreto possibilitou o uso de maiores vãos, com maior capacidade de suporte, utilizando menos material do que as estruturas reticuladas usuais, além de permitirem o uso de geometrias diversas.

No Brasil, as estruturas em casca de concreto foram muito utilizadas entre as décadas de 60 e 70 como uma alternativa arquitetônica de grande potencial, cuja leveza e variedade de formas permitiram o desenvolvimento de projetos arrojados, tais como as coberturas do mercado de Pirituba (Figura 1), do estádio Lourival Baptista (Batistão) e do edifício de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP, entre outras.

Figura 1 - Mercado de Pirituba, São Paulo/SP (construção entre 1966-1972).



Fonte: Adaptado de <https://www.pirituba.net/mercado/>. Acesso em 22/05/2019.

A partir da década de 70 houve um declínio da aplicação de estruturas em casca no Brasil, que pode ser atribuído aos custos elevados de fôrmas e escoramentos e à complexidade de cálculo e de execução da armadura e da concretagem. Podemos incluir também a ocorrência de diversos tipos de patologias nesse tipo de estrutura.

Já no início do século XXI, Brandão (2005) aponta a perspectiva de mudança nesse cenário devido ao desenvolvimento de novas tecnologias como o concreto bombeado (facilitando sua aplicação em formas curvas), os modelos de cálculo computacional, os concretos de alto desempenho e o reforço do concreto com o uso de fibras e tecidos.

Além dessas inovações tecnológicas ligadas ao comportamento mecânico do material, ao método de aplicação e aos modelos de cálculo, há também novas técnicas relacionadas ao cimbramento da estrutura, visando garantir a geometria pretendida e reduzir os custos associados à sua execução, para as quais a presente pesquisa se volta. Uma vertente inovadora neste campo consiste no uso de fôrmas flexíveis para conformação do concreto, resultando em elementos não prismáticos de variadas formas, dentre elas a casca.

Utilizando-se membranas e tecidos retesados ou inflados é possível obter geometrias com curvaturas complexas e de montagem rápida, apresentando-se como um sistema atrativo para execução de elementos estruturais curvos, nos quais se é possível explorar melhor o desempenho do concreto.

O uso de fôrmas constituídas por tecidos e membranas remonta desde o final do século XX, quando Louis Lilienthal (1899) projetou uma laje à prova de fogo empregando um tecido para a conformação do concreto. Desde então, diversos construtores, inventores e projetistas desenvolveram processos construtivos a partir do mesmo conceito de fôrma, e não apenas para moldagem de lajes e de cascas, mas para diversas outras estruturas, cuja revisão histórica se propõe na presente pesquisa.

Atualmente, existem aplicações comerciais bem sucedidas com o uso de fôrmas flexíveis, a exemplo dos produtos da empresa Concrete Canvas (2023) para proteção de encostas e de abrigos temporários de rápida mobilização e o sistema de execução de fundações da empresa canadense Fab-Form (2023), ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Sistema flexível para execução de fundações da Fab-Form Industries.



Fonte: <https://www.fab-form.com/fastfoot/fastfootOverview.php>. Acesso em 08/09/2023.

Há também aplicações recentes voltadas à execução de estruturas em casca, como o projeto da cobertura do módulo HiLo do NEST laboratory, na Suíça (BLOCK et al., 2017), reproduzido na Figura 3, baseado no uso de uma fôrma constituída por tecido e uma rede de cabos retesada, e o método *Pneumatic Forming of Hardened Concrete* (PFHC) proposto por Kromoser e Kollegger (2015), baseado na concretagem de segmentos de placas de concreto inicialmente planas, como gomos de laranja achatados, que são transformados em segmentos

de casca com o insuflamento da fôrma sob as placas, com o auxílio de cabos de protensão junto à base.

Figura 3 - Protótipo da cobertura do NEST HiLo em execução (2017).



Fonte: Fotos de Naida Iljazovic. Disponível em: <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/full-scale-construction-prototype-nest-hilo-shell-roof>. Acesso em: 08/09/2023.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral da presente pesquisa é o estudo do uso de fôrmas flexíveis para a execução de cascas em concreto, tendo por objetivos específicos:

- ✓ Revisão histórica do uso de fôrmas flexíveis;
- ✓ Estudo em modelos físicos de diferentes aplicações de fôrmas flexíveis;
- ✓ Formulação de uma rotina paramétrica para análise do uso de uma fôrma flexível em um estudo de caso utilizando modelo Ansys Mechanical APDL.

1.2 JUSTIFICATIVA

As estruturas em casca apresentam vantagens atraentes frente às estruturas reticuladas tradicionais, destacando-se o apelo arquitetônico, a eficiência estrutural e a economia de materiais.

A concepção de formas variadas, com geometrias complexas, atribui valor estético e arquitetônico à estrutura. As curvaturas da estrutura possibilitam que o sistema trabalhe majoritariamente sob esforços de compressão, possibilitando a adoção de espessuras finas, da ordem de 10 cm para vãos de até 50 metros (MUTTONI et al., 2013).

Atrelada à eficiência estrutural do sistema, está também a economia de material, fator de grande relevância na conjuntura atual, em que os impactos ambientais se apresentam cada vez mais como um parâmetro fundamental de projeto.

Dentre as desvantagens desse sistema está o seu alto custo, a complexidade de cálculo e de detalhamento construtivo e os cuidados necessários durante o processo de execução da estrutura, exigindo um controle rigoroso.

Nesse contexto, o cimbramento é um dos grandes desafios na execução de cascas em concreto devido ao alto custo decorrente da complexidade geométrica exigida nesse tipo de estrutura e aos grandes vãos usualmente empregados. Hurd (1995) aponta que este é um fator de grande impacto no custo total da estrutura de concreto armado, variando entre 35% e 60% da mesma.

Maranhão (2000) menciona a faixa de 40% a 60% da participação do custo da fôrma no custo total da estrutura de concreto, correspondendo a um valor entre 8% e 12% do custo total de uma edificação.

Um exemplo de caso concreto é o da construção do shopping situado na cidade de Chiasso, Suíça, onde o custo com cimbramentos correspondeu a 49% do custo integral da estrutura de concreto (MUTTONI et al., 2013).

Além dos altos custos, a complexidade do cimbramento convencional exige um projeto detalhado e tempo adequado para sua montagem, assumindo um papel importante no prazo de construção de uma obra desse tipo.

Neste panorama, a redução do custo e do prazo de execução das fôrmas de uma estrutura em casca é fundamental para viabilizar sua utilização, tornando-a se não uma alternativa econômica, uma opção viável frente aos demais tipos estruturais.

Quanto ao uso de fôrmas flexíveis, diversos autores têm destacado nos últimos anos benefícios provenientes da adoção de moldes têxteis e pneumáticos para a conformação do concreto.

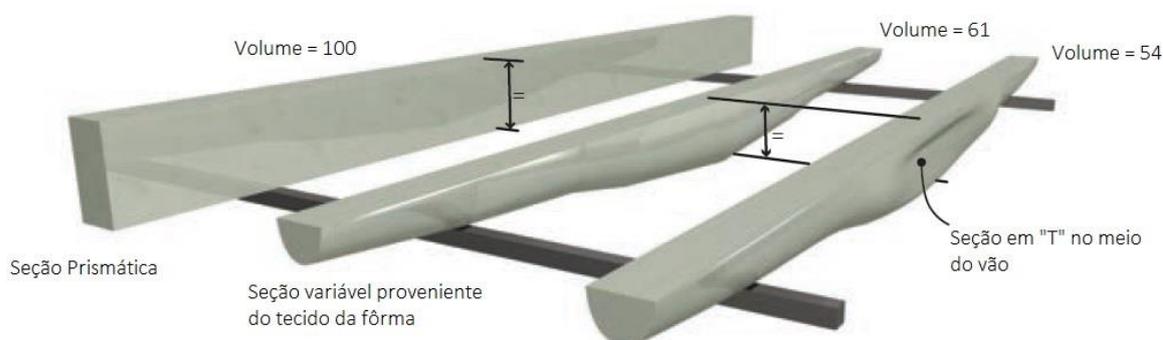
Veenendaal et al. (2011) mencionam ser desnecessário o uso de mão de obra qualificada para montagem dos tecidos e membranas empregados como fôrma, permitindo assim a adoção deste sistema de cimbramento em regiões afastadas de grandes centros urbanos, empregando a força de trabalho local.

Orr et al. (2013) destacam também a melhoria da qualidade da superfície do concreto em contato com a fôrma, impactando positivamente a resistência, a durabilidade e a estética do material. Em função do acabamento obtido, de grande valor estético e arquitetônico, Orr (2012) menciona ainda a possibilidade de expor os elementos estruturais, prescindindo assim do uso de forros.

Já Abdelgader et al. (2008) apontam para a redução de materiais empregados nas fôrmas e para a redução de custos de armazenagem, transporte e descarte dos tecidos e membranas empregados, em comparação aos sistemas de cimbramento tradicionais.

Além desses benefícios, Orr (2012) e Kostova et al. (2016) destacam a possibilidade de otimizar elementos estruturais por meio da variação de suas seções transversais, como o estudo retratado na Figura 4, o que se torna viável com o uso de fôrmas têxteis.

Figura 4 - Estudo de otimização de uma viga prismática.



Fonte: Adaptado de Orr (2012).

2 REVISÃO DA LITERATURA

O emprego de fôrmas na construção civil tem seu desenvolvimento atrelado à própria evolução do uso do concreto, em função da necessidade de conformação deste material em sua fase não endurecida.

No entanto, as fôrmas para concreto não se resumem apenas a moldes para sua conformação, constituindo-se sim de estruturas temporárias para suporte do concreto aplicado e demais cargas decorrentes das obras, tais como de equipamentos, trabalhadores e materiais (HURD, 1995).

De acordo com Hurd (1995), o projetista e o construtor das fôrmas devem se preocupar com três objetivos principais: garantir a qualidade dos elementos, nas geometrias e posições prescritas, e no acabamento do concreto; garantir a segurança da estrutura; e buscar a economia, construindo com eficiência, menor custo e em menor tempo.

Melaragno (1991) relata que o primeiro material a ser utilizado em cimbramentos foi a madeira, com o uso de toras maciças ou chapas compensadas, apresentando-se como uma boa solução tanto para geometrias reticuladas e planas quanto para geometrias de dupla curvatura. No entanto, a execução de geometrias complexas com o uso de fôrmas planas de madeira se torna demasiado custoso, podendo inviabilizar sua construção.

Maranhão (2000) menciona que o predomínio da madeira como matéria-prima principal para fabricação de moldes para o concreto armado continua ocorrendo, embora tenha havido uma substituição gradativa do uso de tábuas de Pinho do Pará (*Araucaria angustifolia*) para chapas de madeira compensada a partir da década de 40.

Além da madeira, outros materiais também são utilizados para produção de fôrmas para concreto como o aço, alumínio e plásticos, embora estes sejam economicamente viáveis nos casos em que a repetibilidade de seu uso permite a

diluição dos custos destes materiais ou que a degradação da fôrma seja um parâmetro a se evitar.

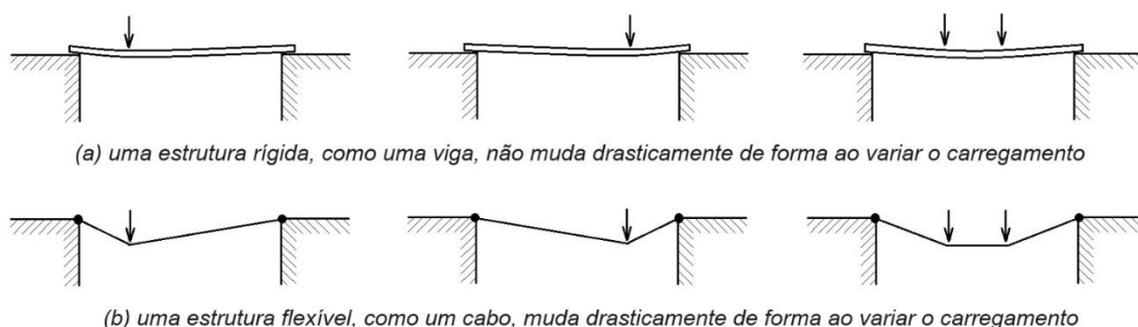
De todo modo, em se tratando da execução de estruturas em casca, os cimbramentos tradicionais se apresentam muito custosos em razão da complexidade de sua confecção e de sua montagem, tendo um impacto significativo no custo final da estrutura (HURD, 1995 e MUTTONI et al., 2013), razão pela qual os esforços de diversos inventores e pesquisadores foram empregados para o desenvolvimento de alternativas economicamente viáveis, dentre elas o uso de fôrmas flexíveis.

2.1 FÔRMAS FLEXÍVEIS

A distinção entre fôrmas rígidas convencionais e fôrmas flexíveis se dá justamente em função de seu comportamento ao serem submetidas aos carregamentos impostos durante a concretagem da estrutura.

Schodek e Bechthold (2014) definem estruturas rígidas como aquelas que não apresentam mudanças relevantes em sua geometria em função da variação dos carregamentos aplicados. Já as estruturas flexíveis, apresentam alterações drásticas de geometria de acordo com o carregamento aplicado, assumindo uma determinada forma para certa condição de carregamento (Figura 5), conceito que pode ser estendido também para estruturas temporárias como os moldes utilizados para a conformação do concreto fresco.

Figura 5 – Distinção entre estruturas rígidas e flexíveis



Fonte: Adaptado de Schodek e Bechthold (1992) *apud* Pauletti (2003).

Assim, fôrmas flexíveis são, portanto, estruturas de escoramento temporário, suscetíveis aos carregamentos aplicados, de modo que sua geometria varia substancialmente com as condições impostas.

Com relação à produção de cascas em concreto, Hawkins et al. (2016) apontam que, neste tipo de estrutura, a geometria é ditada em geral pelo método que são construídas, ou ainda, pelo comportamento do molde utilizado.

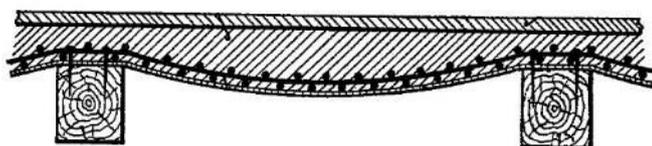
Uma das dificuldades na execução de estruturas em casca com fôrmas flexíveis está justamente no controle destas deformações e na maximização da eficiência estrutural da casca utilizando apenas famílias de formas preconcebidas.

2.1.1 Desenvolvimento Histórico

O primeiro uso de um tecido para conformação de concreto que se têm notícia é atribuído à Lilienthal (1899), que projetou uma laje à prova de fogo baseada no conceito de fôrma flexível (Figura 6).

A invenção de Lilienthal (1899) consistia na aplicação do concreto sobre um tecido suficientemente impermeável, coberto com as armações de reforço, voltado à produção de lajes. Com esta técnica, Lilienthal construiu mais de 30 casas voltadas à classe média de Berlim (WEST, 2016).

Figura 6 - Laje à prova de fogo produzida com fôrma flexível.



Fonte: Adaptado de Lilienthal (1899).

Objetivando o posicionamento do tecido, Lilienthal (1899) previu a fixação da fôrma nas vigas, mas sem esticá-la totalmente, adquirindo assim uma geometria funicular. De acordo com o autor, esta disposição geométrica permitia que as

armações desenvolvessem tensões de tração com o carregamento da laje, ocasionando um aumento considerável na capacidade resistente da estrutura (LILIENTHAL, 1899).

Seguindo o mesmo conceito idealizado por Lilienthal, outros inventores patentearam variações da técnica original, trazendo diferentes tipos de aprimoramentos e estendendo o campo de aplicação da técnica.

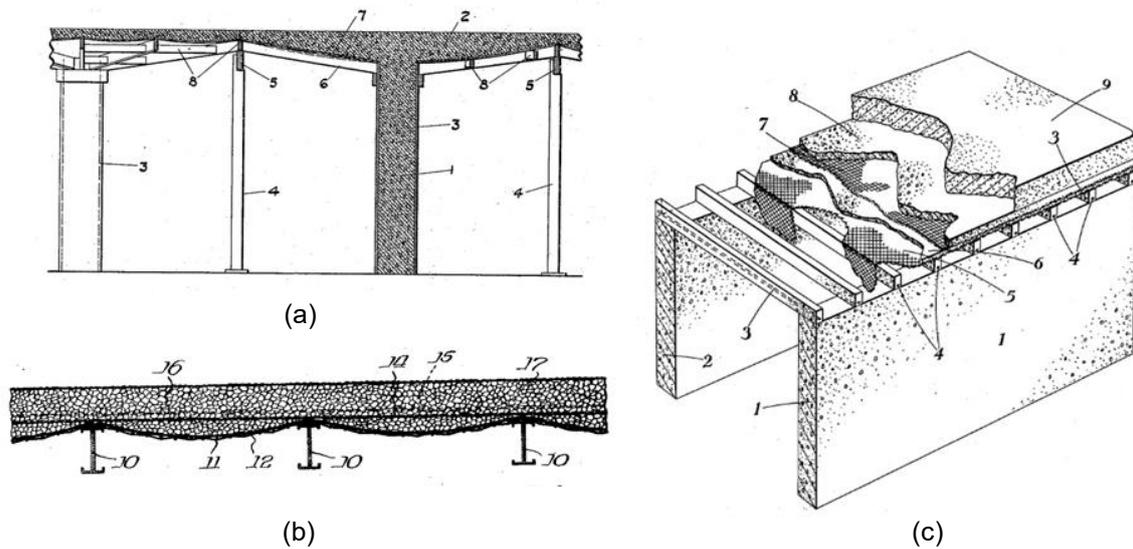
Fletcher (1917) estendeu a aplicação da técnica para elementos estruturais em geral, incluindo vigas, e aponta a economia de material e tempo decorrentes do uso de tecidos como fôrmas, possibilitando a concretagem de elementos com seções transversais variáveis (Figura 7a). Com isso, Fletcher (1917) menciona a possibilidade de obtenção de estados uniformes de tensão nos elementos, próximos à “forma teórica” destes componentes.

Govan e Ashenhurst (1928), já três décadas após a invenção de Lilienthal, patentearam processo construtivo similar, mas utilizando um material à base de gesso voltado à melhoria do isolamento térmico das construções (Figura 7b). Os autores apontam também os benefícios provenientes do uso da fôrma têxtil, como a economia de materiais e mão de obra.

Quanto às etapas construtivas, Farrar et al. (1937) sugerem a aplicação do concreto em duas camadas, com posicionamento das armações entre as concretagens (Figura 7c). Mencionam ainda (FARRAR et al., 1937) a possibilidade do uso de diversos materiais para a fôrma, incluindo papel e “tapetes de folhas ou grama” conforme disponibilidade local, e a facilidade de execução, sendo o método apropriado para locais em que a mão de obra especializada é escassa.

Ainda sobre os custos relacionados ao uso de fôrmas flexíveis, Parker (1971) calcula uma economia de 20% de concreto relacionada à geometria “parabólica” que a estrutura assume, e menciona a diminuição de custos com a madeira de fôrmas convencionais e com a mão de obra, apresentando-se como solução econômica inclusive frente ao uso de elementos pré-fabricados.

Figura 7 - Aprimoramentos desenvolvidos no uso de tecidos para conformação do concreto.

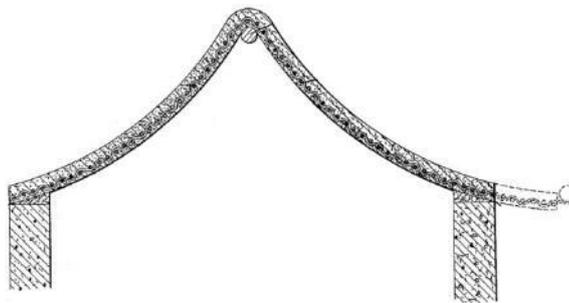


Fonte: (a) Adaptado de Fletcher (1917); (b) Adaptado de Govan e Ashenhurst (1928); (c) Adaptado de Farrar et al. (1937).

Dentre os primeiros inventores que aprimoraram o método proposto por Lillienthal, James Waller foi sem dúvida o que mais contribuiu para o desenvolvimento das fôrmas têxteis (WEST, 2016).

Por meio de observações experimentais, Waller desenvolveu um sistema para concretar coberturas que consistia num tecido de fibra vegetal esticado sobre uma estrutura de madeira, sobre o qual se aplicava a argamassa de cimento (Figura 8), patentado posteriormente como sistema “Nofrango” (VEENENDAAL et al., 2011).

Figura 8 - Cobertura produzida com fôrma de tecido.



Fonte: Adaptado de Waller (1934).

Diferentemente das patentes anteriores, Waller (1934) menciona que o tecido pode ser adotado como fôrma perdida e considerado como reforço da estrutura produzida, prescindindo assim de telas ou barras de aço ou de outros reforços para a argamassa. Sobre o retesamento da fôrma, Waller (1934) menciona ainda a importância em molhar o tecido após sua fixação, pois o encolhimento decorrente da umidade proporciona um tracionamento adicional do tecido e a penetração da argamassa nos poros do tecido é facilitada.

Waller (1934) aponta também o aspecto econômico da técnica desenvolvida, e ressalta a solidez e a leveza que a estrutura final apresenta.

Além do sistema Nofrango, Waller patenteou diversas outras aplicações que podem ser categorizadas de acordo com o retesamento da fôrma e a aplicação da argamassa. De acordo com Veenendaal et al. (2011), estas categorias são: esticadas em uma direção e enrijecidas (lajes e coberturas); esticadas em duas direções e enrijecidas (paredes); preenchidas e esticadas por pressão hidráulica (colunas); e estendidas sobre o chão (fundações e lajes sobre o terreno).

Posteriormente, o trabalho de Waller atingiria seu auge com o desenvolvimento da primeira aplicação de uma fôrma têxtil para construção de cascas (WEST, 2016): o sistema “Ctesiphon”, cujo nome foi inspirado no arco Taq-i-Kisra da antiga cidade imperial de Ctesiphon, nos arredores de Bagdá, Iraque (Figura 9).

Waller observou que a flacidez da fôrma entre os seus pontos de apoio ocasionava uma ondulação no tecido, que ao aplicado sobre arcos paralelamente espaçados e dentro de uma “flecha” adequada, promovia um enrijecimento adicional à casca produzida (WEST, 2016).

Projetando assim os arcos de sustentação pela analogia do cabo catenário invertido, a necessidade de reforços para a casca foi minimizada (VEENENDAAL et al., 2011), sendo até descartada na produção de dois protótipos de 12 e 32 metros de vão (WEST, 2016), construídos em 1943, cujo processo construtivo é ilustrado na Figura 10.

Figura 9 - Arco Taq-i-Kisra da antiga cidade de Ctesiphon, Iraque.



Fonte: Newman (2012).

Figura 10 - Construção de uma casca com o sistema "Ctesiphon".



Fonte: Waller e Aston (1953) *apud* West (2016).

Em função de sua rápida execução, sem a necessidade de mão de obra especializada e reforços, o sistema Ctesiphon se demonstrou competitivo durante a segunda guerra mundial, onde houve grande demanda por estruturas com grandes vãos livres, sendo construídas ao menos 50 cascas de concreto com este sistema, entre 6 a 12 metros de vão, nesta época (WEST, 2016).

Entretanto, Veenendaal et al. (2011) apontam fatores negativos das cascas produzidas pelo sistema Ctesiphon, a exemplo da fissuração ocorrida no topo dos arcos de sustentação e do baixo desempenho térmico das cascas.

Em 1954, Waller promoveu modificações em seu sistema Ctesiphon, de modo a produzir cascas circulares ou domos (VEENENDAAL et al., 2011), empregando

seu sistema em diversas construções, seja em casas, silos ou indústrias, em diversos países pelo mundo.

Outras aplicações primevas de fôrmas têxtis, abordadas por Waller, mas que se distanciam do trabalho desenvolvido por Lilienthal, estão no uso de tecidos para estruturas submarinas e geotécnicas.

Condie (1911) desenvolveu uma estrutura de proteção de encostas produzida pelo enchimento de um colchão de tecido com concreto. Store (1922) concebeu um método semelhante para a concretagem de fundações, quebra-mares e molhes, no entanto a concretagem dos invólucros, feitos de tecido, era realizada embaixo da superfície da água.

Fôrmas têxteis também foram ainda muito exploradas por arquitetos de renome da segunda metade do século XX, como Heinz Isler, Antoni Gaudí e Felix Candela (ABDELGADER et al., 2008).

Além do uso de tecidos de origem vegetal, surgiu no século XX uma série de outras aplicações utilizando tecidos de origem sintética, estas mais voltadas ao emprego de invólucros pneumáticos.

Embora a disponibilidade comercial de fibras sintéticas tenha se consolidado apenas a partir da década de 50 (KOSTOVA, 2016), aplicações utilizando membranas poliméricas já haviam sido concebidas desde os primeiros anos do século XX (BOYLE, 1907).

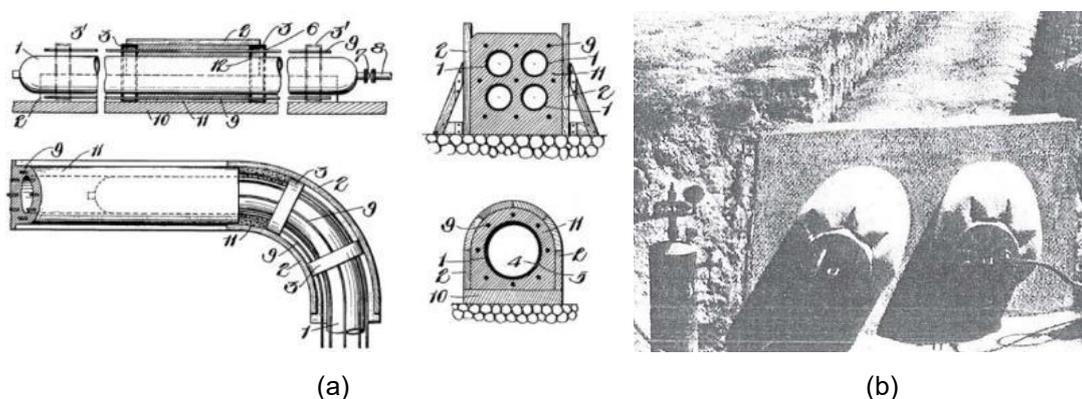
Uma das primeiras referências ao uso de fôrmas pneumáticas para construção de estruturas em concreto ocorre em meados da década de 1920 (MOHR, 1927) com a menção do arquiteto Normand W. Mohr aos sistemas pneumáticos recentes à época para construção de uma passagem subterrânea na baía de São Francisco.

Mohr (1927) sugere a execução de tubos submarinos com fôrmas infláveis e desinfláveis e o transporte dos tubos ao local por flutuação, podendo gerar uma economia de até dois terços do custo de uma ponte suspensa.

Em 1926, Nose já havia concebido um sistema semelhante para concretagem de tubulações de água e esgoto e galerias de drenagem de comprimentos quaisquer e sem emendas, inclusive com trechos curvos (Figura 11a), implementando melhorias para proteção da membrana inflável e obtenção de seções de geometrias variadas com a publicação de outra patente em 1931.

Um exemplo da aplicação do método concebido por Nose pode ser observada na Figura 11b, onde foi utilizada uma fôrma pneumática para construção de uma tubulação de água na Itália (SOBEK, 1991).

Figura 11 - Aparato para concretagem de tubulações com o uso de tubos infláveis (a) e exemplo de construção de tubulação de água na Itália (b).



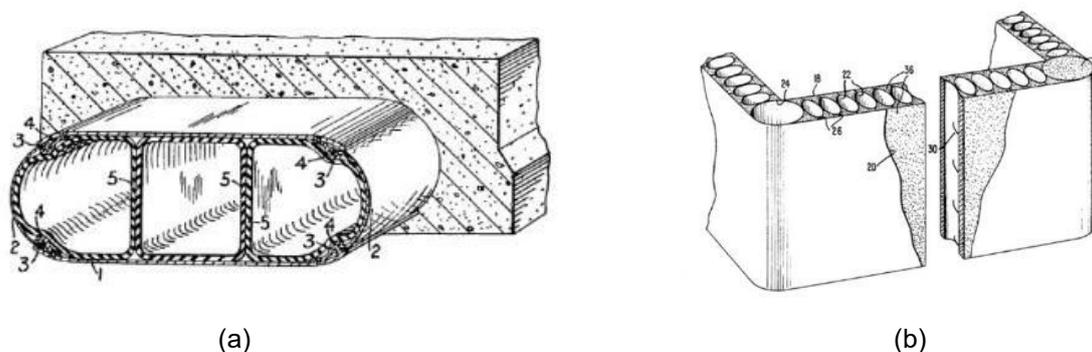
Fonte: (a) Adaptado de Nose (1926); (b) Sobek (1991).

A utilização de fôrmas pneumáticas para criação de espaços internos, introduzida por Nose, também foi explorada por Matthews e Ambrose (1949), Leonhardt (1955) e Mora (1968), que utilizaram tubos infláveis para delimitação de vazios durante a operação de concretagem.

Matthews e Ambrose (1949) propuseram um processo de fabricação de tijolos vazados de concreto com núcleo não circular, enquanto Mora (1968) concebeu um sistema de produção de painéis leves de concreto vazado (Figura 12). Em ambos

os casos, as regiões vazadas das peças são delimitadas por tubos inflados, gerando menor consumo de material e peças mais leves.

Figura 12 - Uso de tubos inflados para produção de tijolos vazados (a) e de painéis leves de concreto vazado (b).



Fonte: (a) Adaptado de Ambrose e Matthews (1949); (b) Adaptado de Mora (1968).

Já Leonhardt (1955), patenteou um sistema para execução de bainhas de protensão com uso de tubos infláveis e anéis metálicos, de modo que a fricção resultante da protensão dos cabos fosse reduzida.

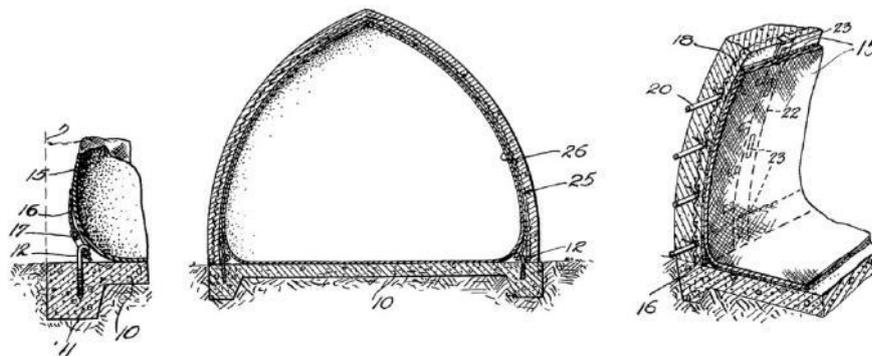
Com relação ao emprego de membranas pneumáticas para execução de cascas, as primeiras invenções sobre o assunto começaram a surgir apenas a partir da década de 40.

Wallace Neff desenvolveu um pioneiro sistema pneumático para construção de moradias de baixo custo e casernas, com custos mínimos e de rápida execução (NEFF, 1942).

O sistema proposto por Neff consistia na pressurização de uma membrana com a forma desejada, ancorada por cabos fixados na borda inferior, após a execução das fundações da estrutura final. Os reforços são colocados sobre a membrana inflada e as aberturas de portas e janelas são previstas com o uso de quadros. Em seguida é feita a concretagem da estrutura em camadas até se obter a espessura desejada. O desinflamento da membrana é feito somente após a cura do concreto, processo no qual a membrana se descola facilmente da estrutura formada. Para conter os esforços laterais da casca, Neff propôs o uso de reforços adicionais na

região mais próxima aos apoios, como o uso de barras de aço alocadas horizontalmente ao longo da estrutura em formato de anéis. Na Figura 13 há um detalhamento deste sistema.

Figura 13 - Sistema proposto por Neff para execução de cascas com membranas infladas.



Fonte: Adaptado de Neff (1942).

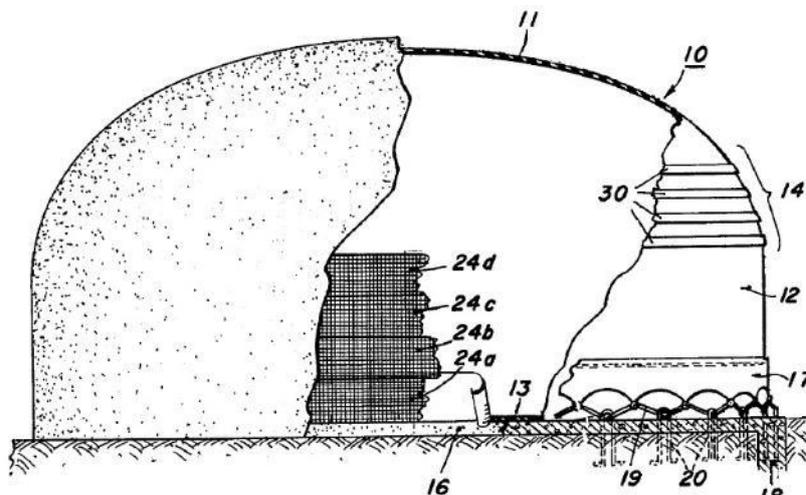
Posteriormente em 1959, com a criação de uma nova patente, Neff (1959) relata que as cascas, moldadas convencionalmente como domos, apresentaram falhas e fissuras nas paredes laterais em função das tensões radiais que surgem nesta parte da estrutura.

Diferentemente da porção superior, que atua apenas à compressão, as laterais da casca são submetidas a esforços de tração, cuja região é delimitada por um plano horizontal, chamado por Neff de plano de ruptura, no qual os anéis de reforço previstos seriam responsáveis por conter estas tensões.

No entanto, Neff (1959) explica que utilizando os anéis de reforço de forma passiva, qualquer nível de tensão nesta região produz deformações excessivas na estrutura, e que, em função da curvatura da casca, não seria possível efetuar o pré-tensionamento adequado das barras para que pudessem atuar de forma ativa.

Assim, propôs uma geometria circular para o piso da estrutura, com laterais verticais, formando uma superfície cilíndrica nas proximidades dos apoios, de modo que os anéis horizontais pudessem ser pré-tracionados, e as tensões se distribuíssem de maneira uniforme ao longo desta região (Figura 14).

Figura 14 - Novas adaptações ao sistema proposto por Neff.

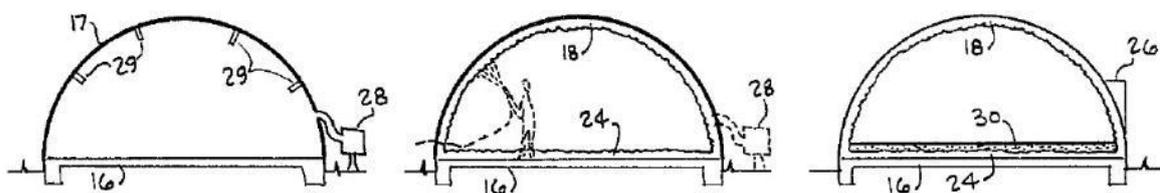


Fonte: Adaptado de Neff (1959).

Sistemas com melhorias semelhantes também foram propostos por Turner (1966), Heifetz (1972a), Provoust (1978) e South e South (1979).

Turner (1966) e South e South (1979) propuseram a aplicação de espuma de poliuretano na parte interna da membrana inflada, produzindo assim um enrijecimento da fôrma para posterior aplicação do concreto, conforme se observa na Figura 15. Além disso, a camada plástica formada auxilia na impermeabilização da estrutura.

Figura 15 - Enrijecimento interno do invólucro pneumático antes da aplicação externa do concreto.



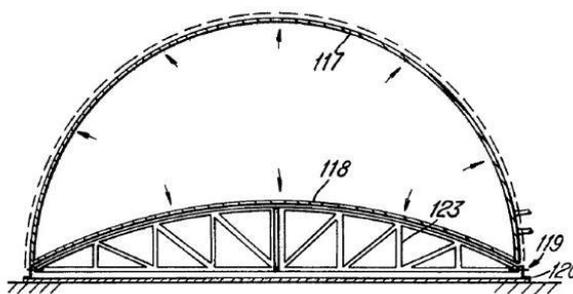
Fonte: Adaptado de Turner (1966).

Procurando enrijecer o invólucro pneumático, Heifetz utilizou um sistema semelhante ao de Neff, mas utilizando pressões mais elevadas. Enquanto as membranas de Neff eram pressurizadas na faixa de 0.5 a 2.0 kN/m², as fôrmas de

Heifetz eram infladas com pressões de 4.0 a 10.0 kN/m² (KROMOSER; HUBER, 2016).

Heifetz (1972a) inventou ainda um sistema para ancoragem da membrana por meio de um anel rígido situado na base da estrutura, capaz de absorver as tensões impostas pelo insuflamento do molde, aliviando assim os esforços na fundação, ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Enrijecimento da base com o uso de um anel rígido.



Fonte: Adaptado de Heifetz (1972a).

Com este sistema, denominado “Domecrete Building System” ou “Heifetz System”, foram construídas diversas cascas em vários países, como Israel, África do Sul, Bolívia, Itália e Irã, cujas etapas construtivas são indicadas na Figura 17.

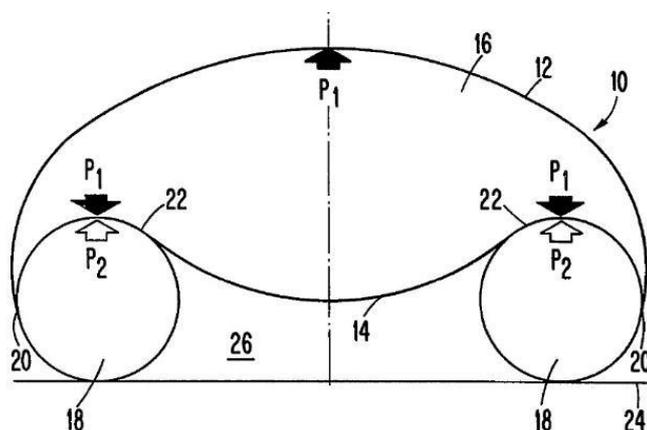
Figura 17 - Etapas construtivas do "Domecrete Building System".



Fonte: Heifetz (1972b).

Assim como Heifetz, Provoust (1978) identificou os esforços de ancoragem das fôrmas pneumáticas como uma grande desvantagem deste processo construtivo, projetando assim um sistema pneumático secundário na base da membrana superior, com câmaras de ar separadas, para absorção das tensões que seriam exigidas nos elementos de fundação (Figura 18).

Figura 18 - Concepção de um invólucro pneumático secundário na base da membrana.



Fonte: Adaptado de Provoust (1978).

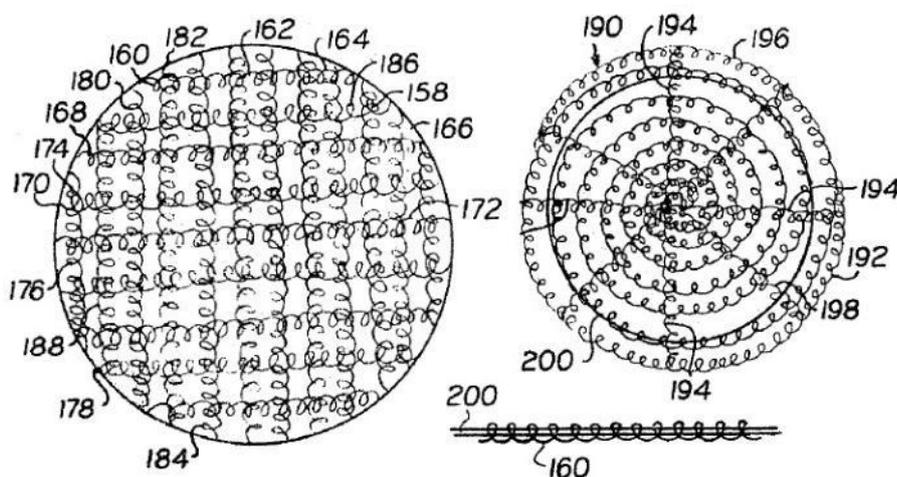
Há que se mencionar também o processo concebido por Bird et al (1964) que envolvia a combinação de um sistema de treliças sobrepostas em moldes infláveis atuando como reforço e possibilitando a execução de cascas também de geometria cilíndrica.

Os métodos de construção com invólucros pneumáticos apresentados até então previam o insuflamento da membrana antes da concretagem da casca. Neste contexto, o processo desenvolvido pelo arquiteto italiano Dante Bini no final da década 60 foi inovador ao prever primeiramente a deposição do concreto sobre a membrana desinflada.

Além da inversão das etapas de deposição do concreto e insuflamento da fôrma, Bini (1969) propôs o uso de uma malha de reforço extensível, de modo a possibilitar que a armação adquira uma geometria tridimensional a partir do plano da base da casca (Figura 19). Bini menciona ainda que o reforço não precisaria

ser necessariamente de aço, sugerindo também o uso de fibras naturais ou sintéticas.

Figura 19 - Disposição do reforço nas cascas de Bini.



Fonte: Adaptado de Bini (1969).

Pugnale e Bologna (2014) relatam que no primeiro protótipo de Bini, realizado em 1964, a fluidez do concreto foi restringida por uma malha, resultando num acabamento granular e não compactado, o que foi corrigido com o alisamento manual da superfície. Já em 1967, após a execução de novos experimentos e a criação de sua empresa “Binishells Spa”, Bini realizou uma demonstração no campus da Universidade de Columbia, Estados Unidos, fazendo uma modificação em seu processo construtivo: Bini instalou uma segunda membrana sobre o concreto, antes do insuflamento, melhorando assim o acabamento da casca final. Além disso, foi possível fazer a vibração mecânica do concreto com o auxílio de cabos, perfazendo toda a superfície da casca.

Por meio deste novo processo, Bini (1969) patenteou uma série de novas aplicações, apresentando em detalhes a conexão entre a membrana e a fundação e diferentes meios de insuflamento do invólucro pneumático.

Em sua patente, Bini (1969) relata que após a segunda guerra mundial, o custo de mão de obra para construção de casas, escritórios, escolas e afins, encareceu muito a ponto de se tornar motivo de preocupação em sua época, estabelecendo

assim a finalidade primária de sua invenção: o desenvolvimento de um método capaz de reduzir significativamente os gastos com a construção de estruturas civis quando comparado aos métodos que existiam até então.

Já em 1971, o método desenvolvido por Bini havia ganhado reconhecimento internacional, com a execução de cascas pneumáticas em mais de 20 países (PUGNALE; BOLOGNA, 2014), por meio de sua empresa “Binishell Spa”. Em 1973, Bini foi convidado pelo governo australiano para executar uma série de construções voltadas ao ensino público, chegando a executar mais de 20 edificações por meio de seu processo construtivo.

No entanto, diversos autores apontam aspectos negativos do método desenvolvido por Bini. Ramaswamy (1968) comenta sobre diversas anomalias observadas nas cascas produzidas na Austrália relacionadas à fluência do concreto, assim como o fazem Levy e Salvadori (1992), mas estes destacando diversos aspectos construtivos delicados envolvidos no processo desenvolvido por Bini.

Levy e Salvadori (1992) alertam para o monitoramento adequado da pressão interna das cascas de Bini, argumentando que uma pressão elevada modificaria a geometria prevista e que uma pressão demasiada baixa planificaria perigosamente o topo do domo. Os autores indicam esta como a principal causa para o colapso de duas cascas construídas por Bini na Austrália, cujas pressões internas da fôrma sofreram variações em função da temperatura ambiente, tensionando ou aliviando o topo da casca de maneira não prevista.

Ainda sobre o uso de fôrmas pneumáticas, Sobek (1986) traz uma série de questões concernentes ao assunto, agrupando entre aquelas relacionadas ao *design* adequado das cascas, aos materiais empregados tanto para a membrana da fôrma quanto para o concreto empregado, e aos métodos utilizados para limitar a deformação da fôrma durante a aplicação do concreto.

Neste último quesito, Sobek (1986) menciona algumas soluções possíveis para a manutenção da rigidez do invólucro pneumático durante a deposição do concreto, tais como o aumento da pressão interna, a concretagem da casca em etapas ou seções, o enrijecimento da fôrma com espumas plásticas, adoção de estruturas auxiliares como cabos ou malhas de cabos e o uso de elementos pré-moldados.

Todas estas invenções mencionadas até então, baseadas na utilização de fôrmas têxteis ou pneumáticas, se assemelham pelo esforço de seus inventores em reduzir os custos de produção de estruturas em concreto com foco na redução dos custos provenientes das fôrmas convencionais de madeira e da mão de obra necessária para sua confecção.

Foi neste contexto que as fôrmas flexíveis tiveram seus desenvolvimentos iniciais, apresentando-se inclusive como uma opção construtiva viável ao mercado, haja vista o sucesso do processo desenvolvido por South e Bini.

Entretanto, a partir da década de 70, outro aspecto proveniente do uso das fôrmas têxteis passou a atrair a atenção de projetistas e construtores da época: a textura transmitida ao concreto em função dos tecidos utilizados. A estética obtida com o uso de fôrmas têxteis foi primeiramente explorada pelo arquiteto espanhol Miguel Fisac, interessado em conferir uma expressão nova e própria ao concreto em suas obras (MARTIN-MANTERO, 2015).

A partir desta ideia, Fisac (1972) *apud* Martin-Mantero (2015) patenteou um sistema de fôrmas verticais constituído por uma lâmina de material flexível, como plásticos e similares, com diferentes configurações e geometrias, o que permitia moldar a superfície do concreto e imprimir a textura de seu estado pastoso.

