

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**RAFAELA KLUGE**

**TENSOESTRUTURA: UMA PROPOSTA PARA OS PASSEIOS DA UNIPAMPA  
CAMPUS ALEGRETE**

**Alegrete  
2014**

**RAFAELA KLUGE**

**TENSOESTRUTURA: UMA PROPOSTA PARA OS PASSEIOS DA UNIPAMPA  
CAMPUS ALEGRETE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Telmo Egmar Camilo Deifeld

**Alegrete  
2014**

**RAFAELA KLUGE**

**TENSOESTRUTURA: UMA PROPOSTA PARA OS PASSEIOS DA UNIPAMPA  
CAMPUS ALEGRETE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06 de março de 2014.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Mestre André Lübeck  
UNIPAMPA

---

Prof. Mestre Elvira Luiza Arantes Ribeiro Mancini  
UNIPAMPA

## **AGRADECIMENTO**

A Deus, sempre em primeiro lugar, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais, Evandro e Darcila, que me deram toda a estrutura para que me torna-se a pessoa que sou hoje. Pela confiança e pelo amor que me fortalece todos os dias.

Ao meu orientador Professor Telmo, por todo o auxílio e incentivo e por seu empenho dedicado à elaboração deste trabalho. Aos demais professores pela contribuição na minha formação.

A minha amiga Priscilla, que fez tudo o que estava ao seu alcance para me ajudar em vários momentos, por tornar o meu TCC menos árduo com as nossas risadas quando reuníamos para fazê-lo.

Agradeço meus familiares que sempre acreditaram muito no meu trabalho e me ajudaram no que foi preciso. Principalmente meus avós, Eda, Leonel e Ivone.

Ao meu namorado Francisco, pelo carinho, incentivo, por aceitar os momentos de minha ausência e por ter me aturado nos momentos de estresse.

A Cláudia pela sua ajuda com a costura da cobertura da maquete.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de trabalho que de alguma maneira ajudaram para esta realização. Aos técnicos do laboratório da UNIPAMPA, Clayton e Jarbas, pela ajuda nas primeiras etapas da montagem da maquete.

Obrigada a todos vocês!

“Que eu não perca a vontade de ajudar as pessoas, mesmo sabendo que muitas delas são incapazes de ver, reconhecer e retribuir essa ajuda”.

Francisco Candido Xavier

## RESUMO

Este trabalho propõe uma cobertura em tensoestruturas para os passeios da UNIPAMPA Campus Alegrete. Para isto, deu-se início a revisão da literatura de como e quando essas estruturas surgiram e da sua evolução, mostrando algumas obras marcantes no mundo e no Brasil. Também fez-se o estudo das etapas necessárias para a realização dessas estruturas, que são: busca da forma, padronagem, análise das respostas aos carregamentos, material e montagem. Estas servindo de apoio para a realização do projeto. Que começou com o reconhecimento dos passeios que interligam os prédios do campus, para posteriormente realizar uma maquete eletrônica de um trecho escolhido, sendo que esta auxiliou para a execução da maquete física, resultando no encontro da forma da cobertura e possíveis padrões de cortes.

Palavras - chaves: tensoestrutura; projeto; padrões de corte.

## **ABSTRACT**

This work proposes a covering in tensoestructuras for the sidewalk of the UNIPAMPA Campus Alegrete. For this, was given start the review of literature of how and when this structures appears and of their evolution, showing some works outstanding works in the word and at the Brazil. Also made the study of the steps necessaries to achievement this structures, that are: search the of build, patterning, review of answers to loading, material and installation. These serving of support for the achievement of project. That started with the recognition of the sidewalk that interconnect the campus's buildings, for posteriorly to make an electronics model of stretch chosen, being that this supported for the execution of real model, resulting in the clash of the cover forms and the possible cutting patterns.

Keywords: tensoestructuras; project; cutting patterns.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do Peso das Estruturas .....	13
Figura 2 – Tenda Negra do Oriente Médio .....	14
Figura 3 – Um dos primeiros registros iconográficos .....	15
Figura 4 - Velaria .....	15
Figura 5 - Tenda de circo Chapiteu .....	16
Figura 6 - Tenda de aço da Exposição Pan-Russa .....	17
Figura 7 - Pavilhão Temps Nouveaux, World Fair, Paris .....	17
Figura 8 - Arena de Raleigh .....	18
Figura 9 - Concha acústica de Melbourne .....	19
Figura 10 - Estádio de Hockey de Yale .....	19
Figura 11 - Estádios das Olimpíadas de Tóquio - Kenzo Tange .....	19
Figura 12 - Pavilhão de Música em Kassel .....	20
Figura 13 - Pavilhão Alemão, em Montreal .....	21
Figura 14 - Estádio Olímpico de Munique .....	22
Figura 15 - Cobertura da Piazzale Roma, Milão .....	23
Figura 16 - Estádio de Turim .....	23
Figura 17 - Estádio Olímpico de Roma, 1990 .....	24
Figura 18 - Portão de acesso a EXPO92 - Oleada .....	24
Figura 19 - Terminal de Passageiros de Jeddah, Arábia Saudita .....	25
Figura 20 - Estádio Rei Fahd, Arábia Saudita .....	25
Figura 21 - Aeroporto de Denver, Colorado, EUA .....	26
Figura 22 - Hotel Burj Al Arab, em Dubai, nos Emirados Árabes .....	27
Figura 23 - Pavilhão do Rio Grande do Sul .....	27
Figura 24 - Pavilhão São Cristóvão .....	28
Figura 25 - Igreja Batista de Fortaleza .....	29
Figura 26 - Memorial dos Povos de Belém do Pará .....	30
Figura 27 - Arquibancadas criada para o evento da Vila da Copa .....	31
Figura 28 - Shopping Spazzio Desing .....	31
Figura 29 - Mercado do Peixe em Angra dos Reis .....	32
Figura 30 - Feira Ananindeua .....	32
Figura 31 - Parque dos Direitos da Criança e Adolescentes .....	33

Figura 32 - Fases do projeto de estruturas retesadas .....	34
Figura 33 - Modulação, corte e planificação da superfície espacial em faixas planas .....	38
Figura 34 - Arranjos das membranas estruturais .....	43
Figura 35 - Passeios da UNIPAMPA Campus Alegrete .....	47
Figura 36 - Vagas de estacionamento.....	48
Figura 37 - Locação dos mastros.....	48
Figura 38 - Vista de todo o trecho de passeio .....	49
Figura 39 - Vistas do passeio em relação ao prédio .....	50
Figura 40 – Trecho entre passeios e entrada do prédio administrativo.....	51
Figura 41 - Cobertura entre o passeio e ao prédio administrativo.....	51
Figura 42 - Detalhe da ligação com a parede do prédio.....	52
Figura 43 - Cobertura entre passeios.....	53
Figura 44 - Vista da maquete física da cobertura entre passeios.....	53
Figura 45 - Detalhe da barra e mastros da cobertura entre passeio .....	54
Figura 46 - Cobertura entre os passeios .....	54
Figura 47 – Pontos que sofreram alteração .....	55
Figura 48 - Ponto 1.....	56
Figura 49 – Detalhes dos pontos 2, 3 e 4.....	56
Figura 50 - Vista da maquete virtual.....	57
Figura 51 - Detalhe dos mastros, cabos e fundação .....	58
Figura 52 - Detalhe da membrana entre passeios sem e com a barra transversal ...	59
Figura 53 - Maquete física.....	60
Figura 54 - Trecho selecionado para criar padrões de corte .....	61
Figura 55 – Primeira versão das linhas de corte .....	62
Figura 56 – Faixas redesenhadas sobre a primeira superfície de papel .....	63
Figura 57 – Novas faixas definidas .....	63
Figura 58 – Resultado da padronização em papel.....	64
Figura 59 - Maquete física com o novo tecido.....	65

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>13</b>
2.1 No Mundo.....	13
2.2 No Brasil.....	27
2.3 Passos do Projeto de uma Tensoestrutura.....	33
2.3.1 Busca da Forma .....	35
2.3.2 Padronagem.....	36
2.3.3 Análise da Resposta aos Carregamentos .....	39
2.3.4 Material.....	41
2.3.5 Montagem .....	44
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>45</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1 Projeto da tensoestrutura.....	47
4.2 Projeto da maquete .....	56
4.3 Padronização .....	60
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As tensoestruturas são estruturas constituídas por membranas e elementos lineares (cabos e mastros). Para que o conjunto forme uma estrutura e desempenhe sua função, é necessário o retesamento da membrana e dos cabos, gerando assim um estado de solicitações internas responsável pela forma e estabilidade da estrutura. Essas estruturas dependem basicamente da rigidez geométrica para a sua estabilização, ou seja, há uma ligação direta entre a forma geométrica e o estado de solicitações (PAULETTI, 2003).

As tensoestruturas também são conhecidas por estruturas retesadas ou estruturas tensionadas. Segundo Pauletti (2003) o termo tensoestrutura, já bastante utilizado no campo das coberturas de cabos e membranas, foi uma tradução para o português que gerou uma série de ambiguidades, pois o termo *tension*, em inglês significa estado de tensões de tração, já em português tensão, abrange todos os estados de solicitações internas da estrutura. Desse modo os termos “estruturas tensionadas” e “tensoestruturas” tornam-se inadequados para a nomenclatura dessas estruturas. No entanto, considerando que o termo tensoestrutura é bem consagrado no Brasil, preferiu-se mantê-lo neste texto, concomitantemente com o termo estruturas retesadas.

A maioria dessas estruturas é utilizada em estádios, pavilhões, terminais rodoviários e aeroportos, em forma de cobertura. No decorrer do trabalho será apresentado e ilustrado onde se encontram essas estruturas.

As tensoestruturas, começaram a surgir já na antiguidade com as tendas que serviam como abrigos para os nômades. Na sua fase mais moderna, começaram na segunda metade do século XX. A tecnologia dessas estruturas ainda está em desenvolvimento, e se encontra num estágio avançado com ferramentas computacionais desenvolvidas para automatização do projeto. No Brasil, essas estruturas ainda são pouco estudadas e empregadas, talvez pelo escasso conhecimento disponível, pela falta de normas técnicas e por questões culturais (PASQUAL, 2011).

Neste contexto surgiu o interesse do estudo das tensoestruturas, que proporcionam ao engenheiro a possibilidade de experimentar e explorar a leveza e a estética dessas estruturas, visando uma aplicação regional. Desse modo, pensou-se em solucionar o problema da falta de cobertura dos passeios que interligam os prédios da UNIPAMPA Campus Alegrete. Estes passeios se encontram sem

proteção, dificultando o acesso entre os prédios em dias de chuva e, noutros dias, deixando expostas ao sol as pessoas que por ali transitam. Este trabalho apresenta um projeto em tensoestrutura com o objetivo de resolver, pelo menos em parte, o problema exposto. Além do fator funcional, essa estrutura vai trazer para Alegrete uma nova proposta de estrutura moderna, até então desconhecida por muitos em nossa região. Com isso, esse trabalho tem, também, como objetivo divulgar estas estruturas em nossa universidade. De forma mais específica, primeiramente, pretende-se elaborar uma proposta arquitetônica, descrever o detalhamento necessário para o projeto e por fim construir uma maquete física.