Com esta técnica, Fisac projetou edifícios com fachadas arquitetonicamente inovadoras, como a clínica MUPAG, em Madrid (1969-1973), o hotel Tres Islas, em Fuerteventura (1970-1973), o Edifício Viviendas Del Parterre, em Daimiel (1978-1982), conforme se observa na Figura 20, entre outros (WEST, 2016 e MARTIN-MANTERO, 2015).

Figura 20 - Clínica MUPAG (a) e o Edifício Viviendas Del Parterre (b).



(a)

(b)

Fonte: (a) West (2016) e (b) Martin-Mantero (2015).

Alguns anos mais tarde, já na década de 90, porém de forma independente ao trabalho de Fisac, o arquiteto japonês Kenzo Unno desenvolveu um sistema de painéis modulares empregando tecidos como fôrma (SCHMITZ, 2014). Tratava-se de um método de baixo custo para produção de paredes, constituído por um tecido fixado numa malha de pontos (WEST, 2016).

Nesta época, o professor Mark West da Universidade de Manitoba, Canadá, também passou a desenvolver experimentos com fôrmas têxteis para fabricação de elementos como colunas e vigas, chegando a fundar o primeiro centro de pesquisas dedicado ao assunto, o “Centre for Architectural Structures and Technology” – CAST (ORR, 2012).

Dentre as observações feitas sobre o uso de fôrmas flexíveis, West (2016) menciona que a plasticidade e o peso próprio do concreto desempenham papel crucial na determinação da forma final da estrutura, passando a se relacionar ativamente com a fôrma, o que não ocorre quando utilizados moldes rígidos. Quanto ao controle de execução, West (2016) expõe que este é obtido através da especificação dos materiais utilizados, tanto da fôrma quanto do concreto, da imposição das condições de contorno, e pela determinação do retesamento adequado à fôrma.

Já no século XXI, o uso de fôrmas flexíveis passou a atrair a atenção de diversos outros especialistas e empresas, proporcionando aplicações diversas (LAWTON; MILLER-JOHNSON, 2012 e KROMOSER; KOLLEGGER, 2015).

No âmbito acadêmico, Orr (2012) desenvolveu sua tese de doutorado a partir de um estudo de otimização de vigas de concreto com o uso de fôrmas flexíveis, cuja capacidade de deformação permite a conformação do concreto em geometrias estruturalmente mais eficientes do que aquelas obtidas a partir de moldes convencionais ortogonais, sendo possível alcançar uma economia de até 40% de materiais.

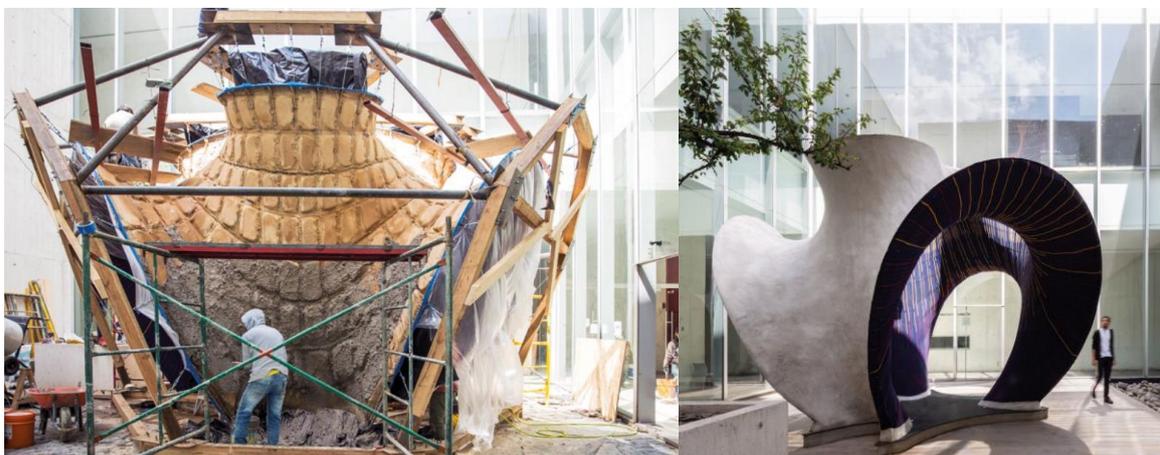
Orr (2012) expõe ainda que as vantagens do uso de fôrmas têxteis não se restringem apenas à redução de consumo de materiais. Segundo o autor, a aplicação do concreto em tecidos permite que a água em excesso seja expelida durante a cura do material, trazendo benefícios arquitetonicamente interessantes, com maior qualidade de acabamento da superfície. Além disso, autores (PRICE, 1991 e 2000 e DuPont, 2007 apud ORR, 2012) apontam uma melhora na resistência à tração na superfície do concreto moldado em fôrmas têxteis e uma diminuição da permeabilidade, promovendo proteção adicional à armadura interna em função da redução da carbonatação do concreto e do ingresso de cloretos e oxigênio em sua superfície (PRICE, 2000 apud ORR, 2012).

No entanto, Orr (2012) menciona a existência de obstáculos para execução de cascas com fôrmas flexíveis, tais como os processos complexos de otimização, a dificuldade do entendimento do comportamento estrutural, as dificuldades de construção e predição do comportamento do molde e as mudanças na zona de superfície.

Há que se mencionar também os trabalhos desenvolvidos por Manelius (2012) e Kostova (2016) em suas teses de doutorado, que investigaram o uso de moldes flexíveis em modelos empíricos e na concepção e projeto de estruturas resultantes destes moldes.

Dentre as aplicações mais recentes do uso de fôrmas flexíveis, pode-se citar a cobertura do módulo HiLo do NEST laboratory, na Suíça (BLOCK et al., 2017), uma casca tipo sanduíche constituída por um núcleo rígido de poliuretano executada por meio de uma fôrma flexível mecanicamente retesada, formada por uma rede de cabos suspensa, e a casca de concreto ondulada moldada sobre um tecido pré-fabricado e uma rede de cabos concebida em homenagem ao arquiteto Félix Candela, a KnitCandela (POPESCU et al., 2020), exibida no Museo Universitario Arte Contemporáneo (MUAC) na Cidade do México entre outubro de 2018 e julho de 2019 e ilustrada na Figura 21.

Figura 21 - Execução da casca Knitcandela.



Fonte: Adaptado de Popescu et al. (2020).

É de se destacar também aplicações comerciais já difundidas, a exemplo do sistema de fundações Fastfoot® da empresa canadense Fab-Forms (2023) e os produtos da Concrete Canvas® (2023) voltados à proteção de encostas e abrigos infláveis de rápida execução.

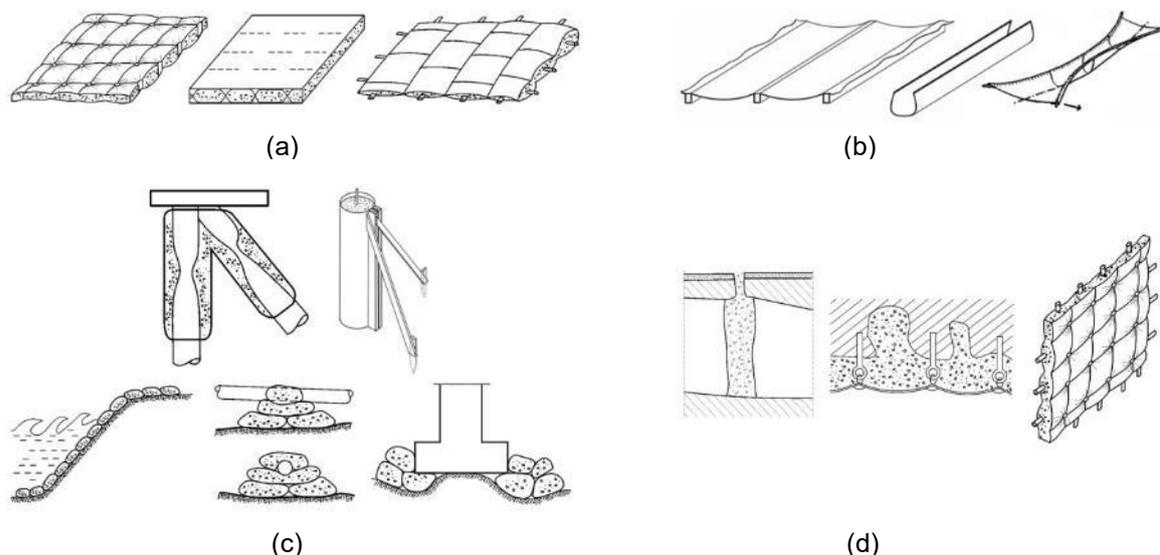
2.1.2 Classificação

Diversos autores já propuseram meios de categorizar fôrmas flexíveis em famílias de acordo com a natureza dos esforços atuantes na fôrma ou em razão da geometria que se pode obter com sua utilização.

Isler (1994) estudou cinco técnicas diferentes em seus experimentos de cascas produzidas por meio de folhas e membranas, citando os seguintes métodos: método pneumático; método da membrana suspensa; o retesamento de membranas elásticas em diferentes quadros, com fixação em suas bordas; método do fluxo; e outras técnicas combinadas ou não entre si.

Abdelgader et al. (2008) propuseram uma classificação em quatro grupos principais, com base no comportamento do molde e na geometria e uso da estrutura formada, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Tipos de fôrmas flexíveis segundo Abdelgader et al. (2008): (a) fôrmas colchão, (b) fôrmas abertas, (c) fôrmas tipo bolsas, (d) fôrmas de cobertura.



Fonte: Adaptado de Abdelgader et al. (2008).

Já de acordo com Veenendaal, West e Block (2011) e Hawkins et al. (2016), as fôrmas flexíveis podem ser divididas em duas categorias: fôrmas de enchimento e fôrmas de superfície. Diferentes elementos construtivos podem ser obtidos em cada categoria assim definida, conforme exposto na Figura 23.

Figura 23 - Classificação de fôrmas flexíveis segundo Veenendaal, West e Block (2011).

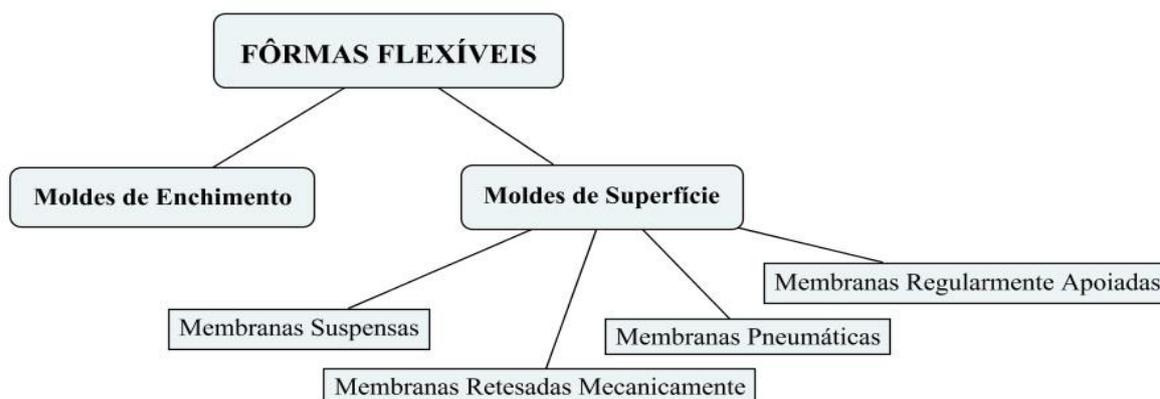
 Moldes de Enchimento	 Moldes de Superfície
 Pisos e Lajes	 Coberturas, cúpulas e domos
 Vigas e Treliças	 Pisos
 Pilares	 Paredes
 Paredes e Painéis de Fachada	 Pneumáticos
 Fundações	 Adaptáveis
 Aplicações Submarinas	

Fonte: Adaptado de Hawkins et al. (2016).

Enquanto os elementos estruturais obtidos por meio dos moldes de enchimento apresentam processos de concretagem semelhantes entre si, aqueles obtidos por meio de moldes de superfície podem exigir processos de execução variados.

Fôrmas de superfície são aquelas em que o concreto ou argamassa aplicados não são confinados lateralmente, e seu fluxo é controlado por meio da fluidez do próprio material. Com base nas diversas aplicações estudadas e desenvolvidas ao longo do século XX e XXI, constata-se que este tipo de fôrma pode ser dividido em quatro famílias de acordo com o método construtivo empregado, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Classificação das fôrmas de flexíveis.

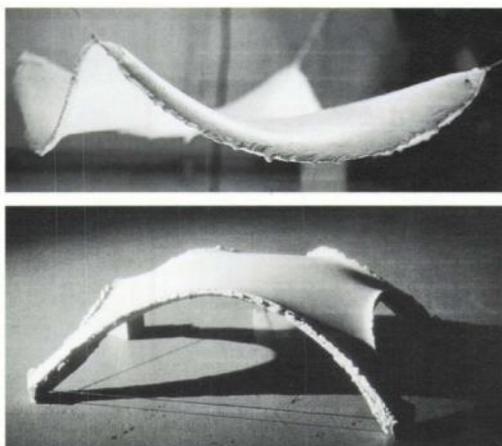


Fonte: Autoria própria.

A primeira delas são as cascas geradas por membranas suspensas, nas quais a força da gravidade da própria estrutura dá origem a uma geometria funicular puramente em estado de tração. Invertendo a posição da estrutura, esta passa a ser submetida a um estado puro de compressão, possibilitando o aproveitamento eficaz das propriedades do concreto. A desvantagem deste método reside na sua limitação de tamanho para concretagem *in situ* e na operação de inversão da casca, a qual pode introduzir condições indesejáveis de carregamento.

Nesta categoria se encontram as cascas estudadas por Isler (1994), conforme se ilustra na Figura 25.

Figura 25 - Cascas de Isler geradas por tecidos suspensos.



Fonte: Adaptado de ISLER (1994).

O segundo método abrange a família de cascas produzidas a partir da concretagem de membranas retesadas, usualmente com geometrias anticlásticas contendo regiões de tração. É o caso da cobertura do módulo HiLo do NEST laboratory (BLOCK et al., 2017), cuja fôrma concebida consiste numa rede de cabos associada a um tecido para conformação da casca.

Outro método é a utilização de membranas pneumáticas como fôrmas para o lançamento ou ereção do concreto. As geometrias produzidas são usualmente sinclásticas. Para esta família de geometrias, há a necessidade de equipamentos adicionais para insuflamento e sustentação do molde.

Conforme exposto anteriormente, este tipo de fôrma foi muito empregado por Bini na década de 70 (BINI, 1969 e PUGNALE; BOLOGNA, 2014), mas há também aplicações recentes com expressivos aprimoramentos construtivos, como no caso do processo construtivo exposto por Kromoser e Kollegger (2015) e Kromoser e Huber (2016), denominado “Pneumatic Forming of Hardened Concrete (PFHC)”, que consiste na concretagem de segmentos de placas de concreto inicialmente planas, como gomos de laranja achatados, que são transformados em segmentos de casca com o insuflamento da fôrma sob as placas, com o auxílio de cabos de protensão junto à base.

Por último, a geometria da casca pode ser originada a partir de fôrmas flexíveis sustentadas ao longo de toda superfície por suportes regularmente distribuídos, ou do próprio solo, tal como o processo construtivo associado aos produtos da empresa Concrete Canvas (2023) utilizados para proteção de encostas. Neste caso, a fôrma não é submetida a um tensionamento prévio, nem invertida como no caso das fôrmas suspensas.

2.1.3 Tecidos e Membranas

Com relação à composição e processo de produção, Oliveira (2003) expõe que os tecidos usualmente são constituídos por fibras e por uma matriz, ao passo que nas membranas poliméricas não há a presença de fibras.

No caso dos tecidos, as fibras precisam ser unidas por algum processo para se tornarem fios, tendo em vista não possuírem o comprimento ou a espessura adequados para sua utilização direta, podendo ser dispostas paralelamente ou torcidas juntas (OLIVEIRA, 2003). Já os fios são entrelaçados ou sobrepostos em duas direções para a formação da malha.

A malha constituída por fios entrelaçados geralmente segue duas direções, denominando-se urdume e trama, sendo que os fios da trama são entrelaçados

alternadamente por cima e por baixo dos fios do urdume, estes inicialmente retesados (PAULETTI, 2003).

Já no caso da malha constituída por fios sobrepostos não há o entrelaçamento dos fios, sendo apenas aplicada a matriz após a sobreposição dos fios (OLIVEIRA, 2003), caracterizando-se como um “nãotecido”. Pode-se ainda empregar as fibras diretamente neste caso, utilizando processos mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) para consolidação da malha (ABNT, 2017).

Oliveira (2003) destaca que, enquanto a espessura da malha nãotecida atinge duas vezes o diâmetro dos fios, a malha de fios tecidos atinge aproximadamente três vezes o diâmetro dos fios empregados, sendo que as ondulações produzidas pela trama alteram as características mecânicas do material, ocasionando uma ortotropicidade acentuada.

Além das ondulações dos fios, Oliveira (2003) menciona outros parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas do tecido tais como o diâmetro dos fios, a quantidade de fios por metro, o afastamento entre os fios e o ângulo entre a trama e a urdidura.

Em se entrelaçando os fios da trama perpendicularmente aos fios do urdume, Pauletti (2003) expõe que o reticulado retangular produzido é suscetível a distorções angulares, o que poderia ser minimizado pelo alinhamento das fiações com as direções das tensões principais, mas que raramente é possível. Pauletti (2003) sugere ainda a adoção de uma segunda camada de fiações com direções oblíquas à primeira, de modo a atenuar grandes distorções decorrentes dos variados carregamentos.

Há ainda outro procedimento de composição da malha a partir de um fio em laço que percorre uma trajetória sinuosa, formando assim uma malha interligada (WEST, 2016), denominado “tecido tricotado” (“*knit textile*”). West (2016) destaca que, neste tipo de malha, como os fios são em laço e não retilíneos, o tecido

produzido permite uma certa elasticidade quando tensionado. Além disso, a depender do padrão de “tricotagem”, é possível obter tecidos que permitem consideravelmente menos alongamento em uma direção do que em outra, bem como tecidos com alongamento semelhantes nas direções do comprimento e da largura (WEST, 2016).

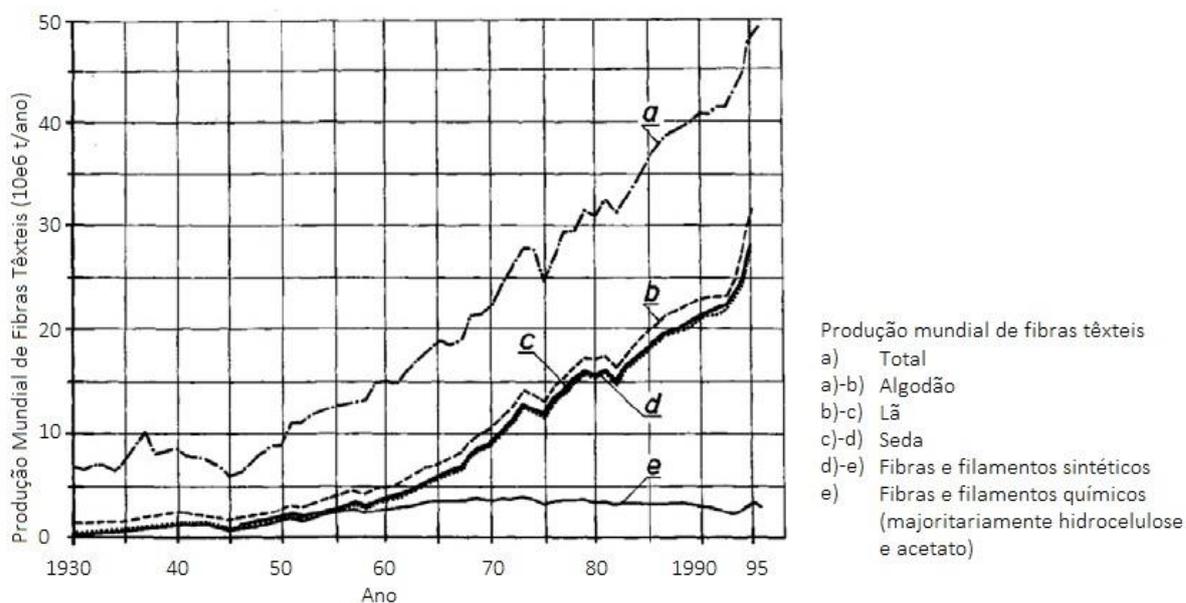
A respeito da matriz, Oliveira (2003) relata que sua aplicação pode se dar por meio do derramamento da matriz líquida sobre a malha, esperando-se a cura ou polimerização, ou ainda pelo espalhamento com espátula e pressionada contra o tecido ou laminada.

Outro aspecto importante está relacionado à união de pedaços de tecido que compõe a estrutura de membrana, sendo que esta pode ser soldada, colada ou ainda costurada (OLIVEIRA, 2003), sendo fundamental que a emenda seja capaz de transmitir adequadamente os esforços atuantes no tecido. Oliveira (2003) destaca ainda que a adesão da matriz e a largura da emenda são fatores que influenciam na resistência desta ligação.

Quanto aos materiais utilizados, é de se destacar que as primeiras aplicações de fôrmas flexíveis se voltaram ao uso de tecidos constituídos por fibras de origem vegetal, principalmente à base de fibras de juta e/ou sisal (WALLER, 1934 e WEST, 2016), em função da disponibilidade à época.

Embora a invenção do primeiro tecido inteiramente sintético tenha ocorrido em 1913 (KOSTOVA, 2016), a produção comercial de tecidos sintéticos só se desenvolveu a partir de 1950, quando a os tecidos com melhor desempenho (permeabilidade, resistência e durabilidade) se tornaram disponíveis a preços baixos, viabilizando sua produção em larga escala (KOSTOVA, 2016). Este cenário é ilustrado pelo gráfico reproduzido na Figura 26.

Figura 26 - Dados da produção mundial de tecidos.



Fonte: Adaptado de Fourne (1999) apud Kostova (2016).

Pauletti (2003) destaca que, antes da disseminação dos tecidos sintéticos, a resistência e a durabilidade inferiores dos tecidos naturais eram fatores limitantes para extensão dos vãos e a permanência das estruturas de membrana, razão pela qual as fibras sintéticas prevaleceram nas aplicações recentes.

Sobre as fibras utilizadas atualmente em tecidos voltados para estruturas de membrana, Oliveira (2003) destaca que as mais utilizadas são o nylon, o poliéster, a aramida e a fibra de vidro. Já os materiais principais utilizados para a matriz são: o polícloreto de vinila (policloroetileno ou PVC); o politetrafluoretileno (PTFE ou Teflon); e o silicone (OLIVEIRA, 2003).

No mesmo sentido, Happold (1994 apud PAULETTI, 2003) aponta que os materiais disponíveis para estruturas de membrana são bastante restritos, limitados, na prática, à três ou quatro tipo de tecido: fibras de poliéster ou de vidro recoberta com PVC; fibras de vidro ou carbono recobertas com Teflon/PTFE; e fibras de vidro ou carbono recobertas com silicone.

Já no caso de tecidos utilizados como fôrma, West (2016) expõe a preferência por tecidos à base de fibras de polietileno (PE) e polipropileno (PP), cuja

disseminação em meados da década de 1980 foi um divisor de águas para a tecnologia de fôrmas de tecido. West (2016) relata que os tecidos constituídos por fibras de PE e PP são baratos, extremamente robustos, não propagam rasgos e não requerem óleos ou outros agentes para desmoldagem, permitindo sua reutilização por várias vezes, razões pelas quais substituíram a utilização de tecidos à base de fibras vegetais, como a juta e o sisal.

No entanto, admitindo-se a perda da fôrma ou a sua utilização como reforço do concreto, conforme sugerido por Waller (1934), ainda pode ser viável a aplicação de tecidos de origem vegetal, mais baratos, inclusive em função da redução do impacto ambiental decorrente da utilização de materiais renováveis, aspecto cada vez mais relevante na atualidade.

Quanto ao uso da membrana como fôrma, é de se destacar que a durabilidade do tecido não é um fator preocupante, uma vez se tratar de estrutura provisória, razão pela qual a aplicação de tratamentos especiais no tecido, como o uso de matriz polimérica, pode ser dispensável.

Além disso, comparativamente a uma membrana permanente, o tecido utilizado como fôrma pode ter um fator de segurança relacionado à resistência do material mais permissivo em função de seu caráter provisório, sendo possível submeter a fôrma a um nível de tensão mais elevado do que aquele usualmente estabelecido em projetos no qual a membrana é utilizada como estrutura definitiva.

Por fim, cabe destacar o efeito de relaxação acentuada apresentada pelos tecidos (OLIVEIRA, 2003), fenômeno que ocasiona uma redução das tensões atuantes na membrana inclusive após curtos períodos, e que se trata de importante fator na utilização do tecido como fôrma.

2.2 CASCAS EM CONCRETO

2.2.1. Conceituação

Segundo Adrianenssens et al. (2014), estruturas em casca podem ser definidas como sistemas construtivos descritos por superfícies curvas tridimensionais, nos quais uma dimensão é significativamente inferior quando comparada com as demais.

Diferentemente das membranas onde atuam apenas esforços normais, estruturas em casca são capazes de resistir e equilibrar ainda momentos fletores e forças cortantes, caracterizando-se como o tipo estrutural conceitualmente mais genérico.

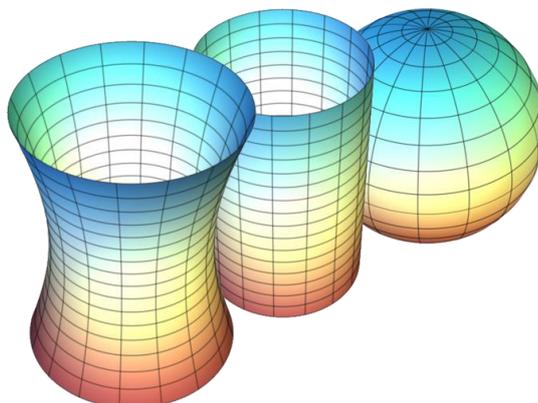
No entanto, embora capazes de suportar diferentes tipos de carregamentos, cascas eficientes são aquelas que atuam predominantemente sob esforços de membrana (HAWKINS et al., 2016), resultando em seções mais delgadas em função da ausência de esforços de flexão significativos.

Com relação às curvaturas, as cascas podem ser classificadas em sinclásticas, quando as curvaturas de linhas ortogonais sobre a superfície apresentam a mesma concavidade, anticlásticas, quando as curvaturas de linhas ortogonais apresentam concavidades opostas, ou cilíndricas, quando apenas uma das linhas ortogonais sobre a superfície apresenta curvatura.

Ao produto entre as curvaturas de duas linhas ortogonais, dá-se o nome de curvatura gaussiana (k), correspondendo assim às definições anteriores com base no valor deste parâmetro, que é ilustrada na Figura 27.

- $k > 0$ (geometria sinclástica);
- $k = 0$ (geometria cilíndrica ou plana);
- $k < 0$ (geometria anticlástica).

Figura 27 - Representação da curvatura gaussiana: ($k < 0$; $k = 0$; $k > 0$).



Fonte: Nicoguardo/Wikimedia Commons.

Ainda de acordo com Adrianenssens et al. (2014), as cascas podem ser distinguidas em três tipos de geometria: formas livres ou cascas esculturais, quando geradas sem a consideração de seu desempenho estrutural; cascas matemáticas, analíticas ou geométricas, quando descritas por funções analíticas convenientes para efetuação dos cálculos e construção da estrutura; ou cascas *form-found*, obtidas através da consideração de seu desempenho estrutural.

Embora desejável que as cascas estejam submetidas predominantemente a efeitos de membrana, sua forma não é ditada pelos carregamentos impostos, ou seja, esta não varia sua forma conforme variam os esforços externos.

A esta característica se dá o nome de *form-passive* (ADRIANSENS et al., 2014), em oposição aos cabos e às redes de cabos, classificados como *form-active*, estes últimos nos quais a forma depende intrinsecamente do carregamento aplicado.

Pode-se ainda classificar as estruturas em casca com base na sua espessura em relação aos raios de curvatura principais que sua superfície média apresenta. (VIZOTTO, 1993).

Quanto ao cálculo de estruturas em casca, Lamé e Clapeyron foram os primeiros pesquisadores neste campo, introduzindo a teoria de membrana na qual se considera que a casca é capaz de resistir aos carregamentos externos apenas por tensões normais internas, seja de tração ou compressão (BRANDÃO, 2005).

Recentemente, já no século XIX, Airy e Love desenvolveram a Teoria de Cascas, aliando a teoria de membrana à capacidade de flexão da estrutura.

Atualmente, os métodos de cálculo das estruturas em casca são predominantemente computacionais, tendo em vista a complexidade, ou até impossibilidade, matemática existente no cálculo analítico desse tipo de elemento.

Cabe ainda mencionar, conforme apontado por Isler (1994), que a concepção de uma estrutura em casca não pode ser dividida em duas tarefas, uma parte estrutural e outra arquitetônica, pois sua geometria será determinante no seu desempenho estrutural. Assim, Isler (1994) recomenda que ambas as atividades, recaiam sobre o mesmo profissional.

Ainda de acordo com Isler (1995) apud Vieira (2003), *“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”*.

2.2.2. Breve Histórico

Os primeiros usos de cascas se relacionam com os primórdios da civilização humana, quando foram utilizados pedras e tijolos para a construção de arcos e abóbodas.

Estruturas em arco podem ser definidas como um caso particular de casca cilíndrica de pequeno comprimento, resistindo aos carregamentos de maneira eficiente por esforços de compressão. Surgiram juntamente com a arquitetura Mesopotâmica no segundo milênio a.c., onde eram utilizados tijolos de barro.

Posteriormente, o Império Romano utilizou este mesmo sistema para construção de aquedutos, visando o abastecimento de água em cidades afastadas, e para construção de pontes, durante um período de aproximadamente 5 séculos, entre 312 a.c. até 226 d.c.

Algumas destas construções ainda permanecem sólidas, a exemplo do aqueduto romano “Pont Du Gard”, edificado no primeiro século, que tinha a capacidade de transportar uma vazão estimada de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}^1$ (Figura 28).

Figura 28 - Aqueduto romano de “Pont du Gard” sobre o rio Gard, França.



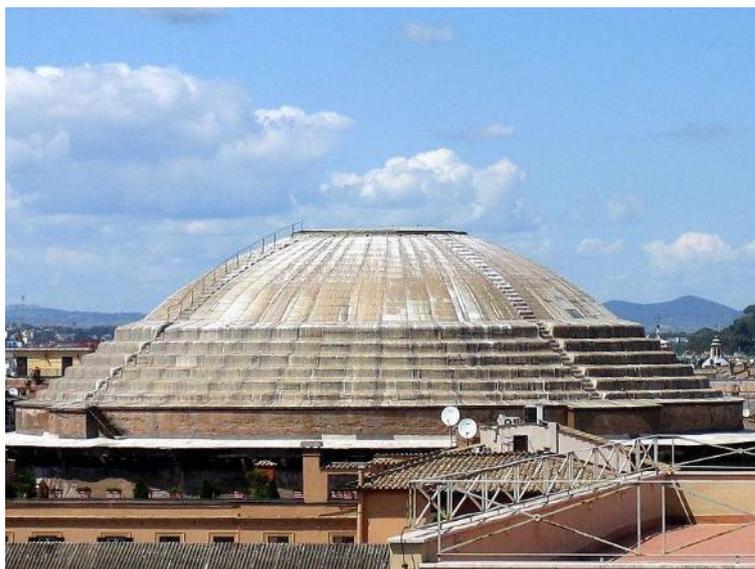
Fonte: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/roman-aqueducts/>. Acesso em 22/05/2019.

A civilização romana também utilizou o princípio do arco para construção de grandes templos, palácios e mausoléus, como o Pantheon, construído em 126 d.C. e tido como o domo de maior vão até 1881, com $43,45 \text{ metros}^2$ (Figura 29).

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard. Acesso em 22/05/2019.

² https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Roman_domes. Acesso em 22/05/2019.

Figura 29 - Pantheon, Roma.



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Roman_domes. Acesso em 22/05/2019.

Outro exemplo deste tipo de estrutura é a abóboda da Domus Áurea (“casa dourada”), uma cúpula de 13,5 metros de diâmetro com uma grande abertura central, construída pelo imperador romano Nero entre 64 e 68 d.C.

Brandão (2005) relata que as construções de concreto tiveram um declínio ao final do império romano, quando foram utilizadas técnicas de construção com pedras cortadas e arranjadas em conjunto, típicas da Idade Média, caindo em declínio também as cascas, que foram retomadas apenas no renascimento.

Segundo Melaragno (1991), a história das cascas de concreto coincide com a própria descoberta do cimento hidráulico, mas a construção de cascas delgadas ocorre apenas com o desenvolvimento do concreto armado.

De acordo com Tang (2015), isto ocorreu no início do século XX, quando também passaram a ser arquitetonicamente aceitos os acabamentos em concreto bruto. O autor ainda relata que, durante as guerras mundiais, a escassez de materiais de construção e a grande oferta de mão de obra, aliados ao baixo custo do concreto frente ao aço e à madeira, permitiram que as cascas de concreto ganhassem popularidade como solução estrutural.

Hawkins et al. (2016) mencionam ainda que o alto custo de material durante as guerras mundiais conduziram os projetistas a concepções mais eficientes, o que somado ao baixo custo de mão de obra, permitiu a viabilização de métodos mais complexos para execução de estruturas.

Isto levou a um pico na construção de cascas em concreto no meio do século XX, direcionado por grandes inventores como Maillart, Candela, Nervi, Isler e outros, que se sustentou até meados da década de 70. Após esse período, Enrique e Schwartz (2016) mencionam que houve um declínio do uso de cascas de concreto armado em função dos altos custos envolvidos em mão de obra e cimbramento destas estruturas, e pela demanda por geometrias livres na arquitetura.

2.2.3. Aspectos Construtivos de Cascas de Concreto

Embora se tratem de superfícies contínuas, cascas podem ser construídas a partir de elementos discretos como treliças, estruturas reticuladas ou grelhas espaciais denominadas *gridshells*.

Segundo Melaragno (1991), a estratégia de construção se constitui fator principal para o sucesso ou fracasso econômico de uma estrutura em casca. Considerando-se fatores usualmente desprezados na análise de custo, tais como a segurança estrutural, custos de manutenção e mecanismos de proteção contra incêndio, sua viabilidade econômica pode ser concretizada quando comparada aos outros tipos estruturais.

Isler (1995) *apud* Vieira (2003) relata que as cascas foram muito utilizadas entre as guerras mundiais, havendo um declínio a partir da década de 1960. No entanto, em função dos benefícios ecológicos e grande liberdade estética, estas estruturas estavam sendo bem vistas mais uma vez.

Ketchum (2000 *apud* Vieira, 2003) comenta que alguns benefícios da adoção de estruturas em casca nem sempre são avaliados economicamente, tais como a

economia de energia, melhores condições térmicas e acústicas, espaço livre e luminosidade.

Ainda segundo Ketchum (2000 apud Vieira, 2003), o projeto e a construção de fôrmas têm a maior contribuição no custo final da estrutura em casca, considerando-se os custos de material, mão de obra e maquinário, em função do procedimento de montagem e curvatura dos elementos.

No caso das fôrmas de madeira, o autor descreve sua execução em dois métodos distintos, seja utilizando painéis desmontáveis ou painéis encurvados (fôrmas de superfície).

Em se tratando de estruturas de formas livres, sua concepção muitas vezes é única, não sendo possível a repetibilidade de seu uso para diminuição do custo (VIEIRA, 2003).

Ramaswamy (1965 apud Vieira, 2003) apresenta práticas de projeto adotadas à época para execução de cascas em concreto, mencionando a variação do traço de concreto de acordo com o vão livre da estrutura. O autor menciona a necessidade de um concreto com maior módulo de elasticidade para maiores vãos em função das instabilidades que surgem na estrutura.

Outro aspecto relevante é a fluência, como indicado por Wilby (1993 apud Teixeira, 1999), dado que a maior parte do carregamento de uma estrutura em casca é permanente, requerendo um valor adequado de resistência e módulo de deformação para suportar a deformação lenta do concreto. A exemplo deste problema, Wilby (1993 apud Teixeira, 1999) cita o aumento dos deslocamentos em até três vezes de cascas cilíndricas construídas no Reino Unido.

Kolleger (1989 apud Vieira, 2003) também fez um estudo sobre o assunto, apresentando detalhadamente as características do concreto e demais problemas enfrentados.

Vieira (2004) lista ainda as fases do processo construtivo de cascas, mencionando as etapas de lançamento, vibração, cura e retirada das fôrmas. No lançamento, usualmente por projeção, deve-se cuidar com a segregação do material e o *slump* do concreto para evitar seu escorrimento.

Em relação ao *slump*, Ramaswamy (1968) comenta que se o concreto for fluído demais, este tenderá a escorrer nas regiões mais inclinadas, e se for muito seco, a compactação passa a apresentar dificuldades.

Ramaswamy (1968) menciona ainda algumas práticas para melhor concretagem de cascas, tais como: iniciar concretagem em pontos inferiores e de maneira simétrica, evitando-se o surgimento de cargas assimétricas nos apoios; quando utilizadas, as juntas devem estar em zonas de compressão e indicadas em projeto; caso a concretagem seja em etapas, que estas sejam espaçadas de dois ou três dias para minimizar as tensões devido à retração.

Quanto à etapa de desforma, Ramaswamy (1968) apresenta alguns princípios visando evitar o surgimento de carregamentos concentrados ou assimétricos na estrutura, para os quais a mesma não foi projetada. O autor orienta que a desfôrma se inicie pelo ponto de maior deformação e que prossiga de maneira simétrica em direção aos pontos de menor deformação, sendo feita simultaneamente entre os elementos de borda e a superfície de casca adjacente.

No caso de uso de elementos pré-fabricados, Ramaswamy (1968) aponta uma gama de vantagens tais como maior produtividade e controle da qualidade, menor custo com fôrmas, redução na mão de obra e redução dos efeitos de retração. No entanto, o autor ressalta que o tamanho da casca se torna limitado em função dos equipamentos de içamento disponíveis no canteiro.

Teixeira (1999) menciona ainda os comentários do Engenheiro Augusto Carlos de Vasconcelos a respeito da espessura. Segundo o autor, Vasconcelos orienta que a espessura de uma casca deveria ser a menor possível, desde que respeitando os limites mínimos atrelados à durabilidade e ao método executivo utilizado. Outro

ponto abordado pelo engenheiro diz respeito ao engrossamento das bordas da casca, cujo objetivo seria a atenuação das flechas.

Teixeira (1999) aponta também para o problema relacionado à desfôrma de peças com grande superfície, nas quais o descolamento pode causar esforços e deslocamentos não previstos na estrutura ainda com pequena idade.

Outro aspecto que ocasiona um impacto direto na concepção de cascas estruturais de concreto é o tipo de reforço utilizado. Verwimp et al. (2013) destacam que a rigidez das barras de aço usualmente utilizadas limita as curvaturas adotadas para a superfície.

Segundo Chen (2004), é difícil a orientação das barras de acordo com as tensões principais que ocorrem numa estrutura em casca. Primeiro porque as trajetórias são usualmente não lineares, o que necessitaria de barras curvas, e segundo em razão da alteração das linhas de tensão principais em função dos diferentes carregamentos que podem ocorrer na estrutura.

Nesse sentido, alternativas para as barras de aço vêm sendo desenvolvidas ao longo das últimas décadas, dentre as quais se pode mencionar o uso de compósitos à base de polímeros reforçados com fibras (KOSTOVA, 2016).

Por fim, como destacado por Pazdon (2009), cascas são nossa oportunidade e nosso desafio para demonstrar respeito com a exaustão dos recursos naturais, celebrando ao mesmo tempo o esplendor de nossos *designs*.

3 DESENVOLVIMENTO

A partir da revisão da literatura exposta a respeito do uso de fôrmas flexíveis para execução de diferentes estruturas de concreto, desenvolveu-se a presente pesquisa com a elaboração de experimentos de bancada, num primeiro momento, para observação, discussão e experimentação empírica das características concernentes do processo construtivo.

Foram realizados experimentos voltados à aplicação de fôrmas de superfície, adequadas para a execução de cascas, abrangendo quatro modelos de membranas retesadas mecânica e pneumaticamente e um modelo de membrana suspensa livremente pela ação da gravidade.

Em seguida, tomando-se proveito das observações empíricas dos modelos experimentais, foi elaborado um modelo computacional com o uso do programa Ansys Mechanical APDL, versão Acadêmica “Student”, para a simulação do processo construtivo de execução de uma casca de concreto com o uso de uma membrana retesada mecanicamente.

3.1 EXPERIMENTOS DE BANCADA

Foram realizados cinco experimentos de pequenas dimensões (área em planta de até 1 m²), aplicando-se diferentes técnicas, com o objetivo de analisar o processo construtivo envolvido no uso de fôrmas flexíveis e as peculiaridades que demandam atenção nas etapas de concepção e projeto de estruturas assim construídas.

As principais etapas de concepção e execução dos experimentos envolveram a definição da geometria dos protótipos, obtenção da padronagem das fôrmas (também utilizados para camada de reforço), montagem dos suportes e fixação e retesamento das membranas, aplicação do concreto/argamassa e dos reforços, execução dos acabamentos e por fim a desmoldagem dos modelos obtidos.

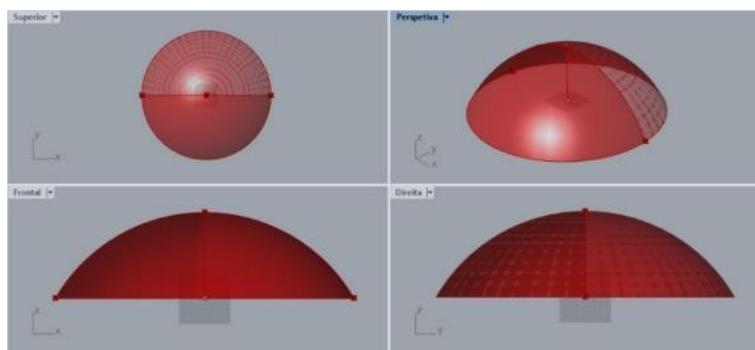
A elaboração dos modelos teve como foco o comportamento da fôrma durante e após a aplicação do concreto/argamassa, não sendo aqui analisadas as estruturas auxiliares utilizadas para fixação e retesamento das membranas.

3.1.1 Membrana retesada pneumaticamente

O primeiro modelo estudado se tratou de uma calota esférica obtida por meio de um molde pneumático de plástico (Figura 30).

A geometria foi concebida de modo que o ângulo máximo entre a superfície e o plano da base fosse de 60 graus, visando evitar grandes inclinações que dificultassem o processo de concretagem. O diâmetro da base da calota esférica foi delimitado em 89,5 cm e sua altura resultante foi de 20,7 cm.

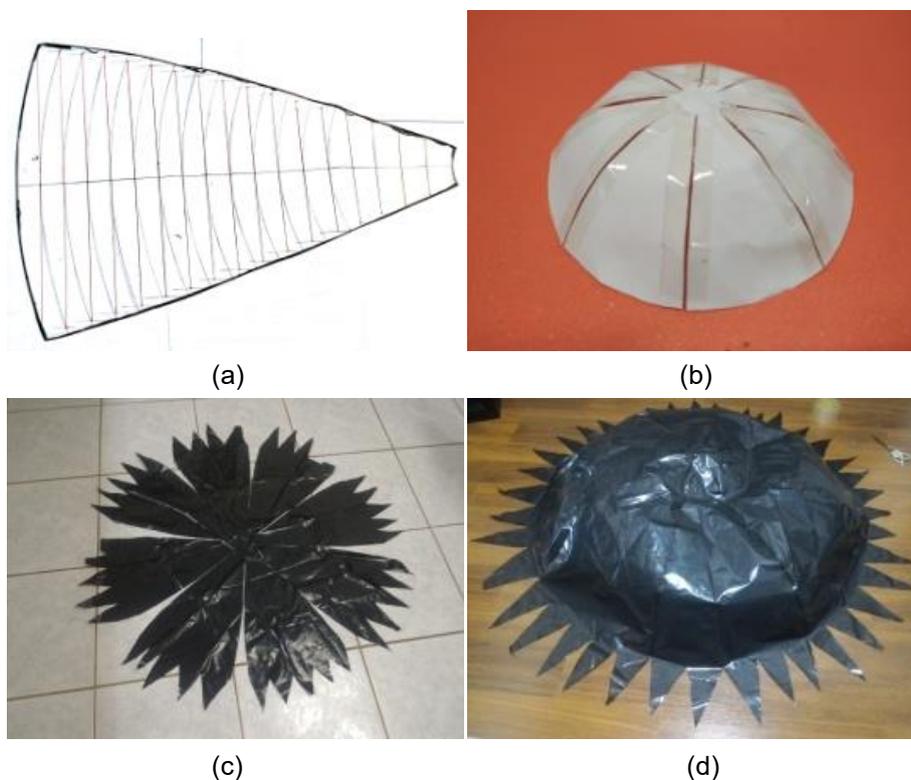
Figura 30 - Geometria da casca moldada pneumaticamente.



Fonte: Autoria própria.

O molde e o reforço foram desenvolvidos com base na padronagem indicada na Figura 31a, realizada analiticamente por meio da divisão da casca em 8 segmentos, testada posteriormente em um modelo de papel em escala reduzida (Figura 31b).

Figura 31 - Padronagem da fôrma: (a) obtenção da padronagem analiticamente; (b) teste da padronagem em modelo de papel; (c) cortes da membrana segundo padronagem obtida; (d) obtenção da fôrma.



Fonte: Autoria própria.

A entrada de ar para insuflamento da membrana foi posicionada no centro da base da calota esférica (Figura 32), sendo o perímetro da base delimitado com a fixação de tubos de borracha encurvados. A pressão de ar foi fornecida por um ventilador centrífugo conectado a uma tubulação auxiliar situada na entrada inferior, feita com o mesmo material plástico da fôrma.

Figura 32 - Entrada inferior para insuflamento da fôrma.



Fonte: Autoria própria.

Todo o processo de execução da casca durou aproximadamente 10 horas, principalmente para manter a fonte de pressão ligada durante a cura do gesso. O gesso foi depositado sobre a membrana inflada, após o posicionamento da camada de reforço, que auxiliou na aplicação do material. Além de melhorar a resistência, o intuito da camada de reforço foi o de evitar o surgimento de tensões de retração no gesso e também o de reter a fluidez do material aplicado, evitando assim seu escorrimento.

O controle da espessura da casca se deu pelo uso de espaçadores, fixados regularmente sobre a superfície da membrana (Figura 33) após o posicionamento da camada de reforço.

Figura 33 - Posicionamento da camada de reforço e dos espaçadores.



Fonte: Autoria própria.

A casca final apresentou uma espessura média de 5 mm, medida 1mm superior àquela prevista. Puderam-se observar na superfície resultante danos locais provenientes do esforço necessário para aplicação do gesso e danos provenientes da desmoldagem da casca próximos ao anel de fixação da base.

Após a execução da casca, a fôrma foi removida e a superfície de gesso foi lixada. O processo de despressurização foi feito lentamente, reduzindo-se a rotação do ventilador sucessivamente, verificando-se o fácil descolamento do molde plástico da casca obtida (Figura 34).

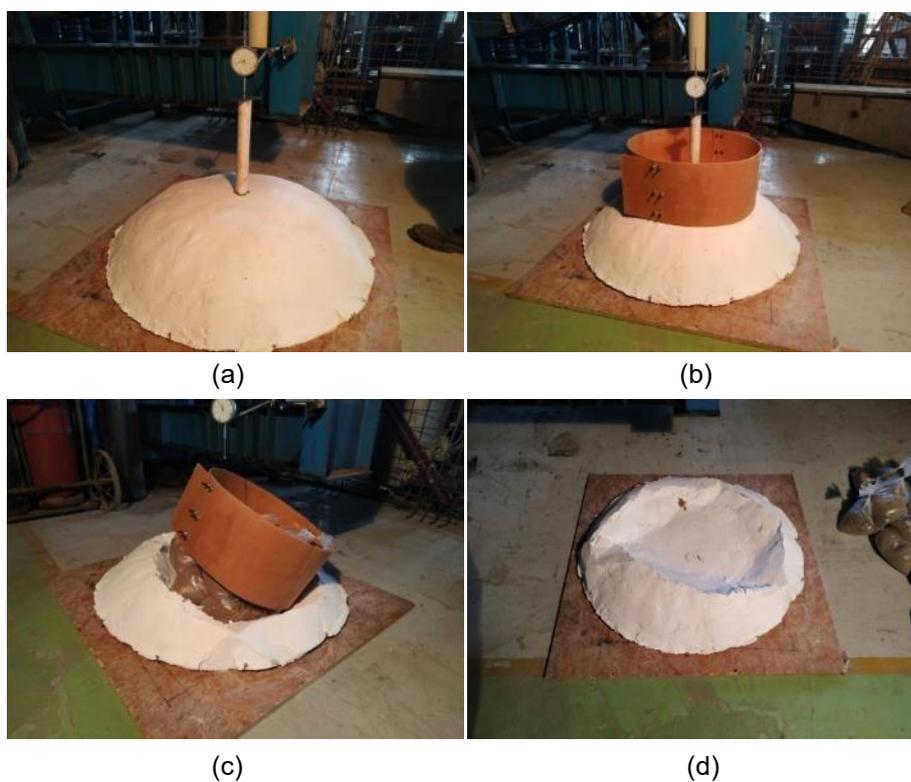
Figura 34 - Casca de gesso obtida com o molde pneumático.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, o protótipo foi submetido a um ensaio de carregamento controlado, no qual se constatou a ruptura da casca pelo mecanismo de “*snap-through*” com uma carga equivalente a doze vezes o peso total da casca, sendo esta carga aplicada na região central do topo da casca (Figura 35).

Figura 35 - Ensaio de carregamento da casca pneumática: (a) relógio comparador para medição das deformações; (b) cinta para retenção das cargas; (c) ruptura da casca; (d) casca rompida.



Fonte: Autoria própria.

Embora as deformações da casca e o carregamento tenham sido medidos ao longo de todo o ensaio, este se tratou de um ensaio qualitativo em função da ausência de dados sobre as propriedades físicas do gesso e do reforço empregados.

3.1.2 Membrana sem retesamento inicial – membrana suspensa

O segundo modelo realizado se baseou nos experimentos de Isler com cascas suspensas (CHILTON, 2000), usando um tecido de algodão preso a uma estrutura de madeira de 60 cm por 60 cm (Figura 36).

Figura 36 - Montagem do modelo de fôrma suspensa.



Fonte: Autoria própria.

A casca foi concebida para ter uma abertura central de 25 cm de diâmetro e não exigiu técnicas de padronagem, uma vez que a geometria foi obtida pelo equilíbrio das tensões internas do tecido e do peso próprio da camada de argamassa aplicada.

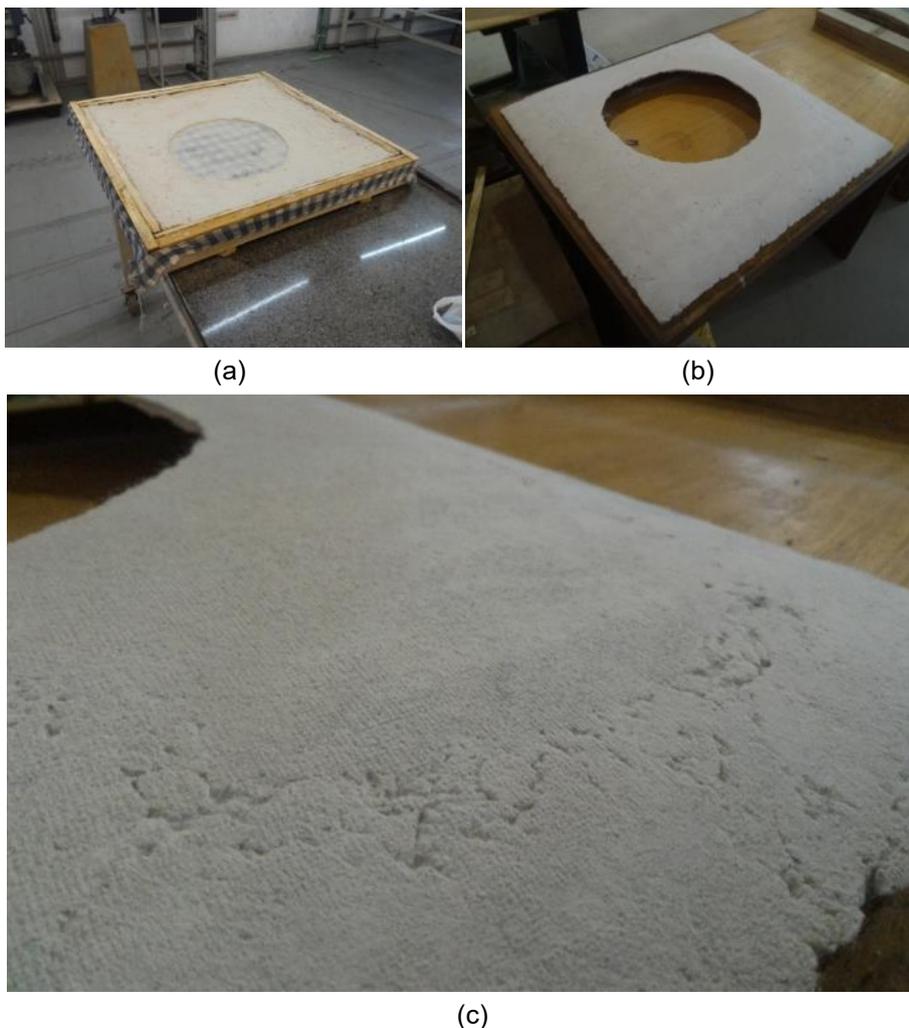
Neste segundo modelo, foi utilizada uma argamassa de cimento branco e areia (traço 1: 2: 0,45), reforçada com fibras de polipropileno (PP) para conter as tensões de retração (1% em volume). Também foi utilizado um aditivo plastificante (2% em volume). O traço e a dosagem de fibras e de aditivo plastificante foram extraídos do trabalho de Lucena (2017).

Diferentemente do primeiro modelo, a deposição da argamassa se iniciou nas proximidades dos apoios, conforme sugerido por Ramaswamy (1968), sendo

subsequentemente depositada de maneira simétrica. Não foram utilizados espaçadores para garantir a regularidade da espessura da casca, ocasionando variações relevantes ao longo de sua superfície.

O processo de execução durou 2 horas e a desmoldagem da casca ocorreu após 2 dias. Com a retirada da casca do molde, observou-se que este desenvolveu deformações plásticas que ocasionaram seu afrouxamento. Embora a superfície resultante da casca apresentasse vazios de ar decorrentes da má compactação da argamassa (Figura 37), o acabamento obtido da face em contato com a fôrma apresentou um valor estético em função da textura impressa pelo tecido.

Figura 37 - Casca suspensa: (a) moldagem da casca; (b) casca resultante; (c) acabamento da superfície da casca em contato com a fôrma.



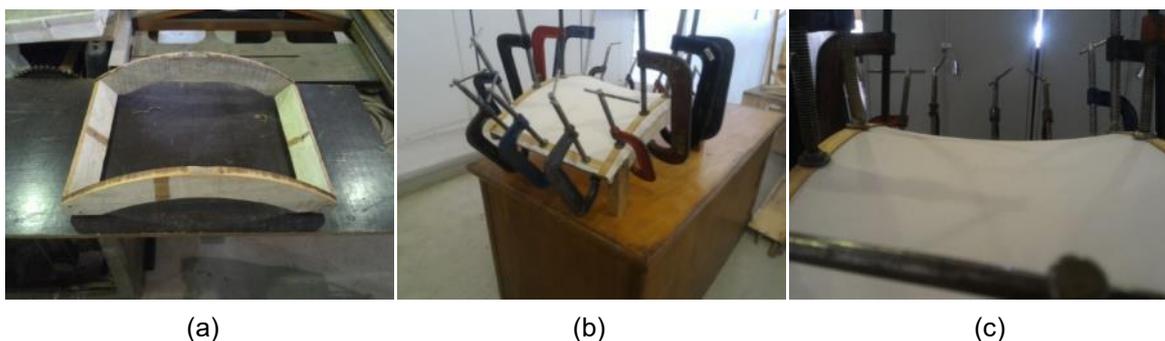
Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Membrana retesada mecanicamente

Para as duas moldagens seguintes, empregou-se uma mesma membrana têxtil retesada mecanicamente, cujo pré-tensionamento foi resultante dos esforços aplicados nos apoios da casca.

O tecido da fôrma foi fixado sobre uma estrutura cilíndrica de madeira (Figura 38a), sendo posteriormente retesado com o auxílio de grampos (Figura 38b e Figura 38c). A geometria foi retirada de um segmento de arco de $70,6^\circ$ de um cilindro de 50 cm de raio, resultando em um retângulo de 57,8 cm x 39,6 cm no plano da base, com altura de 9,2 cm.

Figura 38 - Estrutura para fixação e retesamento do tecido: (a) quadro de madeira; (b) retesamento do tecido com o auxílio de grampos; (c) detalhes da superfície do molde.



Fonte: Autoria própria.

Após atingir o estado de pré-tensionamento desejado, o tecido foi fixado no quadro de madeira, sendo a geometria resultando uma superfície anticlástica de sela (Figura 39). A altura resultante do tecido no ponto médio da superfície foi 6,5 cm.

Conforme descrito, a geometria da sela foi obtida a partir do processo de retesamento do tecido, não sendo utilizada, portanto, técnica para padronagem do molde.

Figura 39 - Geometria de sela obtida com o retesamento da fôrma.



Fonte: Autoria própria.

Para a primeira moldagem, empregou-se uma argamassa de cimento branco com relação água/cimento de 0,45. Foram adicionados ainda 1% em volume de fibras de polipropileno e 2% em volume de superplastificante para prevenir o surgimento de tensões de retração e melhorar a trabalhabilidade do material.

A partir das observações feitas nos ensaios anteriores, adotou-se o uso de espaçadores para controlar a espessura da casca durante a deposição da argamassa sobre o molde (Figura 40).

Figura 40 – Uso de espaçadores para controle da espessura da casca em sela.



Fonte: Autoria própria.

O processo de execução durou 1 hora, incluindo a aplicação de desmoldante sobre a fôrma, o posicionamento dos espaçadores e a deposição da argamassa. A espessura média da casca obtida foi de 2,5 mm, conforme previsto inicialmente.

A desmoldagem da casca foi feita sem danos ao tecido, o que permitiu o reaproveitamento do molde (Figura 41).

Figura 41 - Primeira casca em sela obtida.



Fonte: Autoria própria.

Para a segunda moldagem, foi aplicada sobre a fôrma uma argamassa produzida pela empresa “Art Spray”, utilizada comercialmente como revestimento texturizado de paredes e fachadas. Trata-se de uma argamassa ideal para aplicação com equipamento de projeção, que foi o caso do modelo produzido.

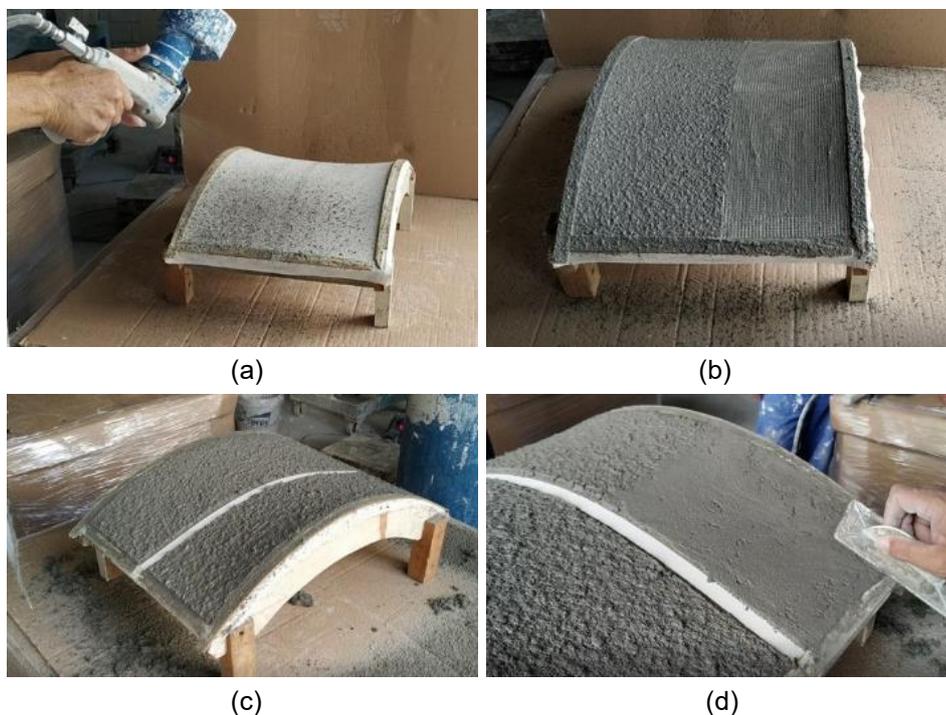
Assim como nas argamassas utilizadas nos experimentos anteriores, foram adicionadas fibras de polipropileno para controle das tensões de retração.

Durante a aplicação da argamassa por projeção, o controle da pressão pôde ser feito pelo próprio bico do equipamento, permitindo o ajuste da velocidade e da quantidade de material lançada sobre o molde.

A aplicação foi feita em duas etapas, paralisando-se o processo com a obtenção de metade da espessura desejada para início da cura do material já depositado, com evaporação da água da superfície, para melhor aderência da camada seguinte de argamassa.

Ao contrário da primeira moldagem da casca em sela, esta foi dividida em duas metades (Figura 42), sendo uma delas reforçada com um tecido de fibra de vidro e colocado ao fim da primeira etapa de concretagem (meia espessura). Além disso, um acabamento diferente foi dado na metade reforçada para comparação estética (Figura 42d).

Figura 42 - Moldagem da segunda casca em sela: (a) projeção da argamassa; (b) colocação do reforço; (c) finalização da projeção; (d) acabamento da superfície da casca.



Fonte: Autoria própria.

O processo de execução foi realizado por profissional com bastante experiência no processo de projeção de argamassas, necessária para o coreto controle da

pressão de projeção e da liberação do material. Em função disso, nenhum espaçador foi utilizado para controlar a espessura da casca.

A primeira etapa da projeção de argamassa foi concluída quando se atingiu metade da espessura final esperada para a casca, com 1,5 mm, sendo o processo interrompido por 30 minutos para cura do material já aplicado e alocação da camada de reforço.

A desmoldagem da casca foi feita após sete dias, tempo suficiente para a cura da argamassa, de acordo com as especificações do fabricante. O tecido da fôrma foi inutilizado e as duas metades da casca foram removidas. Ambas as peças apresentaram resistência suficiente durante o processo de desmoldagem e manuseio.

As superfícies das cascas resultaram em bom acabamento, sem quaisquer vazios de ar e fissuras aparentes (Figura 43). A espessura média da casca final foi de 3,0 mm, conforme previamente esperado.

Figura 43 - Casca em sela obtida com a argamassa projetada: (a) acabamento da superfície superior dado pelo aplicador; (b) acabamento da superfície inferior em contato com a fôrma.



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Membrana retesada mecanicamente por esforços internos – “*tensegrity*”

Aproveitando-se os benefícios provenientes da projeção da argamassa na casca em sela, desejou-se explorar os limites da aplicação deste processo em uma fôrma bastante flexível. Assim, utilizou-se como molde a membrana de um modelo *tensegrity*, fabricada por Bolelli *et al.* (2018).

A estrutura da membrana é composta por quatro barras de PVC de 1,0 metro e um tecido helanca (BOLELLI *et al.*, 2018). Por ser um molde de superfície retesado mecanicamente, as barras internas agem sob compressão, tensionando a superfície do tecido (Figura 44). A geometria final foi obtida pela primeira estrelação do octaédrico e os padrões de corte foram obtidos com o auxílio do *software* Rhinoceros utilizando o comando *Squish* (BOLELLI *et al.*, 2018).

Figura 44 - Estrutura tensegrity utilizada como fôrma.



Fonte: Autoria própria.

O processo de concretagem foi feito em duas etapas. Primeiramente, foi aplicada uma fina camada de um compósito de base acrílica, visando minimizar a deformabilidade do molde (Figura 45). Este compósito também se trata de um produto comercial fabricado pela empresa “Art Spray” e apresenta baixo módulo de elasticidade, o que era esperado para minimizar a fissuração da primeira camada.

Figura 45 - Projeção da primeira camada sobre o molde tensegrity.



Fonte: Autoria própria.

A segunda camada foi aplicada cinco dias após a primeira e era composta pela mesma argamassa de cimento utilizada no segundo experimento da casca em sela (Figura 46). Como na primeira camada a espessura da casca não foi controlada, o volume de material liberado foi medido e o aplicador utilizou sua experiência e habilidade para manter uma certa regularidade na espessura.

Figura 46 - Projeção da segunda camada sobre o molde tensegrity.



Fonte: Autoria própria.

O molde deformou-se consideravelmente durante a segunda aplicação, causando deslocamento excessivo e fissuras nas proximidades dos pontos de apoio da estrutura (Figura 47).

Figura 47 - Enrugamentos do molde e surgimento de fissuras na argamassa.



Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Membrana retesada mecanicamente – Modelo reduzido da membrana do Anfiteatro do Memorial dos Povos de Belém do Pará

Dentre os modelos realizados anteriormente e os processos construtivos estudados, a projeção da argamassa da empresa “Art Spray” na membrana retesada em sela foi a que apresentou o melhor desempenho. Assim, objetivou-se simular sua aplicação num modelo em escala reduzida de uma estrutura existente, qual seja a membrana do Anfiteatro do Memorial dos Povos de Belém do Pará (MPBP).

Trata-se de uma cobertura de aproximadamente 400 m² de área em planta, em forma de sela, com eixo de simetria passando pelos 2 vértices centrais, identificados pelos topos dos mastros denominados “Rei” e “Rainha”, além de outros 4 vértices identificados pelos topos dos tripés laterais. A membrana é constituída por duas abas, com caimento para as laterais do anfiteatro. O retesamento é realizado por meio de um sistema de cabos situados nas bordas da membrana, assim como por dois cabos de ancoragem que se unem aos cabos de borda nos topos dos mastros “rei” e “rainha”.

A cobertura foi modelada por meio de elemento de membrana, cuja geometria foi obtida computacionalmente por meio do método da densidade de forças (PAULETTI; BRASIL, 2005), resultando numa superfície não isotrópica, com

tensões não uniformes, mas próxima a uma superfície minimal nas regiões mais afastadas dos apoios.

A membrana se apoia em seis mastros, sendo que seu retesamento é feito pelo tracionamento apenas de um dos mastros, dito mastro “rei”, situado no eixo de simetria da estrutura. Cabos de borda alocados em todo o perímetro da membrana também compõe a estrutura. Uma vista da cobertura é reproduzida na Figura 48.

Figura 48 - Membrana do Anfiteatro do Memorial dos Povos de Belém do Pará.



Fonte: Adaptado de Pauletti e Brasil (2005).

O modelo em escala reduzida, de 1:30, elaborado pela Arquiteta Alessandra Pissardo, foi ensaiado preliminarmente com o objetivo de se obter o módulo de elasticidade do material da membrana empregada. Para tanto, foram realizados ensaios de carregamento na membrana com diferentes cargas de tração aplicadas no mastro principal (mastro “rei”) e cargas distribuídas em regiões predefinidas sobre a membrana.

Para medição da tração do cabo de ancoragem do mastro “rei”, utilizou-se uma balança digital portátil com gancho, com capacidade máxima de 50 Kg, e para medição das deformações foram empregados relógios comparadores centesimais e milésimos, com cursos de 25 mm a 50 mm, conforme se observa na Figura 49 reproduzida a seguir.

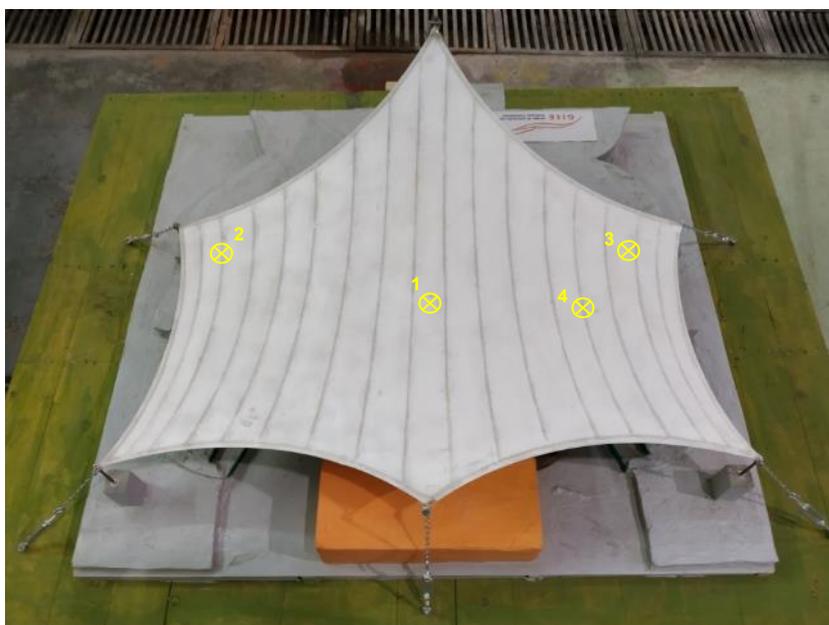
Figura 49 - Instrumentação do modelo em escala reduzida do MPBP.



Fonte: Autoria própria.

Foram escolhidos quatro pontos de medição das deformações, indicados na Figura 50, sendo dois deles simétricos um ao outro, objetivando assim identificar eventuais defeitos no comportamento do modelo.

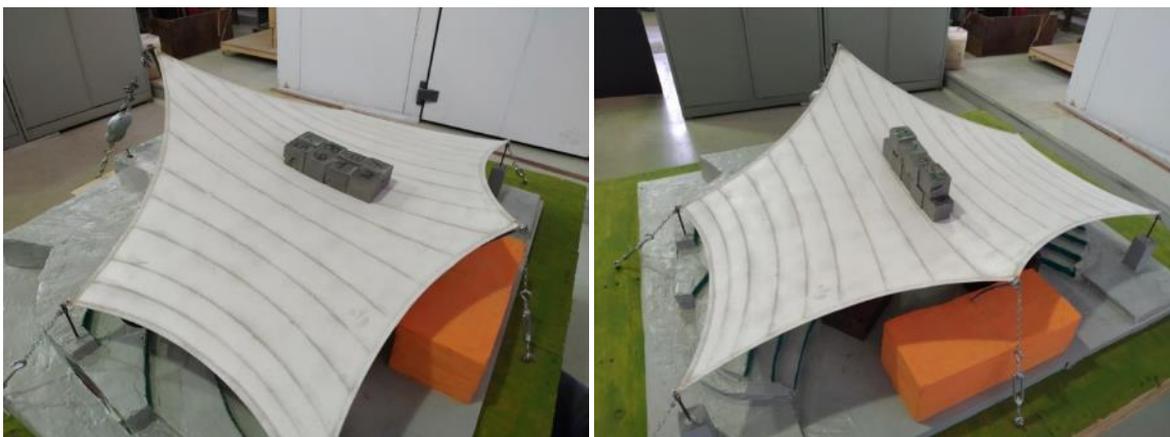
Figura 50 - Pontos para medição das deformações da membrana.



Fonte: Autoria própria.

As cargas foram aplicadas no eixo de simetria, dispostas sobre o primeiro ponto de medição das deformações, na região central da membrana (Figura 51).

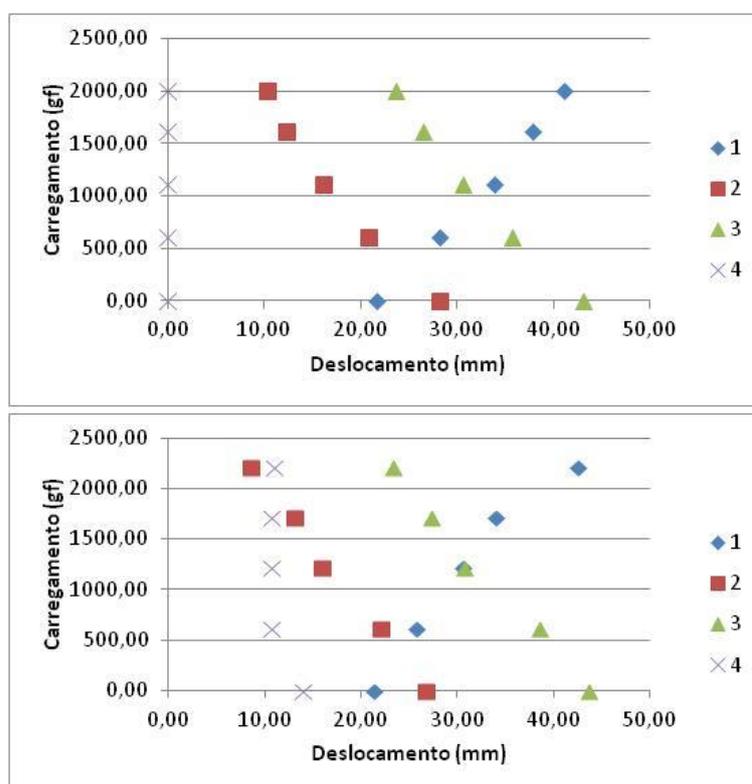
Figura 51 - Aplicação das cargas sobre a membrana.



Fonte: Autoria própria.

As cargas aplicadas sobre a membrana variaram entre 1,5 N e 25,0 N, e a carga de tração aplicada no mastro rei variou entre 80,0 N a 100,0 N. Nos gráficos a seguir (Figura 52) se apresentam os resultados obtidos nos ensaios realizados:

Figura 52 - Resultados obtidos nos ensaios de carregamento.



Fonte: Autoria própria.

A instrumentação do protótipo foi realizada ao longo de todo o processo de aplicação da argamassa, sendo realizados ensaios de carregamento sobre a membrana após a concretagem, com a fôrma ainda em estado de retesamento. Posteriormente, após a desfôrma da estrutura, realizou-se também outro ensaio de carregamento.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de carregamento preliminares (Figura 52), verificou-se que os deslocamentos nos pontos simétricos 2 e 3 apresentaram uma variação inferior à 10%, quando comparados entre si, e que a medição do ponto 4 não produziu resultados relevantes para o esquema de carregamento aplicado. Assim, para as etapas seguintes do ensaio, mediu-se apenas os deslocamentos dos pontos 1 e 2.

A argamassa utilizada foi a mesma do experimento da casca em sela, fornecida pela empresa “Art Spray”. Quanto ao reforço, foi utilizada uma tela de polietileno alocada na região inferior da seção transversal, disposta sobre a membrana logo após a projeção da primeira camada de argamassa.

Para controle da espessura, utilizou-se um limitador de altura nas bordas da membrana com a espessura desejada, de 4 mm, sendo que o controle da espessura nas regiões afastadas das bordas feito pelo próprio aplicador da argamassa, tendo por referência o limitador utilizado nas laterais (Figura 53).

Figura 53 - Colocação do limitador de espessuras nas bordas da membrana.



Fonte: Autoria própria.

Aplicou-se ainda um desmoldante na membrana para avaliar a possibilidade de sua reutilização (Figura 54).

Figura 54 - Membrana pronta para a aplicação da argamassa.



Fonte: Autoria própria.

A aplicação da argamassa foi feita em camadas (Figura 55), sendo o processo interrompido com a obtenção de metade da espessura desejada da casca (da ordem de 2,0 mm) para cura das primeiras camadas projetadas.

Figura 55 - Aplicação das primeiras camadas de argamassa e colocação do reforço na membrana.

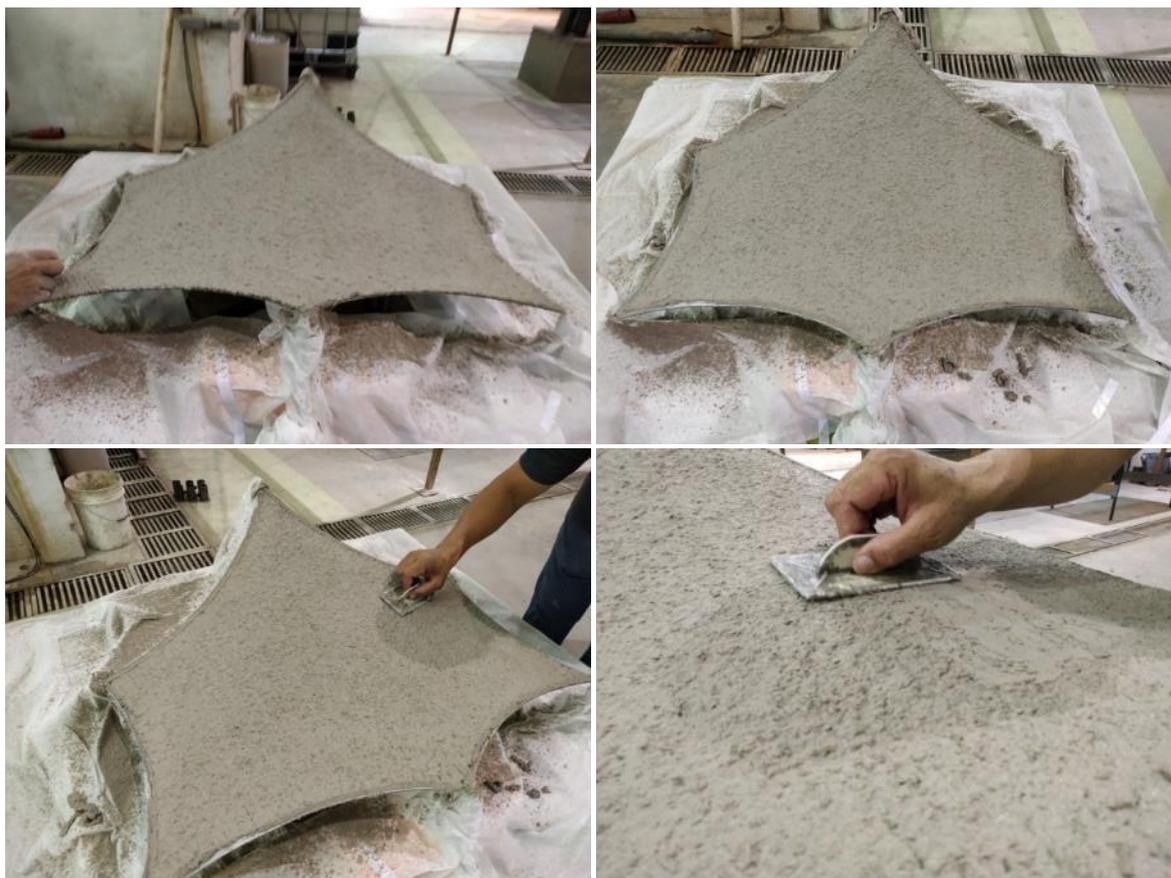




Fonte: Autoria própria.

Após decorridos 45 minutos o processo foi retomado, com a aplicação das camadas restantes de argamassa e execução do acabamento da superfície superior da casca (Figura 56 e Figura 57).

Figura 56 - Finalização da projeção de argamassa e acabamento da superfície superior da casca.





Fonte: Autoria própria.

Figura 57 - Finalização do acabamento da casca.



Fonte: Autoria própria.

Conforme exposto anteriormente, ao longo de todo processo de execução da casca foram monitorados os deslocamentos dos pontos 1 e 2, bem como a tração atuante no mastro “rei”.

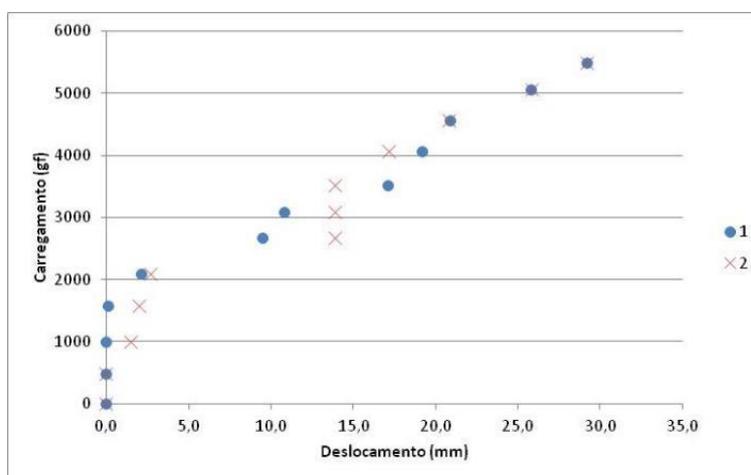
O peso do copo do equipamento de projeção, onde é colocada a argamassa, foi medido antes e após cada aplicação, obtendo-se assim uma estimativa da carga acrescida à membrana. Dentre as duas etapas de execução, foram necessárias 10 recargas do copo, totalizando 11 aplicações de argamassa. Os dados assim obtidos são apresentados na Tabela 1, e os deslocamentos apresentados pelos pontos 1 e 2 são indicados na Figura 58.

Tabela 1 - Dados obtidos durante o processo de execução da casca.

Aplicação	Carga (gf)	Mastro Rei (gf)	Desloc. em 1 (mm)	Desloc. em 2 (mm)
Inicial	0	8730	0,0	0,0
1ª	490	8810	0,0	0,0
2ª	1000	8985	0,0	1,5
3ª	1570	9165	0,1	2,0
4ª	2085	9235	2,1	2,7
5ª	2675	9435	9,5	13,9
6ª	3080	9600	10,8	13,9
7ª	3525	9810	17,1	13,9
8ª	4065	10100	19,2	17,2
9ª	4570	10280	20,9	20,8
10ª	5070	10520	25,8	25,9
Última	5500	10670	29,2	29,2

Fonte: Autoria própria.

Figura 58 - Deslocamentos medidos nos pontos 1 e 2 durante a execução da casca.



Fonte: Autoria própria.

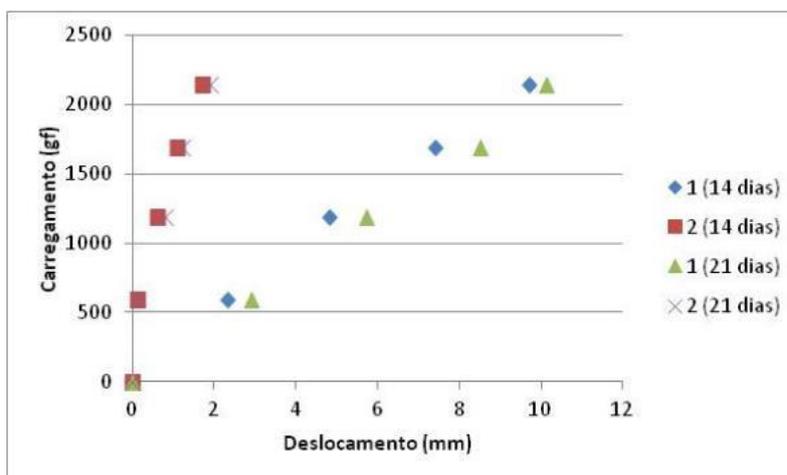
Antes da desmoldagem da membrana e alívio da tração atuante nos mastros, foram feitos dois ensaios de carregamento sobre a estrutura, aos 14 dias e aos 21 dias após a “concretagem”, aplicando-se cargas na mesma região central em que foram aplicadas nos ensaios de carregamentos anteriores à execução da casca (Figura 59). Os resultados obtidos, em termos dos deslocamentos dos pontos 1 e 2, são apresentados na Figura 60.

Figura 59 - Realização de ensaios de carregamento na casca com a fôrma ainda ativa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 60 - Ensaio de carregamento da casca com a fôrma ainda ativa.



Fonte: Autoria própria.

A desmoldagem da casca foi realizada após 28 dias, iniciando-se pela remoção dos limitadores localizados nas bordas da membrana e em seguida pela desmobilização gradual dos mastros (Figura 61).

Figura 61 - Remoção dos limitadores localizados nas bordas da casca.



Fonte: Autoria própria.

Após a desmobilização da membrana, foi feita a remoção integral da fôrma, sendo possível avaliar visualmente a argamassa na região de contato com o molde. Verificou-se uma pequena aderência da argamassa ao tecido. Quanto à casca produzida, observou-se o surgimento de fissuras e deslocamento da argamassa nos vértices de apoio da casca e na região dos mastros “rei” e “rainha” (Figura 62).

Figura 62 - Surgimento de fissuras na etapa de desmoldagem da casca.



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que a argamassa empregada não obteve resistência necessária para a espessura adotada e os vãos existentes, o que já era esperado. Isto se justifica pela intenção em se manter a espessura especificada proporcionalmente ao vão e pela preocupação com o processo de execução em detrimento do comportamento estrutural da casca final, optando-se pela aplicação de uma argamassa projetável

com reologia adequada. Em ensaios futuros em maior escala, este deve ser um aspecto a ser considerado, assim como o dimensionamento dos reforços, que também não foram objeto de estudo do modelo aqui analisado.

Após a desmobilização da membrana e a remoção da fôrma foi feita uma readequação dos apoios (Figura 63), tendo em vista os vértices da casca não coincidirem com os vértices da membrana em função do delimitador de espessura aplicado nas bordas da fôrma. O acabamento da superfície inferior da casca pode ser observado na Figura 64, constatando-se a “impressão” das emendas do tecido sobre a argamassa.

Figura 63 - Desmobilização da membrana, remoção da fôrma e readequação dos apoios.



Fonte: Autoria própria.

Figura 64 - Superfície inferior da casca em contato com a fôrma.

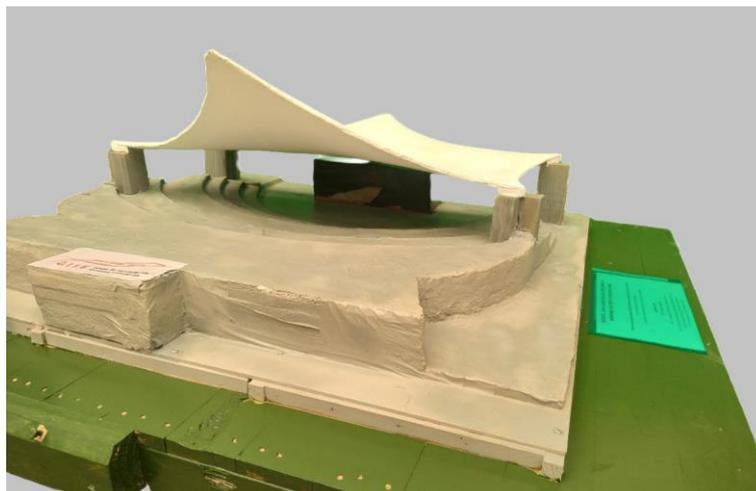


Fonte: Autoria própria.

A estrutura final da casca apoiada apenas nas colunas laterais, após o acabamento das superfícies inferior e superior, é reproduzida na Figura 65.

Figura 65 - Estrutura final da casca sobre os apoios laterais.





Fonte: Autoria própria.

3.2 DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Partindo-se do último modelo de bancada experimentado, o modelo em escala reduzida da membrana do Anfiteatro do MPBP, elaborou-se um modelo computacional de elementos finitos com o programa Ansys Mechanical APDL, versão Acadêmica “Student”, com o intuito de simular o processo construtivo de execução da casca de concreto desde o retesamento da fôrma até a sua desmobilização.

Elaborou-se um código em APDL paramétrico (APÊNDICE), no qual é possível ajustar a escala da estrutura a partir dos parâmetros de entrada, sendo possível simular tanto a estrutura em dimensões reais (como a análise aqui realizada), mas também em escala reduzida, como aquela do modelo estudado anteriormente.

Além do ajuste na escala, a modelagem paramétrica permite a alteração das propriedades geométricas da estrutura e dos materiais empregados, dos carregamentos iniciais impostos para o retesamento da fôrma, de opções de cálculo do método dos elementos finitos (tamanho e tipo das malhas, tipo de elementos, mapeamento, etc.), tudo a partir dos parâmetros de entrada.

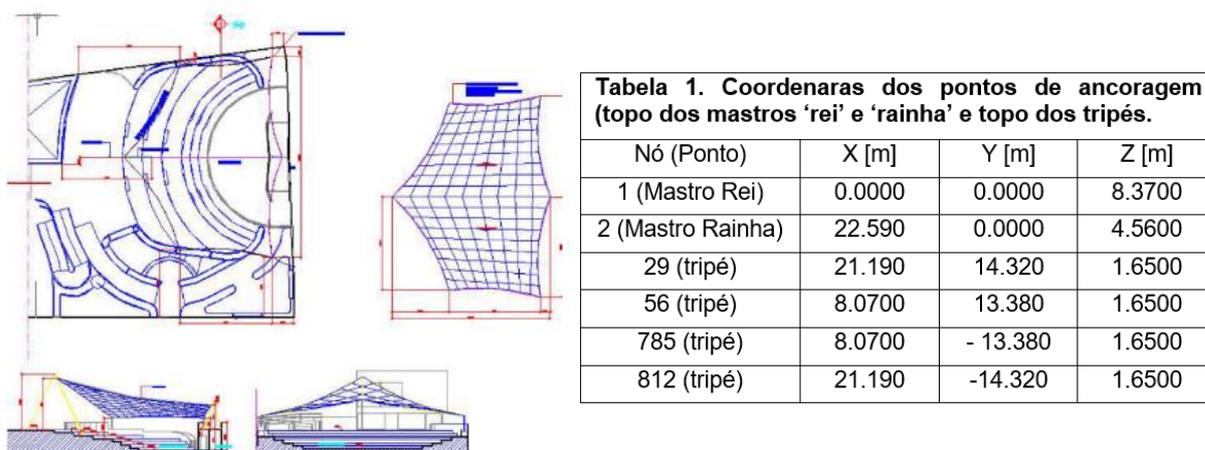
O uso do programa Ansys para a modelagem da estrutura se justifica a partir da conclusão de estudos precedentes sobre a análise de estruturas retesadas com o

uso de programas de elementos finitos de uso geral (PAULETTI, 2003; PAULETTI E BRASIL, 2003), sendo os detalhes da modelagem abordados na sequência.

3.2.1 Parâmetros do modelo

A intenção arquitetônica concebida para a estrutura e as coordenadas dos vértices da membrana são indicados na Figura 66, conforme exposto no estudo de Pauletti e Brasil (2005). Foram modelados também os mastros denominados “rei” e “rainha”, articulados na base (direção “y”), e os tripés laterais, adotando-se geometrias inicialmente arbitrárias, condizentes com a necessidade estrutural decorrente dos esforços incidentes.

Figura 66 - Intenção arquitetônica e coordenadas geométricas dos vértices da membrana do Anfiteatro do MPBP.



Fonte: Adaptado de Pauletti e Brasil (2005).