Com isso, foram estabelecidas algumas etapas de trabalho para que sejam alcançados os objetivos. Primeiramente no capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica, onde consta a história e a evolução dessas estruturas no mundo e no Brasil. Abordam-se ainda os procedimentos de projeto de tensoestruturas, que consistem, em um primeiro momento, na busca da forma, a padronagem, a análise da resposta aos carregamentos, a especificação dos materiais empregados e, por fim, a montagem.

No capítulo 3 é descrita a metodologia do trabalho. Nela são definidos quais dos passos do projeto de tensoestrutura serão seguidos, delimitando o escopo do trabalho.

Os resultados deste trabalho são apresentados no capítulo 4, sendo que são de fato um projeto arquitetônico para a cobertura dos passeios da UNIPAMPA Campus Alegrete e a construção de uma maquete física. Parte desta maquete foi feita com tecido tule e outra parte, usando outro tipo de tecido, construída a partir da definição dos padrões de corte.

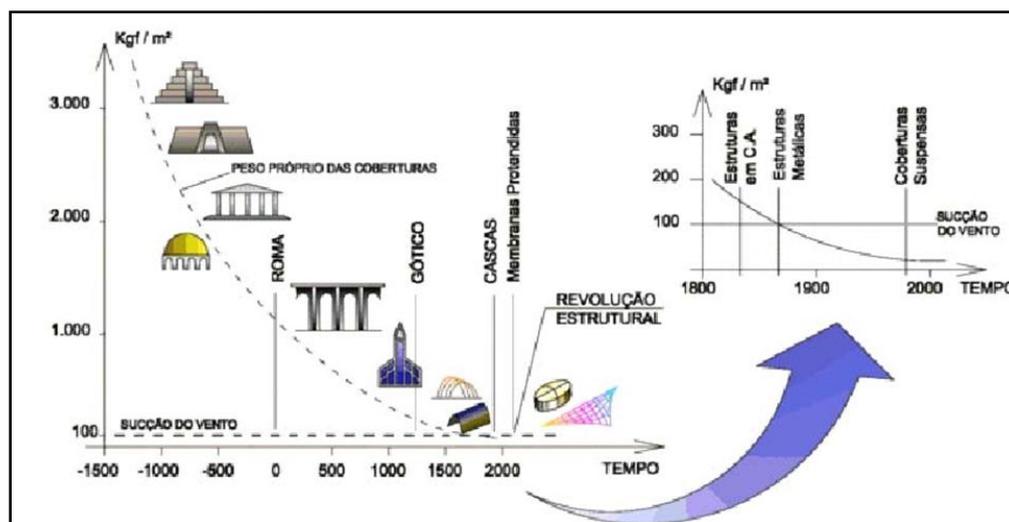
E por fim no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais deste trabalho, onde é descrito aspectos que foram relevantes para a realização deste projeto e sugestões para continuidade.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

As tensoestruturas são estruturas que para funcionar a contento, ou até mesmo existirem como estruturas, e não apenas como um conjunto de elementos estruturais, necessitam de um estado de solicitações internas de modo a dar-lhe rigidez (geométrica). Este estado de solicitações é garantido por retesamento do conjunto. Neste tipo de estruturas a grande maioria dos elementos lineares é tracionado e os elementos de superfície são retesados (PAULETTI, 2003).

Essas estruturas se destacam por serem capazes de vencer grandes vãos com menor peso, tem alta resistência, grande potencial estético, facilidade na montagem, transporte e rapidez de construção (SILVA, 2006). Cabe lembrar que construir com menor peso por área é um desejo do homem desde a antiguidade, como ilustrado na Figura 1. Assim, pode-se dizer que as tensoestruturas constituem um sistema estrutural moderno.

Figura 1 - Evolução do Peso das Estruturas



Fonte: Pauletti, (2004)

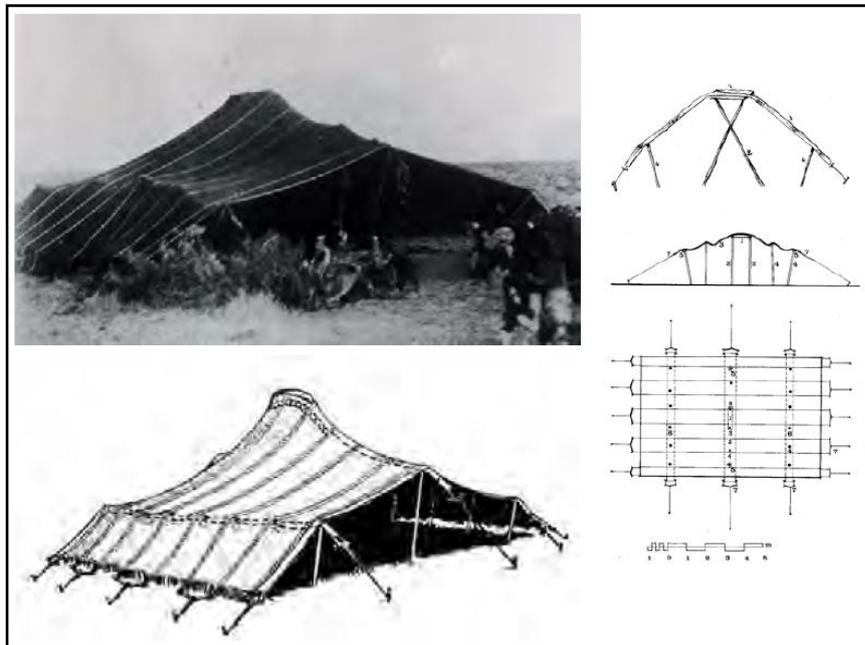
A seguir é apresentado, de forma compacta, um histórico do desenvolvimento destas estruturas.

### 2.1 No Mundo

Pode-se dizer que estruturas retesadas vêm sendo utilizadas pelo homem desde o início da sua evolução, quando este usava peles e ossos de animais para construir suas tendas. Há evidências da utilização de ossos de mamute há mais de 40.000 anos na Ucrânia (SHAEFFER, 1994 *apud* PAULETTI, 2003).

Segundo Pauletti (2003), as tendas eram utilizadas praticamente por todos os povos nômades. Uma tenda que se assemelha, pela forma e funcionamento estrutural, com a do século XX, foi à tenda negra do Oriente Médio, ilustrada na Figura 2, devido sua forma protendida que a tornava rígida na cobertura. A transformação da forma armada para a protendida foi possível devido à substituição das peles por pêlos de cabra ou dromedário, que permitiam ser tracionados devido à sua resistência.

Figura 2 – Tenda Negra do Oriente Médio



Fonte: Pauletti, (2003, p. 9)

Mas as primeiras estruturas retesadas, na sua essência, só foram possíveis de serem construídas após a invenção do laço e da tecelagem. Alguns exemplos são as tendas de tecido, as redes de pesca e as velas (PAULETTI, 2003).

Outras utilizações das tendas eram nas culturas urbanas “[...] em atividades transitórias ou móveis, como as campanhas militares, os circos, as festas campestres” (PAULETTI, 2003, p. 8). Os primeiros registros iconográficos, aparecem a partir do século XIV, como mostrado na Figura 3, são fragmentos dos assírios e egípcios (cerca 300 a.C). Os exércitos persas também utilizavam tendas luxuosas nas suas guerras contra os gregos, que começaram a usá-las na sua cultura e posteriormente passadas para os povos romanos que construíram suas tendas com formato cilindro-cônicas, onde ficava suspensa por apenas uma haste central. Após, surgiu o papilio (borboleta) que eram tendas militares com planta retangular,

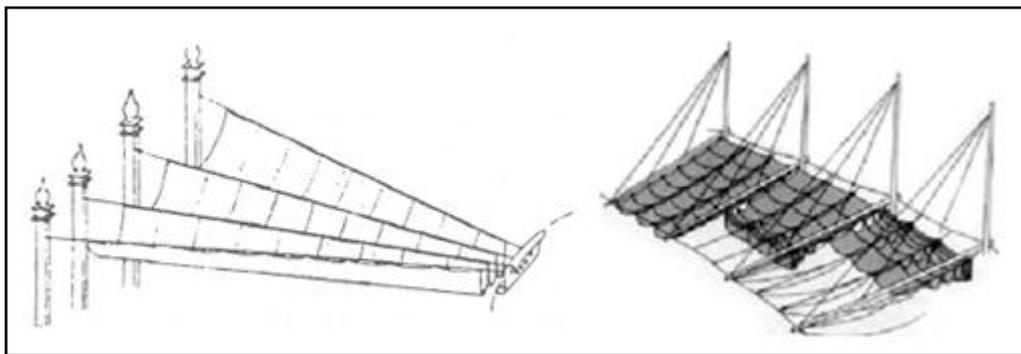
formadas por peças retangulares de couro de bezerro costuradas. Outra estrutura construída pelos romanos foi a velaria (Figura 4), cobertura de linho, utilizada para espaços e eventos públicos (PAULETTI, 2003).

Figura 3 – Um dos primeiros registros iconográficos



Fonte: Otto; Jota *apud* (NUNES, 2008, p. 9)

Figura 4 - Velaria



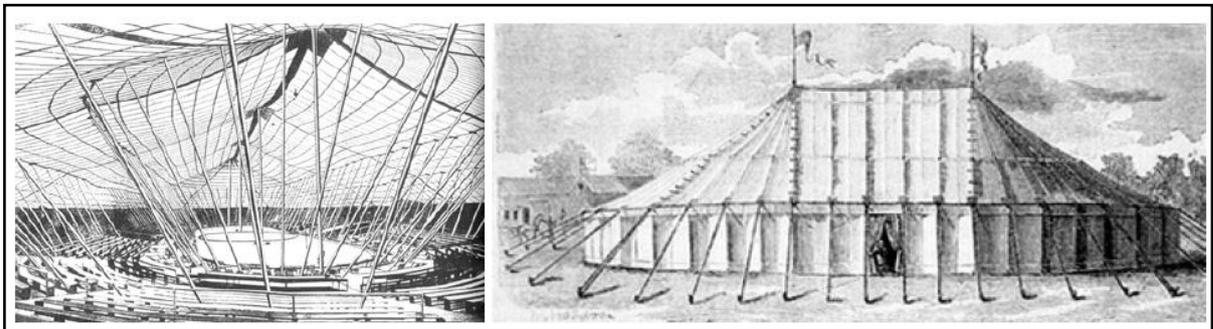
Fonte: Otto; Jota *apud* (NUNES, 2008, p. 9)

Segundo Nunes (2008), um dos objetos usuais em nosso cotidiano de proteção contra chuva e sol – o guarda chuva – é usado na Ásia, desde 500 a.C. “Quando aberto para resistir às cargas de vento e chuva, as nervuras de aço são apoiadas nos elementos de compressão conectados à haste metálica e a superfície da membrana é submetida a tração” (NUNES, 2008, p.9).