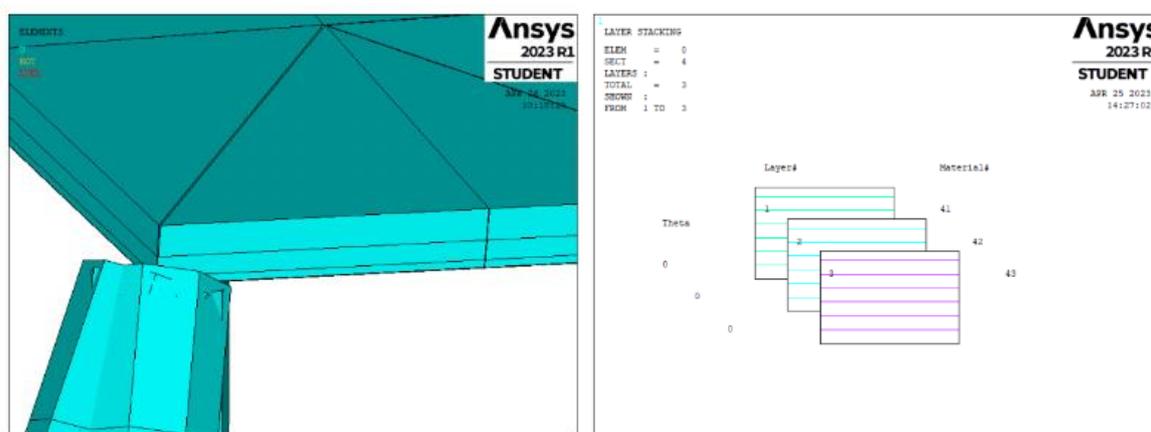
Os detalhes geométricos dos elementos estruturais são indicados na Tabela 2. A membrana foi modelada com elementos SHELL41, em malha triangular, atuando apenas à tração. Para os mastros e os tripés se adotou elementos BEAM188 e para os cabos de borda e os cabos de ancoragem elementos LINK180, adotando-se opção de atuarem apenas sob tração e sendo desconsiderado deslizamento entre os cabos de borda e a membrana. A casca de concreto foi modelada com elementos SHELL181, sendo utilizada a opção multicamadas. Os detalhes das camadas da casca de concreto são ilustrados na Figura 67.

Tabela 2 - Propriedades geométricas e tipo de elemento de cada componente estrutural.

Estrutura	Seção	Propriedades Geométricas	Elemento
Cabos de borda	Circular	$r = \frac{1}{2}$ pol (1,27 cm)	LINK180
Cabos de ancoragem	Circular	$r = 1$ pol (2,54 cm)	LINK180
Mastros e Tripés	Circular vazada	$r_e = 18$ cm; $r_i = 14$ cm	BEAM188
Membrana	Casca	$e = 2$ mm	SHELL41
Casca	Casca	$e_1 = 2$ cm; $e_2 = 5$ cm; $e_3 = 8$ cm.	SHELL181

Fonte: Autoria própria.

Figura 67 - Detalhe das camadas da casca de concreto (SHELL181).



Fonte: Autoria própria.

Em relação aos materiais empregados, adotou-se parâmetros usuais do aço para os mastros, cabos e tripés, do concreto armado para a casca e do mesmo tecido estudado por Pauletti e Brasil (2005) para a membrana (Tabela 3).

Tabela 3 - Propriedades dos materiais empregados.

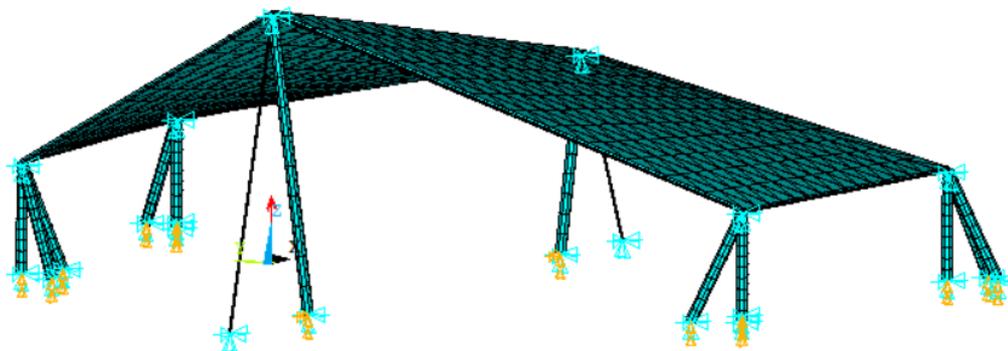
Estrutura	Material	Módulo de Elasticidade	Poisson	Densidade
Cabos	Aço	180 GPa	0.3	7850 Kg/m ³
Mastros e Tripés	Aço	200 GPa	0.3	7850 Kg/m ³
Membrana	Tecido com revestimento de PVC	1 GPa	0.0	960 Kg/m ³
Casca	Concreto armado	30 GPa	0.2	2500 Kg/m ³

Fonte: Autoria própria.

Foram definidos materiais distintos para cada camada dos elementos de casca, de modo a mobilizá-los separadamente conforme a execução das concretagens, possibilitando ainda a atribuição de diferentes módulos de elasticidade conforme o estágio de cura para avaliação futura do processo construtivo. No entanto, o módulo de elasticidade final é o mesmo para todas as camadas, conforme indicado na Tabela 3.

Em relação às condições de contorno, fixaram-se os deslocamentos na base dos mastros, dos tripés e dos cabos de ancoragem, restringindo-se também as rotações em torno dos eixos 'x' e 'z' dos mastros e as rotações em torno do eixo 'z' dos tripés. Complementarmente, fixaram-se inicialmente os deslocamentos dos pontos do topo dos mastros e tripés para obtenção da forma da membrana. A representação destes vínculos é indicada na Figura 68.

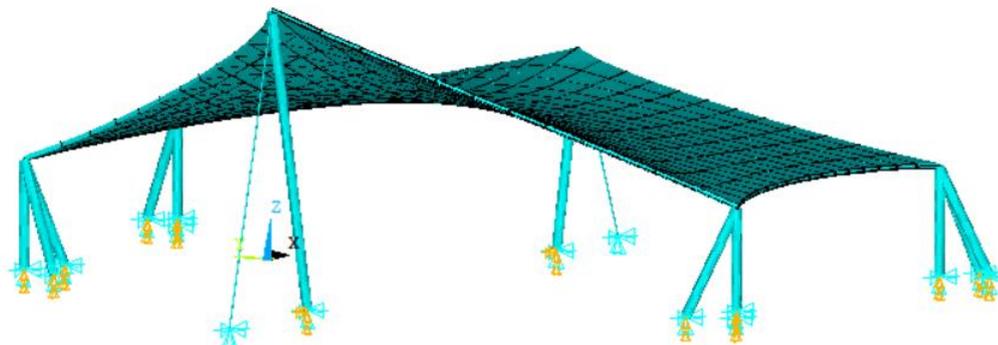
Figura 68 - Condições de contorno iniciais do modelo.



Fonte: Autoria própria.

Após a busca da forma da membrana, foi feita a remoção dos vínculos atribuídos aos topos dos mastros e tripés, de modo a se simular o comportamento integrado da estrutura, conforme representado na Figura 69.

Figura 69 - Condições de contorno da estrutura após busca da forma da membrana.



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Carregamentos

O processo construtivo para execução da casca consiste no lançamento de camadas sucessivas de concreto sobre a membrana retesada, de modo que o concreto é submetido inicialmente apenas ao seu peso próprio. Após a cura de uma camada precedente, aplica-se uma nova camada de concreto, sendo que a rigidez da estrutura passa a ter a contribuição da casca produzida pela camada precedente, em atuação conjunta com a membrana.

A modelagem foi conduzida com o intuito de simular a execução de uma casca com espessura final de 15 cm a partir do lançamento de três camadas sucessivas de concreto, com espessuras progressivas, de modo a minimizar as deformações iniciais da fôrma e possibilitar a mobilização da casca para resistir aos esforços das camadas mais espessas (segunda e terceira camadas). Para tanto foram utilizados os comandos “EKILL” e “EALIVE” para desabilitar os elementos da casca de concreto na busca da forma (TIME 1), e habilitá-los para as etapas de lançamento das camadas (TIME 2 ao 4).

A execução das camadas foi simulada por meio da atribuição de densidade à camada em lançamento e correção de seu módulo de elasticidade antes do lançamento da camada seguinte, de modo a avaliar seu comportamento no estado fresco e posteriormente no estado endurecido para recebimento da próxima concretagem.

Ao final do processo construtivo simulou-se ainda a desmobilização dos cabos de ancoragem e de borda e da membrana (TIME 5), etapa em que a casca de concreto produzida passa a se apoiar apenas nos tripés laterais, e por fim, a partir da casca final obtida, foram aplicadas cargas de vento sobre a estrutura, incidentes nas direções “x” e “y” (TIME 6.1 e 6.2), semelhantes às aquelas analisadas por Pauletti e Brasil (2005).

Assim, diante do processo construtivo descrito e das cargas a serem aplicadas à estrutura final, tem-se as seguintes etapas de carregamento do modelo:

1. Retesamento da membrana – TIME 1;
2. Lançamento da 1ª camada (2,0 cm) – TIME 2;
3. Lançamento da 2ª camada (5,0 cm) – TIME 3;
4. Lançamento da 3ª camada (8,0 cm) – TIME 4;
5. Desmobilização dos cabos e da membrana – TIME 5;
6. Cargas atuantes na casca de concreto:
 - 6.1. Vento em “x” – TIME 6.1;
 - 6.2. Vento em “y” – TIME 6.2.

A busca da forma foi realizada a partir da imposição de uma tensão constante atuante na membrana, assim como tensões nos cabos de borda e nos cabos de ancoragem, assumindo-se materiais lineares isotrópicos. Foram incluídos os efeitos decorrentes de grandes deformações e foi imposta a solução pelo método de Newton-Raphson (análise não-linear).

Para auxiliar a convergência adotou-se inicialmente módulos de elasticidade reduzidos para a membrana e para os cabos, sendo estes progressivamente incrementados até se obter o equilíbrio da membrana com as propriedades reais dos materiais. O mesmo conceito foi empregado nas etapas de lançamento das camadas de concreto, sendo a densidade e o módulo de elasticidade do concreto das camadas incrementados progressivamente.

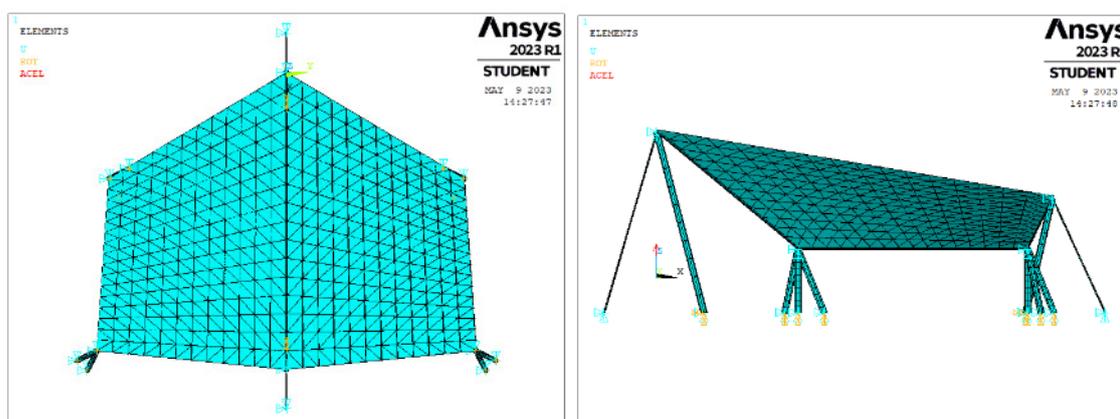
Em relação às cargas de vento atuantes na estrutura final, adotaram-se os carregamentos de 286 N/m^2 sobre a casca para o vento atuando na direção paralela à cumeeira, em ambas as águas, e de 286 N/m^2 sobre a aba a barlavento e de -115 N/m^2 sobre a aba a sotavento para o vento na direção perpendicular à cumeeira (PAULETTI; BRASIL, 2005), sendo aplicados os carregamentos assim resultantes na direção “z” do modelo. Tais carregamentos foram estabelecidos com base na norma NBR 6123 (ABNT, 1988 apud PAULETTI; BRASIL, 2005) em função dos seguintes parâmetros: $V_o=30\text{m/s}$; $S_1=1.0$; $S_2=0.72$; $S_3=1$; $C_p=-1.0$; $C_{pb}=-1.0$; e $C_{ps}=-0.4$.

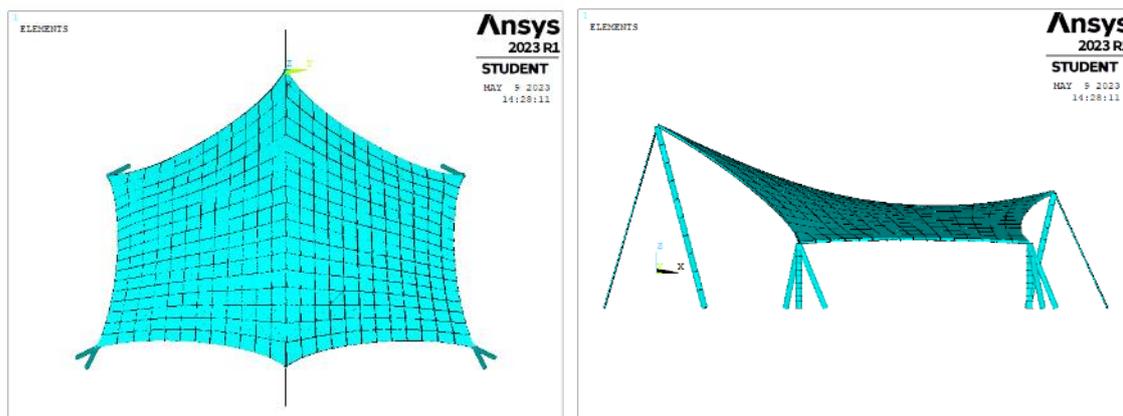
Em função dos resultados obtidos foram feitas ainda simulações do processo construtivo propondo-se a elevação dos vértices dos mastros “rei” e “rainha” em 1.80 m (Proposta 1), com o intuito de evitar regiões de baixa declividade ao longo da casca produzida, bem como a imposição de um nível de retesamento maior àquele considerado inicialmente (Proposta 2), com o intuito de avaliar a influência do nível de retesamento da fôrma na evolução dos deslocamentos da estrutura.

3.2.3 Resultados

A partir da geometria inicial, definida pelos vértices da cobertura, obteve-se a geometria resultante do processo de busca da forma, conforme se ilustra na Figura 70, sendo aplicada uma tensão inicial uniforme de 10 MPa, próxima àquela de projeto da membrana (PAULETTI; BRASIL, 2005).

Figura 70 - Obtenção da geometria da membrana (retesamento).

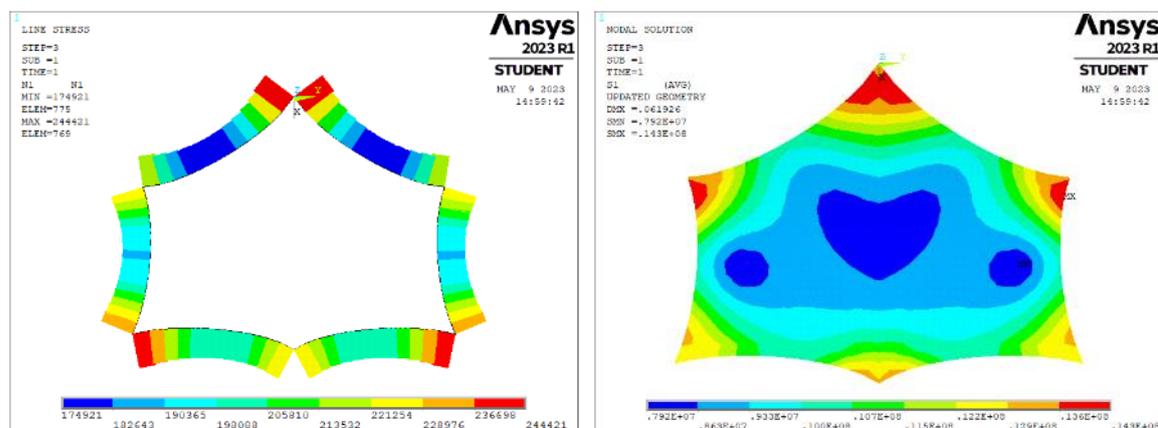




Fonte: Autoria própria.

Na Figura 71 são representadas as forças atuantes nos cabos de borda e as tensões principais máximas (s_1) obtidas atuantes na membrana após a etapa de retesamento, constatando-se tensões resultantes na membrana variando entre 7.9 MPa e 14.3 MPa e esforços de tração nos cabos de borda entre 174 kN e 245 kN.

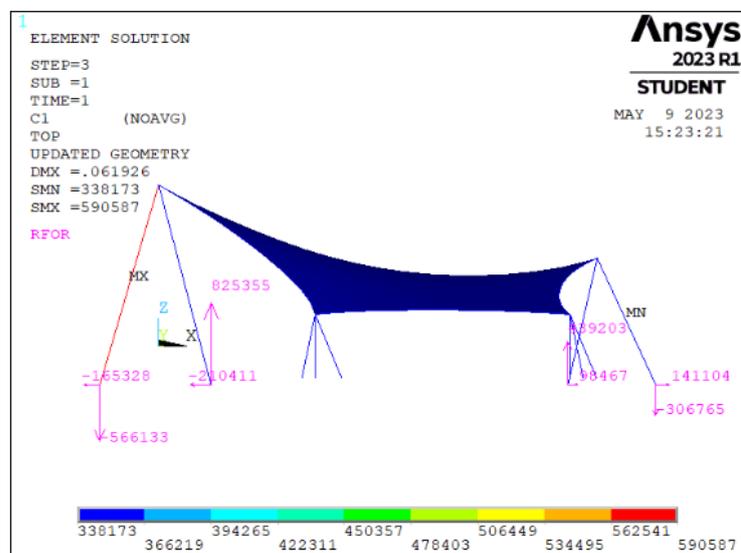
Figura 71 – Forças atuantes nos cabos de borda e tensões principais máximas (s_1) na membrana após o retesamento – TIME 1.



Fonte: Autoria própria.

Os esforços resultantes nos nós dos apoios dos mastros “rei” e “rainha” e dos cabos de ancoragem são indicados na Figura 72. Também na Figura 72 se indicam as forças atuantes nos cabos de ancoragem, constatando-se os esforços de tração de 591 kN e de 338 kN nos cabos do mastro “rei” e “rainha”, respectivamente. Os esforços resultantes nos nós dos tripés laterais foram suprimidos para melhor visualização dos resultados.

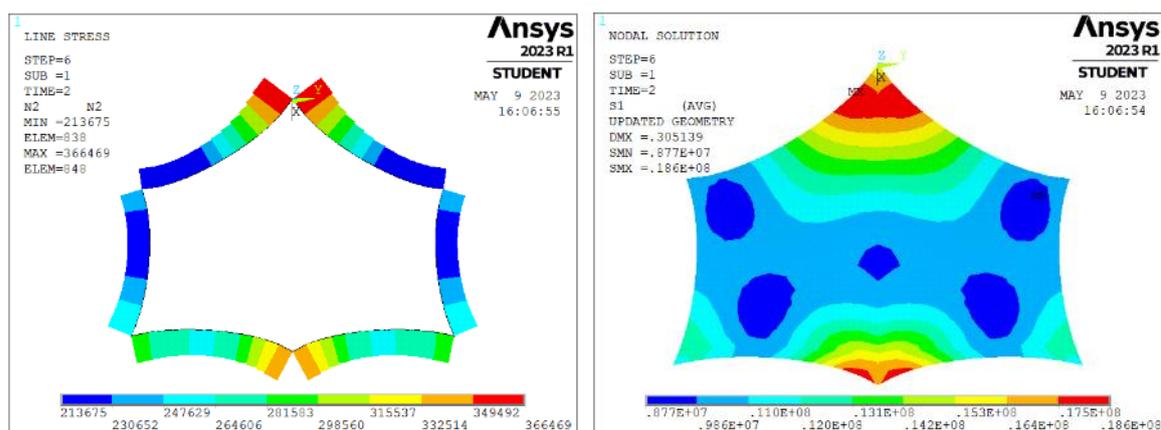
Figura 72 - Forças resultantes nos nós dos apoios e nos cabos de ancoragem – TIME 1.

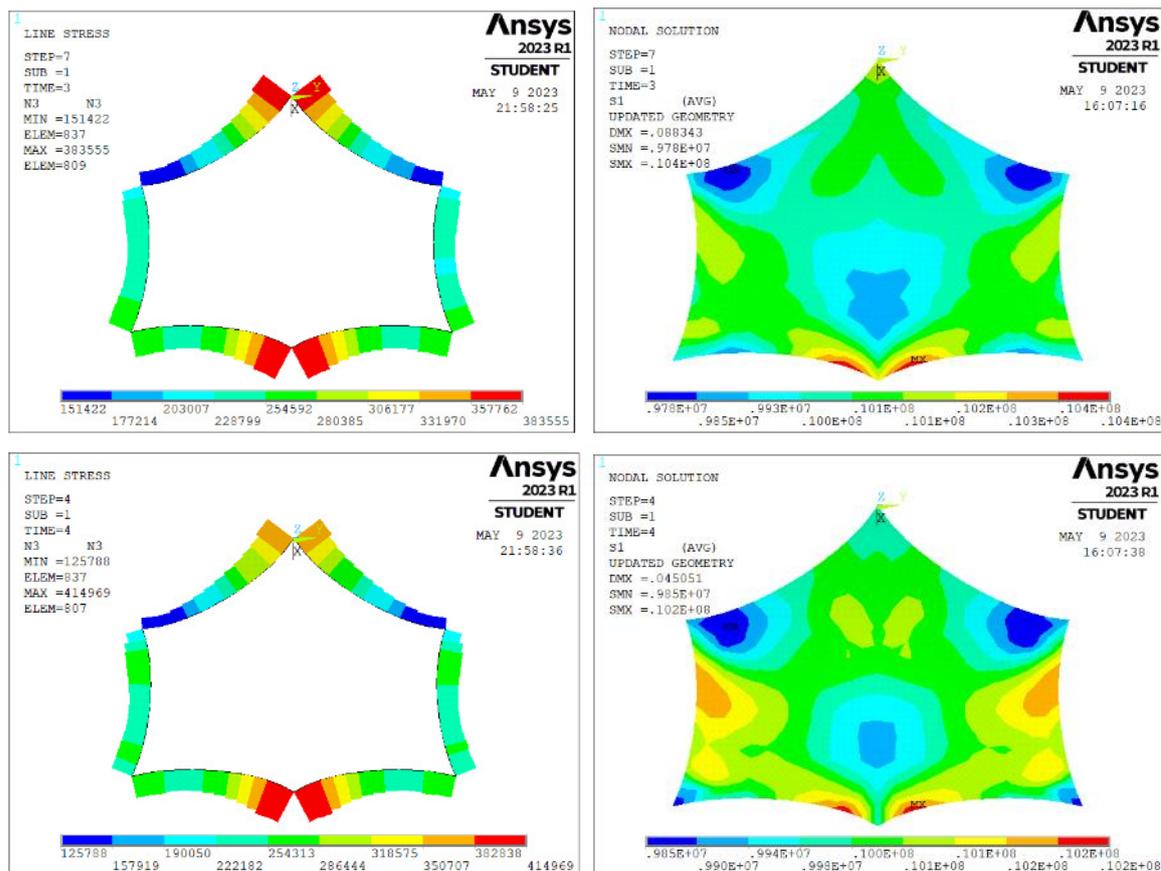


Fonte: Autoria própria.

A evolução dos esforços nos cabos de borda e das tensões principais máximas (s1) na membrama, conforme o lançamento de cada camada de concreto, é retatada na Figura 73.

Figura 73 - Evolução das forças atuantes nos cabos de borda e das tensões principais da membrama no decorrer do processo construtivo - lançamento da 1ª camada (TIME 2); da 2ª camada (TIME 3); e da 3ª camada (TIME 4).

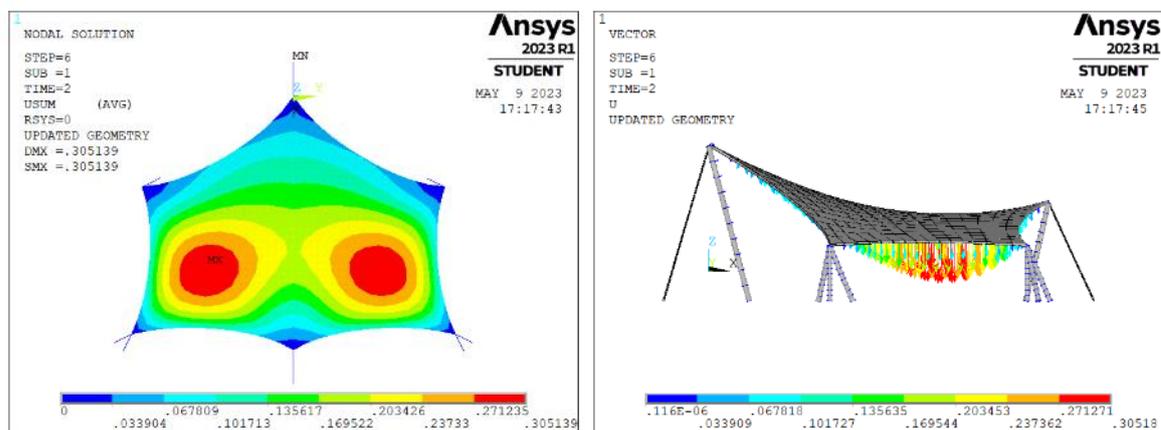


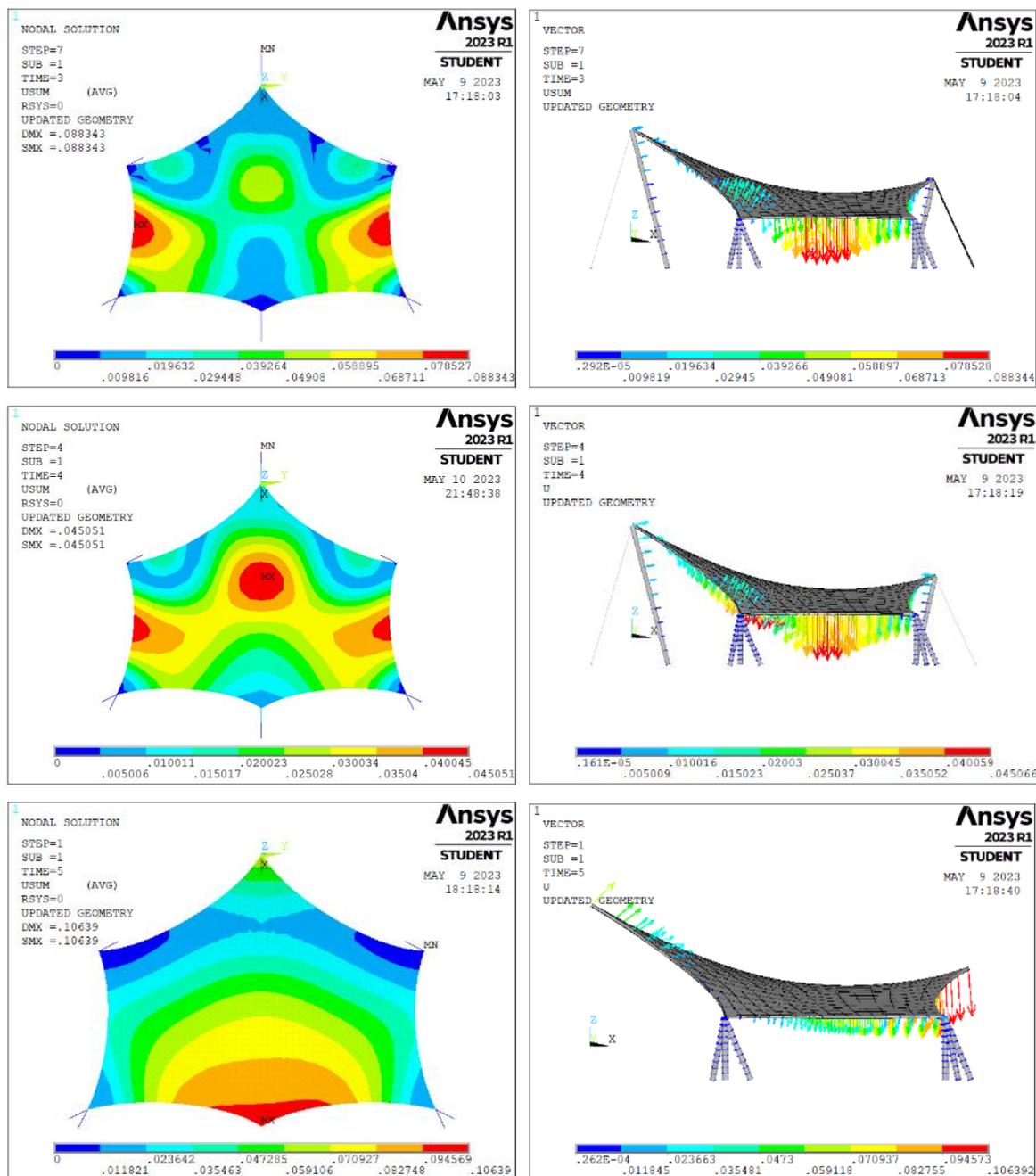


Fonte: Autoria própria.

Os deslocamentos desenvolvidos ao longo do processo construtivo são reproduzidos na Figura 74. Destaca-se que os valores de deslocamentos totais se referem àqueles desenvolvidos na etapa de carregamento em análise em relação à etapa anterior.

Figura 74 - Evolução dos deslocamentos no decorrer do processo construtivo – lançamento da 1ª camada (TIME 2); da 2ª camada (TIME 3); da 3ª camada (TIME 4); e desmobilização (TIME 5).

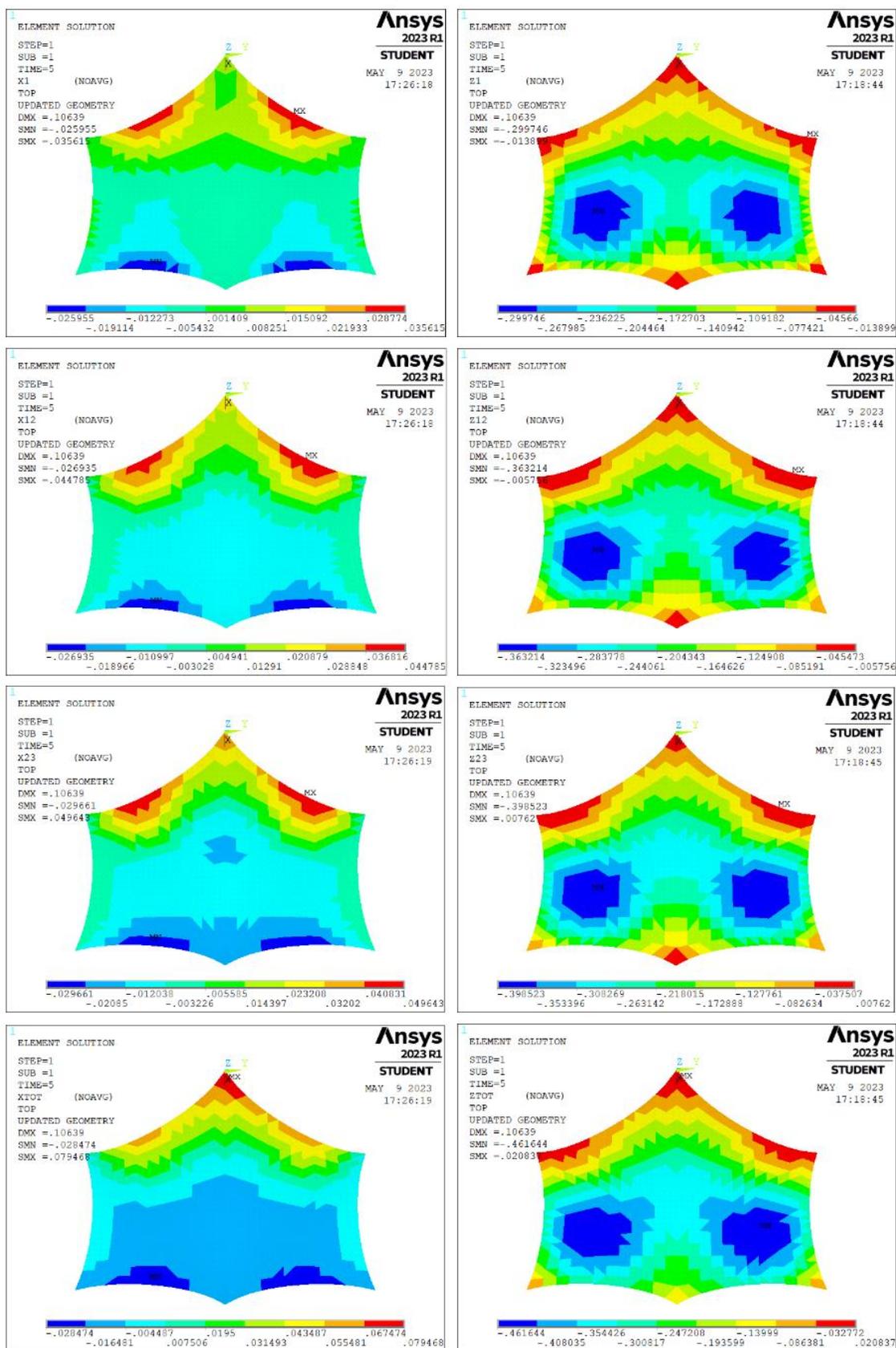




Fonte: Autoria própria.

Já os deslocamentos acumulados no decorrer do processo construtivo são reproduzidos na Figura 75, indicando-se os deslocamentos no eixo x e no eixo z. Destaca-se o deslocamento total máximo em “z” de 46.2 cm (absoluto).

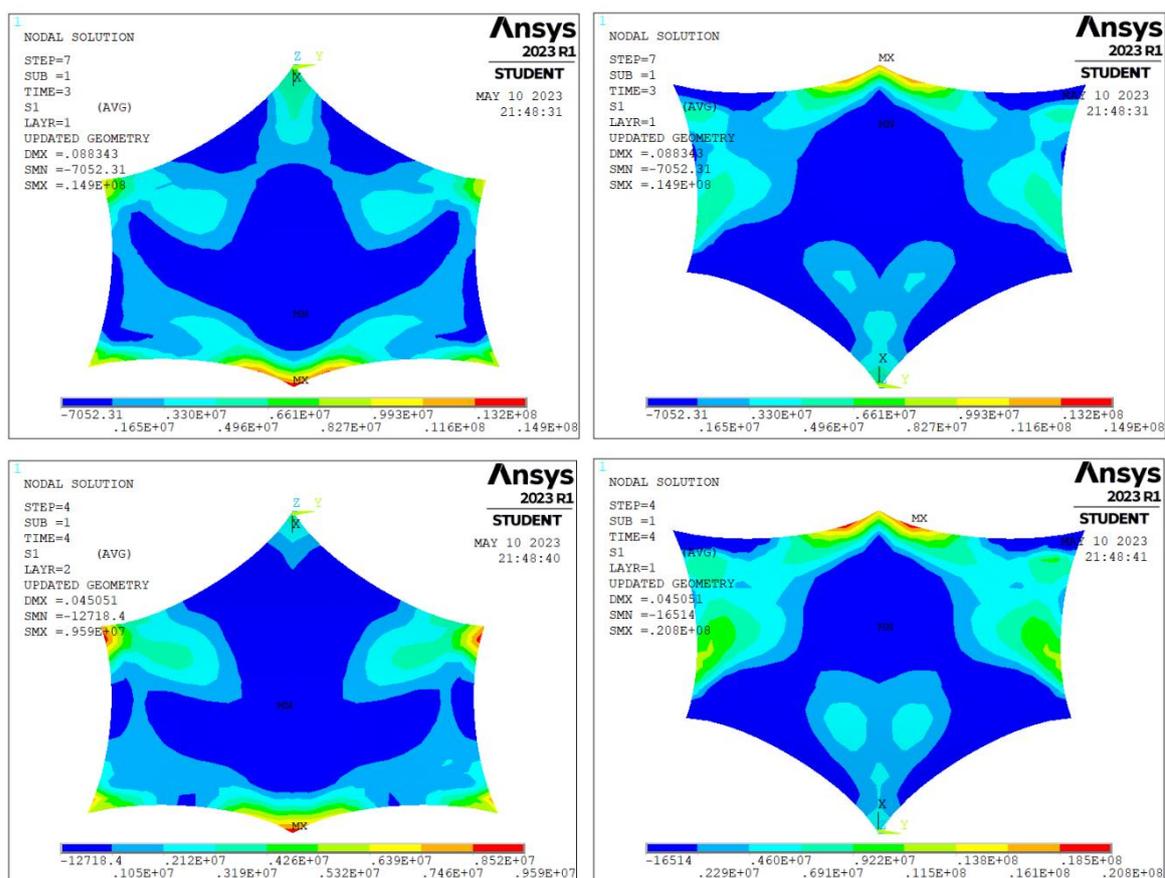
Figura 75 - Deslocamentos acumulados em "x" e "z" no decorrer do processo construtivo – lançamento da 1ª camada até a etapa de desmobilização de cabos e membrana.

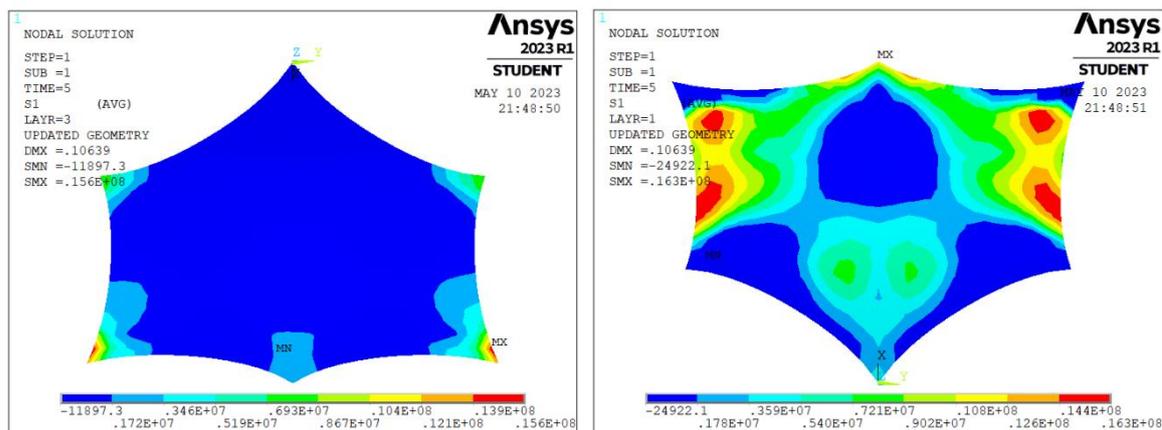


Fonte: Autoria própria.

Em relação à casca de concreto, as tensões principais máximas e mínimas desenvolvidas nos elementos das camadas superior (curada até a etapa em análise) e inferior são indicadas na Figura 76 e na Figura 77, sendo que a casca formada pela primeira camada ($e = 2,0$ cm) atua apenas no lançamento da segunda camada e assim sucessivamente, até a mobilização integral da casca de concreto ($e = 15,0$ cm) na etapa de desmobilização dos cabos e da membrana. A primeira camada é identificada pelo “LAYER 1”, a segunda pelo “LAYER 2” e a terceira e última pelo “LAYER 3”. Destaca-se que as imagens invertidas foram assim dispostas para destacar que se referem à face inferior da casca.

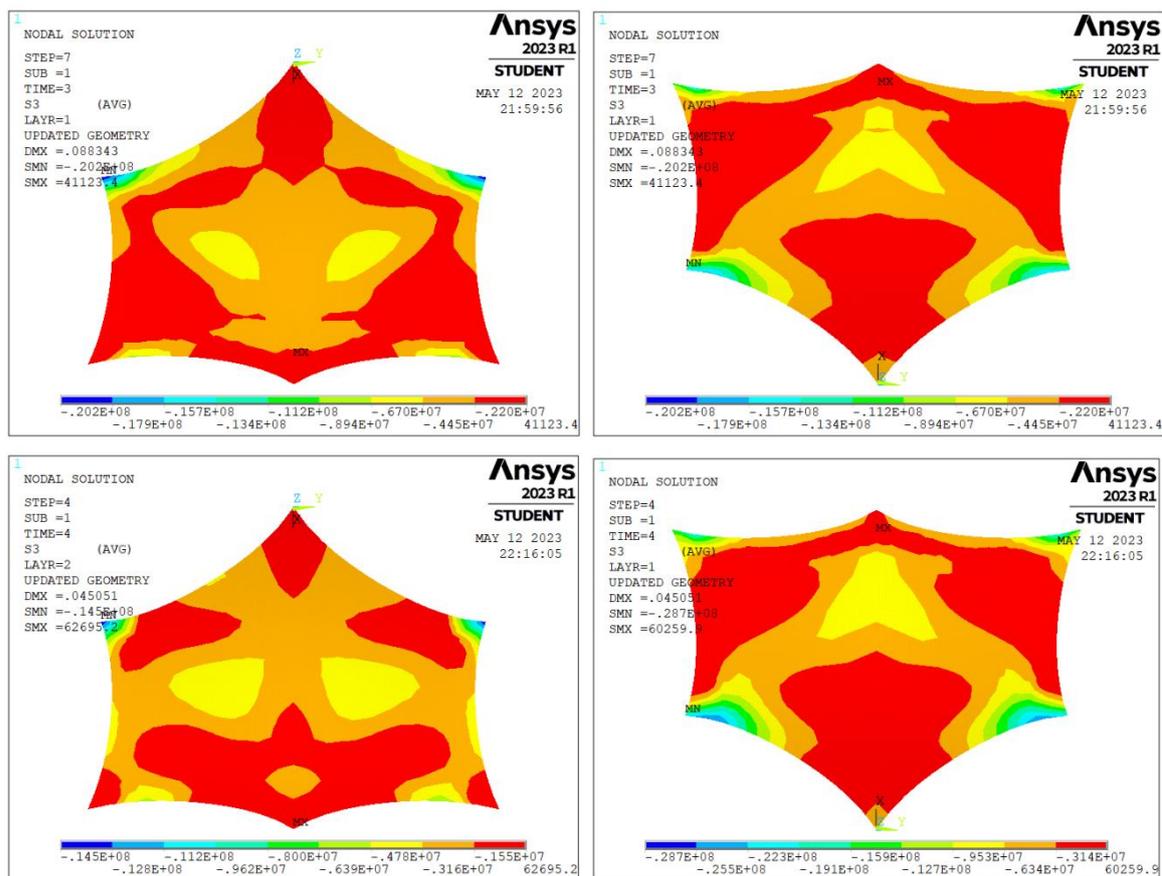
Figura 76 - Evolução das tensões principais máximas (s1) na camada superior (esquerda) e camada inferior (direita) da casca de concreto curada – lançamento da 2ª camada (TIME 3); da 3ª camada (TIME 4); e após desmobilização (TIME 5).

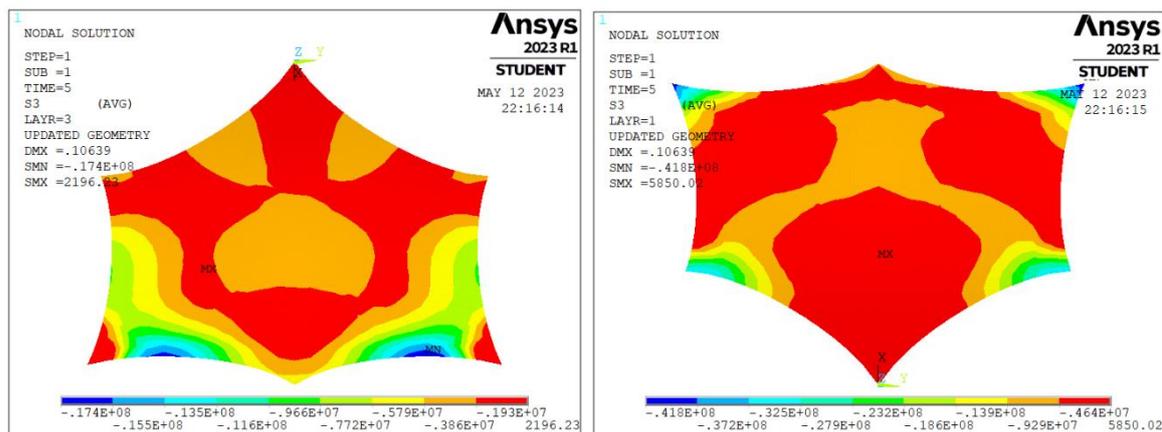




Fonte: Autoria própria.

Figura 77 - Evolução das tensões principais mínimas (s3) na camada superior (esquerda) e camada inferior (direita) da casca de concreto curada – lançamento da 2ª camada (TIME 3); da 3ª camada (TIME 4); e após desmobilização (TIME 5).