As tendas se desenvolveram muito pouco desde os romanos até o final do século XVIII (NUNES, 2008). Foi no século XIX, nos Estados Unidos, que surgiram os primeiros circos modernos, como forma de entretenimento a população urbana. Com a expansão das ferrovias (a partir de 1860) os circos começaram a viajar e tornou-se muito importante a utilização dos pavilhões de lona pela facilidade de montar e desmontar a cada apresentação nas cidades (FORSTER, 1994 *apud* PAULETTI, 2003).

Com essa necessidade de se apresentarem em outras cidades, surgiu à primeira tenda desmontável, o Chapiteu, mostrada na Figura 5. Essa tenda tinha 50 m de diâmetro, que podia ser feita de lonas de linho ou cânhamo. Essa cobertura era suportada por mastros verticais centrais, intermediários (que ficavam inclinados a 60° em relação ao solo, gerando uma tensão no tecido) e periféricos. Os artesãos, com o passar do tempo, foram desenvolvendo uma técnica para o corte, juntas e montagens, para que a estrutura mantivesse a forma desejável (SCHAEFFER, 1994 *apud* PAULETTI, 2003).

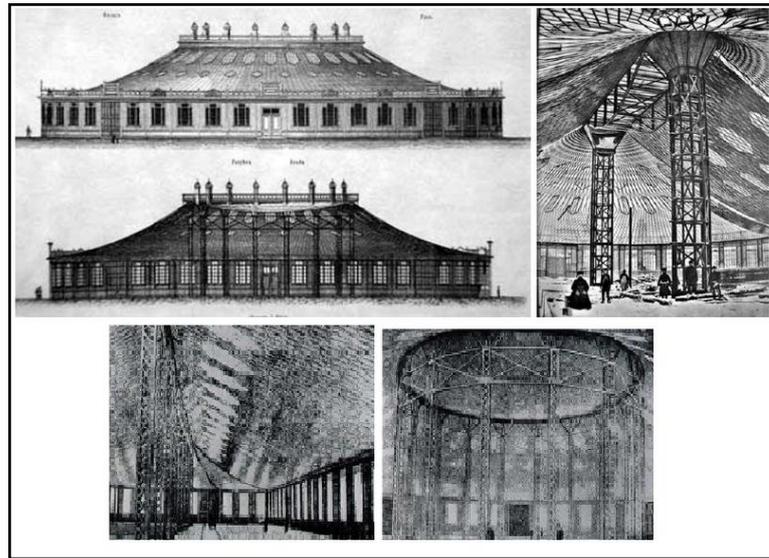
Figura 5 - Tenda de circo Chapiteu



Fonte: Forster *apud* (NUNES, 2008, p.10)

O que deu início às idéias de aplicações modernas das coberturas suspensas foi a apresentação de quatro tendas de aço de Shukhov na exibição Pan-Russa de Nizhny Novgorod (Figura 7), Rússia em 1896. Essas tendas eram constituídas de cobertura suspensa, onde existiam redes flexíveis feitas com fitas metálicas, cobertas por finas chapas metálicas, que formavam superfícies anticlásticas, não retesadas (DREW, 1979 *apud* PAULETTI, 2003).

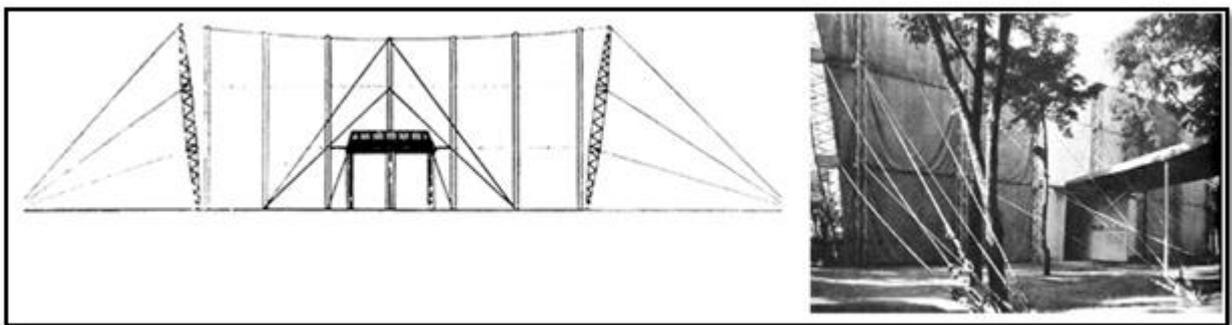
Figura 6 - Tenda de aço da Exposição Pan-Russa



Fonte: Drew, *apud* (PAULETTI, 2003, p. 13); Nunes (2008, p.11)

Após o surgimento da tenda de aço, o arquiteto Le Corbusier criou o Pavilhão dos Tempe Nouveaux na World Fair em Paris 1937 como um grande pavilhão móvel, conforme detalhes mostrados na Figura 6. Usando de técnicas de construção do passado, como as tendas dos povos nômades, e as construções de aço da época, tentou mostrar o quanto é possível adaptar, flexibilizar e melhorar a qualidade dessas construções com o tempo (NUNES, 2008).

Figura 7 - Pavilhão Temps Nouveaux, World Fair, Paris



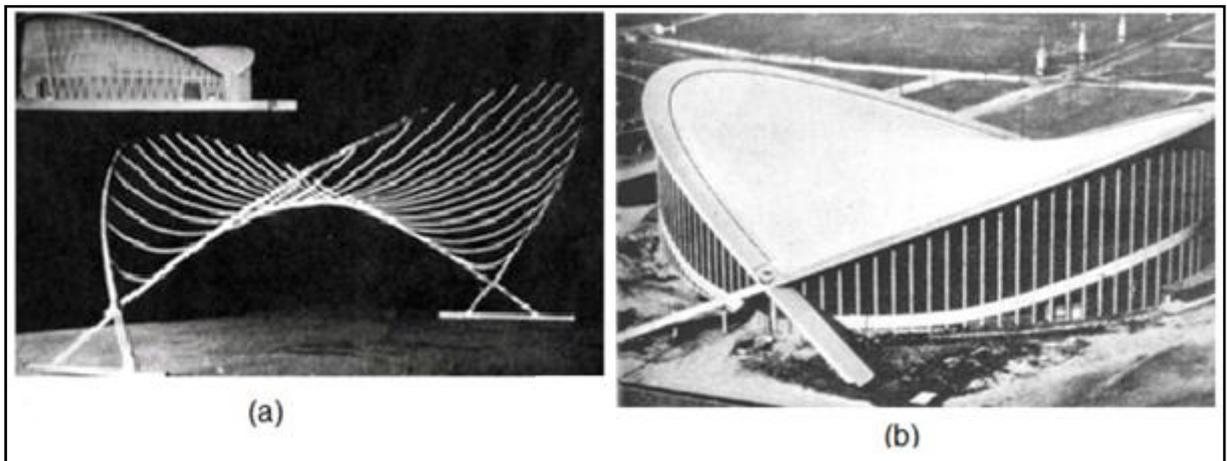
Fonte: Kock *apud* (NUNES, 2008, p.12)

Mas foi em 1952, que surgiu de fato as estruturas retesadas, na forma moderna, com a Arena de Raleigh na Carolina do Norte, Estados Unidos, projetada pelo arquiteto Matthew Nowicki, mostrada na Figura 8b. A cobertura em formato de sela com um vão de 95 m, era suportada por cabos paralelos catenários com

variação de flechas formando assim um parabolóide e também por cabos normais ao sistema com a função de reforçar a curvatura gerada, conforme Figura 8a (PAULETTI, 2003).

Com a morte de Nowicki em 1950, os projetistas Fred Severud e W.H. Deitrick, que prosseguiram com o projeto, trocaram os cabos catenários por uma rede de cabos uniformes esticada entre os dois arcos parabólicos inclinados, estes arcos eram suportados por pilares esbeltos (PAULETTI, 2003).

Figura 8 - Arena de Raleigh



Fonte: Otto *apud* (NUNES, 2008, p.12); Google Imagens, (2013)

Uma obra importante, provavelmente a primeira bem sucedida, é a concha acústica de Melbourne, na Austrália, 1958, que foi amplamente divulgada por Frei Otto. A estrutura, como mostrado na Figura 9, era composta por uma rede de cabos anticlástica de borda livre. Outras estruturas também vieram em seguida, como o Estádio de Hockey da Universidade Yale (Figura 10) – Estados Unidos da América, em 1958 – que inseriu um arco central comprimido, e os estádios de Kenzo Tange (Figura 11) – em 1994 – construídos para as Olimpíadas de Tóquio de 1966. Neste caso, a cobertura do estádio era suportada por cabos principais catenários (SALVADORI, 2006).

Figura 9 - Concha acústica de Melbourne



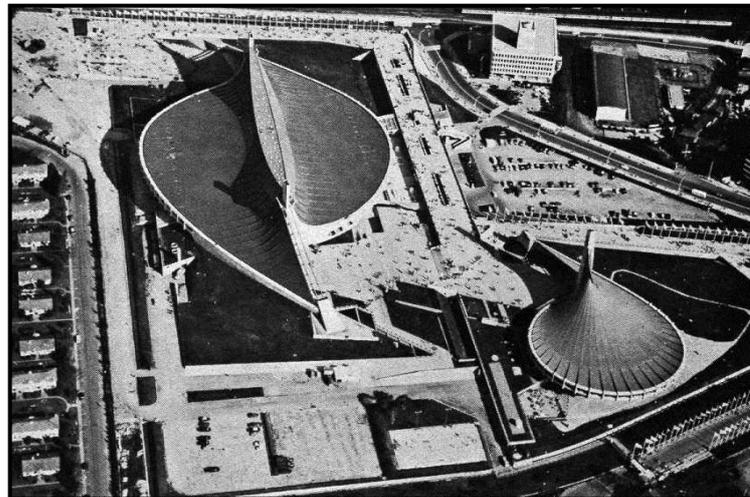
Fonte: Drew *apud* (PAULETTI, 2003, p. 16)

Figura 10 - Estádio de Hockey de Yale



Fonte: Google Imagens, (2013)

Figura 11 - Estádios das Olimpíadas de Tóquio - Kenzo Tange

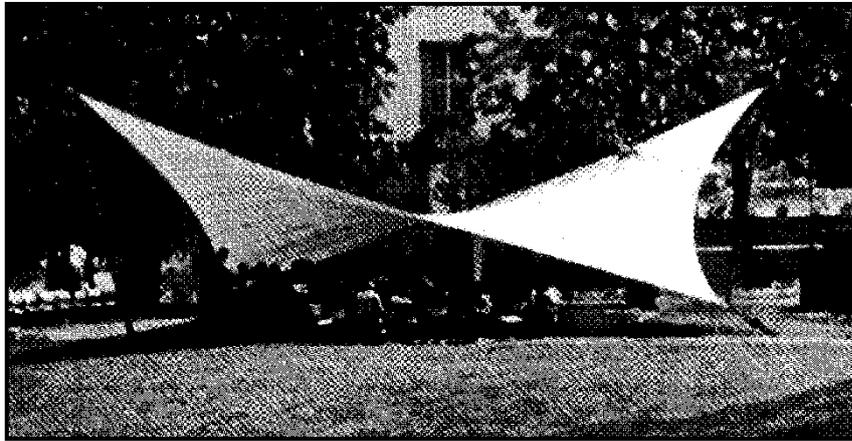


Fonte: Tange *apud* (PAULETTI, 2003, p.17)

O que marcou a evolução das estruturas retesadas supracitadas foi o Pavilhão de Música em Kassel, 1955, mostrada na Figura 12. Era um pavilhão feito de lona e cabos que podia ser transportado, e montado em outros locais, servindo na época em feiras e exposições na Europa (PAULETTI, 2003).