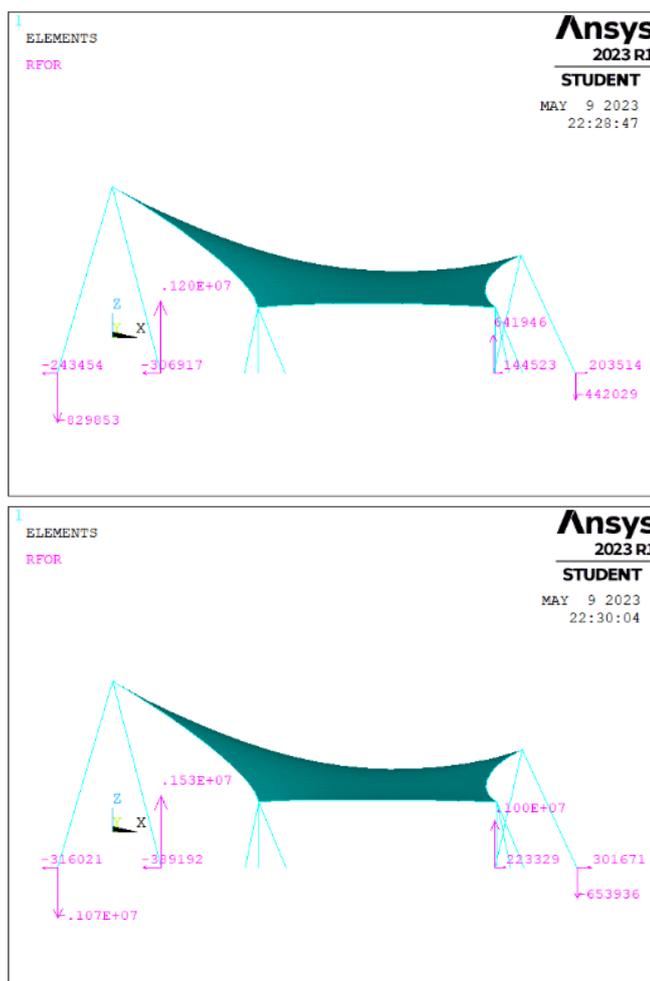


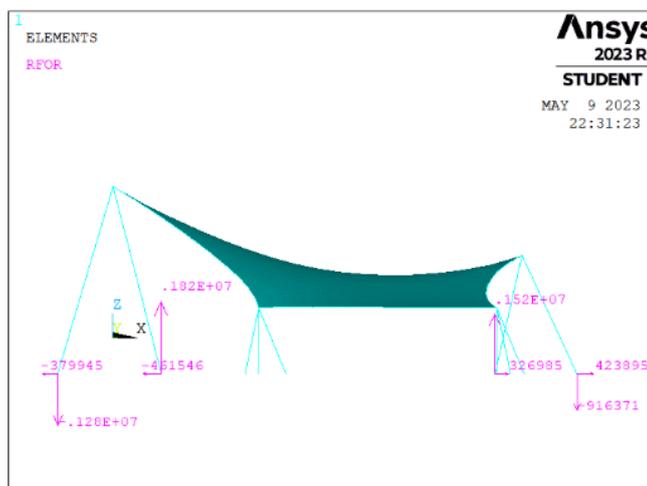


Fonte: Autoria própria.

A evolução das forças resultantes nos nós de apoio dos mastros “rei” e “rainha” e dos cabos de ancoragem são indicadas na Figura 78.

Figura 78 - Evolução das forças resultantes nos nós de apoio dos mastros e cabos de ancoragem – lançamento da 1ª, 2ª e 3ª camadas da casca de concreto.





Fonte: Autoria própria.

Apresentam-se na Tabela 4 a evolução das forças resultantes nos nós de apoio dos mastros “rei” e “rainha”, bem como as forças atuantes nos cabos de ancoragem no decorrer do processo construtivo.

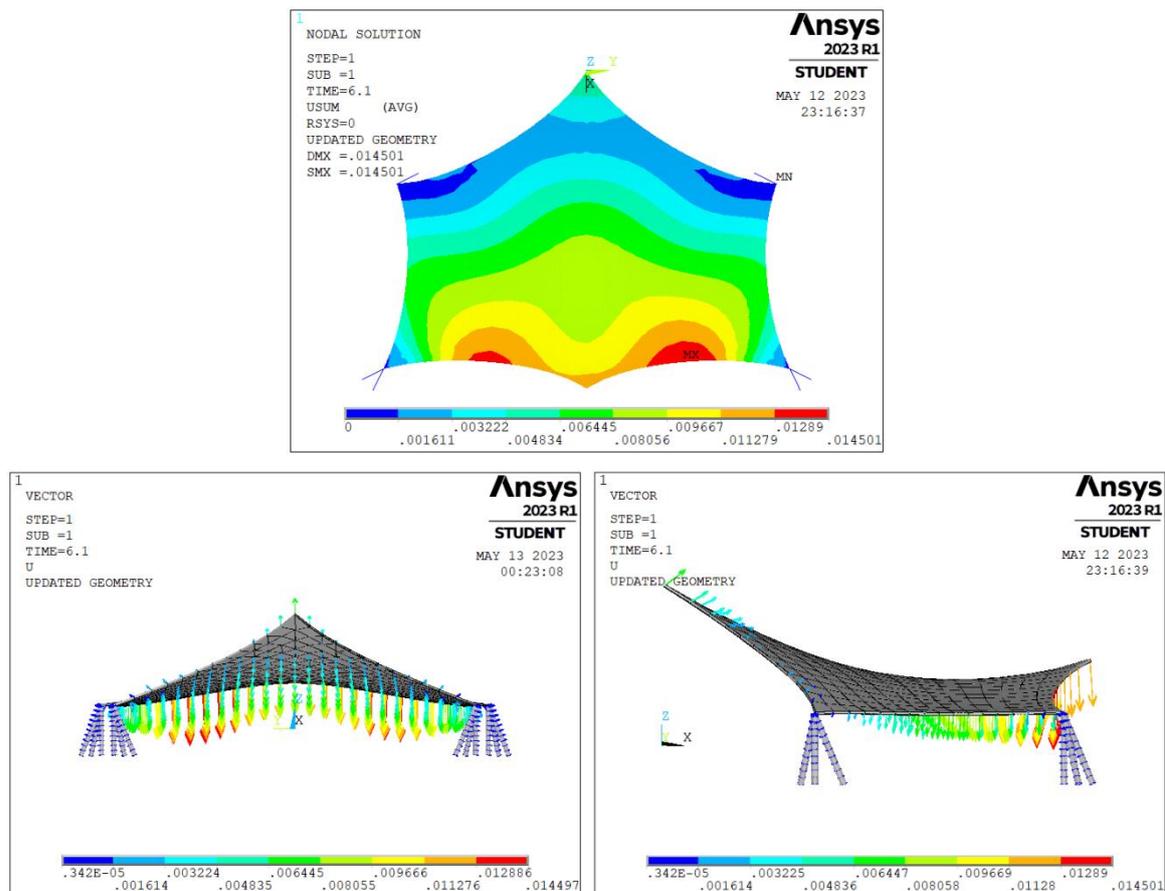
Tabela 4 - Forças resultantes nos nós de apoio dos mastros “rei” e “rainha” e forças atuantes nos cabos de ancoragem no decorrer do processo construtivo.

Etapa	Mastro “rei”		Mastro “rainha”		$F_{\text{cabo,rei}}$	$F_{\text{cabo,rainha}}$
	F_x	F_z	F_x	F_z		
Retesamento (TIME 1)	- 210 kN	825 kN	98 kN	489 kN	591 kN	338 kN
1ª camada (TIME 2)	- 307 kN	1200 kN	144 kN	642 kN	866 kN	487 kN
2ª camada (TIME 3)	- 389 kN	1530 kN	223 kN	1000 kN	1120 kN	721 kN
3ª camada (TIME 4)	- 462 kN	1820 kN	327 kN	1520 kN	1340 kN	1010 kN

Fonte: Autoria própria.

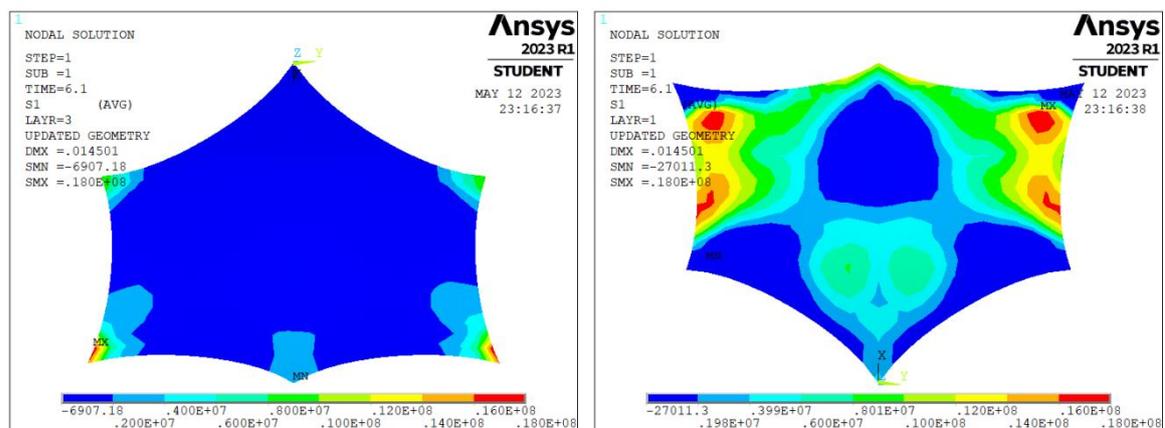
Em relação à aplicação da carga de vento em “x”, os resultados obtidos em termos dos deslocamentos totais ocorridos na estrutura são indicados na Figura 79, e as tensões principais máximas e mínimas atuantes na casca são reproduzidas na Figura 80.

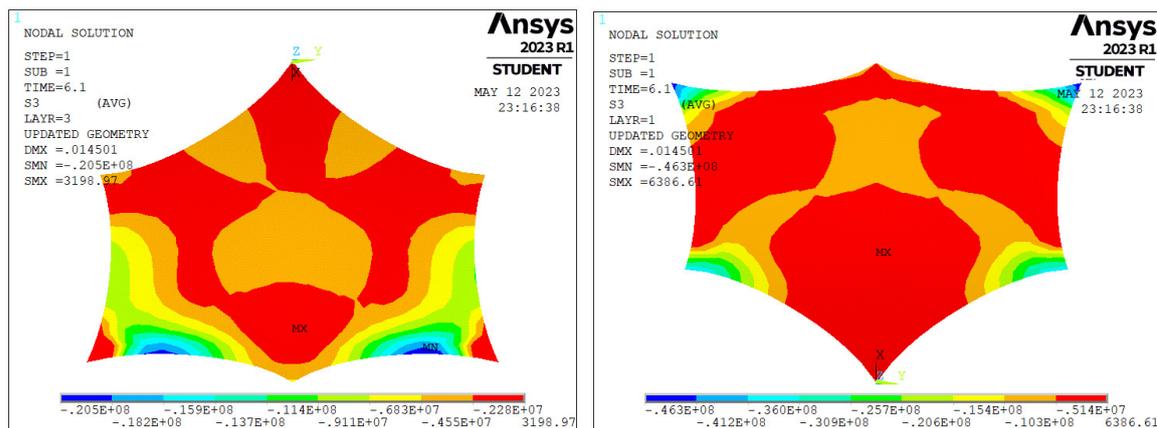
Figura 79 - Deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura em função da carga de vento na direção "x" (TIME 6.1).



Fonte: Autoria própria.

Figura 80 - Tensões principais máximas e mínimas ocorridas na casca com a aplicação da carga de vento na direção "x" (TIME 6.1).

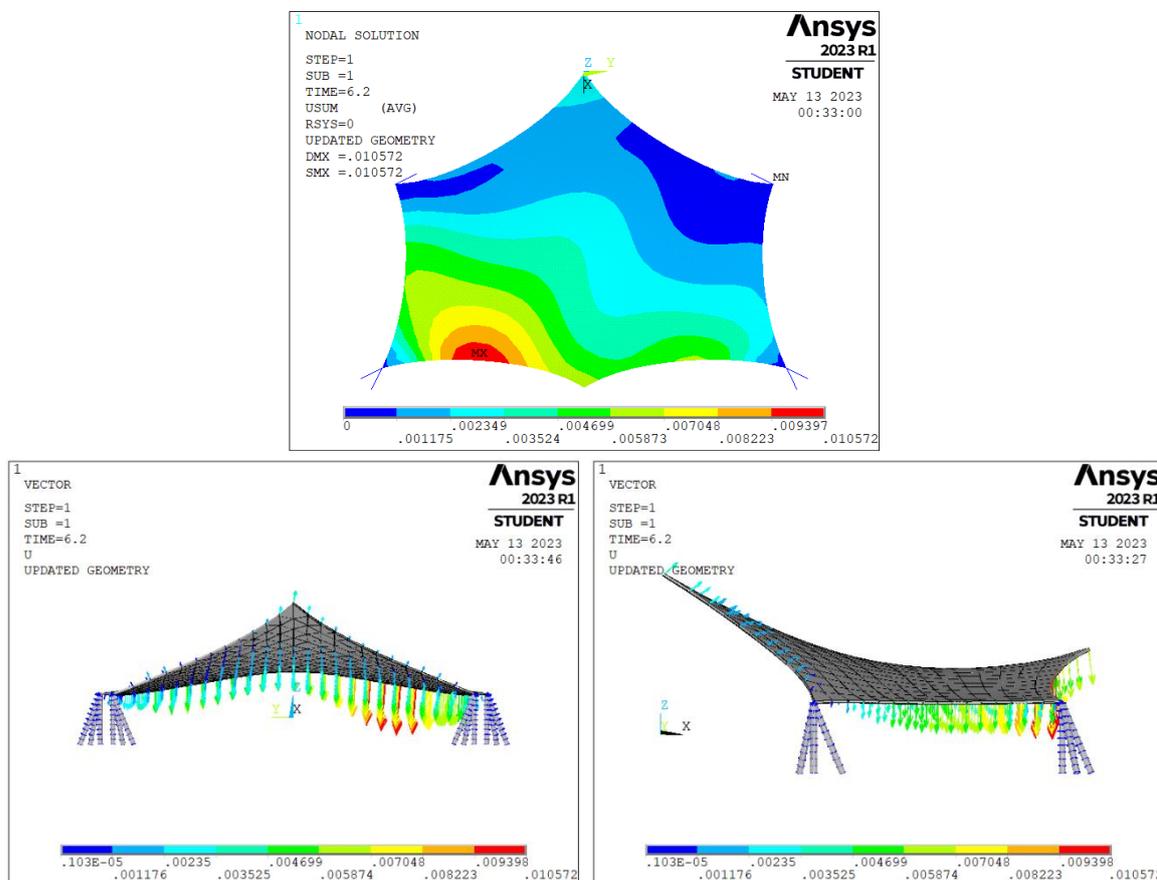




Fonte: Autoria própria.

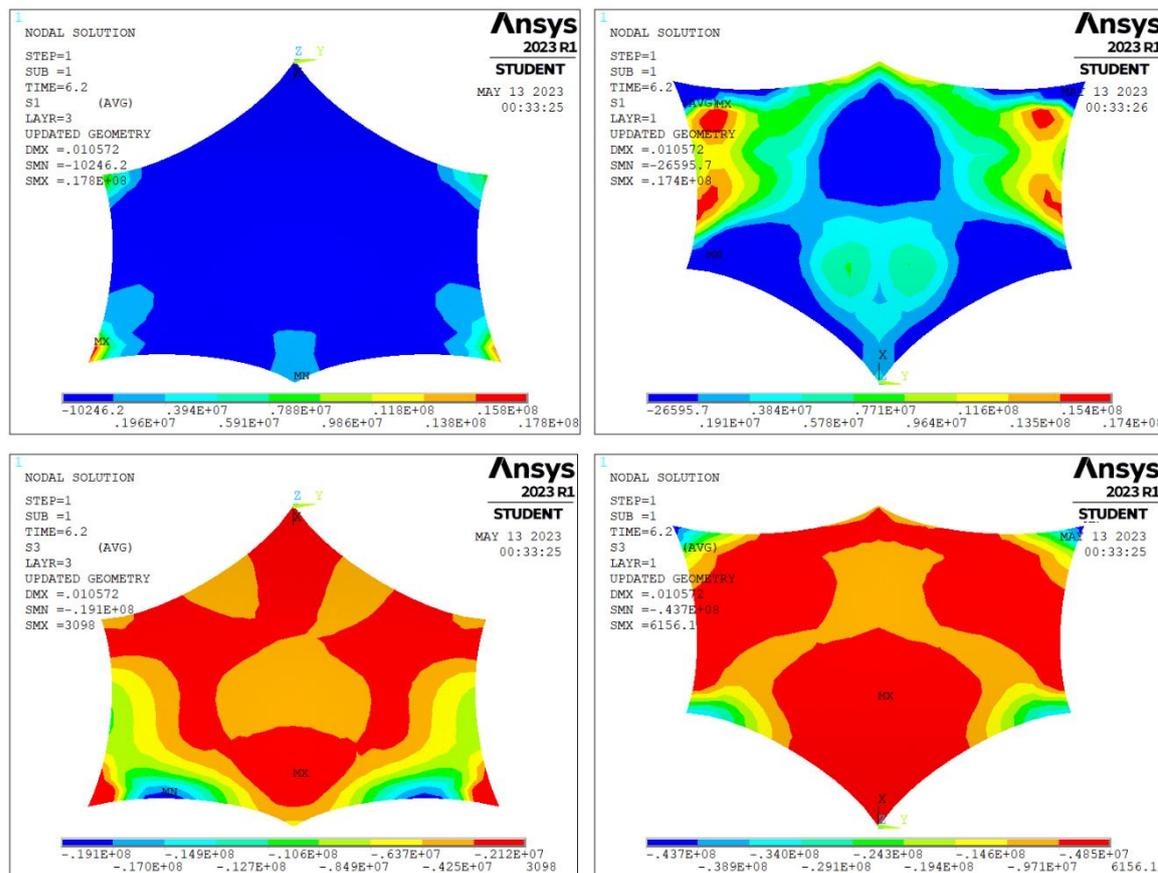
Já os resultados obtidos do carregamento de vento na direção "y" são indicados na Figura 81 (deslocamentos totais da estrutura) e na Figura 82 (tensões principais máximas e mínimas atuantes na casca).

Figura 81 - Deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura em função da carga de vento na direção "y" (TIME 6.2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 82 - Tensões principais máximas e mínimas ocorridas na casca com a aplicação da carga de vento na direção "y" (TIME 6.2).



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que os resultados expostos acima decorrem da execução da casca a partir da geometria inicial de projeto da membrana, submetida a uma tensão uniforme também semelhante àquela de projeto. Para avaliação dos efeitos destes parâmetros na geometria final da casca, propôs-se: (1) elevação dos topos dos mastros “rei” e “rainha” em 1.8 m; (2) aumento da tensão inicial de retesamento de 10 MPa para 20 MPa.

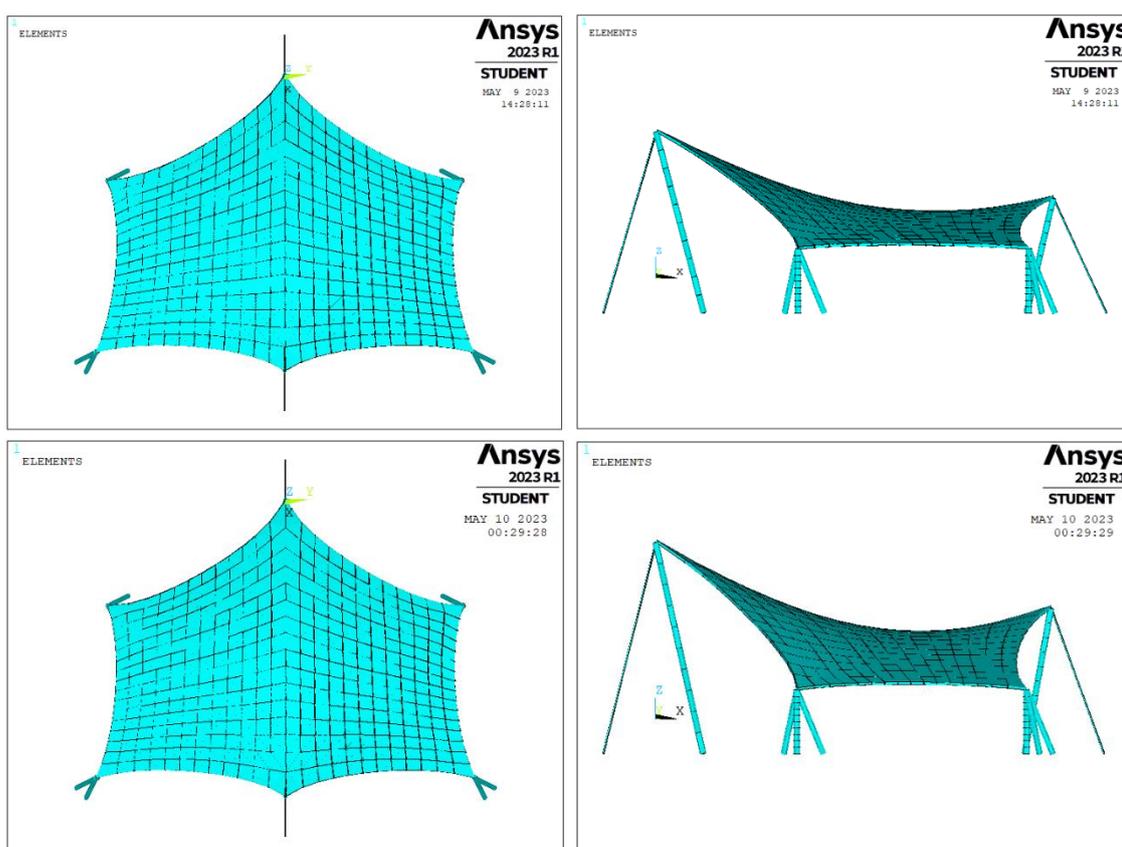
3.2.3.1 Da Proposta 1 (alteração da geometria inicial)

Tendo em vista o abatimento da casca de concreto a partir da geometria de projeto nas regiões centrais de cada aba lateral e na região central da cumeeira, com a incidência de tensões principais máximas de até 16 MPa na camada

inferior, propôs-se uma alteração na geometria inicial da estrutura por meio da elevação dos vértices dos mastros “rei” e “rainha” em 1.80 m.

A geometria obtida após a busca da forma (etapa de retesamento – TIME 1) em comparação com a geometria obtida do projeto original é apresentada na Figura 83.

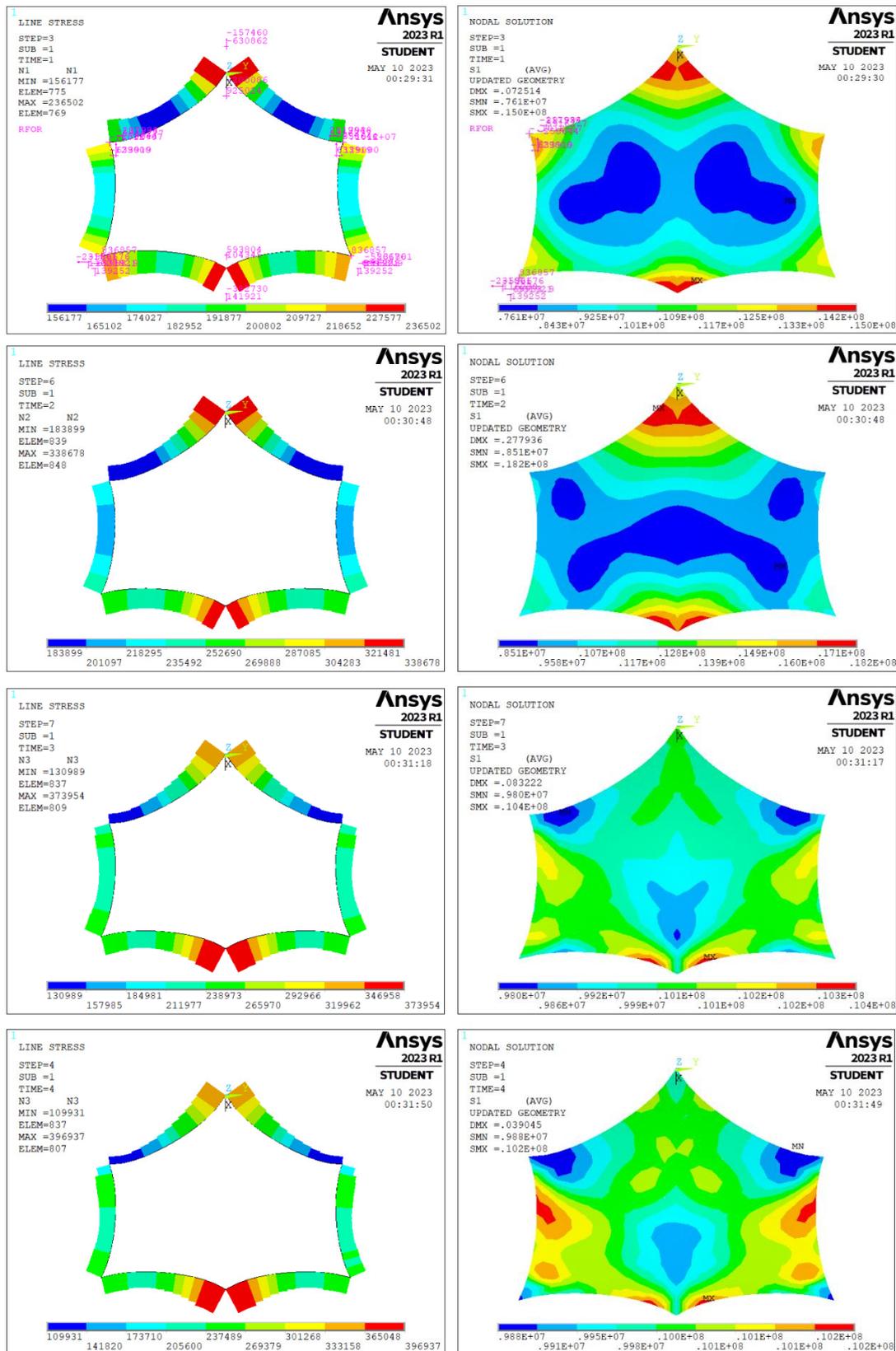
Figura 83 - Geometria da estrutura após busca da forma - geometria de projeto (superior) e geometria proposta (inferior).



Fonte: Autoria própria.

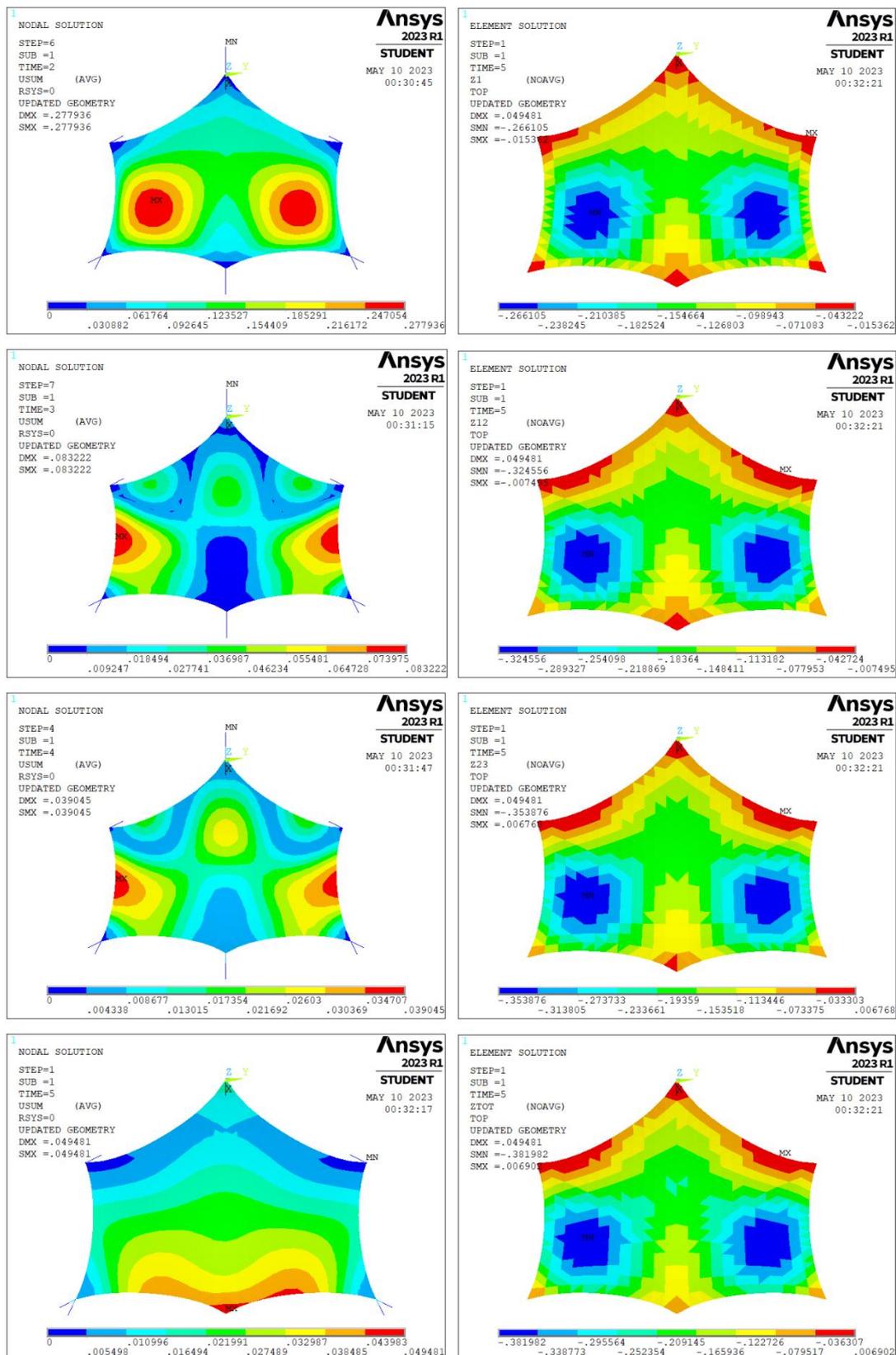
Na Figura 84 são indicadas as forças atuantes nos cabos de borda e as tensões principais máximas (s_1) obtidas atuantes na membrana no decorrer do processo construtivo, desde o retesamento até o lançamento da 3ª camada de concreto. Já na Figura 85 são reproduzidos os deslocamentos totais por etapa de carregamento e os deslocamentos acumulados em “z” no decorrer do processo construtivo.

Figura 84 - Evolução das forças atuantes nos cabos e das tensões principais máximas na membrana no decorrer do processo construtivo (Proposta 1).



Fonte: Autoria própria.

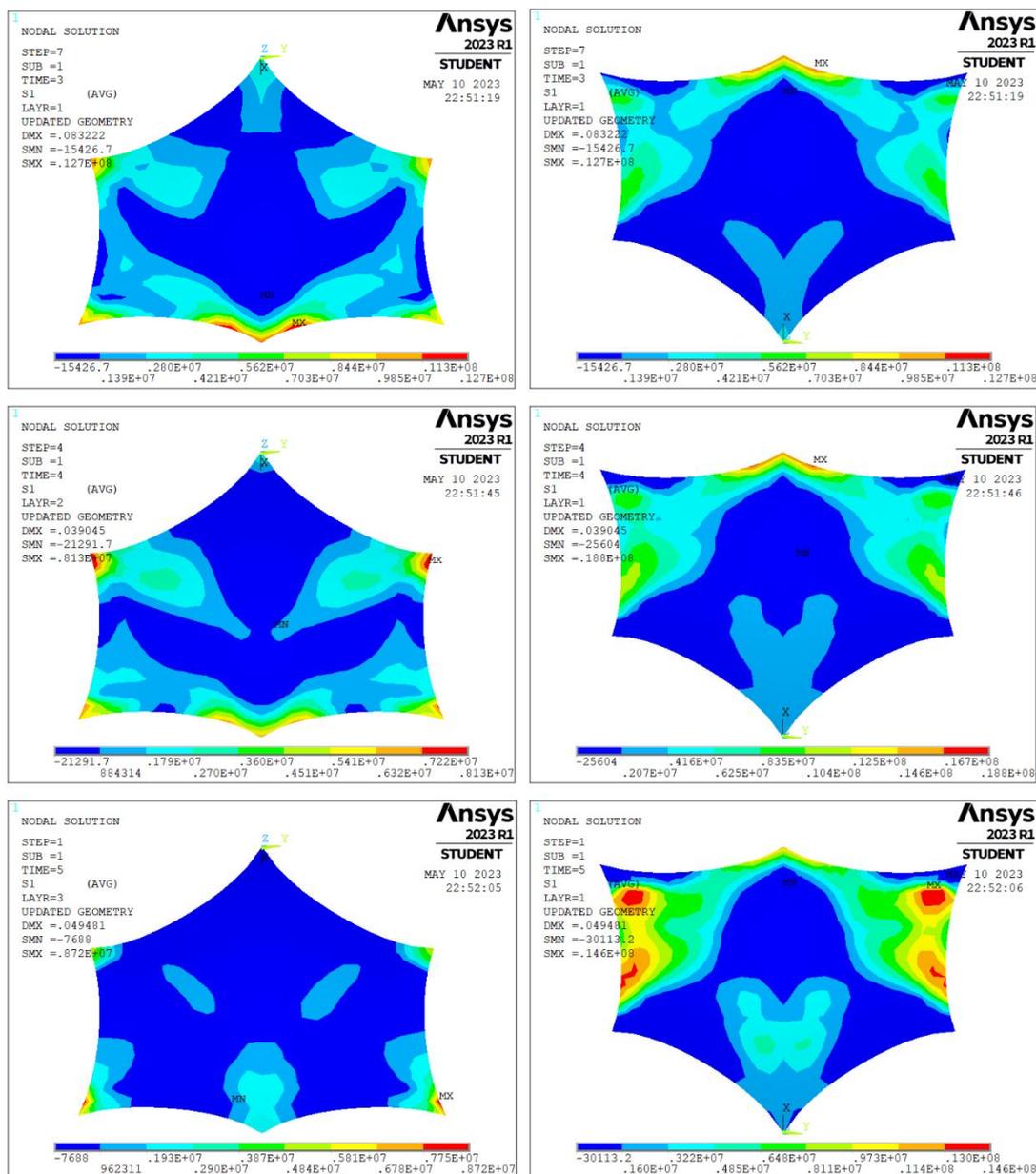
Figura 85 - Evolução dos deslocamentos totais por etapa de carregamento (esquerda) e deslocamentos acumulados em “z” (direita) – Proposta 1.



Fonte: Autoria própria.

As tensões principais máximas desenvolvidas nas camadas superior (já curada) e inferior da casca ao longo do processo construtivo são indicadas na Figura 86.

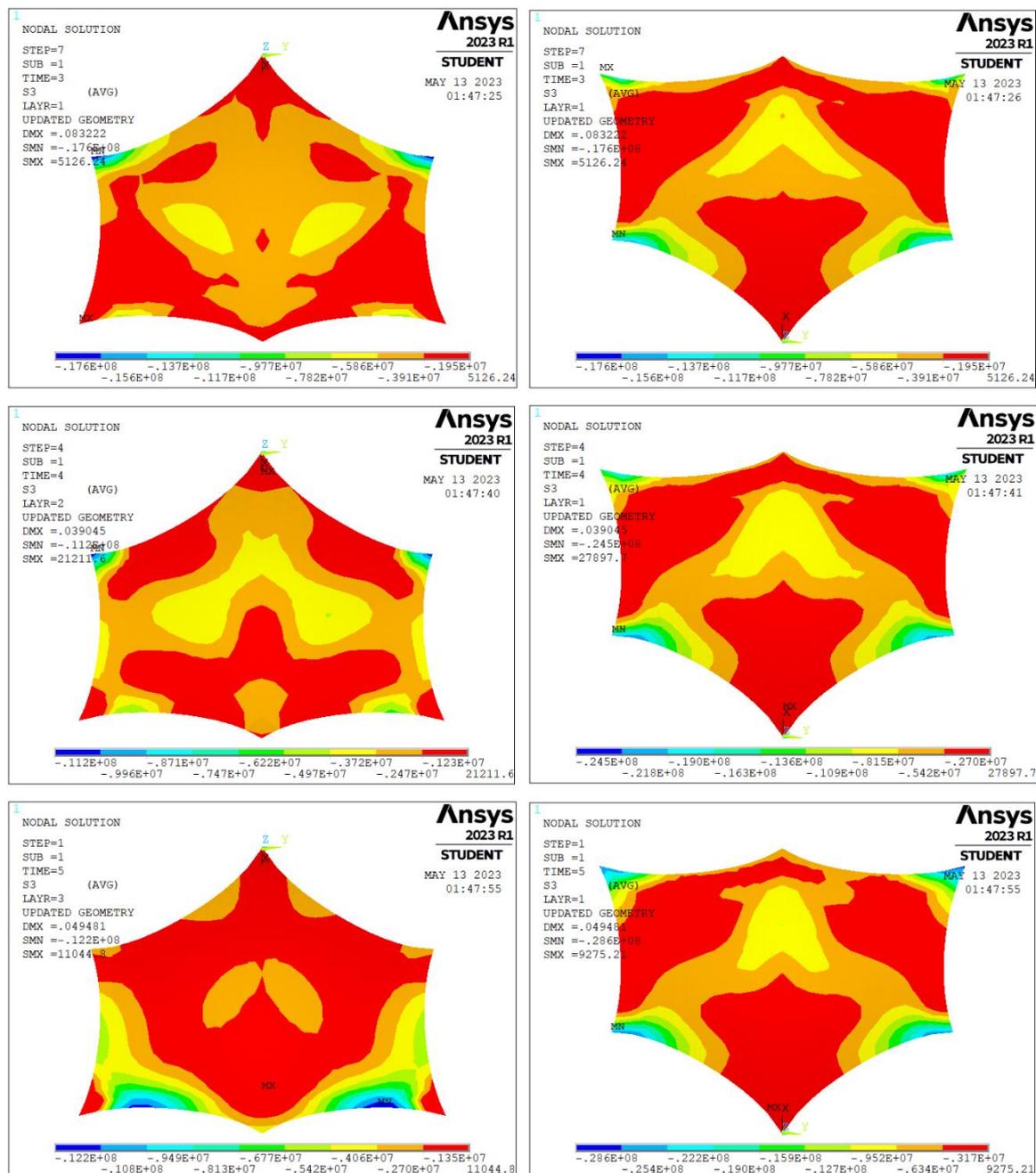
Figura 86 - Evolução das tensões principais máximas (s1) na casca de concreto no decorrer do processo construtivo (Proposta 1).



Fonte: Autoria própria.

Já as tensões principais mínimas atuantes na casca, nas camadas superior e inferior, observadas no decorrer do processo construtivo são indicadas na Figura 87.

Figura 87 - Evolução das tensões principais mínimas (s_3) na casca de concreto no decorrer do processo construtivo (Proposta 1).



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5 são indicadas as forças resultantes nos nós dos apoios dos mastros “rei” e “rainha” e as forças atuantes nos cabos de ancoragem no decorrer do processo construtivo.

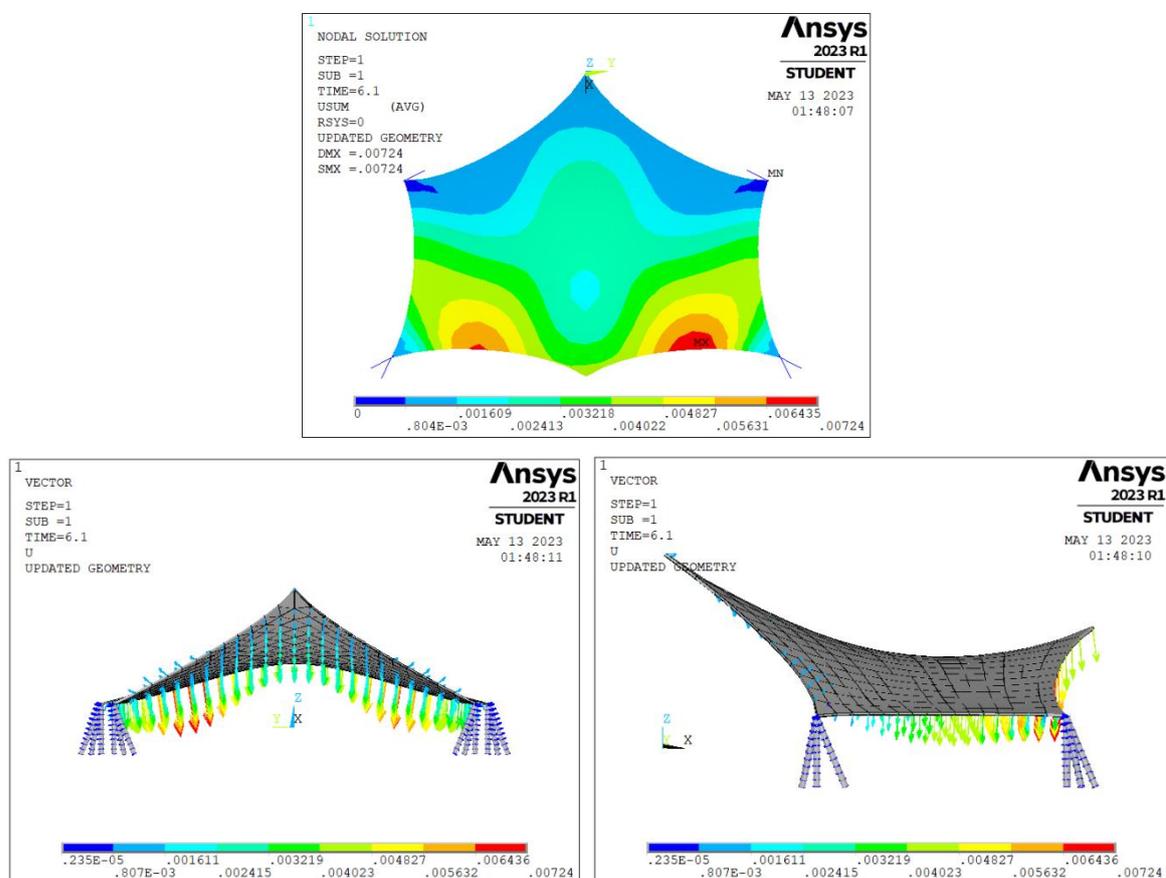
Tabela 5 - Forças resultantes nos nós de apoio dos mastros "rei" e "rainha" e forças atuantes nos cabos de ancoragem no decorrer do processo construtivo (Proposta 1).

Etapa	Mastro "rei"		Mastro "rainha"		F _{rei}	F _{rainha}
	F _x	F _z	F _x	F _z		
Retesamento (TIME 1)	- 200 kN	925 kN	104 kN	594 kN	651 kN	418 kN
1ª camada (TIME 2)	- 277 kN	1290 kN	143 kN	815 kN	908 kN	566 kN
2ª camada (TIME 3)	- 318 kN	1470 kN	189 kN	1090 kN	1050 kN	681 kN
3ª camada (TIME 4)	- 350 kN	1640 kN	251 kN	1480 kN	1115 kN	808 kN

Fonte: Autoria própria.

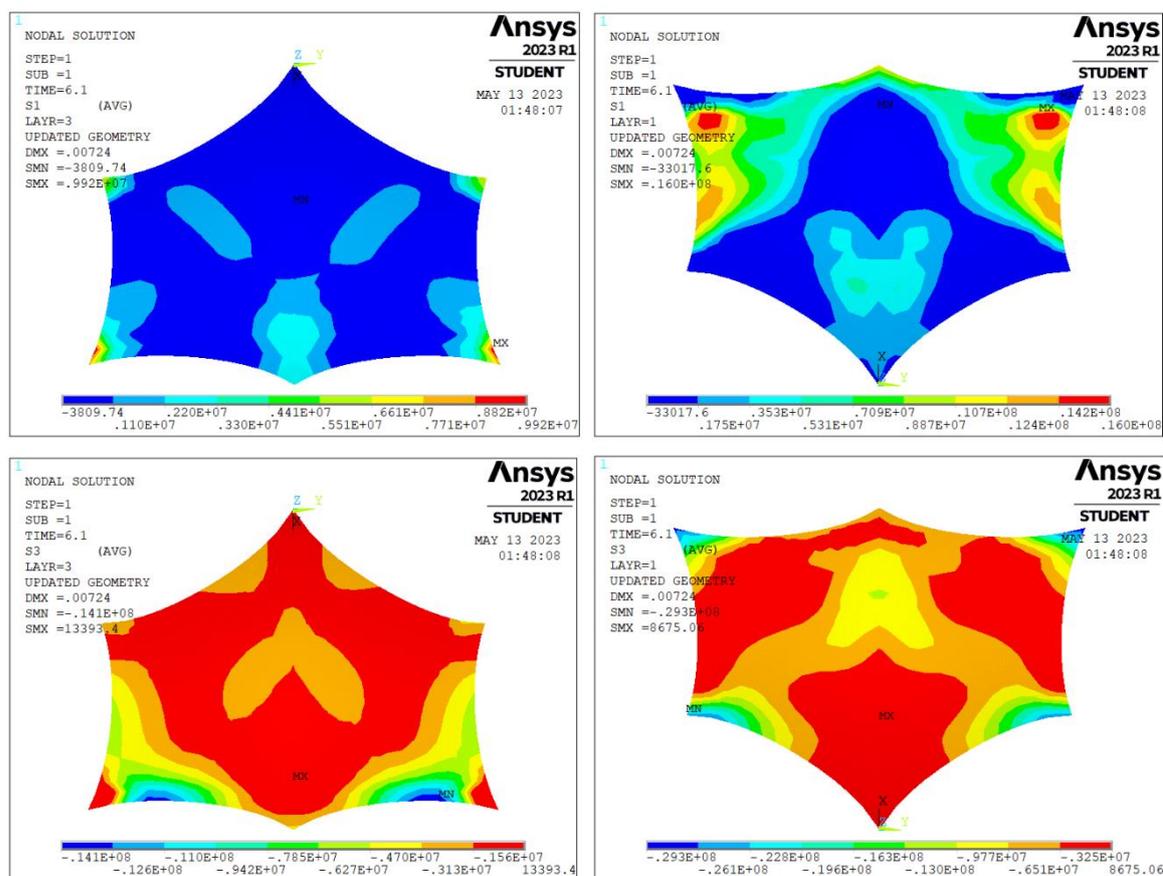
Os resultados decorrentes do carregamento de vento em "x" são indicados na Figura 88 e na Figura 89.