Mas para chegar até o projeto final, foram feitos vários modelos com diferentes materiais, primeiramente com correntes e cabos tracionados, em seguida membranas elásticas, malhas de filó e filmes de sabão (PAULETTI, 2003), também em algumas ocasiões utilizou de moldes sólidos possibilitando o estudo dos cortes e da planificação das superfícies (NUNES, 2008).

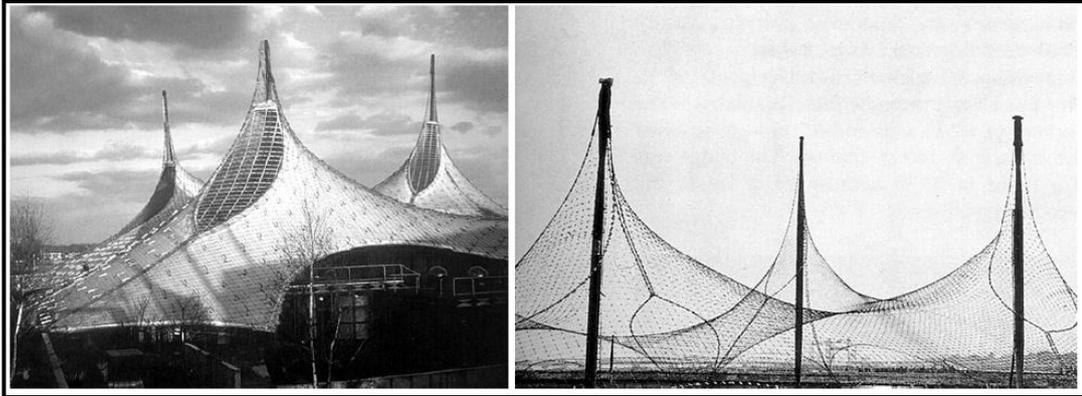
Figura 12 - Pavilhão de Música em Kassel



Fonte: Vandenberg *apud* (PAULETTI, 2003, p.18)

No entanto, a estrutura não se comportou com muito sucesso, devido à membrana ficar enrugada, mas o efeito serviu de estímulo para o projeto de cobertura para o Pavilhão Alemão da EXPO67 de Montreal (Figura 13), em 1967 (PAULETTI, 2003). “Foi esta obra que, no entender de DREW [1979], marcou a consolidação da moderna “tensoarquitetura”, na forma das superfícies anticlásticas retesadas” (PAULETTI, 2003, p.18).

Figura 13 - Pavilhão Alemão, em Montreal



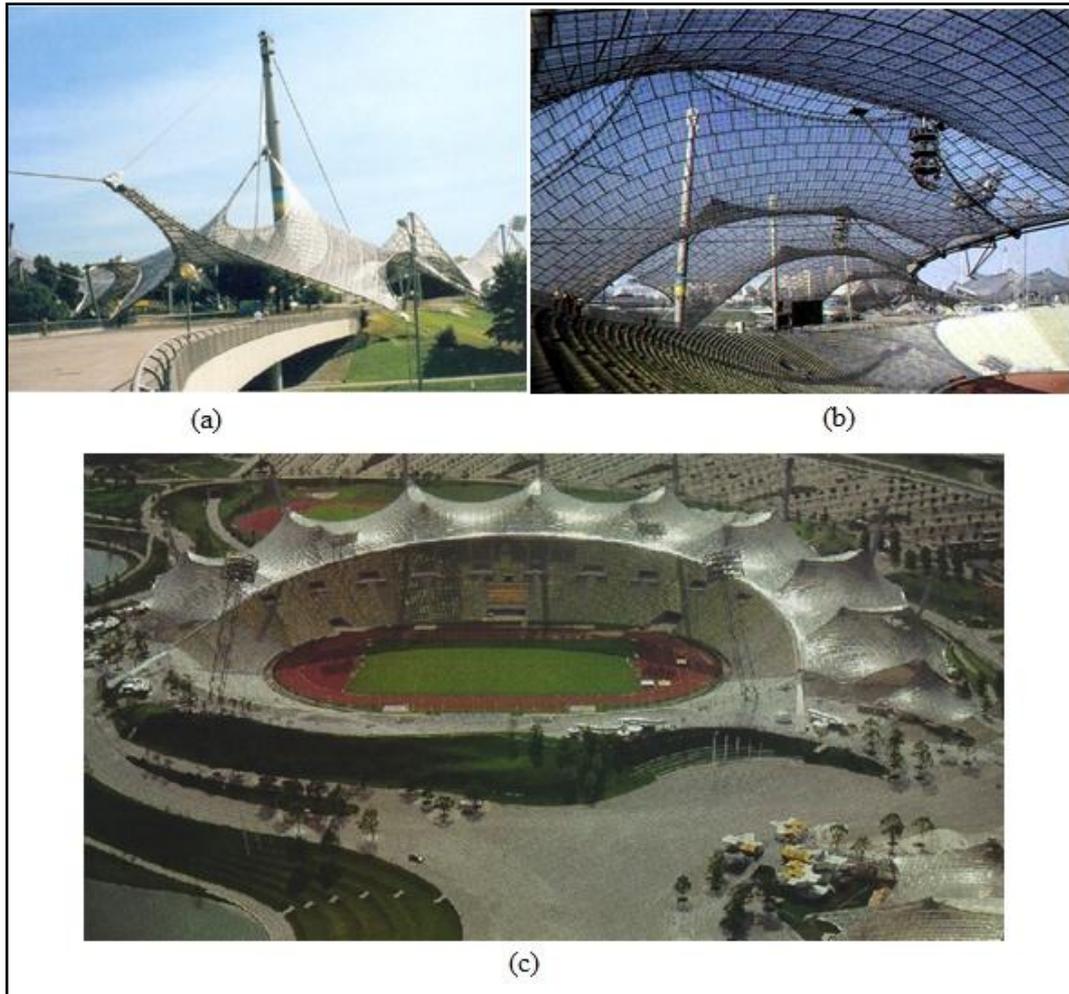
Fonte: Kock; Eekhout *apud* (NUNES, 2008, p.19)

A cobertura em rede de cabos (revestida em membrana de *polyester* cobertura coberta por PVC) é suspensa por mastros com variação de altura e inclinação sobre uma planta irregular. As aberturas – *eye loops* – na superfície da rede interceptam e transmitem aos cabos as forças concentradas do topo dos mastros (NUNES, 2008, p.18, grifo do autor).

Segundo Addis (1994), durante este projeto Otto, escolheu um novo método, onde a geometria e os cortes eram determinados antes para o desenvolvimento dos modelos protótipos. Para resolver o problema de como escalar as tensões e deformações, ele recorreu há vários testes, começando com estruturas de pequenos vãos, e aumentando os vãos aos poucos (PAULETTI, 2003).

Outra obra que se destaca como sendo “[...] a maior e mais permanente das estruturas projetadas por Otto” (DREW, 1979 *apud* PAULETTI, 2003, p.19) foi à cobertura do Estádio Olímpico de Munique na Alemanha, 1972 (Figura 14). O detalhe da coluna de sustentação é mostrado na Figura 14a, sendo que a Figura 14b retrata uma vista interna e na Figura 14c uma externa. Para que o projeto adquirisse essa forma, foram elaborados modelos pequenos de arame e tecidos elásticos, mas ainda surgia o problema de como determinar o retesamento dos cabos, quando surgiu pela primeira vez na história a substituição de protótipos físicos por protótipos virtuais, possibilitando chegar ao comportamento e a capacidade da estrutura (NUNES, 2008).

Figura 14 - Estádio Olímpico de Munique



Fonte: Kock *apud* (NUNES, 2008, p. 19); Foster *apud* (PAULETTI, 2003, p.20); Newhouse *apud* (PAULETTI, 2003, p.20)

Com a divulgação das obras de Otto, através de congressos internacionais, houve um interesse a mais nessas estruturas, e surgiram, a partir disso, coberturas de espaços maiores como pavilhões de exposições, igrejas e estádios desportivos (PAULETTI, 2003).

Um dos arquitetos que deu continuidade a essas obras foi o italiano Massimo Majowiecki, com o projeto da cobertura de Piazzale Roma, mostrada na Figura 15, projetada para a Grande Feira de Milão em 1986. A membrana que revestia a cobertura era de poliéster, e através de uma estrutura de cabos suspensos que sustentavam cabos de cumeeira da membrana, foi possível vencer um vão livre de 120 m (PAULETTI, 2003).

Figura 15 - Cobertura da Piazzale Roma, Milão



Fonte: Majowiecki *apud* (PAULETTI, 2003, p.21)

Majowiecki também é responsável por outras obras significativas, como as coberturas dos Estádios de Turim e Roma (Figura 16 e Figura 17, respectivamente) construídos para a Copa do Mundo da Itália em 1990. Nos estádios utilizaram-se como técnica de construção variações de treliças de cabos, tracionados na parte interna da cobertura por cabos de borda. No estádio de Turim as treliças de cabos eram firmadas em cavaletes estaiados que se encontram na parte externa da cobertura e seu revestimento era com chapas metálicas corrugadas. Já no estádio de Roma as treliças de cabos eram ligadas externamente a uma treliça espacial anular, formando módulos piramidais, e seu revestimento era uma membrana de Teflon reforçado com fibra de vidro (PAULETTI, 2003).

Figura 16 - Estádio de Turim



Fonte: Majowiecki *apud* (PAULETTI, 2003, p.21)

Figura 17 - Estádio Olímpico de Roma, 1990



Fonte: Google Imagens, (2013)

Outras construções que ficaram marcadas pelo emprego de estruturas retesadas foram construídas para a EXPO92. Dentre elas as coberturas dos portões que davam acesso ao espaço da feira: a Diadema e a Oleada. Mas se tratando em estruturas de membranas a que se enquadra melhor é a cobertura do portão Oleada. Esta membrana era mais retesada, reforçada por cabos que tinham como função sustentar os arcos tubulares centrais da estrutura como mostra na Figura 18 (BARNES, 1994 *apud* PAULETTI, 2003).

Figura 18 - Portão de acesso a EXPO92 - Oleada



Fonte: Forster *apud* (PAULETTI, 2003, p. 24)

Atualmente a maior cobertura em membranas é na Arábia Saudita. Trata-se do Terminal de Passageiros de Jeddah (Figura 19), 1981, que consiste de módulos de base quadrada de lado 45 m e altura média dos mastros de 45,75 m, formando um conjunto de 210 coberturas quase cônicas, que cobre aproximadamente 470.000

m<sup>2</sup>. A responsabilidade pelo projeto era da firma Skidmore-Owings-Merril, tendo como consultor Horst Berger (GUIRARD, 2006 *apud* MARTINS, 2008).

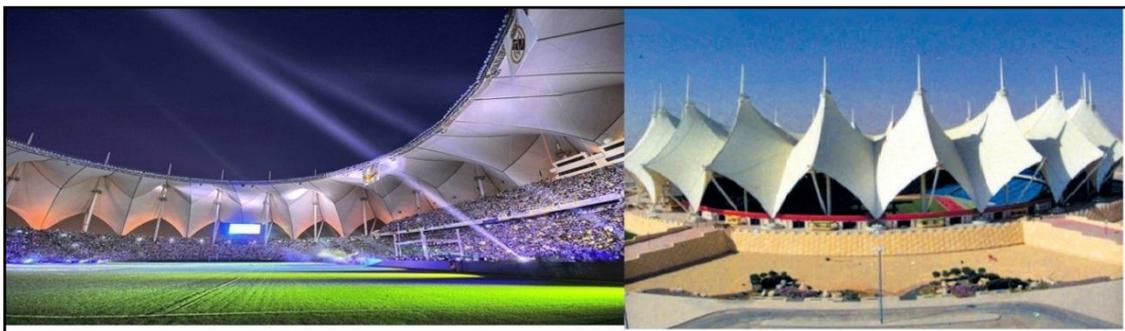
Figura 19 - Terminal de Passageiros de Jeddah, Arábia Saudita



Fonte: Google Imagens, (2013)

Uma obra que também merece ser destacada é o Estádio Rei Fahd, mostrada na Figura 20, na Arábia Saudita, construído entre 1983 e 1986. É formado por 24 módulos, cada um com um mastro central, cuja altura é de 58 m, e um mastro secundário, todos equilibrados por um anel central e por 24 pontos de ancoragem no solo. Os mastros centrais são responsáveis pelo suporte da cobertura, equilibrando apenas componentes verticais da força, enquanto que o anel central de suporta apenas forças de tração (JOTA, 2007 *apud* MARTINS, 2008).

Figura 20 - Estádio Rei Fahd, Arábia Saudita



Fonte: Google Imagens, (2013)

Outra obra mais recente é a cobertura de membrana do Aeroporto de Denver (Figura 21), na cidade de Colorado, EUA, finalizada em 1993, totalizando uma área de 40.000 m<sup>2</sup>. Esta cobertura é composta por duas camadas de fibra de vidro recobertas com Teflon, espaçadas de 60 cm, para melhorar o isolamento térmico e acústico (PAULETTI, 2003).

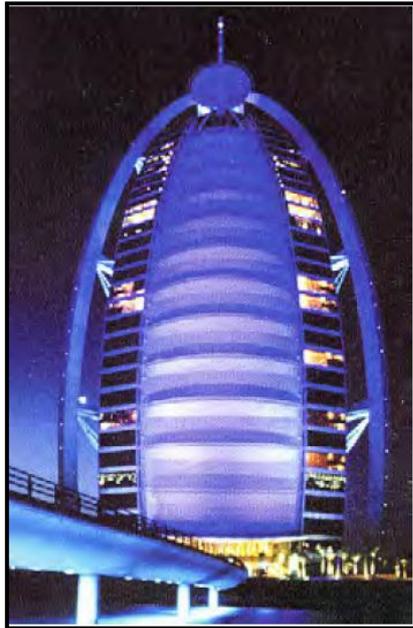
Figura 21 - Aeroporto de Denver, Colorado, EUA



Fonte: Martins, (2008, p.8)

A membrana também tem flexibilidade na sua utilização. Um dos exemplos é o Hotel Burj Al Arab, em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, mostrado na Figura 22, onde a membrana foi utilizada como revestimento de paredes. A membrana feita de fibra de vidro recoberta com Teflon é retesada por arcos metálicos treliçados, dispostos em planos horizontais, com vão de até 50 m (PAULETTI, 2003).

Figura 22 - Hotel Burj Al Arab, em Dubai, nos Emirados Árabes

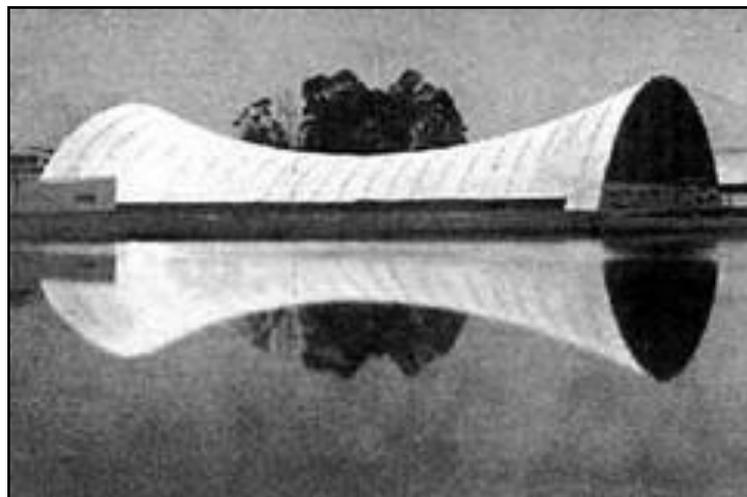


Fonte: Bsj, 2000 *apud* (PAULETTI, 2003, p.25)

## 2.2 No Brasil

No Brasil as estruturas retesadas surgiram em 1954 com o Pavilhão do Rio Grande do Sul (Figura 23), em São Paulo, e o Pavilhão de São Cristóvão (Figura 24), no Rio de Janeiro em 1960. O Pavilhão do Rio Grande do Sul foi projetado por Borges Alliana (DREW, 1979; FORSTER, 1994 *apud* PAULETTI, 2003) enquanto que Pavilhão de São Cristóvão pelos projetistas Sérgio Bernades e Paulo Fragoso (MARTINELLI, 1960 *apud* PAULETTI, 2003).

Figura 23 - Pavilhão do Rio Grande do Sul



Fonte: Google Imagens, (2013)

Figura 24 - Pavilhão São Cristóvão



Fonte: Google Imagens, (2013)

Em nosso país, a ocorrência de estruturas retesadas ainda é relativamente pequena. Em 2002, foi construída a cobertura da Igreja Batista Central de Fortaleza, mostrada na Figura 25, criada para cobrir um teatro aberto já existente. Esta estrutura foi projetada por Nasser Issa Arquitetos Associados e executada por Formato Coberturas Especiais Ltda. O cálculo estrutural desta membrana foi feito pelo Professor Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti, sendo esta a primeira vez que se fez no Brasil a modelagem numérica de uma estrutura em membrana (PORTAL METALICA, 2013a). A estrutura representa um recorde nacional para as estruturas de membranas com bordas flexíveis, pois a cobertura que tem dupla curvatura assimétrica possui área de 2.900 m<sup>2</sup>, sendo 70 m de comprimento e 50 m de largura, sustentada por dois mastros de 20 m de altura. (PAULETTI; BRASIL; ALVIM, 2004).

Figura 25 - Igreja Batista de Fortaleza



Fonte: Pauletti, Brasil e Alvim, (2004)

Outro projeto no Brasil foi o anfiteatro do Memorial dos Povos de Belém do Pará, 2005, utilizado para atividades culturais e de laser. Esta estrutura foi projetada por arquiteto José de Andrade Rayol e executada por Tecno Staff Engenharia e Estruturas Ltda. O cálculo estrutural desta membrana foi feito Professor Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti e o cálculo da estrutura metálica pelo Engenheiro Reyolando Brasil (PORTAL METALICA, 2013b). A cobertura é composta por uma membrana em forma de cela, com dois pontos altos em um plano de simetria vertical e quatro pontos baixos com mesma altura, como mostrado na Figura 26. A cobertura totaliza em 399 m<sup>2</sup>, com a projeção da mesma em 22,6 de largura e 28,6 de comprimento. (PAULETTI; BRASIL, 2005).

Figura 26 - Memorial dos Povos de Belém do Pará



Fonte: Pauletti e Brasil, (2005)

A evolução das construções não para e o uso das estruturas retesadas vem crescendo nos últimos tempos, com a construção dos estádios esportivos para sediarem as Copas Mundiais da FIFA e os Jogos Olímpicos. Estes estádios utilizam tanto a membrana como cobertura, como estrutura da vedação da fachada. Dentre os 22 estádios usados na Copa do Coréia do Sul e Japão, em 2002, e na Copa da Alemanha em 2006, 18 possuem a membrana como revestimento e estrutura (MARTINS, 2008).