Figura 88 - Deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura em função da carga de vento na direção "x" (Proposta 1).



Fonte: Autoria própria.

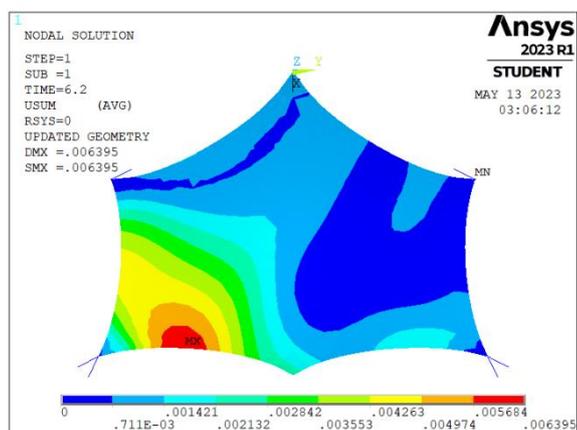
Figura 89 - Tensões principais máximas e mínimas ocorridas na casca com a aplicação da carga de vento na direção "x" (Proposta 1).

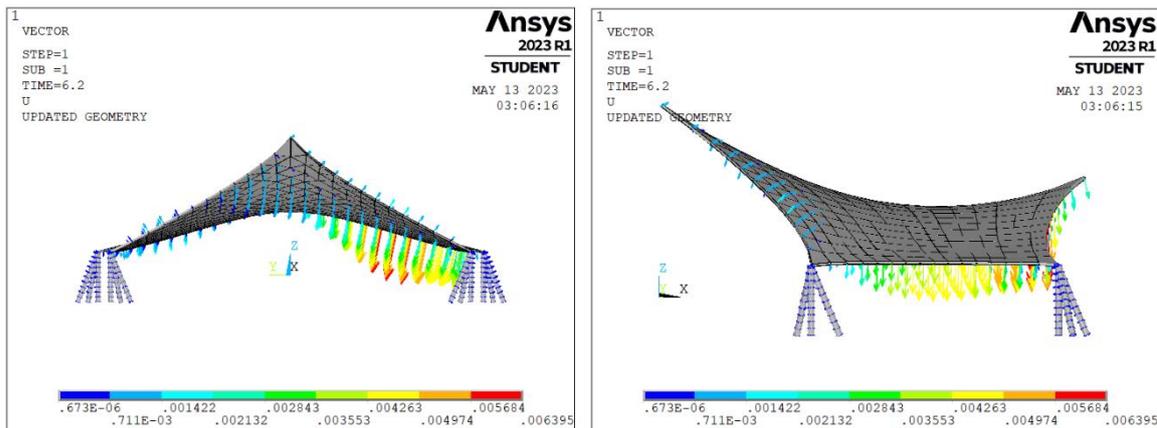


Fonte: Autoria própria.

Já os resultados das cargas de vento em "y" constam na Figura 90 e na Figura 91.

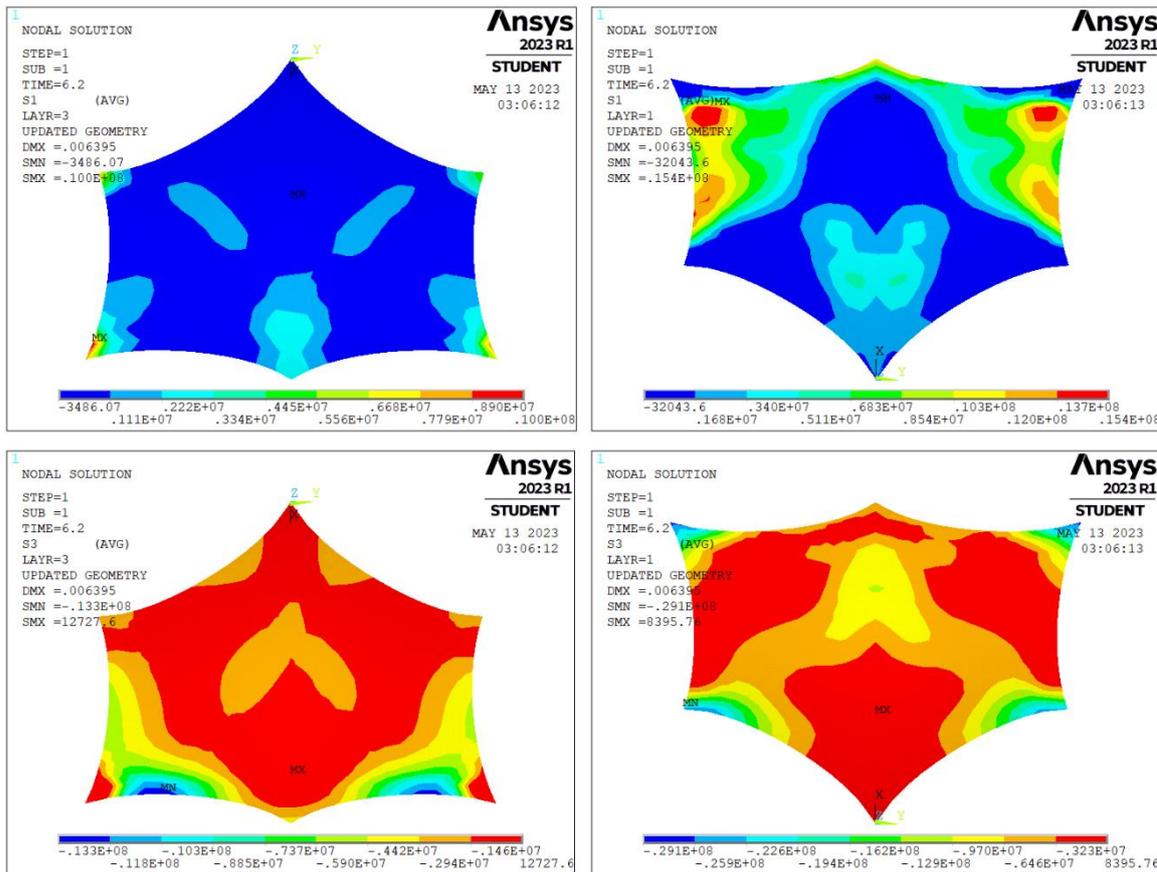
Figura 90 - Deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura em função da carga de vento na direção "y" (Proposta 1).





Fonte: Autoria própria.

Figura 91 - Tensões principais máximas e mínimas ocorridas na casca com a aplicação da carga de vento na direção "y" (Proposta 1).

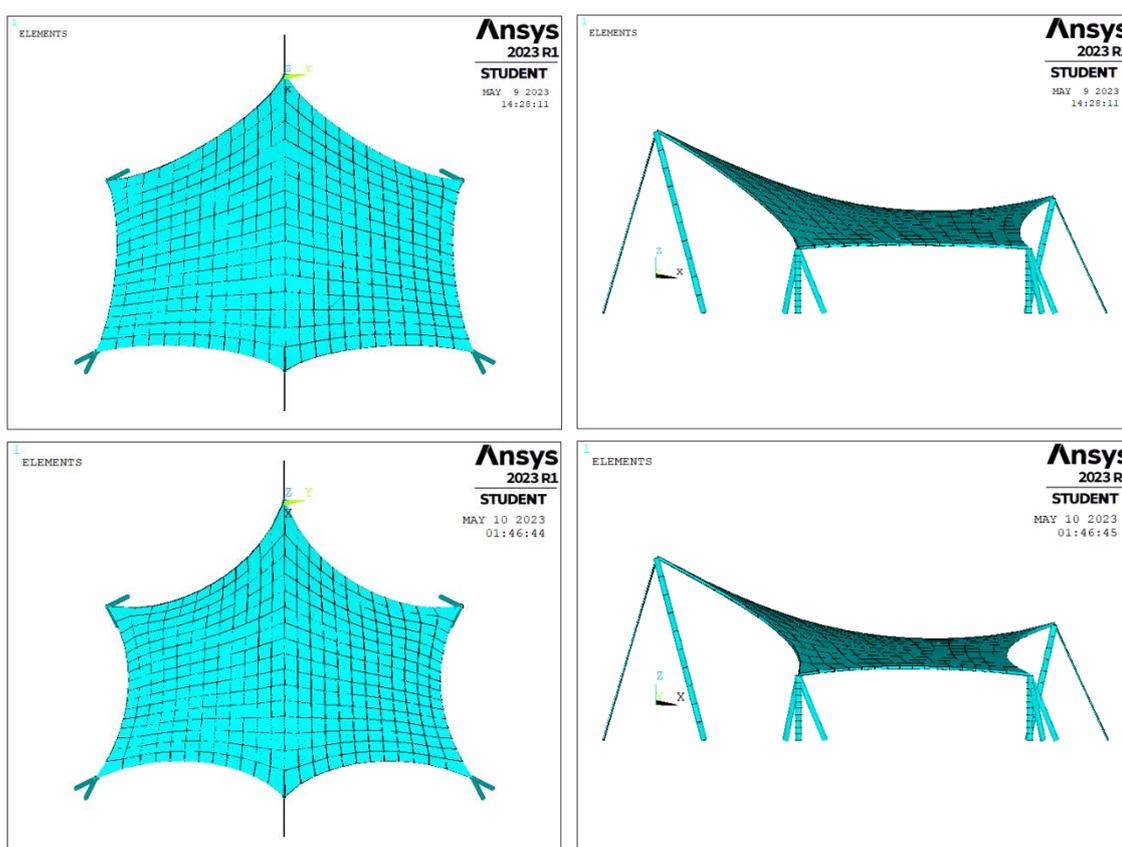


Fonte: Autoria própria.

3.2.3.2 Da Proposta 2 (aumento da tensão de retesamento)

No caso da Proposta 2, sugere-se o aumento da tensão inicial de retesamento da membrana com o intuito de avaliar sua influência na rigidez do molde e na atenuação dos deslocamentos desenvolvidos no decorrer do processo construtivo. A geometria obtida após a busca da forma (etapa de retesamento – TIME 1) em comparação com a geometria obtida do projeto original é apresentada na Figura 92.

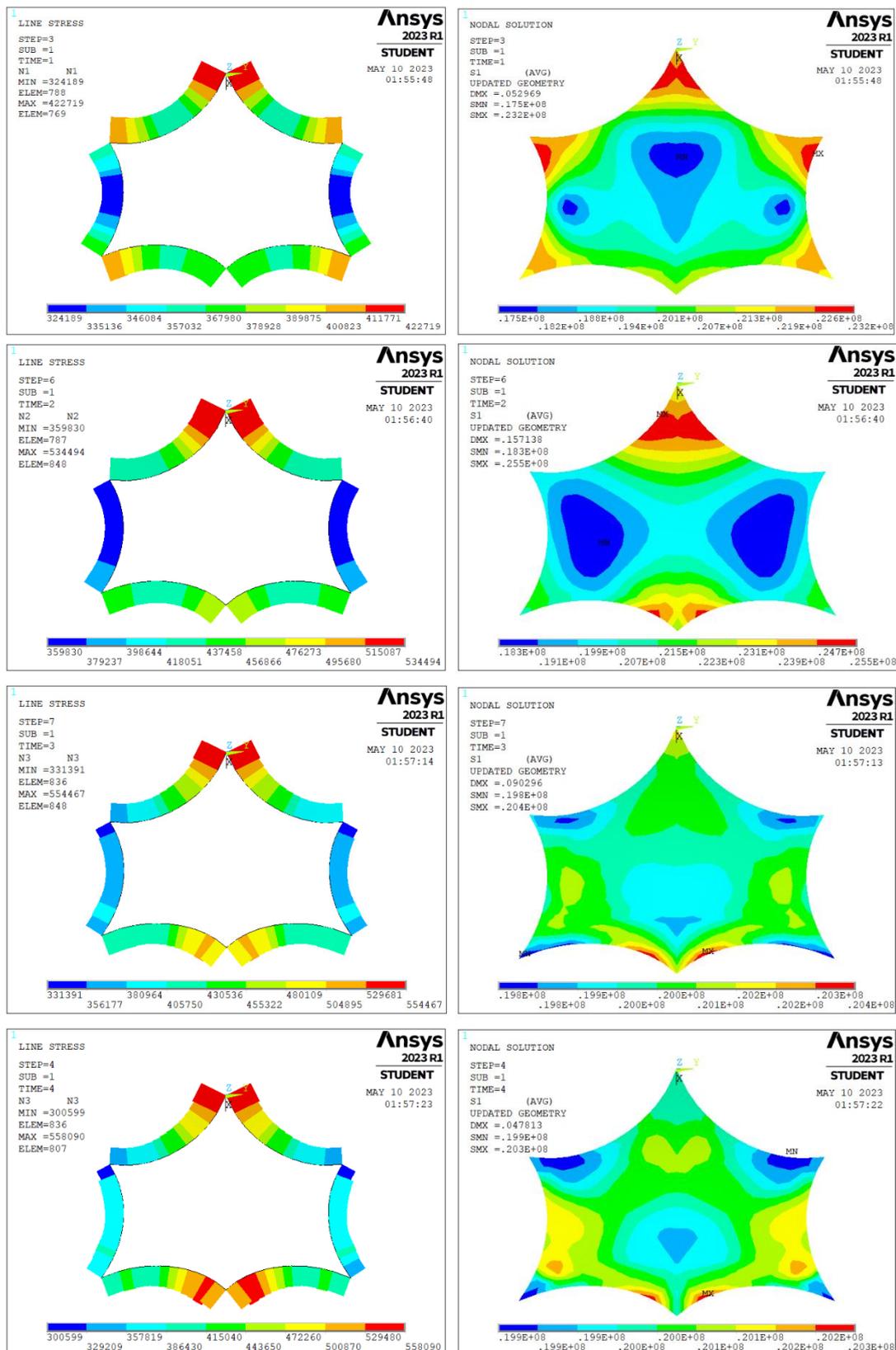
Figura 92 - Geometria da estrutura após busca da forma - geometria de projeto (superior) e geometria com aumento da tensão de retesamento (inferior).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 93 são indicadas as forças atuantes nos cabos de borda e as tensões principais máximas (s_1) obtidas atuantes na membrana no decorrer do processo construtivo, desde o retesamento até o lançamento da 3ª camada de concreto.

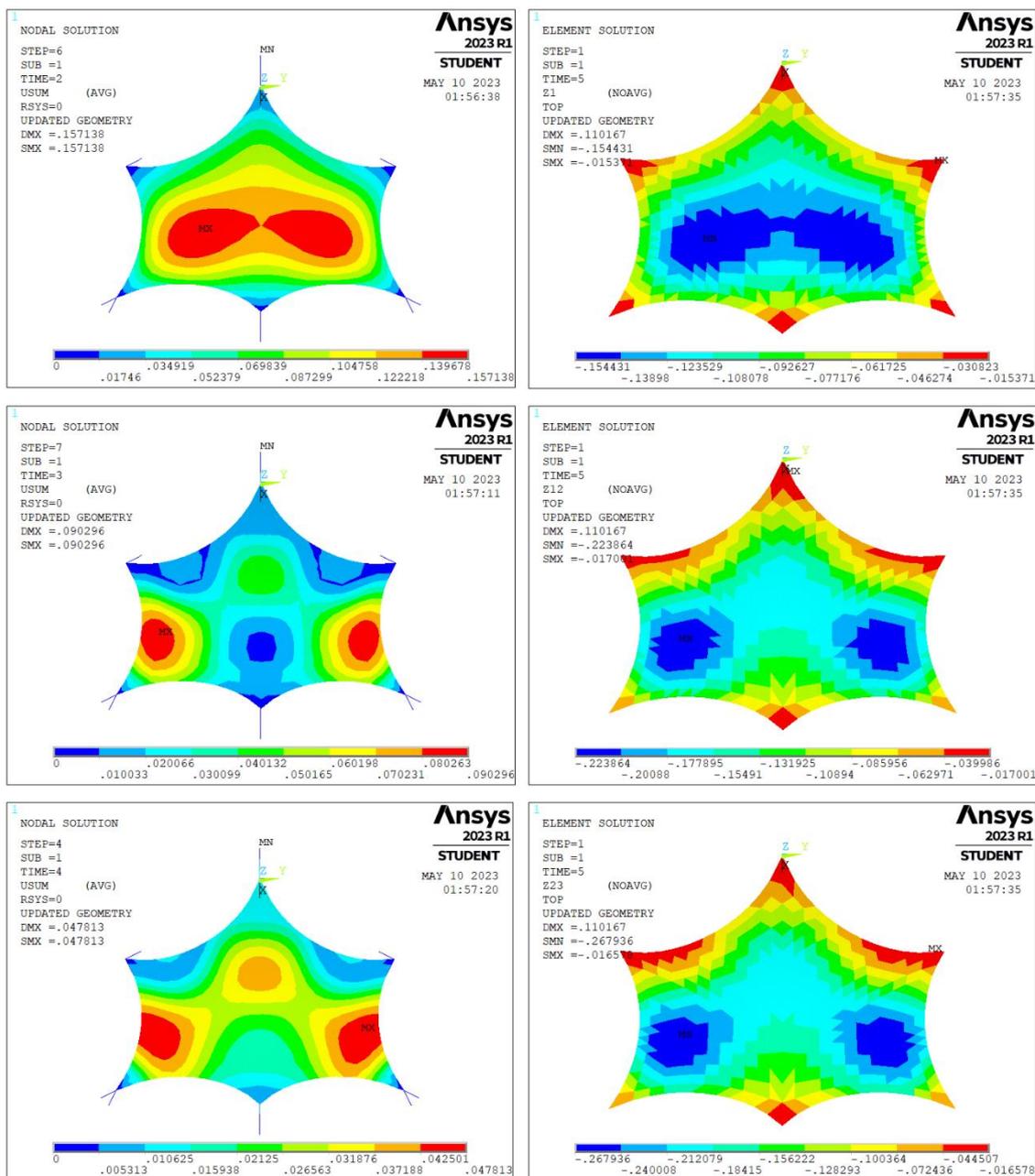
Figura 93 - Evolução das forças atuantes nos cabos e das tensões principais máximas na membrana no decorrer do processo construtivo (Proposta 2).

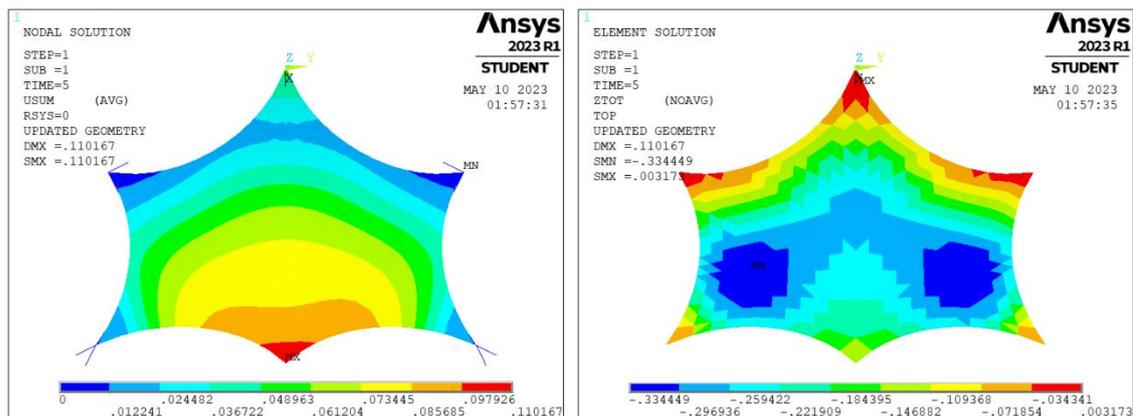


Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 94 são reproduzidos os deslocamentos totais por etapa de carregamento e os deslocamentos acumulados em “z” no decorrer do processo construtivo.

Figura 94 - Evolução dos deslocamentos totais por etapa de carregamento (esquerda) e deslocamentos acumulados em “z” (direita) – Proposta 2.

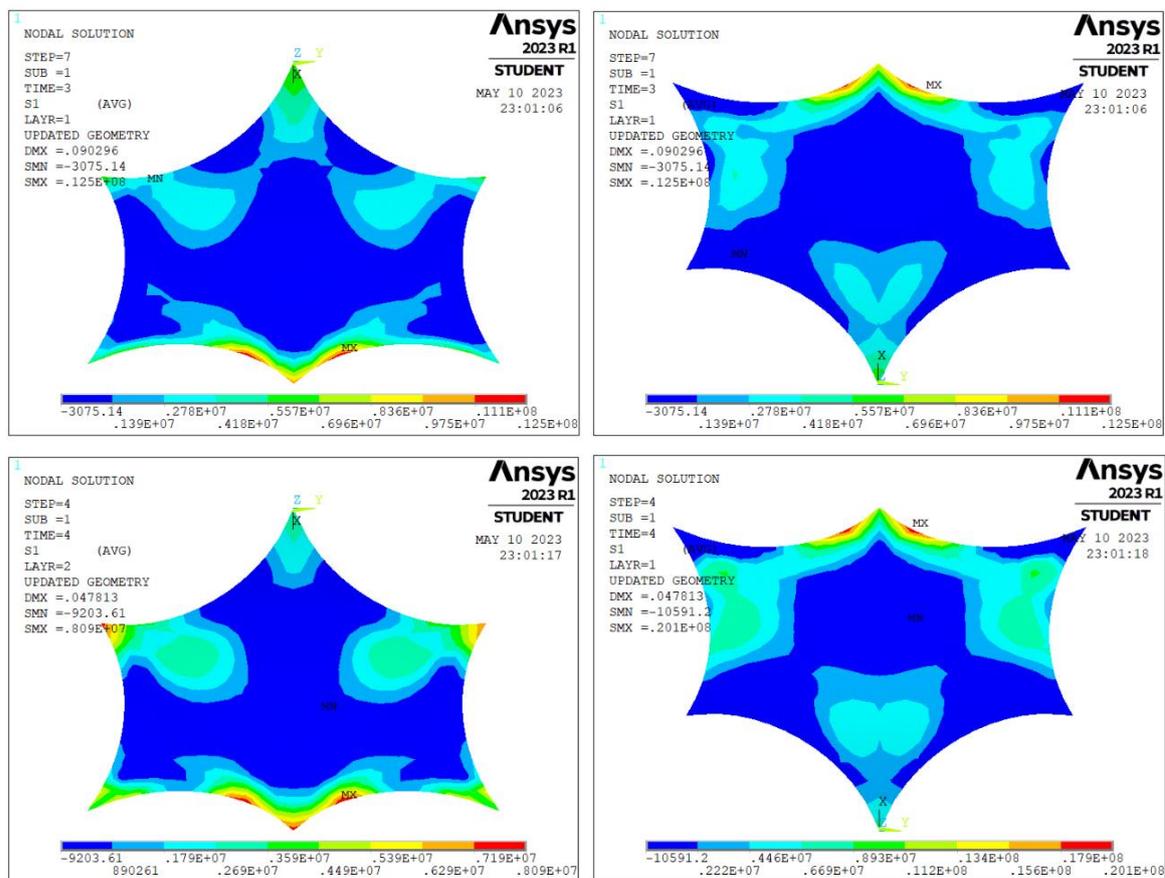


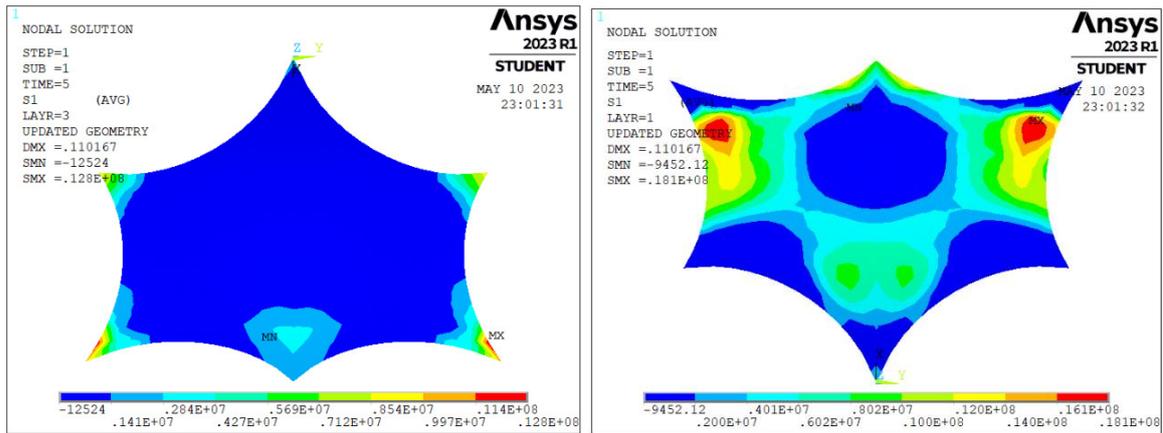


Fonte: Autoria própria.

As tensões principais máximas (s1) desenvolvidas nas camadas superior e inferior da casca ao longo do processo construtivo são indicadas na Figura 95, e as tensões principais mínimas (s3) são reproduzidas na Figura 96.

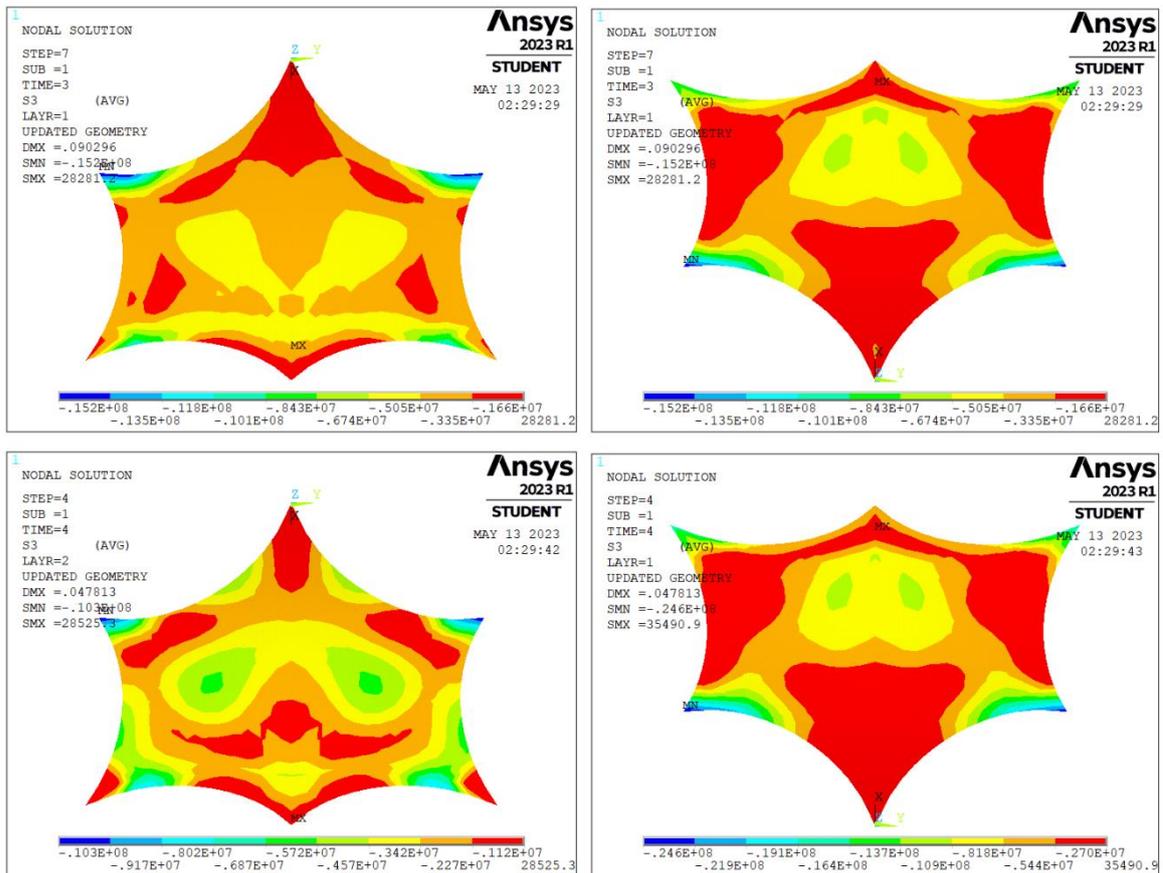
Figura 95 - Evolução das tensões principais máximas (s1) na casca de concreto no decorrer do processo construtivo (Proposta 2).

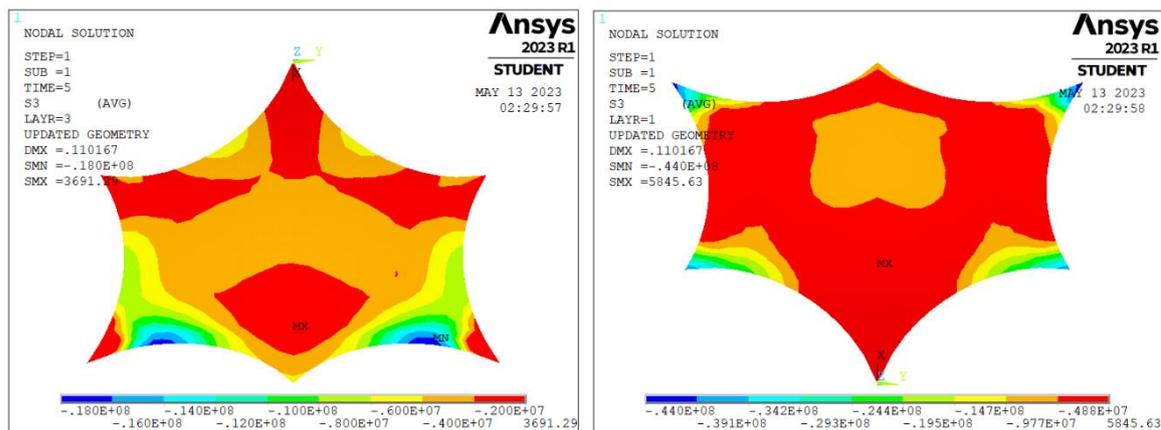




Fonte: Autoria própria.

Figura 96 - Evolução das tensões principais mínimas (s3) na casca de concreto no decorrer do processo construtivo (Proposta 2).





Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 6 são indicadas as forças resultantes nos nós dos apoios dos mastros “rei” e “rainha” e as forças atuantes nos cabos de ancoragem no decorrer do processo construtivo.

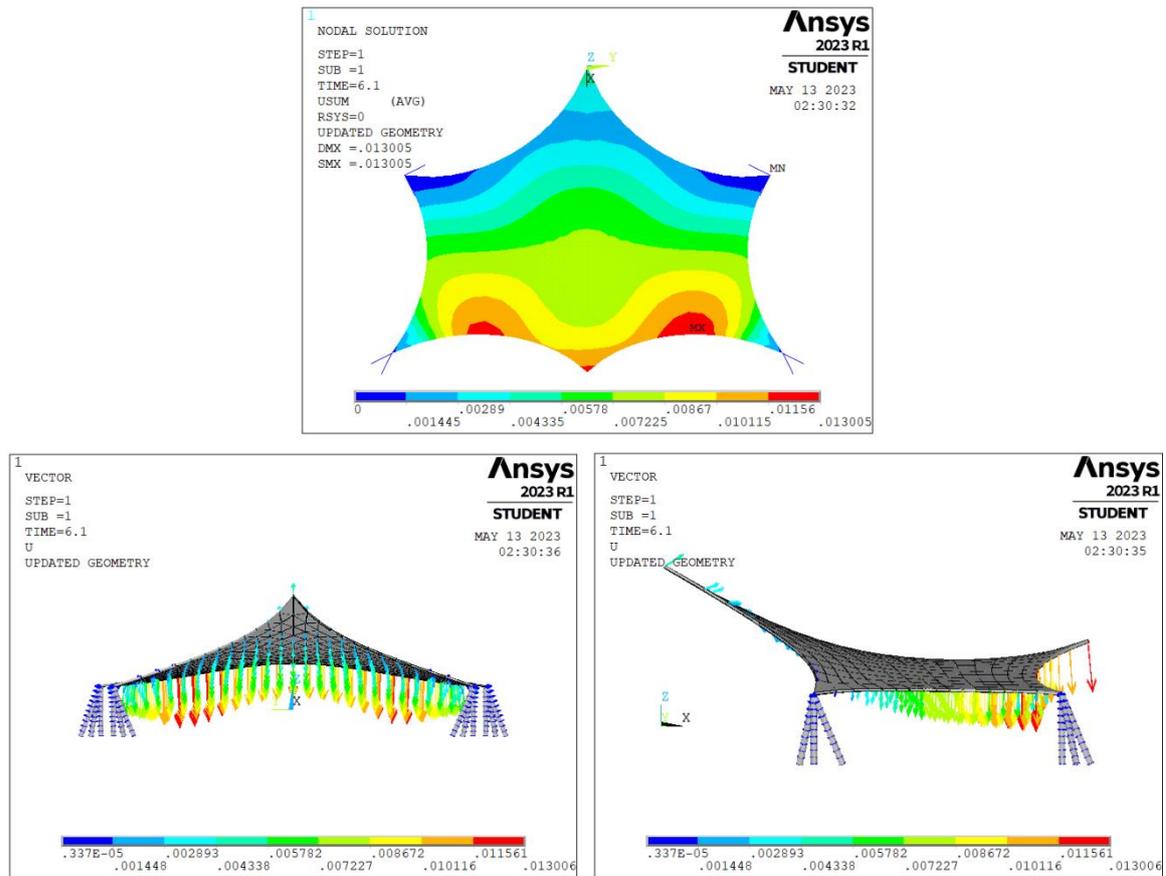
Tabela 6 - Forças resultantes nos nós de apoio dos mastros "rei" e "rainha" e forças atuantes nos cabos de ancoragem no decorrer do processo construtivo (Proposta 2).

Etapa	Mastro “rei”		Mastro “rainha”		F_{rei}	F_{rainha}
	F_x	F_z	F_x	F_z		
Retesamento (TIME 1)	- 394 kN	1540 kN	199 kN	881 kN	1150 kN	738 kN
1ª camada (TIME 2)	- 489 kN	1920 kN	244 kN	1080 kN	1430 kN	894 kN
2ª camada (TIME 3)	- 571 kN	2250 kN	293 kN	1320 kN	1680 kN	1050 kN
3ª camada (TIME 4)	- 648 kN	2570 kN	369 kN	1720 kN	1920 kN	1290 kN

Fonte: Autoria própria.

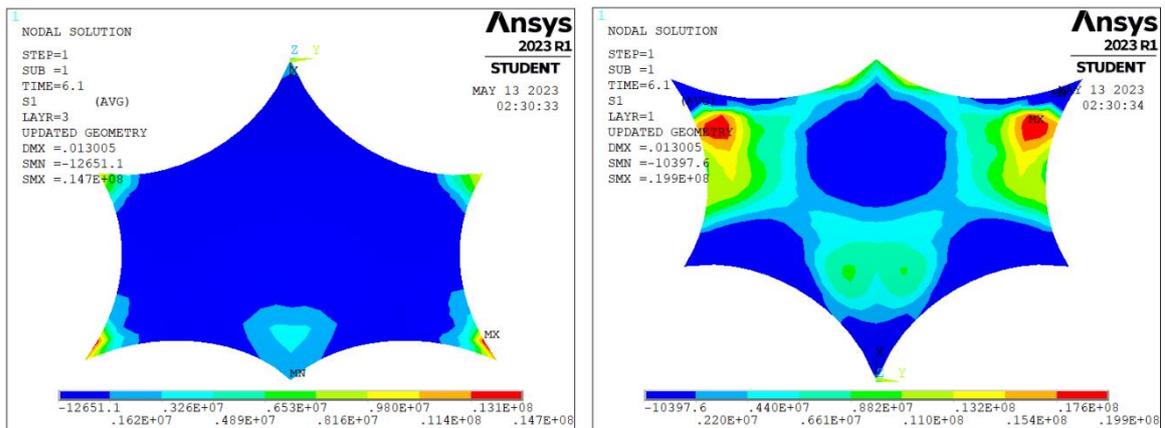
Em relação à carga de vento na direção “x”, os deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura são indicados na Figura 97 e as tensões principais máximas e mínimas atuantes na casca são indicados na Figura 98.

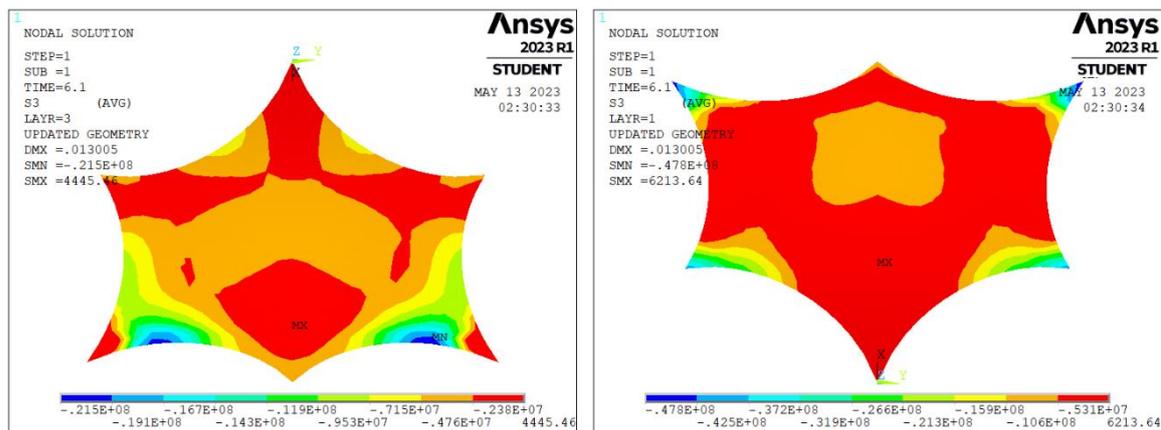
Figura 97 - Deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura em função da carga de vento na direção "x" (Proposta 2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 98 - Tensões principais máximas e mínimas ocorridas na casca com a aplicação da carga de vento na direção "x" (Proposta 2).

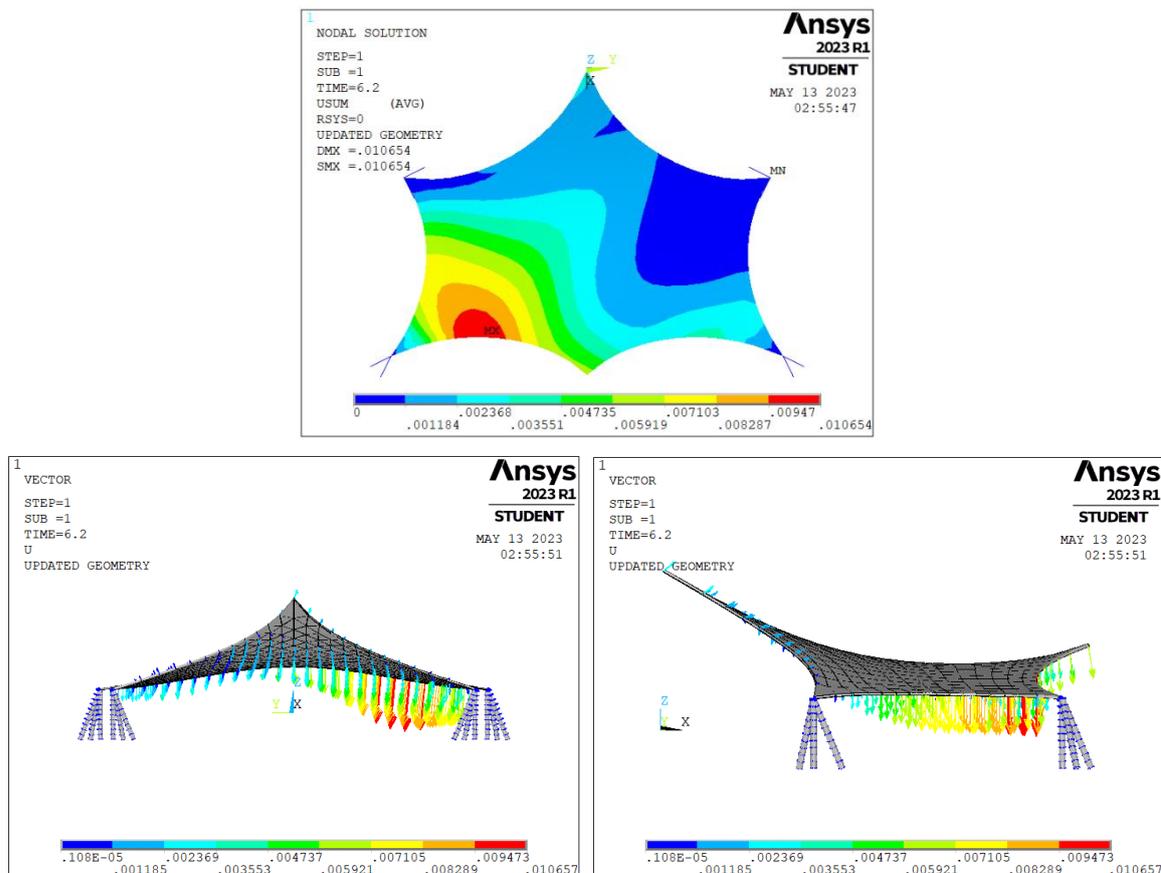




Fonte: Autoria própria.

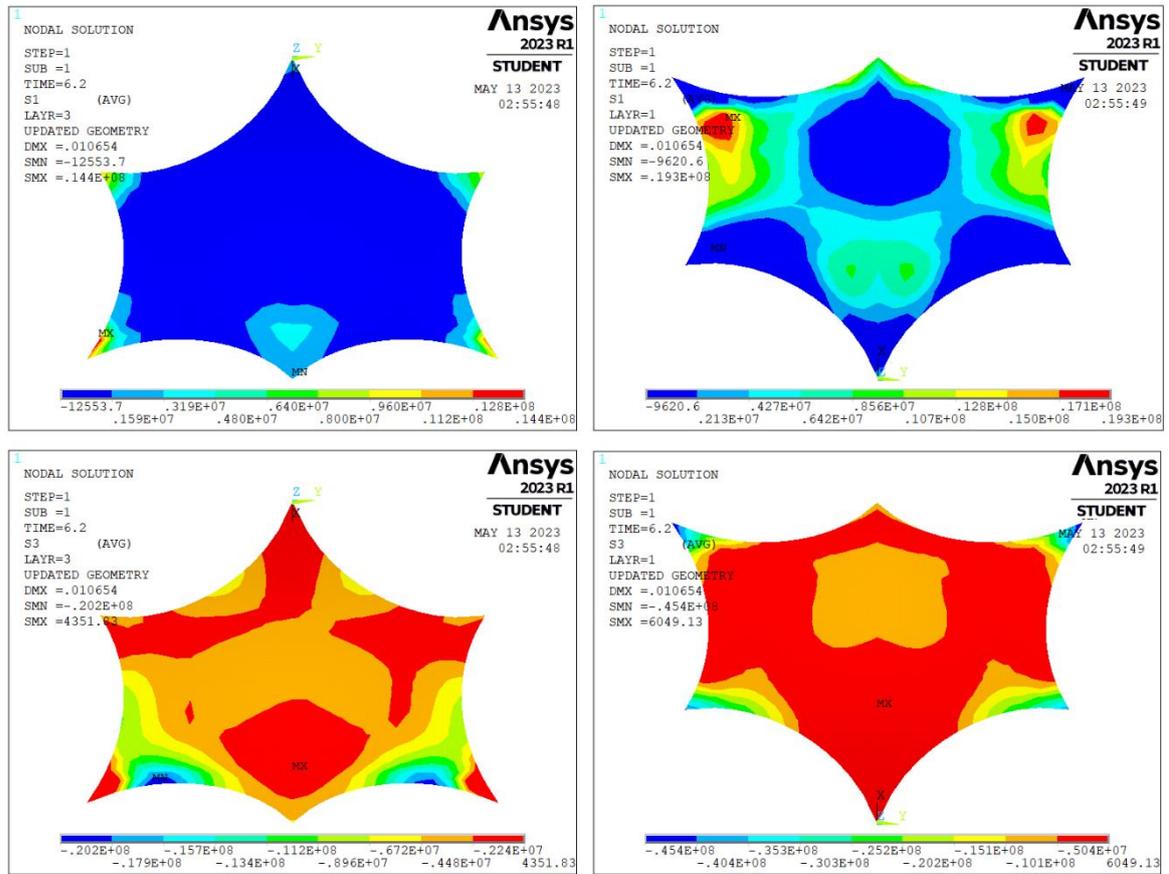
Os resultados da aplicação da carga de vento em “y”, por sua vez, são indicados na Figura 99 e na Figura 100.

Figura 99 - Deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura em função da carga de vento na direção "y" (Proposta 2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 100 - Tensões principais máximas e mínimas ocorridas na casca com a aplicação da carga de vento na direção "y" (Proposta 2).



Fonte: Autoria própria.

4 DISCUSSÃO

4.1 DOS MODELOS DE BANCADA

Por meio da experimentação realizada com os modelos de bancada foi possível comparar os diferentes processos de execução de cascas com o uso de fôrmas flexíveis e observar aspectos críticos associados ao processo de concretagem. Embora o desempenho estrutural não tenha sido analisado, estudou-se um procedimento de concretagem bem sucedido para viabilizar o uso de moldes flexíveis.