No Brasil, o uso de estruturas retesadas também vêm crescendo. A seguir são citadas algumas obras no Brasil utilizando estas estruturas:

- cobertura das arquibancadas criada para o evento da Vila da Copa em São Paulo, 2006, o formato representa as Olas (ondas) feitas pelas torcidas nos estádios, a dimensão de cada “ola” é 13 m X 92,5 m com 21 m de altura, como mostra na Figura 27 (PORTAL METALICA, 2013c);
- cobertura da entrada principal para o Shopping Spazzio Desing em Juiz de Fora, Minas Gerais, tem uma área de coberta de 1000 m<sup>2</sup>, (
- Figura 28) (PORTAL METALICA, 2013d);
- cobertura do Mercado do Peixe em Angra dos Reis, Rio de Janeiro, cobre uma área de aproximadamente 500 m<sup>2</sup>, como mostra na Figura 29 (PORTAL METALICA, 2013e);

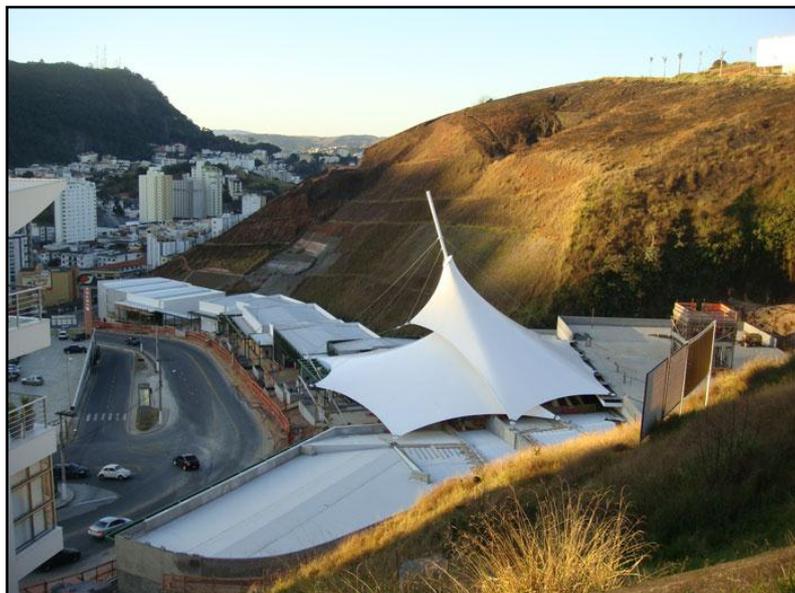
- cobertura para a Feira Ananindeua em Belém, Pará, com função de uma feira para comércio de frutas, peixes e artigos da região, totalizando uma área coberta de quase 3200 m<sup>2</sup>, (Figura 30) (PORTAL METALICA, 2013f);
- em São Bernardo do Campo, São Paulo também foi construída uma cobertura para o Parque dos Direitos da Criança e Adolescentes que terá aproximadamente 1200 m<sup>2</sup> de área coberta, como mostra na Figura 31 (PORTAL METALICA, 2013g).

Figura 27 - Arquibancadas criada para o evento da Vila da Copa



Fonte: Portal Metalica, (2013)

Figura 28 - Shopping Spazzio Desing



Fonte: Portal Metalica, (2013)

Figura 29 - Mercado do Peixe em Angra dos Reis



Fonte: Portal Metalica, (2013)

Figura 30 - Feira Ananindeua



Fonte: Portal Metalica, (2013)

Figura 31 - Parque dos Direitos da Criança e Adolescentes



Fonte: Portal Metalica, (2013)

Dentre os estádios que sediarão a Copa Mundial da FIFA no Brasil em 2014, alguns utilizam estruturas retesadas como cobertura ou como revestimento da fachada. Dos 12 estádios escolhidos 5 utilizam, de alguma forma, este tipo de estrutura: a Arena Amazônia em Manaus, Amazônia; Estádio Octávio Mangabeira (Fonte Nova) em Salvador, Bahia; Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha em Brasília, Distrito Federal; Estádio José Pinheiro Borda (Beira-Rio) em Porto Alegre, Rio Grande do Sul; e Estádio Jornalista Mário Filho (Maracanã) em Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

### **2.3 Passos do Projeto de uma Tensoestrutura**

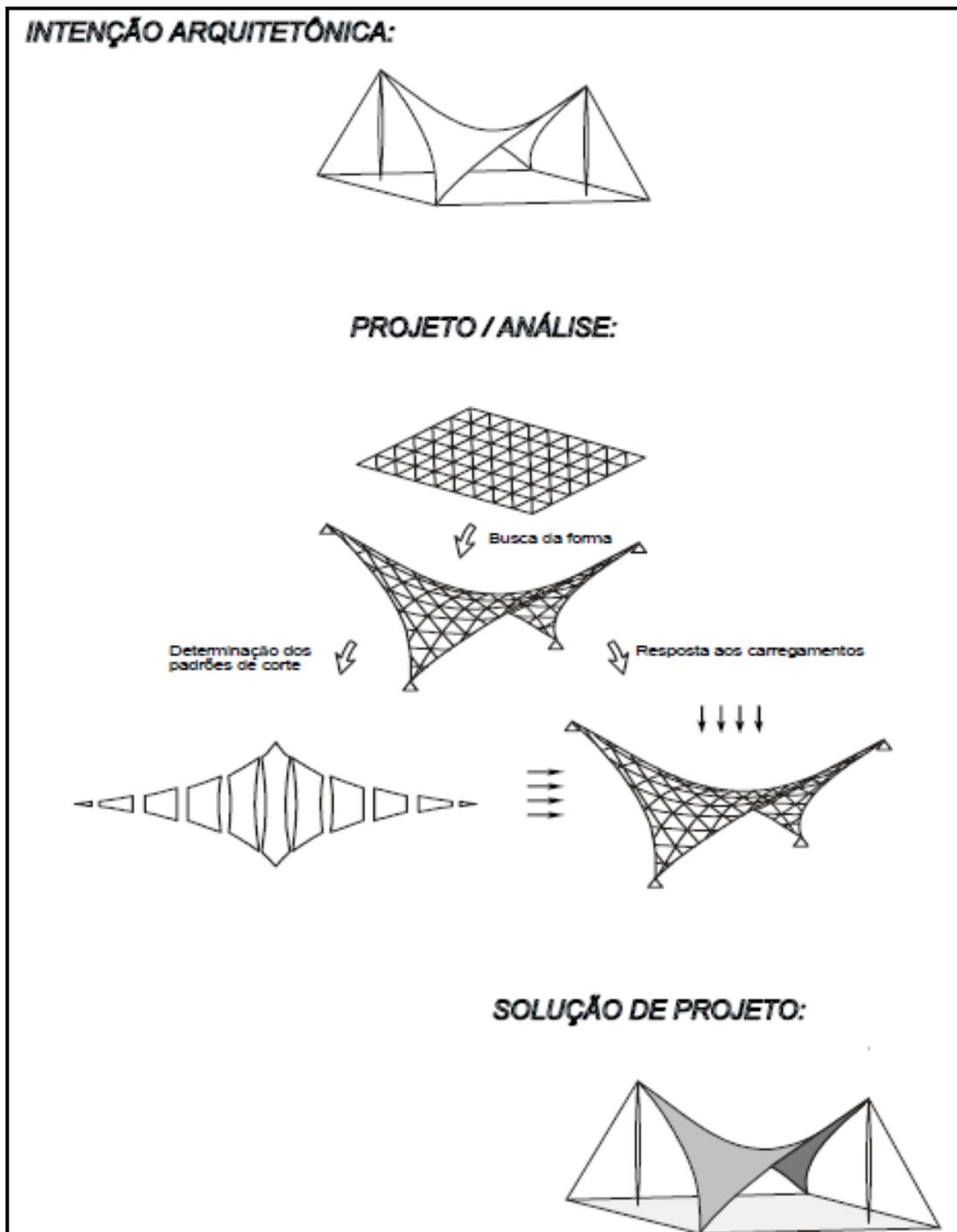
Como já mencionado, as tensoestruturas são leves, comparadas às estruturas em concreto armado e estruturas convencionais de aço. Por esse motivo, têm algumas desvantagens decorrentes da diminuição do peso, como os carregamentos devido à ação do vento na estrutura, tornando assim o projeto mais criterioso neste aspecto (PAULETTI, 2011).

Mas para que o sistema, mesmo sendo leve, desempenhe sua função, tanto estrutural como estética, precisa estar inter-relacionado com a sua forma e as forças

que atuam na estrutura, tornando assim a geometria e a pré-tensão dos componentes essenciais para a integridade da estrutura (NUNES, 2008).

Para que seja alcançada esta inter-relação, é importante que o desenvolvimento do projeto se dê segundo as fases ilustradas na Figura 32, quais são: busca da forma, a determinação dos padrões de corte e a análise das respostas aos carregamentos (PAULETTI, 2003).

Figura 32 - Fases do projeto de estruturas retesadas



Portanto, para desenvolver um bom projeto estrutural em tensoestruturas, mais do que em outros, é necessário que o projeto arquitetônico esteja em perfeita sintonia com os demais e que se tenha muito conhecimento dos princípios e dos parâmetros que envolvem o sistema.

### **2.3.1 Busca da Forma**

A busca da forma tem como principal objetivo, a busca geométrica para que se defina um estado de solicitações autoequilibradas. Deve-se assim garantir que a estrutura suporte os carregamentos, tanto no que diz respeito à resistência quanto a estabilidade, e ao mesmo tempo atenda aos requisitos arquitetônicos, tanto na forma como no uso (PAULLETI, 2011).

Segundo Pasqual (2011), o método da busca da forma pode ser tanto com modelos físicos ou analíticos. Os modelos físicos são obtidos a partir da construção da estrutura, em escala reduzida, para a qual podem ser utilizados vários materiais, indo de filmes de sabão até membranas de PVC.

Os modelos físicos também permitem que o projetista, a partir da visualização do modelo, monte um arranjo geométrico que pode passar informações valiosas sobre o comportamento estrutural (PASQUAL, 2011). Estes modelos tem uma grande importância em vários estágios do projeto de tensoestruturas, melhorando a comunicação entre as pessoas envolvidas com o projeto, bem como servir de verificação dos resultados computacionais (LEWIS, 1998 *apud* BORGES FILHO, 2006).

O pioneiro em buscar o auxílio de modelos físicos em escala reduzida para a construção de tensoestruturas foi Frei Otto, quando começou com a utilização dos filmes de sabão com espessura que variavam de 0,1 a 1 micron, mas devido sua transparência, o que dificultava a sua visualização, foram substituídos por membranas finas de borrachas ou materiais de costura, como o filó. Atualmente o material que vem sendo utilizado é a membrana em PVC, pela possibilidade de pintar sua superfície após a deformação, normalmente de branco, podendo também fazer marcas de linhas reticuladas espaçadas igualmente, a fim de criar um padrão de corte satisfatório auxiliando na determinação da geometria planificada da peça (PAULETTI, 2003).

Mas com o avanço tecnológico, surgiram os métodos numéricos para se obter a configuração inicial da forma. Alguns procedimentos utilizados nos métodos

numéricos são: superfícies minimais, tensões não-uniformes, deslocamentos incrementais, densidade de forças e relaxação dinâmica. Nas etapas que constituem os procedimentos vão surgir varias configurações geométricas equilibradas, até que se obtenha uma que condiga com a forma desejada. Cabe ao engenheiro escolher a que melhor se adapte às condições arquitetônicas, ambientais e econômicas (PASQUAL, 2011).

Segundo Silva (2006) a escolha da forma adequada pode trazer muitas vantagens, como a diminuição dos esforços na membrana, diminuição do esforço de retesamento e até a redução de material.

### 2.3.2 Padronagem

Após encontrada uma forma para a estrutura, será preciso definir os padrões de corte. Este procedimento compreende a identificação de linhas de corte sobre a superfície de equilíbrio inicial, podendo assim desdobrar toda a superfície e gerar um conjunto de peças de dupla curvatura, e por fim desenvolver um conjunto de peças planas para a sua fabricação. Esta é uma análise muito importante e fundamental para que não apareçam enrugamento e rasgos que comprometem a estrutura (PAULETTI, 2011).

Segundo Nunes (2008), o procedimento de corte não permite grandes alterações no local, devido às membranas estruturais serem totalmente pré-fabricadas e apenas montadas e retesadas no local da obra. As membranas são produzidas em larguras que variam entre 2 a 5 m e com forma planificada em painéis bidimensionais, que depois serão convertidas em um conjunto de peças planas que são unidas formando a geometria final retesada.

O processo deve levar em conta uma série de **restrições**: o tecido deve ser cortado a partir de rolos de largura relativamente pequena; por razões econômicas, é desejável que cada peça maximize o uso da largura disponível, sendo vantajoso o emprego de peças com lados retos; os comprimentos do contorno de peças adjacentes devem ser iguais; a distorção do tecido nas bordas da estrutura deve ser evitada; os tecidos usualmente empregados para a confecção de membranas são incapazes de suportar carregamentos prolongados de cisalhamento e o arranjo das peças deve ser tal que as direções das tensões principais coincidam na maior

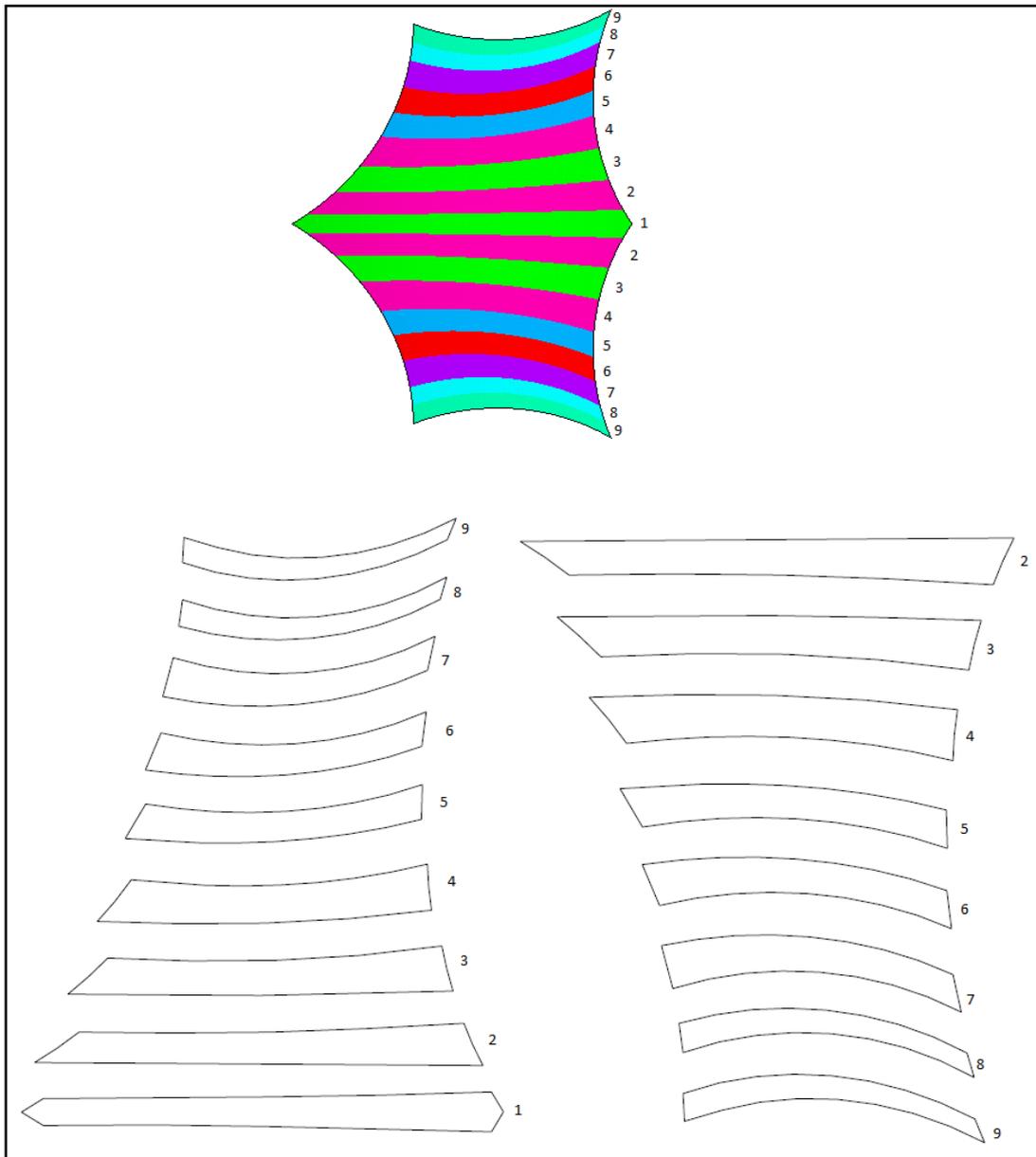
extensão possível com as direções da fiação (PAULETTI, 2003, p.181, grifo do autor).

Portanto, após levar em consideração as restrições e já se ter a configuração inicial da superfície da membrana, tem-se a primeira fase da definição do modelo de corte, em que a superfície tridimensional é dividida em pedaços. Estes pedaços são a determinação dos parâmetros de corte/emenda, em três dimensões. Na segunda fase, esses pedaços são convertidos em pedaços planos, onde a superfície tridimensional é transformada em superfície plana com os dados de corte/emenda, que serão necessários para a fabricação da estrutura (GALASKO et al., 1997; MOCRIEFF; TOPPING, 1990; WAKEFIELS, 1984 *apud* OLIVEIRA; BARBATO, 2005).

Lembrando que como as superfícies de dupla curvatura, típicas das tensoestruturas, não podem ser planificadas de forma exata, o processo de determinação dos padrões de corte é inevitavelmente aproximado. E os erros passam a ser inaceitáveis quando são responsáveis por aparecimento de rasgos e enrugamentos na estrutura (PAULETTI, 2003).

Moncrieff (1990) *apud* Pauletti (2003), diz que os padrões de corte começam pela identificação das linhas de corte, que de preferência sejam linhas geodésicas de curvatura nula, para que quando planificada as superfícies tornem-se retangulares, evitando o desperdício, como pode ser visto nas linhas comuns as faixas 1 e 2 na Figura 33.

Figura 33 - Modulação, corte e planificação da superfície espacial em faixas planas



Fonte: Pauletti; Brasil; Alvim, (2004)

As técnicas de determinação do padrão de corte para a modelagem física, segue alguns passos: primeiramente é determinado o arranjo geral das peças sobre a superfície da maquete, logo em seguida obtém-se uma descrição das peças planas que aproximam a geometria da membrana, utilizando-se de tiras de papel, tecido ou plástico que serão assentados sobre a maquete. Os tecidos devem ter baixos módulos de elasticidade, para que se evitem campos de tensões e conseqüentemente a formas diferentes daquela pretendida (OTTO, 1958, 1982 *apud* PASQUAL, 2011).

Segundo Dias Júnior (2006), há especificações estruturais e construtivas que merecem atenção, a primeira seria a largura das faixas que serão planejadas para a fabricação, pois necessita-se da máxima utilização da largura da membrana, a fim de se obter mais economia. Outra especificação em relação à economia são os lados retos das faixas, desse modo a obter um melhor enquadramento das linhas de corte nas membranas, evitando o desperdício, que se teria com cortes curvos.

Com o padrão de corte estabelecido, tem-se a junção dessas faixas. Essas emendas são feitas entre as faixas, por solda ou por cola, na fábrica ou *in loco*, e nos cabos de borda, por ganchos ou fivelas de alumínio. A junção entre as faixas é feita com a sobreposição de uma pequena largura da borda da faixa, essa largura varia entre 25 mm e 75 m. Para a colocação dos cabos de bordas, as emendas na sua maioria são feitas por ganchos e ou fivelas que permitem a passagem e a movimentação dos cabos de borda (OLIVEIRA, 2003).

### **2.3.3 Análise da Resposta aos Carregamentos**

Nesta etapa do projeto o objetivo principal é avaliar a distribuição de tensões e os deslocamentos para as combinações previstas de carregamentos, sendo que estas tensões não podem ultrapassar os limites de segurança da membrana e os deslocamentos devem atender os limites de projeto (BORGES FILHO, 2006).

Segundo Pauletti (2003), os carregamentos típicos de tensoestruturas englobam as cargas concentradas, o peso próprio e as demais cargas permanentes, a sobre ou sub-pressão uniforme, as cargas de neve e de vento, os terremotos e a variação da temperatura. Os carregamentos devido ao vento são os mais problemáticos para essas estruturas, tanto pela sua severidade como pela complexidade dos fenômenos envolvidos, bem como da interação vento-estrutura. Por outro lado a variação de temperatura induz o aumento ou diminuição da protensão.

Pauletti (2011) ressalta que a falta de rigidez à flexão dos cabos e das membranas leva as estruturas a se adaptarem aos carregamentos, sofrendo grandes deflexões. Sendo que a configuração da membrana, também pode influenciar nas ações (TABARROK; QIN, (1992) *apud* OLIVEIRA; BARBATO, 2005).

A resposta de uma tensoestrutura aos carregamentos de projeto se dá em torno de uma configuração de equilíbrio inicial, na qual a estrutura se encontra

enrijecida pelo efeito dos carregamentos permanentes, que são basicamente, cargas de peso próprio e de retesamento (PAULETTI, 2011).

A contribuição do peso próprio, que é um carregamento intrínseco, pode ser em geral desprezível para o campo de tensões iniciais, já o retesamento da membrana é um carregamento essencial, uma vez que proporciona forma e rigidez (PASQUAL, 2011).

Para o projeto de tensoestrutura os coeficientes de segurança são considerados altos em relação a outros tipos de estrutura, conseqüentemente minorando a tensão atuante no material (PAULETTI, 2003). As razões para adoção de coeficientes altos são diversas. Em primeiro lugar tem-se o vento, por ser um carregamento aleatório, sendo as características conhecidas somente de forma estatística, tendo grande margem de incerteza. Outro fator são as tensões de rupturas serem em geral determinadas por ensaios uniaxiais de tiras de tecido novo, limpo e seco, sendo que em ensaios biaxiais o mesmo material pode exibir tensões de estruturas de ruptura duas vezes maior (LEWIS, 1998 *apud* PASQUAL, 2011).