Apresenta-se na Tabela 7 um comparativo entre as técnicas estudadas, todas elas caracterizadas pelo uso de fôrmas flexíveis de superfície.

Tabela 7 - Comparativo entre as técnicas estudadas.

Característica	Fôrma Pneumática	Fôrma Suspensa	Fôrma Retesada
Geometria da casca	Sinclástica – domo esférico.	Sinclástica – “superfície funicular”.	Anticlástica.
Mobilização da fôrma	Exige equipamentos auxiliares para insuflamento do molde, além das estruturas adjacentes para manutenção da estanqueidade do invólucro.	Não exige equipamentos ou estruturas auxiliares.	Exige estruturas e equipamentos auxiliares para retesamento da membrana, como cabos, mastros, macacos hidráulicos, etc.
Controle da rigidez do molde	O controle da rigidez é realizado através da pressão fornecida pelos equipamentos de insuflamento e é suscetível às condições ambientais.	Não há controle da rigidez do molde, exceto pela especificação do material do tecido empregado.	O controle da rigidez é feito por meio das estruturas auxiliares de retesamento, podendo ser afrouxadas ou retesadas conforme necessário.
Limitações geométricas	Pode ser associado a outros métodos ou estruturas para produzir geometrias deferentes, mas no geral está restrito a cascas sinclásticas.	Restrito a cascas de geometria sinclástica e pequenas dimensões em função do processo de inversão do elemento.	Pode ser associado a outros métodos ou estruturas para produzir geometrias deferentes, mas no geral está restrito a cascas anticlásticas.

Fonte: Autoria própria.

Dentre os modelos analisados e ensaiados, os testes bem sucedidos foram aqueles realizados nas membranas retesadas em função do melhor controle das deformações do molde.

Quanto à aplicação da argamassa, o processo de projeção se mostrou adequado para os casos em que foi aplicado, induzindo pouca vibração nos moldes e prescindindo da compactação do material, características desejáveis para o uso de fôrmas flexíveis de superfície.

Observou-se também que a adequada especificação do concreto ou da argamassa empregado é decisiva para o sucesso da aplicação. Dentre as variáveis importantes para especificação do material se destacam a reologia, a aderência ao tecido, o surgimento de tensões de retração, o tempo de cura e os processos de lançamento e compactação.

A reologia é fundamental para aplicações em fôrmas flexíveis de superfície, como aquelas apresentadas neste trabalho, que não são confinadas lateralmente, pois o fluxo do concreto/argamassa em seu estado fresco deve ser controlado para garantir que este mantenha uma espessura regular, ou que atenda às espessuras especificadas, ao longo da superfície da fôrma, mantendo assim a mesma geometria desta.

Além disso, é esperado que o uso de fôrmas flexíveis envolva superfícies com geometrias complexas, com curvaturas variadas ao longo da superfície da fôrma, exigindo-se assim do concreto/argamassa empregado a capacidade de se manter aderido ao molde, principalmente em regiões com declividades acentuadas, evitando-se seu escorrimento.

Caso seja prevista a reutilização da fôrma ou seu descolamento da estrutura final, a aderência ao molde pode restar comprometida em função do uso desmoldantes, o que deve ser considerado na especificação do material a ser empregado.

Quanto ao tempo de cura, é fundamental ter o controle da evolução das propriedades mecânicas do concreto empregado ao longo do tempo para a desmobilização da fôrma, principalmente nos casos em que se faz necessário o uso de equipamentos auxiliares para manutenção da estrutura provisória de escoramento, como no caso dos invólucros pneumáticos.

Além disso, constatou-se nos experimentos realizados que o controle da deformação da fôrma durante a concretagem é também um aspecto fundamental no processo, e que esta pode ser atenuada com a elaboração de um plano de concretagem que preveja a aplicação do concreto em camadas sucessivas, no qual a mobilização da resistência das primeiras camadas contribua para o enrijecimento do molde. Assim, o controle da evolução das propriedades mecânicas do concreto com o tempo se apresenta como um parâmetro fundamental também neste aspecto, permitindo o planejamento da liberação das camadas de concreto subsequentes durante a consolidação da estrutura.

De igual modo, exige-se um acompanhamento rigoroso da quantidade de concreto lançada sobre a fôrma e da espessura obtida para cada camada prevista, bem como da evolução dos deslocamentos desenvolvidos pelo molde, de modo a avaliar sua ocorrência mediante critérios previamente estabelecidos, o que exige também uma instrumentação da estrutura durante o processo construtivo.

Ainda sobre a especificação do concreto, cabe mencionar os aspectos concernentes ao processo de lançamento e compactação, onde se pode citar os cuidados com a segregação do material nas aplicações por projeção e o controle do *slump*, associado à reologia do material.

Nesse quesito, caso o material seja muito seco ou exija uma energia de compactação elevada, o processo de compactação pode induzir vibrações indesejáveis no molde e afetar a geometria final pretendida para a casca.

Todos estes aspectos concernentes à especificação da argamassa ou do concreto foram bem atendidos pela argamassa utilizada na primeira moldagem da casca

em sela e na moldagem da casca do MPBP, exceto pela resistência atingida, que ficou aquém do necessário para a espessura adotada para a casca produzida com o modelo da membrana do Memorial dos Povos de Belém do Pará.

Neste caso, a espessura da casca poderia ter sido maior para reduzir a exigência de resistência do material, no entanto a relação entre o vão livre e a espessura da casca se afastaria dos valores usualmente empregados neste tipo de estrutura, preferindo-se assim pela manutenção da espessura de 4 mm para simulação da aplicação em escala real do material.

No mesmo sentido, e para evitar regiões de empoçamento, não foi feito o engrossamento da casca nas regiões dos vértices de apoio da estrutura nem nas bordas, sendo observadas fissuras e deslocamento da argamassa nestes locais. Isto também está atrelado às limitações geométricas decorrentes da utilização da membrana do MPBP como foi concebida em projeto, e representada pelo modelo em escala 1:30, não sendo promovidas, neste caso, alterações na geometria inicial da fôrma para obtenção de uma geometria final para a casca menos abatida ou estruturalmente mais eficiente.

Em se tratando de uma fôrma flexível, que se deforma consideravelmente durante o processo construtivo, a predição do comportamento do molde e da casca em formação é fundamental para que seja possível determinar as deformações que serão desenvolvidas pela estrutura, permitindo assim a proposição de alterações na geometria inicial da fôrma para que a casca resultante corresponda o mais próximo possível à geometria de projeto. Esta é uma das dificuldades do uso deste tipo de fôrma, sendo necessária certa tolerância geométrica em relação à intenção arquitetônica originalmente concebida.

Sobre o uso de reforços do concreto, este não foi avaliado em profundidade nos experimentos realizados. No entanto, observou-se que a utilização de telas metálicas pode auxiliar no controle visual da espessura da camada de concreto lançada sobre a fôrma. Além disso, seria possível adotar padrões de padronagem para as telas, inclusive com a orientação das barras de acordo com as direções

das tensões principais atuantes na casca, variando-se o transpasse das emendas para se obter a geometria semelhante à da fôrma. Sugere-se ainda o estudo do retesamento da malha de reforço analogamente ao retesamento da fôrma, produzindo-se um efeito de protensão na casca de concreto.

Por fim, com base nos experimentos realizados, pôde-se definir o processo construtivo para execução de cascas com o uso de fôrmas flexíveis baseado nas seguintes etapas básicas:

1. Definição do melhor tipo de molde ou composição de técnicas diferentes para obtenção da geometria pretendida;
2. Especificação de materiais (membrana, cabos, mastros, etc.) bem como do concreto a ser empregado e dos reforços a serem utilizados, com base na geometria final da estrutura e nas deformações admissíveis;
3. Definição dos esforços de protensão de cabos e retesamento/pressurização da fôrma, com base nas solicitações existentes antes, durante e após as concretagens;
4. Definição das etapas de concretagem e elaboração do plano de concretagem: número de camadas, espessura das camadas, porção do molde onde se iniciará a concretagem e se esta se dará de maneira simétrica, etc.;
5. Plano de desmobilização do molde (se haverá afrouxamento gradual do molde e em que intensidade), possibilidade de reutilização ou remoção do molde, e interação da estrutura final com apoios e/ou fundação.

4.2 DO MODELO COMPUTACIONAL

A modelagem computacional da execução de uma casca de concreto a partir da membrana do Anfiteatro do MPBP, com o uso do programa Ansys Mechanical, possibilitou a análise e o acompanhamento da evolução dos deslocamentos e tensões desenvolvidos pelos componentes estruturais nas diferentes etapas do processo construtivo, e a predição da forma final obtida.

Simulou-se a execução da casca a partir da geometria e do nível de retesamento de projeto, mas também a partir de uma geometria inicial minimamente alterada e da imposição de um nível de retesamento superior à fôrma.

Primeiramente, em relação ao processo construtivo, constata-se que há preponderância nos deslocamentos em “z”, relacionados com a incidência do peso próprio do concreto, cuja evolução nas diferentes etapas de execução é indicada na Tabela 8.

Tabela 8 - Evolução dos deslocamentos em "z" no decorrer do processo construtivo.

Etapa	Modelo de Projeto	Proposta 1	Proposta 2
1ª camada (TIME 2)	- 29.98 cm (64.9%)	- 26.62 cm (69.6%)	- 15.44 cm (46.2%)
2ª camada (TIME 3)	- 6.34 cm (13.7%)	- 5.84 cm (15.2%)	- 6.96 cm (20.8%)
3ª camada (TIME 4)	- 3.54 cm (7.7%)	- 2.94 cm (7.6%)	- 4.4 cm (13.2%)
Desmobilização (TIME 5)	- 6.31 cm (13.7%)	- 2.8 cm (7.6%)	- 6.64 cm (19.8%)
Total	- 46.16 cm (100%)	- 38.20 cm (100%)	- 33.44 cm (100%)

Fonte: Autoria própria.

Da análise dos resultados, depreende-se que de há uma contribuição significativa do comportamento estrutural da casca formada pela execução da primeira camada de concreto, mesmo que de espessura pequena em relação à espessura final da estrutura, o que se observa pela atenuação dos deslocamentos desenvolvidos após o lançamento desta camada.

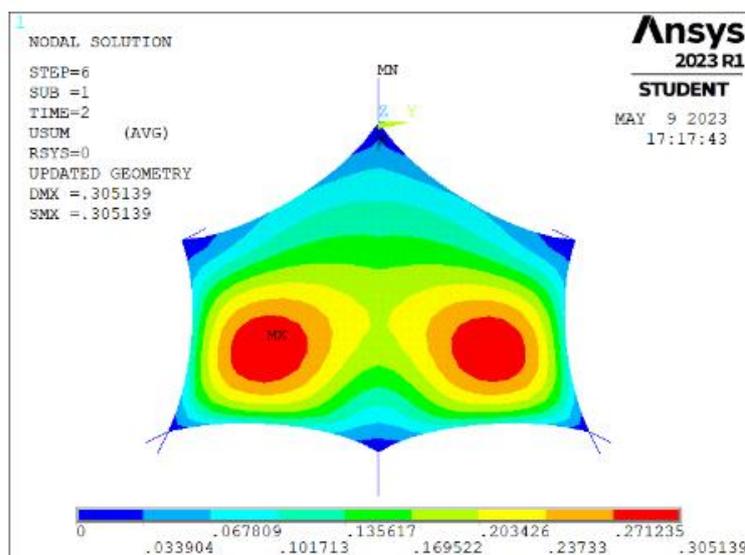
No caso da modelagem a partir da geometria e do retesamento de projeto, constata-se que, do deslocamento total máximo em “z”, aproximadamente 65% ocorreu no lançamento desta primeira camada. Isto não é necessariamente prejudicial, tendo em vista que a casca só se solidariza após a cura do concreto, mas afeta significativamente a geometria final da estrutura, de modo que esta

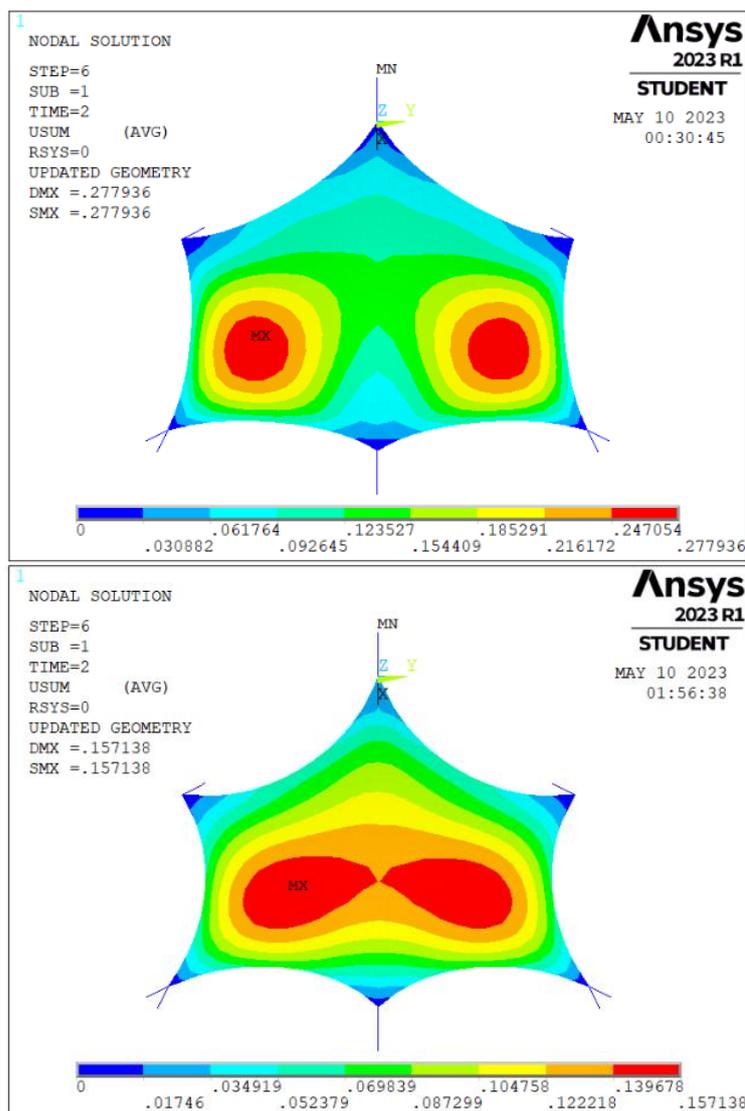
deformação inicial deve ser bem definida em projeto e controlada em obra para que a intenção arquitetônica final da casca seja atingida. É de se destacar que foi adotada uma espessura pequena para execução desta primeira camada, de 2.0 cm, que inclusive pode ser inviável construtivamente de ser executada em obra.

Analisando o comportamento dos modelos propostos, constata-se que a influência da primeira camada de concreto também é significativa no caso da Proposta 1 (elevação dos vértices dos mastros “rei” e “rainha”), correspondendo à aproximadamente 70% do deslocamento total máximo desenvolvido em “z”, mas é atenuada no caso da Proposta 2 (aumento da tensão uniforme inicial imposta à membrana), correspondendo neste último caso a aproximadamente 46% do deslocamento total máximo em “z”.

Isso se destaca também pela análise dos deslocamentos totais desenvolvidos no lançamento da primeira camada de concreto, sendo de 30.51 cm, 27.78 cm e 15.71 cm para o modelo de projeto, para a Proposta 1 e para a Proposta 2, respectivamente (Figura 101), observando-se a ocorrência de deslocamentos mais acentuados nas regiões centrais das abas laterais da fôrma.

Figura 101 - Deslocamentos totais após lançamento da primeira camada (modelo de projeto, Proposta 1 e Proposta 2).

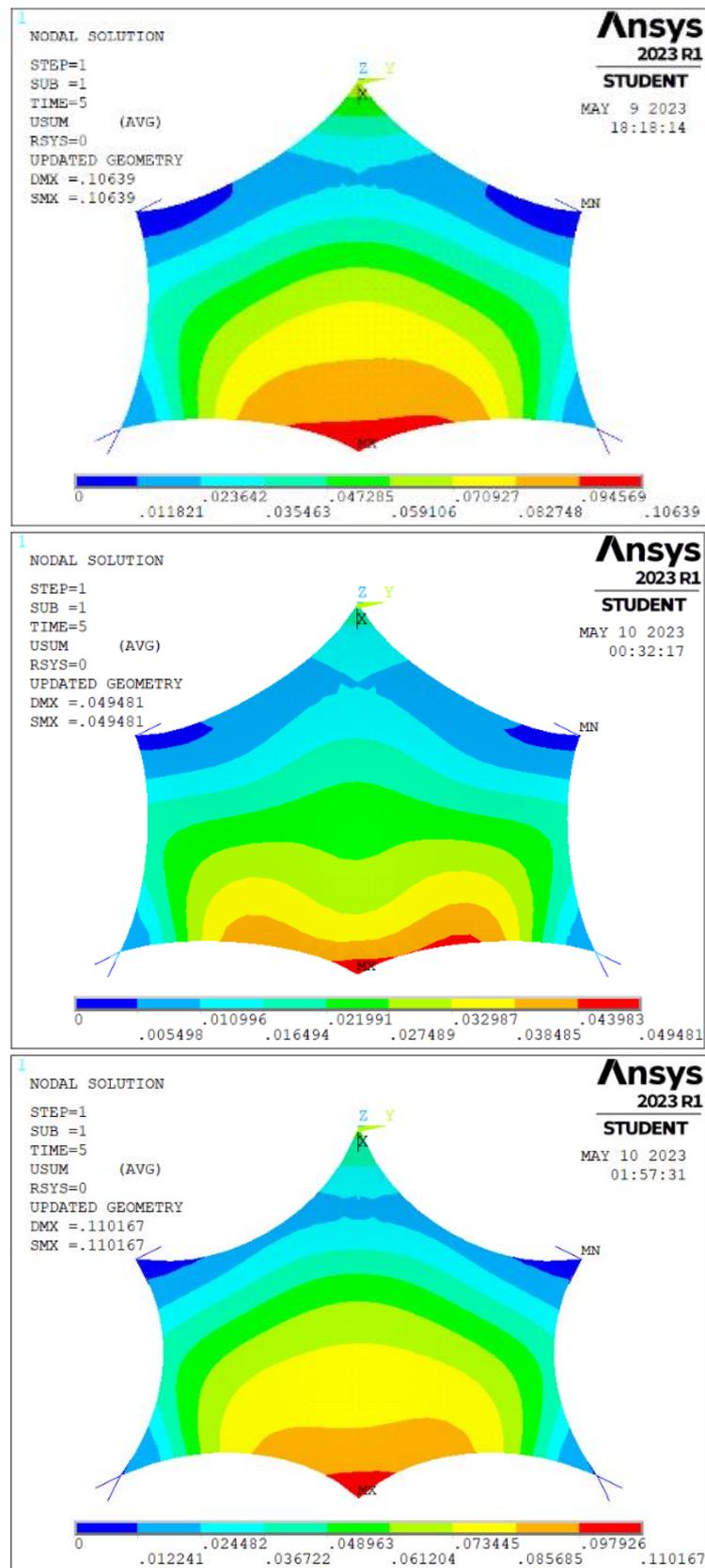




Fonte: Autoria própria.

Observa-se também na modelagem a influência significativa da etapa de desmobilização dos cabos e da membrana no comportamento da casca de concreto produzida, ocasião em que a estrutura passa a se apoiar apenas nos tripés laterais. A partir da modelagem da membrana de projeto, constata-se a ocorrência de deslocamentos significativos nas regiões próximas aos vértices do topo dos mastros “rei” e “rainha”, com valor total máximo de 10.64 cm. Já no caso da Proposta 1 e da Proposta 2, o deslocamento total observado é de 4.95 cm e de 11.02 cm, respectivamente (Figura 102).

Figura 102 - Deslocamentos totais após a etapa de desmobilização (modelo de projeto, Proposta 1 e Proposta 2)



Fonte: Autoria própria.

Em primeira análise, pode-se estabelecer uma correlação entre tais deslocamentos (na etapa de desmobilização) e o nível de retesamento inicial imposto à membrana, tendo em vista que o deslocamento total máximo observado na etapa de desmobilização da Proposta 2 (11.02 cm) ser superior àquele observado no modelo de projeto (10.64 cm). No entanto, é de se destacar que o deslocamento total máximo observado na etapa de desmobilização da Proposta 1 (4.95 cm) é significativamente inferior ao observado no modelo de projeto, embora sujeito a um mesmo nível de retesamento inicial, o que pode estar associado a uma rigidez maior proveniente da casca em função da curvatura assumida para este caso.

De todo modo, pela comparação dos resultados das três modelagens aqui estudadas, observa-se uma redução nos deslocamentos totais desenvolvidos pela estrutura mediante o aumento das tensões de retesamento da membrana, observando-se o deslocamento máximo em “z” de 46.16 cm, 38.20 cm e 33.44 cm para o modelo de projeto, para a Proposta 1 e para a Proposta 2, respectivamente.

Quanto aos esforços de tração máximos atuantes nos cabos de borda e às tensões máximas na membrana, estes são indicados na Tabela 9.

Tabela 9 - Evolução da máxima tensão principal máxima na membrana e da força máxima dos cabos de borda no decorrer do processo construtivo.

Etapa	Modelo de Projeto		Proposta 1		Proposta 2	
	Membrana (s1)	Cabos (smisc)	Membrana (s1)	Cabos (smisc1)	Membrana (s1)	Cabos (smisc1)
Retesamento (TIME 1)	14.3 MPa	244 kN	15.0 MPa	237 kN	23.2 MPa	423 kN
1ª camada (TIME 2)	18.6 MPa	366 kN	18.2 MPa	339 kN	25.5 MPa	534 kN
2ª camada (TIME 3)	10.4 MPa	384 kN	10.4 MPa	374 kN	20.4 MPa	554 kN
3ª camada (TIME 4)	10.2 MPa	415 kN	10.2 MPa	365 kN	20.3 MPa	558 kN

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados é possível constatar que, após a cura da primeira camada de concreto, há uma diminuição nas tensões principais máximas (s_1) ocorridas na membrana que pode ser atribuída ao comportamento estrutural da casca. Assim, tendo em vista a ocorrência das tensões máximas nesta etapa, conclui-se que a espessura e a resistência do tecido devem ser determinadas para a etapa em que é aplicada a primeira camada de concreto, no caso estudado.

Cabe destacar que o nível de retesamento adotado no projeto da estrutura (Pauletti e Brasil, 2005) foi concebido considerando-a uma membrana permanente, sujeita a diferentes esforços decorrentes da atuação de ventos ao longo de sua vida útil. Já no caso da utilização da membrana como fôrma, um nível de retesamento maior e mais próximo de sua capacidade resistente pode ser aceitável, tendo em vista seu carácter provisório. Nesse sentido, é viável a adoção do nível de retesamento aplicado na Proposta 2, que corresponderia aproximadamente à 20% da resistência do material, ou até superior, tendo em vista o efeito observado na atenuação dos deslocamentos totais desenvolvidos.

Já no caso dos cabos de borda, constata-se que há progressão dos esforços de tração máximos, de modo que estes devem ser dimensionados para a etapa de lançamento da última camada da casca. O mesmo se observa em relação aos cabos de ancoragem dos mastros “rei” e “rainha” (Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6), que também devem ser dimensionados para a última etapa de concretagem da casca.

É de se destacar a ocorrência de esforços relevantes atuantes nos cabos de ancoragem que são transferidos a blocos de fundação provisórios, que não integrarão a estrutura final da casca. No caso do cabo de ancoragem do mastro “rei”, constata-se os esforços de tração máximos de 1340 kN, 1115 kN e 1920 kN para o modelo de projeto, Proposta 1 e Proposta 2, respectivamente. O mesmo se aplica às fundações nas bases dos mastros “rei” e “rainha”, que são removidos na etapa de desmobilização da estrutura.

Assim, há que se considerar o consumo de material voltado à execução destas estruturais provisórias e que não são incorporadas à estrutura final em contraposição à eficiência estrutural da casca.

Com relação ao comportamento da casca de concreto produzida, são indicadas na Tabela 10 as máximas tensões principais máximas (s_1) e as mínimas tensões principais mínimas (s_3) observadas no decorrer do processo construtivo e nas etapas de carregamento.

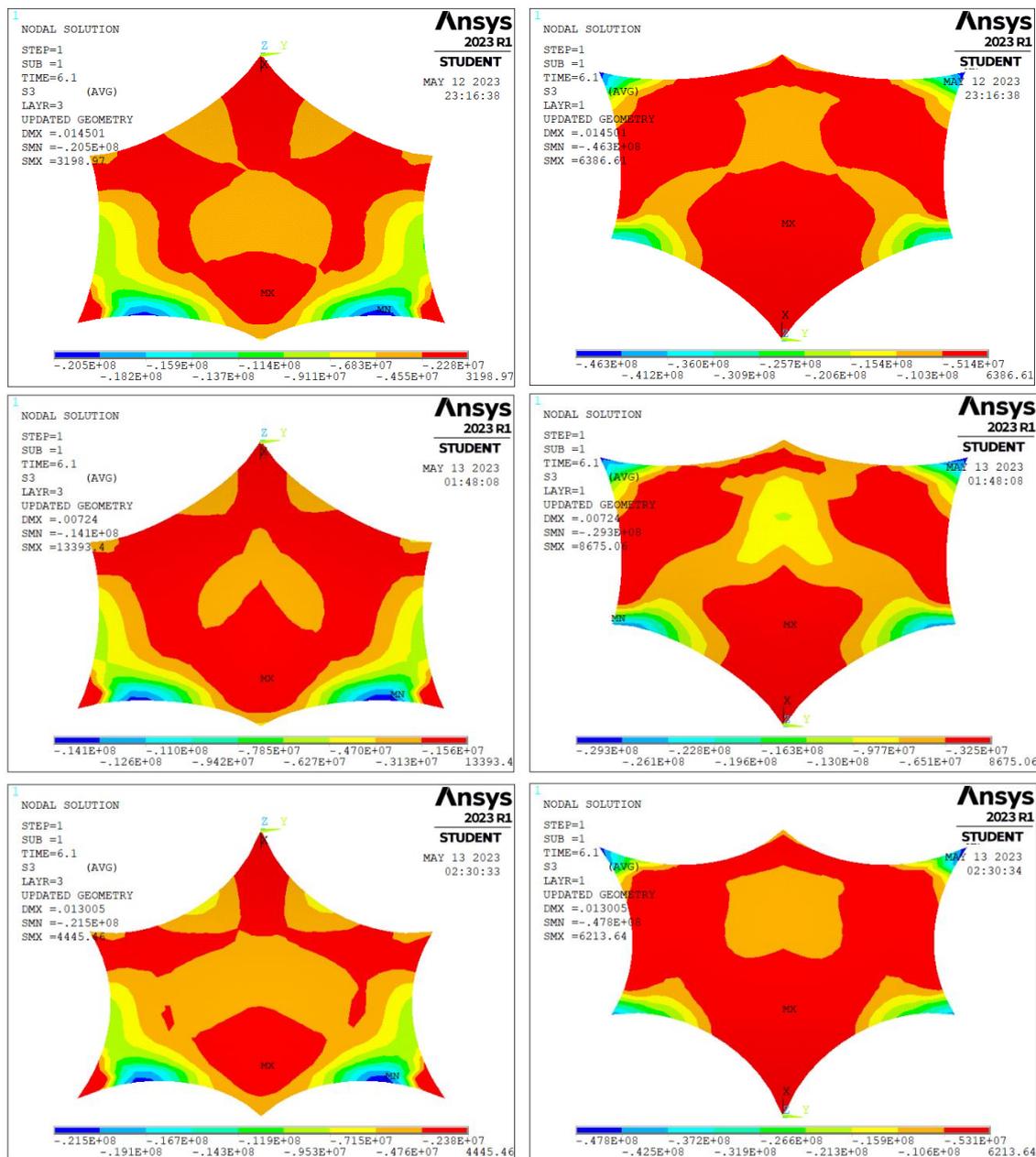
Tabela 10 – Máximas/mínimas tensões principais máximas (s_1) e mínimas (s_3) atuantes na casca no decorrer do processo construtivo e nos carregamentos de vento.

Etapa	Modelo de Projeto		Proposta 1		Proposta 2	
	$s_{1\text{máx}}$	$s_{3\text{mín}}$	$s_{1\text{máx}}$	$s_{3\text{mín}}$	$s_{1\text{máx}}$	$s_{3\text{mín}}$
2ª camada (TIME 3)	14.9 MPa	- 20.2 MPa	12.7 MPa	- 17.6 MPa	12.5 MPa	- 15.2 MPa
3ª camada (TIME 4)	20.8 MPa	- 28.7 MPa	18.8 MPa	- 24.5 MPa	20.1 MPa	- 24.6 MPa
Desmobilização (TIME 5)	16.3 MPa	- 41.8 MPa	14.6 MPa	- 28.6 MPa	18.1 MPa	- 44.0 MPa
Vento em “x” (TIME 6.1)	18.0 MPa	- 46.3 MPa	16.0 MPa	- 29.3 MPa	19.9 MPa	- 47.8 MPa
Vento em “y” (TIME 6.2)	17.8 MPa	- 43.7 MPa	15.4 MPa	- 29.1 MPa	19.3 MPa	- 45.4 MPa

Fonte: Autoria própria.

Em todos os casos, observou-se que as maiores tensões de compressão ocorreram na aplicação das cargas de vento atuando sobre a casca na direção “x”, conforme se reproduz na Figura 103.

Figura 103 - Tensões de compressão máximas (s3) atuantes na casca de concreto produzida na aplicação das cargas de vento em “x” (modelo de projeto, Proposta 1 e Proposta 2).



Fonte: Autoria própria.

Cabe apontar que os valores extremos das tensões principais mínimas (s3) foram observados nas regiões dos vértices de apoio e nas bordas da casca, sendo adotada espessura constante das camadas em toda a estrutura. No entanto, seria recomendável a adoção de uma espessura maior nestes locais em função da concentração de tensões, o que poderia ser feito com a atribuição

de uma seção diferente para os elementos nas regiões dos vértices de apoio (tripés laterais) e nas bordas da casca.

A geometria inicial do molde e as deformações ocorridas ao longo do processo construtivo, no entanto, podem limitar o engrossamento da casca nas bordas e nos vértices em função da declividade da superfície superior da cobertura, cabendo também analisar se haverá áreas de empoçamento de água.

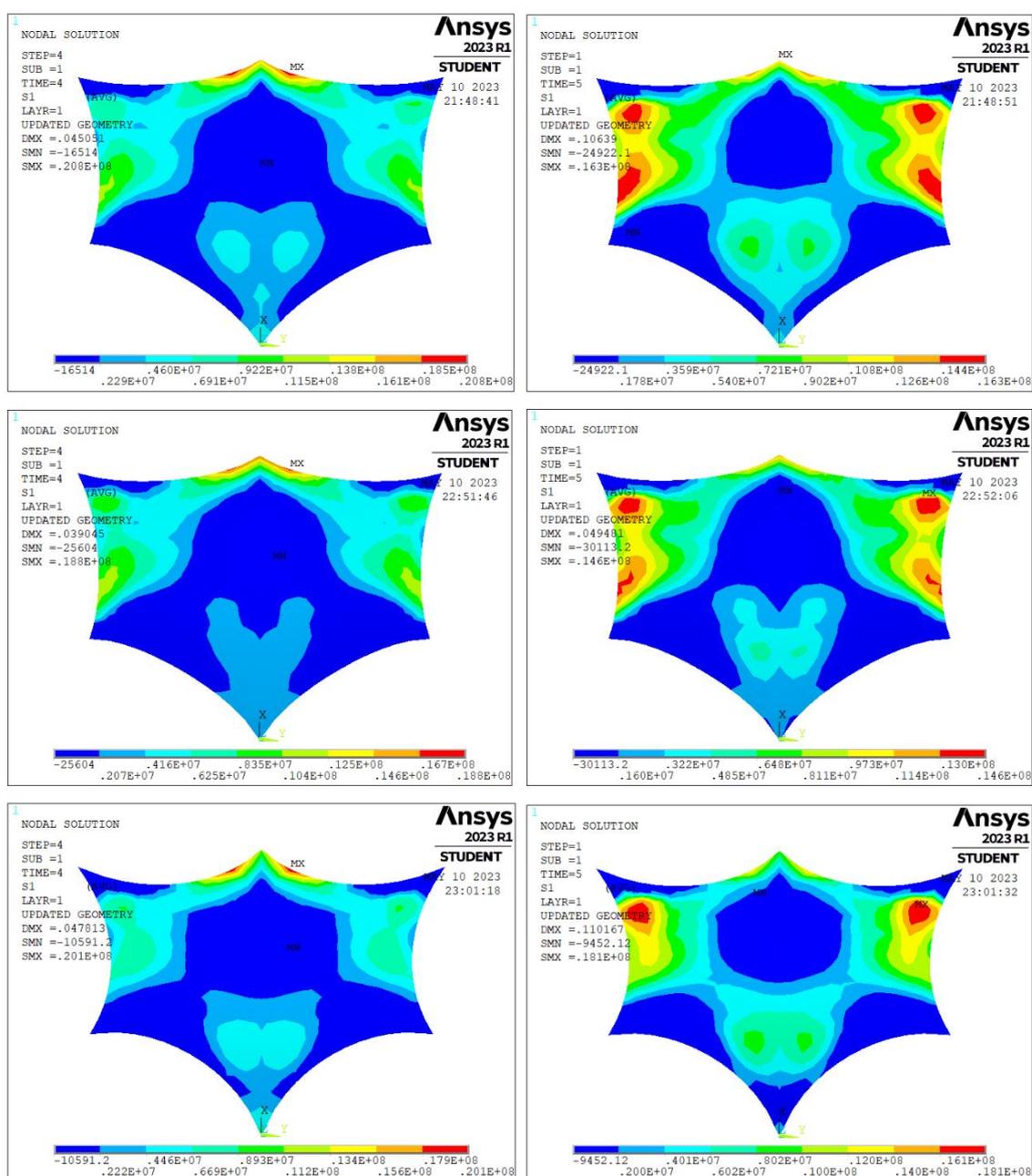
Desconsiderando-se as tensões de compressão máximas observadas nestes locais, desde que combatidas pelo engrossamento da casca e adoção de reforços localizados, verifica-se que as tensões principais mínimas (s_3) ocorridas, nos casos de carregamento mais críticos (desmobilização e cargas de vento), ficam abaixo de 30 MPa. No caso da Proposta 1, em que se obteve uma geometria mais eficiente da casca, constatam-se tensões de compressão ainda menores quando desconsideradas aquelas ocorridas nos apoios, da ordem de 20 MPa.

Outro ponto importante em relação às tensões principais mínimas (s_3) está na etapa de desmobilização da membrana e dos cabos, verificando-se um aumento significativo destas tensões nesta etapa (TIME 5) em relação à etapa de carregamento anterior (TIME 4 – lançamento da 3ª camada) no caso do modelo de projeto (aumento de 46% no módulo de $s_{3\text{máx}}$) e da Proposta 2 (aumento de 79% no módulo de $s_{3\text{máx}}$). Já na Proposta 1 esse acréscimo foi menos impactante (aumento de 17% no módulo de $s_{3\text{máx}}$).

Denota-se que este aumento das tensões mínimas críticas ($s_{3\text{máx}}$) ocorre em pontos localizados das bordas e dos vértices da casca e está atrelado à alteração das condições de apoio da casca, que até então esteve apoiada nos vértices dos tripés laterais e dos mastros principais, mas também na própria membrana da fôrma. Além disso, simulou-se uma desmobilização abrupta do retesamento da fôrma no modelo computacional elaborado, sendo o caso ainda de avaliar se haveria uma atenuação ou redistribuição destas tensões numa desmobilização gradual das tensões dos cabos e da membrana.

Já com relação às tensões principais máximas (s_1), verifica-se que os valores extremos foram observados na etapa de lançamento da 3ª camada, em regiões próximas às bordas e aos vértices de apoio da casca. No entanto, na etapa de desmobilização da membrana e dos cabos, os valores máximos de s_1 passaram a ser observados nas regiões entre o centro e a borda livre das abas laterais da casca, conforme se reproduz na Figura 104, para os casos analisados.

Figura 104 - Tensões principais máximas (s_1) atuantes na casca no lançamento da 3ª camada (TIME 4) e na etapa de desmobilização (TIME 5) – modelo de projeto, Proposta 1 e Proposta 2.

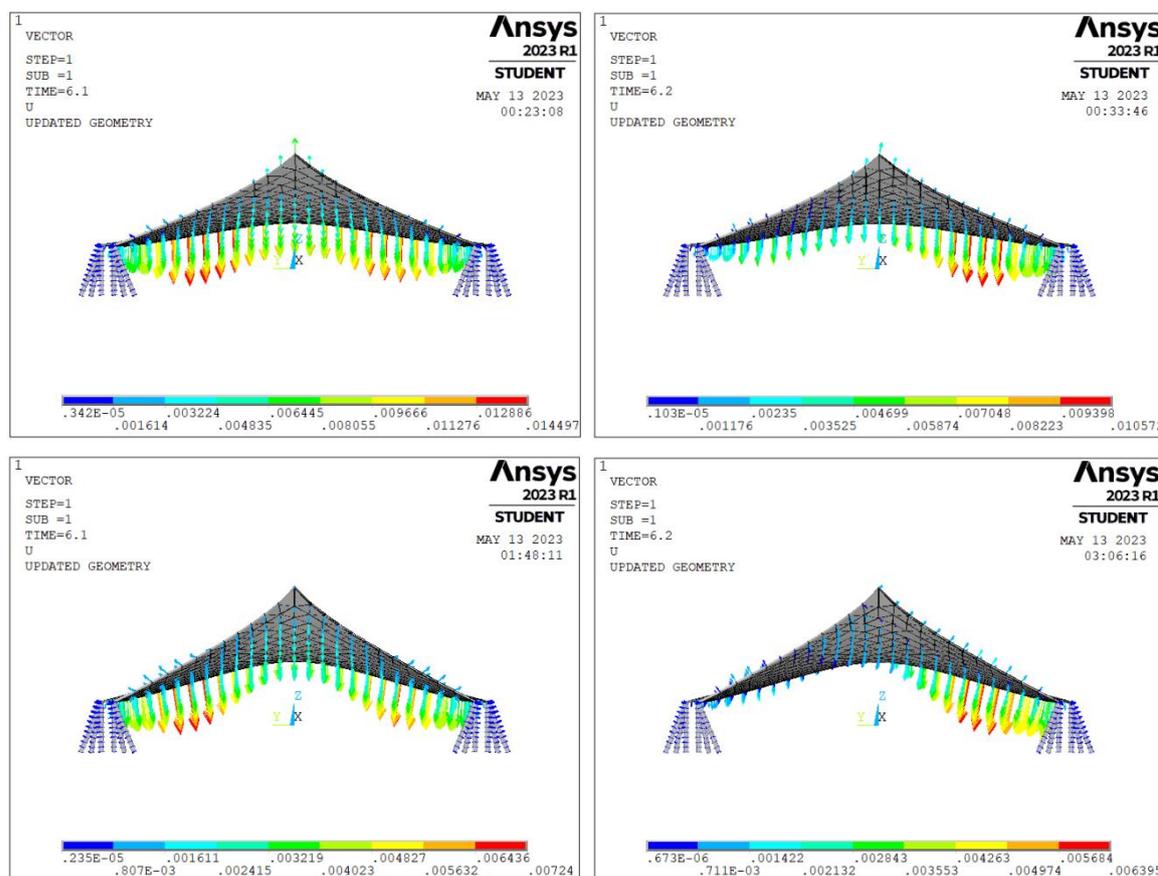


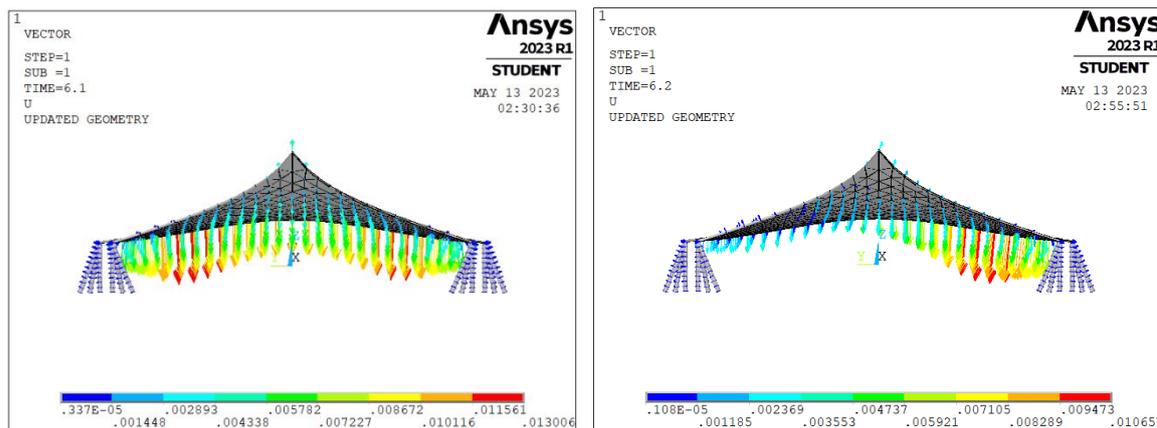
Fonte: Autoria própria.

Quanto às cargas de vento aplicadas na estrutura, observa-se pequeno aumento nas tensões principais máximas e mínimas na casca em relação à etapa final do processo construtivo (de até 10% aproximadamente), destacando-se que a sucção proveniente do vento na direção “y” é inferior à carga proveniente do peso próprio da casca, razão pela qual não se observaram deslocamentos significativos na direção positiva do eixo “z” para este carregamento em todas as propostas analisadas.

Além disso, analisando os deslocamentos totais desenvolvidos nos três modelos estudados para os carregamentos de vento em “x” e em “y” (Figura 105), constata-se uma contribuição considerável da eficiência da casca na ocorrência destes deslocamentos, observando-se uma diminuição de até 50% no deslocamento total da casca da Proposta 1 em relação às demais.

Figura 105 - Deslocamentos totais em função das cargas de vento em "x" (TIME 6.1) e em "y" (TIME 6.2) – modelo de projeto, Proposta 1 e Proposta 2.





Fonte: Autoria própria.

Diante de todo o exposto, pode-se concluir que tanto a etapa de lançamento da 1ª camada de concreto quanto a etapa de desmobilização da membrana e dos cabos são fundamentais na análise do comportamento da estrutura, verificando-se, em ambos os casos, um impacto significativo do nível de retesamento inicial imposto à membrana, mas também da geometria da casca produzida.

Nesse sentido, embora a imposição de um nível de retesamento maior à fôrma tenha resultado em deslocamentos de menor magnitude (Tabela 8), a etapa de desmobilização do molde passou a ter impacto mais significativo tanto na evolução dos deslocamentos verticais (20% do deslocamento total em “z”) quanto das tensões principais mínimas (s_3) observadas na casca (aumento de 79% no módulo de $s_{3\text{máx}}$). Além disso, há um acréscimo significativo nas tensões atuantes nos cabos de borda e de ancoragem, bem como das reações nos elementos de fundação, exigindo seções mais robustas e maior consumo de materiais.

Já com a adoção de uma geometria estruturalmente mais eficiente (Proposta 1), observou-se uma atenuação nos deslocamentos totais em relação ao modelo de projeto (- 38.2 cm ante - 46.2 cm na direção “z”), bem como um menor impacto da etapa de desmobilização da fôrma na evolução dos deslocamentos (apenas 7.6% do deslocamento total em “z”) e das tensões principais mínimas observadas na casca (aumento de 17% no módulo de $s_{3\text{máx}}$). Além disso, observou-se que os esforços atuantes nos cabos de borda e de ancoragem foram inferiores àqueles observados no modelo de projeto, acarretando menor consumo de materiais para

as estruturas provisórias. No entanto, nesta proposta, a etapa de lançamento da primeira camada resultou nos deslocamentos preponderantes observados ao longo do processo construtivo da estrutura (70% do deslocamento total em “z”), ocasionando variação geométrica significativa em relação à geometria inicial do molde.

Tendo em vista estas constatações, depreende-se que uma composição das duas propostas analisadas é promissora, tomando-se proveito da atenuação das deformações iniciais do lançamento da primeira camada provenientes do maior retesamento do molde e da atenuação das tensões ocorridas no concreto e do menor impacto da desmobilização dos cabos e da membrana proveniente da adoção de uma geometria estruturalmente mais eficiente para a casca.

Por fim, destaca-se que as possibilidades de predição do modelo elaborado não foram esgotadas, sendo possível ainda avaliar os efeitos do aumento da espessura do tecido da fôrma, da diminuição das camadas de concreto e execução de mais camadas, ou ainda da composição de diferentes soluções, conforme aqui se sugere, na evolução dos deslocamentos e das tensões atuantes nos diferentes componentes construtivos.

5 CONCLUSÃO

Por meio da análise do desenvolvimento histórico do uso de fôrmas flexíveis para a execução de estruturas de concreto, denotam-se vantagens promissoras em comparação com o uso de sistemas tradicionais de fôrmas, dentre as quais se destacam a redução de custos, a viabilização de geometrias estruturalmente mais eficientes, a rapidez de execução, a mobilização reduzida do canteiro para montagem do molde e o acabamento estético obtido com o uso de tecidos.

No entanto, vários aspectos relacionados aos detalhes do processo construtivo e ao comportamento das fôrmas têm sido apontados por vários construtores, projetistas e arquitetos, incluindo a necessidade de estudo rigoroso e controle das deformações do molde por meio da concepção de modelos computacionais capazes de simular as etapas do processo de construção, desde a otimização do projeto da forma, visando prever o desenvolvimento de deformações e tensões nos elementos estruturais ao longo de sua execução.

A partir dos modelos de bancada realizados, depreende-se que as fôrmas retesadas (pneumaticamente e mecanicamente) apresentaram os melhores resultados devido ao melhor controle da rigidez do molde e que o processo de projeção do concreto/argamassa tem se mostrado promissor para aplicações em maior escala.

Embora o uso de tecidos de origem sintética se apresente muito disseminado na atualidade, observa-se que há campo para o estudo de aplicações envolvendo tecidos de origem vegetal, tendo em vista a origem renovável, o baixo custo e o carácter provisório da fôrma, sem a exigência de durabilidade, bem como pela possibilidade de incorporação do tecido à estrutura final e sua utilização como reforço.

Quanto ao modelo computacional, a modelagem da estrutura de cobertura do Anfiteatro do MPBP no programa Ansys possibilitou a análise do comportamento da membrana para sua utilização como fôrma na execução de uma casca de

concreto, mostrando-se confiável diante dos resultados obtidos. A rotina paramétrica desenvolvida possibilita alterações na configuração de projeto da membrana com o intuito de avaliar os impactos na execução da casca e obtenção da geometria final pretendida.

Mediante critérios pré-estabelecidos de aceitação da geometria final e da evolução dos deslocamentos e das tensões ao longo do processo construtivo, pode-se determinar intervenções prévias no projeto original, tais como as aqui apresentadas (alterações de geometria e das tensões atuantes na membrana) e especificar um plano de concretagem envolvendo o número de camadas a serem empregadas e suas respectivas espessuras, de modo a obter a estrutura final pretendida.

Como sugestão de trabalho futuros para o prosseguimento da presente pesquisa, pode-se mencionar:

- ✓ Elaboração de modelo físico em escala relevante a partir da modelagem computacional aqui elaborada, determinando-se os ajustes necessários no projeto para obtenção da geometria final mais eficiente/pertinente;
- ✓ Estudo da padronagem dos reforços com telas/malhas de aço a partir da sobreposição das emendas de transpasse, da orientação das barras de acordo com as tensões principais atuantes na casca e da aplicação de retesamento dos reforços analogamente à fôrma;
- ✓ Estudo do uso de concretos de alto desempenho na consolidação de estruturas com o uso de fôrmas flexíveis e da possibilidade de não se empregar reforços na casca obtida;
- ✓ Determinação das propriedades mecânicas de tecidos de origem vegetal e de concreto/argamassa reforçados com tais tecidos para avaliação de sua incorporação à estrutura como reforço.

REFERÊNCIAS

ABERGEL, T.; DEAN, B.; DULAC, J. **Global Status Report 2017**. Acesso em 21/03/2021. Disponível em: < <https://globalabc.org/resources/publications/2017-global-status-report-buildings-and-construction> >.

ABDELGADER, H.; WEST, M.; GÓRSKI, J. **State of the Art Report on Fabric Formwork**. International Conference on Construction and Building Technology. 2008.

ADRIAENSSENS, S. et al. **Shell Structures for Architecture: form finding and optimization**. Routledge: London and New York, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13370: Nãotecido – Terminologia**. Rio de Janeiro: 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações – Errata 2**. Rio de Janeiro: 2013.

BINI, D. **Method for erecting structure**. US Patent 3,462,521, 19 Aug. 1969.

BIRD, W. W. et al. **Building construction**. US Patent 3,139,464, 30 Jun. 1964.

BLOCK, P. et al. NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems. **Journal of Building Engineering**, vol. 12, p. 332–341. June 2017.

BOLELLI, P. et al. **Design and construction of a membrane-tensegrity sculpture**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Boston: 2018.

BOYLE, J. M. **Apparatus for molding hollow objects from cement**. US Patent 857,582, 25 Jun. 1907.

BRANDÃO, J. H. **Análise experimental e numérica de cascas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras**. 2005. 128 p. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CHEN, R. **Dimensionamento de elementos de superfície de concreto armado: membranas, placas e cascas**. 2004. 127pp. Tese – Universidade de São Paulo.

CHI, J. Y., PAULETTI, R. M. O. **An outline of the evolution of pneumatic structures**. II Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras. Caracas, 2005.

CHI, J. Y., PAULETTI, R. M. O. **Design and analysis of pneumatic structures**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Acapulco, 2008.

CHILTON, J. **The engineer's contribution to contemporary architecture: Heinz Isler**. London : Thomas Telford, 2000.

CONCRETE CANVAS. Disponível em: <<https://www.concretecanvas.com/>>. Acesso em: 04 mai. 2023.

CONDIE, C. **Revetment-mattress**. US Patent 983,209, 31 Jan. 1911.

CONLON, C. **James Waller's contribution to the advancement of shell roof construction and fabric formed concrete**. Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork. 2012.

DENT, N. R. **Principles of pneumatic architecture**. The Architectural Press: London, 1971.

FAB-FORM. Disponível em: <<https://www.fab-form.com/>>. Acesso em: 04 mai. 2023.

FARRAR, D. et al. **Construction of roofs, floors, ceilings, and the like**. US Patent 2,096,629, 19 Oct. 1937.

FLETCHER, M. **Method and means for forming concrete structural members**. US Patent 1,241,945, 2 Oct. 1917.

FRANCO, J. T. **Architects Team Up with Khmer Women to Build a Community Centre with Fabric and Concrete**. ArchDaily, 2015. Acesso em 20/03/2021. Disponível em <<https://www.archdaily.com/777057/architects-team-up-with-khmer-women-to-build-a-community-centre-with-fabric-and-concrete>>.

GOVAN, J.; ASHENHURST, H. S. **Building Construction**. US Patent 1,671,946, 29 May. 1928.

GULDENTOPS, L. et al. **Textile formworks for concrete shells**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Valencia, 2009.

HAWKINS, W. et al. **Flexible formwork Technologies: a state of the art review**. Structural Concrete, p. 1-48, 2016.

HEIFETZ, H. **Inflatable forms**. US Patent 3,643,910, 22 Feb. 1972a.

HEIFETZ, H. **Domecrete Building System**. 1972b.

HERZOG, T. **Pneumatic Structures: a handbook for the architect and engineer**. Corsby Lockwood Staples. 191 p. London, 1977.

HURD, M. K. **Formwork for concrete**. American Concrete Institute. 6th Ed. Detroit, 1995.

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES. **Recommendations for air-supported structures**. Madrid, 1985.

ISLER, H. **Concrete Shells Derived from Experimental Shapes**. Structural Engineering International, v. 4, n. 3, p. 142–147, 1994.

KOSTOVA, K. Z. **Design and constructability of fabric-formed concrete elements reinforced with FRP materials**. 2016. 401 p. Thesis – University of Bath – Department of Architecture and Civil Engineering. 2016.

KOSTOVA, K. et al. **Using fabric to shape appropriate concrete structures**. Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Las Vegas: 2016.

KROMOSER, B., HUBER, P. **Pneumatic formwork systems in structural engineering**. Hindawi Publishing Corporation. Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2016.

KROMOSER, B., KOLLEGER, J. **Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century**. Structural Concrete (2015), No. 2. 2015.

LAWTON, A.; MILLER-JOHNSON, R. **Case Study – Fabric formed stair**. Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork. 2012.

LEONHARDT, F. **Method of prestressing units with serration**. US Patent 2,705,360, 5 Apr. 1955.

LEVY, M.; SALVADORI, M. **Why buildings fall down: how structures fail**. New York: W W Norton, 1992.

LILIENTHAL, L. W. G. **Fireproof Ceiling**. US Patent 619,769, 21 Feb. 1899.

LUCENA, J. C. T. DE. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Universidade de São Paulo – USP, São Carlos: 2017.

MANELIUS, A. M. **Fabric formwork for concrete: investigations into formwork tectonics and stereogeneity in architectural constructions**. 2012. 328 p. Thesis – The Royal Danish Academy of Fine Arts, Schools of Architecture, Design and Conservation, 2012.

MARANHÃO, G. M. **Formas para Concreto: Subsídios para a Otimização do Projeto Segundo a NBR7190/97**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2000.

MARTIN-MANTERO, R. V. D. D. C. **Miguel Fisac y el hormigón como language estético**. Anales de Investigación en Arquitectura, v. 5, n. Março, p. 6–20, 2015.

MATHEWS, C. B.; AMBROSE, J. G. **Inflatable core for use in casting hollow concrete units**. US Patent 2,485,898, 25 Oct. 1945.

MELARAGNO, M. **An Introduction to Shell Structures: The art and science of vaulting**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

MENEGHETTI, L. C. et al. **Pneumatic formwork systems to build thin concrete shells**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Boston, 2018.

MOHR, N. W. **The city of saint francis idealized**. The Architect and Engineer. 82-84p.1927.

MORA, R. L. **Inflatable construction panels and method of making same**. US Patent 3,388,509, 18 Jun. 1968.

MUTTONI, A.; LURATI, F.; FERNÁNDEZ RUIZ, M. Concrete shells - Towards efficient structures: Construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland. **Structural Concrete**, v. 14, n. 1, p. 43–50, 2013.

NEFF, W. **Building construction**. US Patent 2,270,229, 20 Jan. 1942.

NEFF, W. **Improved method of erecting shell-form concrete structures**. US Patent 2,892,239, 30 Jun. 1959.

NEIGHBOR, N.; SOUTH, D. B. **An evaluation of the monolithic dome construction method for biological containment structures**. Journal of the American Biological Safety Association. pp. 39-46. 1997.

NEWMAN, E. **Ctesiphon Arch - largest unsupported arch in the world**. San Diego Air and Space Museum Archive. 2012. Acesso em 20/03/2021. Disponível em <<https://www.flickr.com/photos/apaame/8344453087>>.

NOSE, T. **Process of constructing culverts or pipes of concrete**. US Patent 1,600,353, 21 Sep. 1926.

NOSE, T. et al. **Apparatus for construction of concrete culverts**. US Patent 1,964,386, 26 Jun. 1934.

OLIVEIRA, M. B. **Estudo das Estruturas de Membrana: uma abordagem integrada do sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

OLIVEIRA, V. M. B. **Análise e projeto de tenso-estruturas têxteis para coberturas**. 2003. 139 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

ORR, J. **Flexible formwork for concrete structures**. 2012. 539 p. Thesis – University of Bath – Department of Architecture and Civil Engineering, 2012.

ORR, J. et al. **Durability enhancements using fabric formwork**. Magazine of Concrete Research, v. 65, n. 20, p. 1236–1245, 2013.

PARKER, S. A. **Concrete Building**. US Patent 3,619,959, 16 Nov. 1969.

PAULETTI, R. M. O. **História, análise e projeto das estruturas retesadas**. 2003. 257 f. Tese de Livre-Docência – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PAULETTI, R. M. O. **Some issues on the design and analysis of pneumatic structures**. International Journal of Structural Engineering, Vol. 1, Nos. 3/4, 2010.

PAULETTI, R. M. D. O.; BRASIL, R. M. L. R. F. **Structural Analysis and Construction of the Membrane Roof of the “Memorial Dos Povos De Belém Do Pará”**. II Simposio latinoamericano de tensoestructuras. Caracas: 2005.

PAZDON, J. A. **Towards the Revitalization of Shell Structures: design and analysis of a prototype for hyperbolic paraboloid shell construction**. Faculty of Princeton University: 2009.

POPESCU, M. et al. Knitcandela: challenging the construction, logistics, waste and economy of concrete-shell formworks. **Fabricate 2020: Making Resilient Architecture**. p. 194–201. UCL Press: 2020.

PUGNALE, A.; BOLOGNA, A. **Dante Bini’s air structures (1964-1979): from early Italian prototypes to the Australian experience**. Proceedings of the First Conference of the Construction History Society. Pages 355-365. Cambridge, 2014.

PUGNALE, A.; BOLOGNA, A. **Dante Bini’s “New Architecture Formulae”: construction, collapse and demolition of binishells in Australia 1974-2015**. Proceedings of the Society of Architectural Historians, Australia and New Zealand: 32, Architecture, Institutions and Change, edited by Paul Hogben and Judith O’Callaghan, 488-499. Sydney: SAHANZ, 2015.

PROUVOST, F. **Construction of houses or similar buildings by means of an inflatable structure**. US Patent 4,094,109, 13 Jun. 1978.

RAMASWAMY, G. S. **Design and construction of concrete shell roofs**. McGraw-Hill: New York, 1968.

SCHLAICH, J. **Conceptual design of light structures**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Montpellier, 2004.

SCHLAICH, J.; SOBEK, W. **Suitable shell shapes**. Concrete International. Pages 41-45. 1986.

SCHMITZ, R. P. **Fabric-formed concrete**: A novel method for forming concrete structures. (Mohammadian et al., Eds.) 3rd International Conference on Civil Engineering and Urban Planning. Wuhan: Taylor & Francis, 2014.

SCHODEK, D. L.; BECHTHOLD, M. **Structures**. Seventh ed. [s.l.] Pearson, 2014.

SOBEK, W. **On design and construction of concrete shells**. Cement, nr. 11. 1991.

SOBEK, W. **Concrete shells constructed on pneumatic formwork**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Osaka, 1986.

SOTO, M. S. O.; PAULETTI, R. M. O.; MENEGHETTI, L. C. **Some experiments on flexible formworks for shell structures**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Annual Symposium 2020/21. [Online], 2021.

SOUTH, D. B.; SOUTH, B. **Building structure and method of making same**. US Patent 4,094,109, 22 May. 1979.

STORE, J. **Method of constructing subaqueous concrete structures**. US Patent 1,421,357, 4 Jul. 1922.

UN ENVIRONMENT AND INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector**. Global Status Report 2017. 2017.

TANG, G. **An Overview of Historical and Contemporary Concrete Shells, their Construction and Factors in their General Disappearance**. International Journal of Space Structures, v. 30, n. Março, p. 13, 2015.

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. 132 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TURNER, L. S. **Method of molding a building structure by spraying a foamed plastic on the inside of an inflatable form**. US Patent 3,277,219, 4 Oct. 1966.

VAN HENNIK, P. C.; WAGEMANS, L. A. G. **Revival of Pneumatic formwork for the construction of monolithic (irregular) shells**. Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Symposium Montpellier. Montpellier, 2004.

VEENENDAAL, D.; WEST, M.; BLOCK, P. **History and overview of fabric formwork**: using fabrics for concrete casting. Structural Concrete: Berlin, 2011.

VERWIMP, E.; TYSMANS, T.; MOLLAERT, M. **Flexible formwork as reinforcement for curved concrete structures**. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013. 2013.

VIEIRA, V. L. **Modelo Teórico e Processos Construtivos de Estruturas em Casca de Concreto**. 2003. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

VIZOTTO, I. **Geração Computacional de Formas Livres de Estruturas em Casca**. 1993. 195 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

WALLER, J. H. DE W. **Method of building with cementitious material applied to vegetable fabrics**. US Patent 1,955,716, 17 Apr. 1934.

WEST, M. **The Fabric Formwork Book: Methods for building new architectural and structural forms in concrete**. Routledge. Londres e Nova Iorque: 2016.

WISE, C. **What if everything we did was wrong?** Building Magazine, 2010. Acesso em 20/03/2021. Disponível em <<https://www.building.co.uk/comment/what-if-everything-we-did-was-wrong/5000493.article>>.

APÊNDICE - Código APDL comentado

```

!-----
!
!                               Modelo MPBP - Ansys Mechanical APDL
!****_ -----
!Unidades SI: N, m, Kg, s          DATA: 13/05/2023
!
!Atenção: nomear diretório e jobname MPBP (para UPGEOM funcionar)
!Sugere-se não rodar o código direto, mas apenas até o fim da 1ª
concretagem. Caso não tenha convergido, rodar novamente.
!Recomenda-se o uso do Notepad++ e estilo de dobragem de comentários
(abrir: !****_ e fechar: !-)
!-----
!****_          1. Inicialização:
!-----
!*****Limpando o ambiente primeiro:*****
FINISH
/CLEAR,NOSTART
!*****Tipo de Análise (estrutural no caso):*****
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
/GO
/PREP7
!*****Background Branco:*****
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,80,80,80,13
/RGB,INDEX,60,60,60,14
/RGB,INDEX,0,0,0,15
!*****Supress Warning Messages*****
!Aceita automaticamente as mensagens de aviso e os inícios do solver
KEYW,PR_SGVOF,1
/NERR,5,10000,,0,5,
!-----
!****_          2. Parâmetros de entrada:
!-----
!**Materiais:
E1 = 180e9          !Mod. Elast. cabos (aço)
nu1 = 0.3          !Poisson cabos (aço)
Dens1 = 7850       !Densidade dos cabos (aço)
E2 = 1e9          !Mod. Elast. Membrana -> ATENÇÃO AO COEF. TERMICO
nu2 = 0           !Poisson membrana
Dens2 = 960       !Densidade da membrana
E3 = 200e9        !Elat. Mastros
nu3 = 0.3
Dens3 = 7850
E4 = 30e9          !Mod. Elast. Concreto
nu4 = 0.2         !Poisson concreto
Dens4 = 2500      !Densidade do concreto
escala = 1

```

```

!**Geometrias Seções:
Ri = 0.1400          !Raio interno mastros
Re = 0.1800          !Raio externo mastros
divm = 8             !Divisões ao longo da circ. dos mastros
esp = 0.002          !Espessura da membrana
Abord = 3.14*(0.0254/2)*(0.0254/2)      !Área dos cabos de borda
Aanco = 3.14*(0.0254)*(0.0254)          !Área dos cabos de ancoragem
espcnc1= 0.020        !Espessuras das camadas de concreto
espcnc2= 0.050
espcnc3= 0.080
!**Malhas:
Divmt = 10            !Número de divisões nos mastros
Divmb = 1.50          !Tamanho elementos da membrana
malha = 1             !0=quadrangular e 1=triangular
mapea = 2             !0=livre; 1=mapeado; 2=mapeado e livre
!**Cargas:
Trei = 200e6          !Tensão no cabo de ancoragem do mastro rei
Trainha = 180e6       !Tensão no cabo ancoragem rainha
Tborda = 150e6        !Tensão nos cabos de borda
ACEL, , ,9.8          !Gravidade
Ttemp = -10e6         !Tensão inicial na membrana se  $E_{membrana} * \alpha_{membrana} = 1$ 
!
!-----
!****_                3. Geometria:
!-----
!**Referenciais
Zrei = 8.37 / escala
Zrainha = 4.56 / escala
Zmast = 1.65 / escala
Xrainha = 22.59 / escala
Xmast1 = 8.07 / escala
Xmast2 = 21.19 / escala
Ymast1 = 13.38 / escala
Ymast2 = 14.32 / escala
espanc = 22.59 / 15 / escala
Zbase = -2.0 / escala
!
/PREP7
!**Pontos de Apoio da membrana:
K,1,0,0,Zrei
K,2,Xrainha,0,Zrainha
K,3,Xmast1,Ymast1,Zmast
K,4,Xmast2,Ymast2,Zmast
K,5,Xmast2,-Ymast2,Zmast
K,6,Xmast1,-Ymast1,Zmast
!
!**Pontos de apoio dos mastros:
K,7,1.8*espanc,0,Zbase          !Base Mastro Rei
K,8,Xrainha-1.0*espanc,0,Zbase  !Base Mastro Rainha
K,9,Xmast1,Ymast1,Zbase
K,10,Xmast2,Ymast2,Zbase
K,11,Xmast2,-Ymast2,Zbase
K,12,Xmast1,-Ymast1,Zbase
!
!**Linhas dos mastros
L,1,7
L,2,8
L,3,9
L,4,10
L,5,11

```

```

L,6,12
!
!**Linhas das bordas
L,1,3
L,3,4
L,4,2
L,2,5
L,5,6
L,6,1
!
A,1,2,4,3
A,1,2,5,6
ANORM,1,0 !Reorientação de uma das abas da estrutura
!
!**Cabos de ancoragem (Rei e Rainha)
K,13,-espanc*2,0,Zbase
K,14,Xrainha+espanc*2,0,Zbase
L,1,13
L,2,14
!
!**Tripés
K,15,Xmast1-espanc/2,Ymast1-espanc,Zbase
K,16,Xmast1+espanc,Ymast1-espanc/2,Zbase
K,17,Xmast2+espanc/2,Ymast2+espanc,Zbase
K,18,Xmast2+espanc,Ymast2+espanc/2,Zbase
K,19,Xmast2+espanc,-Ymast2-espanc/2,Zbase
K,20,Xmast2+espanc/2,-Ymast2-espanc,Zbase
K,21,Xmast1+espanc,-Ymast1+espanc/2,Zbase
K,22,Xmast1-espanc/2,-Ymast1+espanc,Zbase
L,3,15 $L,3,16
L,4,17 $L,4,18
L,5,19 $L,5,20
L,6,21 $L,6,22
!
!- -----
!****_                4. Definição dos Elementos:
!-----
!
ET,1,LINK180                !Cabos
ET,2,SHELL41,2              !Membrana, sem flexão
R, ,esp                      !Espessura da membrana
ET,3,BEAM188                !Mastros
ET,4,SHELL181,0,,,,,,,,,2    !Casca, com flexão, Keyopt(8)=2 p/ acessar
                              resultados nas camadas intermediárias
!
!- -----
!****_                5. Definição dos Materiais:
!-----
!
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,180e6          !MAT Cabos - redução do E para facilitar converg.
MPDATA,PRXY,1,,nul
MPDATA,DENS,1,,Dens1
!
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,1e8           !MAT Membrana - redução do E para 1ª aprox.
MPDATA,PRXY,2,,nu2
MPDATA,DENS,2,,Dens2
UIMP,2,REFT,,,
MPDATA,ALPX,2,,1e-8        !Se ALPX*EX=1 => Ttemp=Tensão de retesamento

```



```

Bmin      = Nmem + 1
!
LSEL, ,LINE, ,14,15      !SELEÇÃO CABOS ANCORAGEM
LATT,1, ,1, , , ,12     !Atribuição do mat., tipo de elem. e seção
LESIZE,ALL, , ,1, , , ,1 !Especificação do tamanho dos elementos
LMESH,14,15
ESEL,ALL
*GET,Erainha,ELEM,0,NUM,MAX  !**Erainha ID do elemento do cabo rainha
Erei      = Erainha -1     !ID do elemento do cabo rei
!
LSEL, ,LINE, ,1,6       !Seleção dos mastros
LSEL,A,LINE, ,16,23
LATT,3, ,3, , , ,3     !Atribuição do mat., tipo de elem. e seção
LESIZE,ALL, , ,Divmt, , , ,1 !Tamanho dos elementos
LMESH,1,6               !Geração da malha dos mastros
LMESH,16,23
!
Nmast     = 14*Divmt
Mmin      = Erainha + 1
Mmax      = Erainha + Nmast
!
!**Elementos Camadas de Concreto
ENGEN,Mmax,2,0,1,Nmem,1,39,2,0,0,3,0,0,0
*GET,Clmax,ELEM,0,NUM,MAX  !**Clmax ID do último elem. da 1ª camada
!
Nmeiacasca = Nmem / 2
Ncasc1     = Mmax + 1      !1º Elemento da casca
Ncasc2     = Mmax + Nmeiacasca !Último elemento de metade da casca
Ncasc3     = Ncasc2 + 1   !1º Elemento da outra metade da casca
Ncasc4     = Ncasc2 + Nmeiacasca !Último elemento da outra metade
!
!- -----
!****_      8. Restrições nos apoios:
!-----
!BASE DOS MASTROS (TRIPÉS - EXCETO REI E RAINHA)
KSEL, ,KP, ,9,12
KSEL,A,KP, ,15,22
DK,ALL,UX,0, ,0,UY,UZ,ROTZ
!
!BASE MASTROS REI E RAINHA
KSEL, ,KP, ,7,8
DK,ALL,UX,0, ,0,UY,UZ,ROTX,ROTZ
!
!BASE CABOS DE ANCORAGEM
KSEL, ,KP, ,13,14
DK,ALL,UX,0, ,0,UY,UZ
!
!VÉRTICES DA MEMBRANA (P/ BUSCA DA FORMA)
KSEL, ,KP, ,1,6
DK,ALL,UX,0, ,0,UY,UZ
!
ALLSEL,ALL
DTRAN
!- -----
!****_      9. Retesamento inicial e EKILL:
!-----
!Tensão inicial cabos de borda
ESEL, ,ELEM, ,Bmin,Bmax
INISTATE,SET,CSYS,-2
INISTATE,SET,DTYP,STRE      !Atribuindo um estado inicial de tensão

```

```

INISTATE,DEFINE,,,,,Tborda !Estado inicial dos cabos
!
!Tensão inicial ancoragem mastro rei
ESEL, ,ELEM, ,Erei
INISTATE,SET,CSYS,-2
INISTATE,SET,DTYP,STRE
INISTATE,DEFINE,,,,,Trei
!
!Tensão inicial ancoragem mastro rainha
ESEL, ,ELEM, ,Erainha
INISTATE,SET,CSYS,-2
INISTATE,SET,DTYP,STRE
INISTATE,DEFINE,,,,,Trainha
!
!Tensão inicial na membrana
TUNIF,Ttemp
!
INISTATE,WRITE,1, , , ,-2,S !Gravar output stresses
ALLSEL,ALL
ESEL,,TYPE,,4
EKILL,ALL !Desabilitando elementos da casca
ALLSEL,ALL
INISTATE,WRITE,1, , , , ,S !Gravar output stresses
!INISTATE,LIST !Caso queira conferir os estados iniciais
de tensão nos elementos
/ESHAPE,1,0
EPLOT
!-----
!****_ 10. Solução da Membrana:
!
!****_ 10.1 Obtenção da geometria:
!
!DEFINO VISTAS E EXPORTO ARQUIVOS JPEG
/VIEW,1,,,1
/ANG,1,-90,ZS,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,amodel,JPEG
/VIEW,1,,-1
/ANG,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,amodel2,JPEG
!
/SOLU
!**ESPECIFICAÇÕES INICIAIS
NLGEOM, ON !Includes large-deflection effects
ANTYPE,0,NEW !Especifica o tipo de análise
ALLSEL,ALL !Seleciona tudo (geometria, nós e elementos)
NROPT,FULL,, !Impõe solução por Newton-Raphson
OUTRES,ALL,ALL
!
!**RESOLUÇÃO MEMBRANA
D,ALL,ALL
TIME,0.90
SOLVE
DDELE,ALL,ALL
DTRAN
TIME,0.905
SOLVE
!
!ATUALIZAR TENSÕES !1ª APROX COM PROP. FICTICIAS

```

```

INISTATE,READ
ALLSEL,ALL
!
TIME,0.91
SOLVE
INISTATE,WRITE,1, , , ,-2,S
!
/PREP7
UPGEOM,1, LAST, LAST, 'MPBP', 'rst'
/SOLU
INISTATE,READ
D,ALL,ALL
TIME,0.91
SOLVE
DDELE,ALL,ALL
DTRAN
TIME,0.915
SOLVE
!
!Atualizando propriedades dos materiais (2ª Aprox.):
INISTATE,READ
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1
MPDATA,EX,1,,180e7
!
TIME,0.92
SOLVE
!
/PREP7
UPGEOM,1, LAST, LAST, 'MPBP', 'rst'
/SOLU
INISTATE,READ
D,ALL,ALL
TIME,0.92
SOLVE
DDELE,ALL,ALL
DTRAN
TIME,0.925
SOLVE
!ATUALIZAÇÃO DAS PROP. DOS MATERIAIS
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1
MPDATA,EX,1,,180e8
!
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,2
MPDATA,EX,2,,5e8           !ITERAÇÕES P/ OBTENÇÃO EQUIL. C/ PROP. REAIS
MPDE,ALPX,2
MPDATA,ALPX,2,,2e-9       !Se ALPX*EX=1 => Ttemp=Tensão de retesamento
!
D,ALL,ALL
TIME,0.93
SOLVE
DDELE,ALL,ALL
DTRAN
TIME,0.935
SOLVE
! ATUALIZAÇÃO DAS PROP. DOS MATERIAIS
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1

```

```

MPDATA,EX,1,,E1
!
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,2
MPDATA,EX,2,,E2
MPDE,ALPX,2
MPDATA,ALPX,2,,1e-9
D,ALL,ALL
TIME,0.94
SOLVE
DDELE,ALL,ALL
DTRAN
TIME,0.945
SOLVE
! ATUALIZAÇÃO DAS PROP. DOS MATERIAIS
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1
MPDATA,EX,1,,E1
TIME,0.95
SOLVE
!
/PREP7
UPGEOM,1, LAST, LAST, 'MPBP', 'rst'
/SOLU
INISTATE,READ
D,ALL,ALL
TIME,0.95
SOLVE
DDELE,ALL,ALL
DTRAN
TIME,0.955
SOLVE
!
!Soltando vértices da membrana:
KSEL, ,KP, ,1,6
DKDELE,ALL,ALL
TIME,1.00
SOLVE
!
!VISTAS E GERAÇÃO DE ARQUIVOS JPEG
/POST1
SET, LAST
/GLINE,ALL,-1
/ESHAPE,0
!DESLOCAMENTOS TOTAIS
PLNSOL,U,SUM
/VIEW,1,,1
/ANG,1,-90,ZS,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,bretesaUSUM,JPEG
/ESHAPE,1,0
EPLOT
/IMAGE,SAVE,bmodell1,JPEG
/VIEW,1,,-1
/ANG,1
/REP,FAST
PLVECT,U
/IMAGE,SAVE,bretesaPLVEC,JPEG
EPLOT
/IMAGE,SAVE,bmodell2,JPEG

```

```

!
! REAÇÕES DE APOIO MASTROS E ANCORAGENS
/ESHAPE,0
ESEL,,SECTYPE,,12
ETABLE,C1,smisc,1
ALLSEL,ALL
NSEL,,NODE,,448,558,10
NSEL,INVE
/VSCALE,,2
/PBC,RFOR,,2
EPLOT
PLETAB,C1,C1
/IMAGE,SAVE,bretesaAPOIOS,JPEG
/PBC,DEFA
ALLSEL,ALL
!
! TENSÕES NA MEMBRANA
ESEL,,TYPE,,2
PLNSOL,s,1
/VIEW,1,,1
/ANG,1,-90,ZS,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,bretesa1membrana,JPEG
ALLSEL,ALL
!
! TENSÕES NOS CABOS DE BORDA
ESEL,,SECTYPE,,11
ETABLE,n1,smisc,1
PLLS,n1,n1
/IMAGE,SAVE,bretesaFcabos,JPEG
ALLSEL,ALL
!-
*****
!****_          10.2 Carregamentos
!
!****_          APLICANDO CARGAS DA 1ª CONCRETAGEM
/PREP7
UPGEOM,1,LAST,LAST,'MPBP','rst'
/SOLU
INISTATE,READ
ALLSEL,ALL
D,ALL,ALL
TIME,1.1
SOLVE
DDELE,ALL,ALL
DTRAN
TIME,1.15
SOLVE
!Colocar Dens4 de uma vez afeta convergência -> aumento do Dens4 em
passos:
ESEL,,TYPE,,4
EALIVE,ALL          !Habilitando elementos da casca
ALLSEL,ALL
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,41,,0.2*Dens4    !Atribuo densidade à 1ª camada
TIME,1.2
SOLVE
!
MPTEMP,1,0
MPDELE,DENS,41

```

```

MPDATA,DENS,41,,0.4*Dens4      !Altero densidade da 1ª camada
TIME,1.3
SOLVE
!
MPTEMP,1,0
MPDELE,DENS,41
MPDATA,DENS,41,,0.8*Dens4      ! Altero densidade da 1ª camada
TIME,1.4
SOLVE
!
MPTEMP,1,0
MPDELE,DENS,41
MPDATA,DENS,41,,Dens4          ! Altero densidade da 1ª camada
TIME,2.00
SOLVE
!
/POST1
SET, LAST
PLNSOL,U,SUM
/IMAGE,SAVE,cesp1USUM,JPEG
/VIEW,1,,-1
/ANG,1
/REP,FAST
/ESHAPE,1,0
/VSCALE,,1
PLVECT,U
/IMAGE,SAVE,cesp1PLVEC,JPEG
!
ETABLE,X1,u,x
ETABLE,Y1,u,y
ETABLE,Z1,u,z
!
!REAÇÕES DE APOIO MASTROS E ANCORAGENS
/ESHAPE,0
ESEL,,SECTYPE,,12
ETABLE,C2,smisc,1
ALLSEL,ALL
NSEL,,NODE,,448,558,10
NSEL,INVE
/VSCALE,,2
/PBC,RFOR,,2
EPLOT
PLETAB,C2,C2
/IMAGE,SAVE,cesp1APOIOS,JPEG
/PBC,DEFA
ALLSEL,ALL
!
ESEL,,TYPE,,2
PLNSOL,s,1
/VIEW,1,,,1
/ANG,1,-90,ZS,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,cesp1S1memb,JPEG
ALLSEL,ALL
!
ESEL,,SECTYPE,,11
ETABLE,n2,smisc,1
PLLS,n2,n2
/IMAGE,SAVE,cesp1Fcabos,JPEG
ALLSEL,ALL

```

```

!-
!*****
!****          ENDURECIMENTO 1ª CAMADA
/PREP7
UPGEOM,1, LAST, LAST, 'MPBP', 'rst'
!
/SOLU
INISTATE, READ
D, ALL, ALL
TIME, 2.1
SOLVE
!
DDELE, ALL, ALL
DTRAN
TIME, 2.15
SOLVE
!
MPTEMP, 1, 0
MPDELE, EX, 41
MPDATA, EX, 41, , 30e6      !Econc da 1ª camada (não converge se coloca E4
direto)
!MPDELE, PRXY, 41
!MPDATA, PRXY, 41, , nu4
TIME, 2.2
SOLVE
!
MPTEMP, 1, 0
MPDELE, EX, 41
MPDATA, EX, 41, , 60e7      !MAT Casca 1ª camada
TIME, 2.3
SOLVE
!
MPTEMP, 1, 0
MPDELE, EX, 41
MPDATA, EX, 41, , 15e8      !MAT Casca 1ª camada
TIME, 2.4
SOLVE
!
MPTEMP, 1, 0
MPDELE, EX, 41
MPDATA, EX, 41, , E4      !MAT Casca 1ª camada
TIME, 2.5
SOLVE
!-
*****
!****          CARGAS DA 2ª CAMADA
MPTEMP, 1, 0
MPDATA, DENS, 42, , Dens4
TIME, 3.00
SOLVE
!
/POST1
SET, LAST
/ESHAPE, 0
PLNSOL, U, SUM
/IMAGE, SAVE, desp2USUM, JPEG
/VIEW, 1, , -1
/ANG, 1
/REP, FAST
/ESHAPE, 1, 0

```

```

/VSCALE,,1
PLVECT,U,SUM
/IMAGE,SAVE,desp2PLVEC,JPEG
!
ETABLE,X2,u,x
ETABLE,Y2,u,y
ETABLE,Z2,u,z
!
!REAÇÕES DE APOIO MASTROS E ANCORAGENS
/ESHAPE,0
ALLSEL,ALL
NSEL,,NODE,,448,558,10
NSEL,INVE
/VSCALE,,2
/PBC,RFOR,,2
EPLOT
/IMAGE,SAVE,desp2APOIOS,JPEG
/PBC,DEFA
ALLSEL,ALL
!
ESEL,,TYPE,,2
PLNSOL,s,1
/VIEW,1,,1
/ANG,1,-90,ZS,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,desp2S1memb,JPEG
ALLSEL,ALL
!
ESEL,,TYPE,,4
LAYER,1
PLNSOL,s,1
/IMAGE,SAVE,desp2S1cascaCIMA,JPEG
PLNSOL,s,3
/IMAGE,SAVE,desp2S3cascaCIMA,JPEG
/ANG,1,180,XS,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,desp2s3cascaBAIXO,JPEG
PLNSOL,s,1
/IMAGE,SAVE,desp2S1cascaBAIXO,JPEG
ALLSEL,ALL
/ANG,1,-180,XS,1
!
ESEL,,SECTYPE,,11
ETABLE,n3,smisc,1
PLLS,n3,n3
/IMAGE,SAVE,desp2Fcabos,JPEG
ALLSEL,ALL
!-
!*****
!****          ENDURECIMENTO DA 2ª CAMADA
/PREP7
UPGEOM,1,LAST,LAST,'MPBP','rst'
/SOLU
INISTATE,READ
TIME,3.1
SOLVE
!
MPTEMP,1,0
MPDELE,EX,42

```

```

MPDATA,EX,42,,30e6      !Aumento do Econc da 2ª camada (não converge se
coloca E4 direto)
!MPDELE,PRXY,42
!MPDATA,PRXY,42,,nu4
TIME,3.2
SOLVE
!
MPTEMP,1,0
MPDELE,EX,42
MPDATA,EX,42,,E4
TIME,3.3
SOLVE
!-
!*****
!****_      CARGAS DA 3ª CAMADA
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,43,,Dens4
TIME,4.00
SOLVE
!
/POST1
SET, LAST
/ESHAPE,0
PLNSOL,U,SUM
/IMAGE,SAVE,eesp3USUM,JPEG
/VIEW,1,,-1
/ANG,1
/REP,FAST
/ESHAPE,1,0
/VSCALE,,1
PLVECT,U
/IMAGE,SAVE,eesp3PLVEC,JPEG
!
ETABLE,X3,u,x
ETABLE,Y3,u,y
ETABLE,Z3,u,z
!
!RELAÇÕES DE APOIO MASTROS E ANCORAGENS
/ESHAPE,0
ALLSEL,ALL
NSEL,,NODE,,448,558,10
NSEL,INVE
/VSCALE,,2
/PBC,RFOR,,2
EPLOT
/IMAGE,SAVE,eesp3APOIOS,JPEG
/PBC,DEFA
ALLSEL,ALL
!
ESEL,,TYPE,,2
PLNSOL,s,1
/VIEW,1,,1
/ANG,1,-90,ZS,1
/REP,FAST
/IMAGE,SAVE,eesp3S1membrana,JPEG
ALLSEL,ALL
!
ESEL,,TYPE,,4
LAYER,2
PLNSOL,s,1

```

```

/IMAGE,SAVE,eesp3S1cascaCIMA,JPEG
PLNSOL,s,3
/IMAGE,SAVE,eesp3S3cascaCIMA,JPEG
/ANG,1,180,XS,1
/REP,FAST
LAYER,1
PLNSOL,s,3
/IMAGE,SAVE,eesp3s3cascaBAIXO,JPEG
PLNSOL,S,1
/IMAGE,SAVE,eesp3s1cascaBAIXO,JPEG
ALLSEL,ALL
/ANG,1,-180,XS,1
!
ESEL,,SECTYPE,,11
ETABLE,n3,smisc,1
PLLS,n3,n3
/IMAGE,SAVE,eesp3Fcabos,JPEG
ALLSEL,ALL
!-
!*****
!****          ENDURECIMENTO DA 3ª CAMADA
/PREP7
UPGEOM,1,LAST,LAST,'MPBP','rst'
/SOLU
INISTATE,READ
TIME,4.1
SOLVE
!
MPTEMP,1,0
MPDELE,EX,43
MPDATA,EX,43,,30e6      !Aumento do Econc da 2ª camada (não converge se
coloca E4 direto)
!MPDELE,PRXY,43
!MPDATA,PRXY,43,,nu4
TIME,4.2
SOLVE
!
MPTEMP,1,0
MPDELE,EX,43
MPDATA,EX,43,,E4
TIME,4.3
SOLVE
!-
!- *****
!****          10.3 Desativação Cabos e Membrana
!
/PREP7
UPGEOM,1,LAST,LAST,'MPBP','rst'
!
!DESATIVANDO CABOS E MEMBRANA
ALLSEL,ALL
ESEL,,TYPE,,2
EKILL,ALL          !Desabilitando elementos da membrana
ALLSEL,ALL
LCLEAR,1,2
LCLEAR,7,12
LCLEAR,14,15
/SOLU
!
INISTATE,READ

```

```

DTRAN
TIME, 5.00
SOLVE
!*****
!
/POST1
SET, LAST
/ESHAPE, 0
PLNSOL, U, SUM
/IMAGE, SAVE, fdesmobUSUM, JPEG
!
ESEL, , TYPE, , 4
LAYER, 3
PLNSOL, s, 1
/IMAGE, SAVE, fdesmobS1cascaCIMA, JPEG
PLNSOL, S, 3
/IMAGE, SAVE, fdesmobS3cascaCIMA, JPEG
/ANG, 1, 180, XS, 1
/REP, FAST
LAYER, 1
PLNSOL, S, 3
/IMAGE, SAVE, fdesmobs3cascaBAIXO, JPEG
PLNSOL, s, 1
/IMAGE, SAVE, fdesmobs1cascaBAIXO, JPEG
ALLSEL, ALL
/ANG, 1, -180, XS, 1
!
/VIEW, 1, , -1
/ANG, 1
/REP, FAST
/ESHAPE, 1, 0
/VSCALE, , 1
PLVECT, U
/IMAGE, SAVE, fdesmobPLVEC, JPEG
!
ETABLE, X4, u, x
ETABLE, Y4, u, y
ETABLE, Z4, u, z
!
SADD, X12, X1, X2
SADD, X23, X12, X3
SADD, Xtot, X23, X4
!
SADD, Y12, Y1, Y2
SADD, Y23, Y12, Y3
SADD, Ytot, Y23, Y4
!
SADD, Z12, Z1, Z2
SADD, Z23, Z12, Z3
SADD, Ztot, Z23, Z4
!
/VIEW, 1, , , 1
/ANG, 1, -90, ZS, 1
/REP, FAST
/ESHAPE, 0
ESEL, , TYPE, , 4
PLETAB, X1
/IMAGE, SAVE, gdeslacumX1, JPEG
PLETAB, X12
/IMAGE, SAVE, gdeslacumX12, JPEG

```

```

PLETAB,X23
/IMAGE,SAVE,gdeslacumX23,JPEG
PLETAB,Xtot
/IMAGE,SAVE,gdeslacumXtot,JPEG
!
PLETAB,Z1
/IMAGE,SAVE,gdeslacumZ1,JPEG
PLETAB,Z12
/IMAGE,SAVE,gdeslacumZ12,JPEG
PLETAB,Z23
/IMAGE,SAVE,gdeslacumZ23,JPEG
PLETAB,Ztot
/IMAGE,SAVE,gdeslacumZtot,JPEG
ALLSEL,ALL
!- *****
!****_          10.4 Ação de cargas na casca
!
/PREP7
UPGEOM,1,LAST,LAST,'MPBP','rst'
!
!****_ Vento na direção X*****
/SOLU
INISTATE,READ
DTRAN
ESEL,,TYPE,,4
SFCONTROL,2,,0,0,1,,,,
SFE,ALL,2,PRES,0,-286
ALLSEL,ALL
TIME,6.10
SOLVE
!
/POST1
SET, LAST
PLNSOL,U,SUM
/IMAGE,SAVE,gventoxUSUM,JPEG
!
ESEL,,TYPE,,4
LAYER,3
PLNSOL,s,1
/IMAGE,SAVE,gventoxS1cascaCIMA,JPEG
PLNSOL,s,3
/IMAGE,SAVE,gventoxS3cascaCIMA,JPEG
/ANG,1,180,XS,1
/REP,FAST
LAYER,1
PLNSOL,s,3
/IMAGE,SAVE,gventoxS3cascaBAIXO,JPEG
PLNSOL,s,1
/IMAGE,SAVE,gventoxS1cascaBAIXO,JPEG
ALLSEL,ALL
/ANG,1,-180,XS,1
!
/VIEW,1,,-1
/ANG,1
/REP,FAST
/ESHAPE,1,0
/VSCALE,,1
PLVECT,U
/IMAGE,SAVE,gventoxPLVEC2,JPEG
/ANG,1,90,YS,1

```

```

/REP, FAST
/IMAGE, SAVE, gventoxPLVEC1, JPEG
/ANG, 1, -90, YS, 1
/REP, FAST
!-
!****_ Vento na direção Y*****
/SOLU
INISTATE, READ
DTRAN
SFDELE, ALL, ALL, ALL, ALL
SFDELE, ALL, ALL
ESEL, , ELEM, , Ncasc3, Ncasc4, 1
SFCONTROL, 2, , 0, 0, 1
SFE, ALL, 2, PRES, 0, -286
ALLSEL, ALL
ESEL, , ELEM, , Ncasc1, Ncasc2, 1
SFCONTROL, 2, , 0, 0, 1
SFE, ALL, 1, PRES, 0, 115
ALLSEL, ALL
TIME, 6.20
SOLVE
!
/POST1
SET, LAST
/VIEW, 1, , , 1
/REP, FAST
/ESHAPE, 0
PLNSOL, U, SUM
/IMAGE, SAVE, gventoYUSUM, JPEG
!
ESEL, , TYPE, , 4
LAYER, 3
PLNSOL, s, 1
/IMAGE, SAVE, gventoYS1cascaCIMA, JPEG
PLNSOL, s, 3
/IMAGE, SAVE, gventoYS3cascaCIMA, JPEG
/ANG, 1, 180, XS, 1
/REP, FAST
LAYER, 1
PLNSOL, s, 3
/IMAGE, SAVE, gventoYS3cascaBAIXO, JPEG
PLNSOL, s, 1
/IMAGE, SAVE, gventoYS1cascaBAIXO, JPEG
ALLSEL, ALL
/ANG, 1, -180, XS, 1
!
/VIEW, 1, , -1
/ANG, 1
/REP, FAST
/ESHAPE, 1, 0
/VSCALE, , 1
PLVECT, U
/IMAGE, SAVE, gventoYPLVEC2, JPEG
/ANG, 1, 90, YS, 1
/REP, FAST
/IMAGE, SAVE, gventoYPLVEC1, JPEG
/ANG, 1, -90, YS, 1

```