Para alcançar o retesamento de uma membrana, existem dois meios ideais, um por imposição de forças, outro por deslocamentos. A imposição ideal de uma força pode ser obtida utilizando-se de um peso suspenso ou por meio de um sistema hidráulico ideal. Já para a imposição ideal do deslocamento, poderia ser obtida por meio da expansão ou encurtamento, de um dispositivo mecânico infinito rígido e de potência ilimitada. Na prática, todas as formas de retesamento impõem condições mistas de força e deslocamento, podendo, porém, ser suficientemente próximos a uma das duas condições ideais para serem tomados como tal (PAULETTI, 2003). Uma forma de impor o retesamento em membranas é através de cabos de bordas.

Com isso, o retesamento de uma membrana independe da maneira como é feito, mas o processo requer sempre a imposição de deslocamentos, pelo menos em parte do contorno. Mas imposição do deslocamento não vai garantir tensionamento permanente, que acaba por relaxar ao longo do tempo. Portanto, de tempos em tempos, deve haver uma nova operação de retesamento ao longo da vida da estrutura. Mas mesmo assim, se faz necessário ser aplicadas tensões com folgas, pois essas são necessárias para absorver as tensões decorrentes da variação de temperatura (PAULETTI, 2003).

### 2.3.4 Material

O uso de tensoestruturas tornou-se mais significativo há cerca de cinquenta anos com o surgimento dos tecidos sintéticos (SALVADORI, 2006), antes disso as estruturas eram restritas, pela falta de resistência e durabilidade dos tecidos naturais que limitavam a amplitude dos vãos e a permanência das tendas (PAULETTI, 2003).

Mas ainda a aplicabilidade é um pouco limitada por uma série de fatores, como a resistência mecânica, a flexibilidade, a trabalhabilidade, a durabilidade e o custo (PAULETTI, 2003). Os tecidos estruturais mais utilizados são a fibra de vidro, o poliéster, o kevlar (fibra de carbono) ou o nylon e como revestimentos existem o cloreto polivinílico (PVC), o politetrafluoretileno (PTFE), o teflon (PVDF), ou o silicone (PORTAL METALICA, 2014h).

Na escolha da membrana a ser utilizada, devem-se levar em consideração certas características tais como: flexibilidade, resistência, permeabilidade, resistência ao fogo, peso-próprio, trabalhabilidade, isolamento térmico, durabilidade e translucidez (HERZOG, 1977 *apud* OLIVEIRA, 2003). Outra consideração que se faz na escolha da membrana é em relação ao custo. Um dos tecidos citados anteriormente que se encontra mais barato é o tecido de poliéster recoberto com PVC, mas infelizmente deteriora-se sob a ação dos raios ultravioleta. Mas em contrapartida existem outros tecido que resistem bem às intempéries, a altas temperaturas, apresentam resistências mais elevadas ao retesamento, ao corte e a perfuração, que pode também ser dotado de alto grau de translucidez. Trata-se de tecidos de fibra de vidro ou Kevlar, recobertos com Teflon. Apresentam a desvantagem de serem mais caros (SALVADORI, 2006).

Para que se mantenha a translucidez da membrana devem-se fazer limpezas, sendo que a frequência destas depende das condições locais de onde esta instalada e do material de revestimento da membrana. As membranas revestidas com PVC acumulam mais sujeira demandando certos cuidados para manterem-se limpas. As membranas revestidas de PTFE são hidrofugantes e raramente necessitam de limpeza, nestas as partículas de sujeira praticamente não se fixam devido às propriedades da superfície, sendo mais facilmente transportadas pela água da chuva. Em estruturas permanentes o acesso à limpeza deve ser considerado na etapa do projeto. Mas, por outro lado, quanto mais as membranas são limpas, mais elas se fragilizam pelo contato com sabões, detergentes e óleos. Deve-se garantir que a limpeza seja feita exatamente como as instruções do fabricante, usando leves

escovas, água e detergentes suaves. Novas demãos de laca ou vernizes podem ser feitas ao longo do tempo, sempre após a lavagem (PORTAL METALICA, 2014h). Na Tabela 1 encontra-se um comparativo de membranas de construção permanentes.

Tabela 1 - Tabela com comparativo de membranas

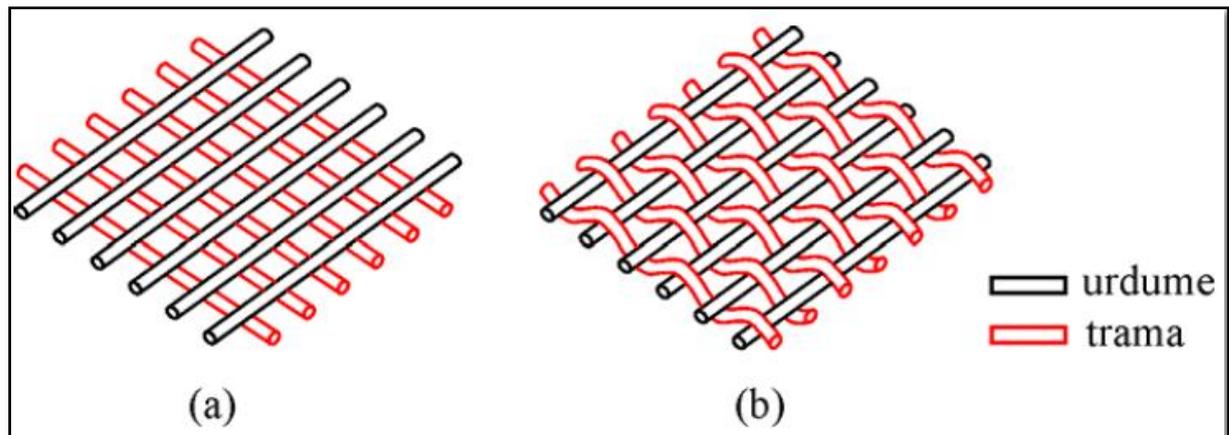
<b>Comparativo de membranas para construções permanentes</b>				
<b>Tipo de tecido</b>	<b>Tecido de Poliéster</b>		<b>Tecido de fibra de vidro</b>	
<b>Proteção</b>	<b>PVC</b>	<b>PVC</b>	<b>PTFE</b>	<b>SILICONE</b>
<b>Proteção da superfície</b>	Polímeros variados	100% PVDF	-	-
<b>Expectativa de vida</b>	> 10 anos	> 20 anos	> 30 anos	> 30 anos
<b>Autolimpeza</b>	bom	bom	muito bom	regular
<b>Transparência</b>	bom	bom	bom	muito bom
<b>Resistência ao fogo</b>	bom	bom	muito bom	muito bom
<b>Facilidade de manuseio</b>	regular	bom	regular	regular
<b>Custo médio* (R\$) - tecido/m<sup>2</sup></b>	45,00	80,00	250,00	200,00
<b>Resistência média à tração em N/5cm para membranas com peso de 1500 g/m<sup>2</sup> (urdume/trama)</b>	9800/8300	10000/8000	7500/6500	7500/6500

Fonte: Pini, 2004.

\* Encontrou-se dificuldade em encontrar preços atualizados da maioria das membranas.

“Em geral, a membrana estrutural é um compósito que consiste em um arranjo plano de fios imersos em uma matriz de revestimento” (BORGES FILHO, 2006, p.20). Os fios são arranjados em duas direções, de tecido ou sobrepostos, e são normalmente perpendiculares. Os fios sobrepostos, como mostra na Figura 34(a), são colocados fios uns sobre os outros. Já nos fios tecidos, existem diferentes esquemas de organização, um deles, o chamado tecido padrão, é mostrado na Figura 34(b) (BORGES FILHO, 2006).

Figura 34 - Arranjos das membranas estruturais



Fonte: Borges Filho, (2006)

Segundo Pauletti (2011), as direções dos fios são denominadas de urdume e a trama, sendo o urdume disposto ao longo do comprimento da faixa de membrana, mantido reto e retesado, enquanto que a trama é disposta na largura da faixa, e no caso do tecido padrão, os fios são passados alternadamente por cima e por baixo de cada fio do urdume ficando entrelaçados (Figura 34).

Cada tipo de arranjo dos fios tem vantagens e desvantagens. Uma vantagem para o sobreposto é que a espessura final da membrana será menor em relação ao tecido, pois a espessura do sobreposto é 2 vezes o diâmetro dos fios e o tecido 3 vezes esse diâmetro, sendo assim o consumo de material também será menor, e com isso contribuindo para a translucidez da membrana, mas encontra partida apresenta uma desvantagem significativa, ou seja, a menor resistência ao cisalhamento, já que o tecido tem muito mais interação entre os fios do urdume e da trama (BORGES FILHO, 2006).

Os mastros e cabos são elementos estruturais normalmente indispensáveis em uma tensoestrutura. Os mastros na sua maioria são de ligas metálicas como aço ou alumínio. Nas estruturas metálicas, o alumínio apresenta alta resistência à corrosão, menor peso que o aço, porém resistência mecânica inferior. Os mastros ficam sujeitos a esforços de compressão enquanto que os cabos tanto de ancoragem ou de bordo sofrem esforços de tração. Estes últimos normalmente são de aço (PORTAL METALICA, 2014h).

As ancoragens e fundações também necessitam de cuidados especiais. No caso de fundações para mastros, geralmente são empregados olhais capazes de

distribuir os carregamentos ao longo de uma linha ou uma superfície, evitando concentrações de tensão. No caso de fundações dos cabos, a solução mais usual é a utilização de sapatas e olhais metálicos engastados em bases de concreto. As ancoragens dos cabos, que normalmente são feitas em chapas metálicas parafusadas na estrutura pré-existente (PORTAL METALICA, 2014h).

### **2.3.5 Montagem**

No processo da montagem, as tensoestruturas têm sistemas específicos para cada etapa. Antes da montagem os materiais devem ser inspecionados, e sempre deve-se tomar o cuidado para não aplicar esforço acima do previsto em projeto (DIAS JÚNIOR, 2006).

A montagem é mais simples de ser feita se as emendas *in loco* apresentarem arestas retas, pois podem-se evitar os enrugamentos e o desperdício de materiais (DIAS JÚNIOR, 2006).

A montagem das tensoestruturas também é bastante simples, mas requer mão de obra bastante especializada. Normalmente, ela começa com a verificação das medidas das bases, seguida do encaixe das peças, e por fim o içamento. Este, por sua vez, pode ser feito com guindastes e gruas. Deve-se, ainda, tomar sempre o cuidado de monitorar as tensões de retesamento obtidas em projeto (TECNO STAFF ENGENHARIA E ESTRUTURAS LTDA, 2013).

### 3 METODOLOGIA

Apresenta-se a seguir a metodologia proposta para a elaboração deste trabalho.

Este trabalho consiste em seguir algumas etapas, descritas no capítulo 2, necessárias para o projeto de uma tensoestrutura:

- Busca da Forma;
- Padronagem;
- Análise da Resposta aos Carregamentos;
- Material;
- Montagem.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso apresenta-se uma proposta, em tensoestruturas, para a cobertura dos passeios que interligam os prédios da UNIPAMPA, Campus Alegrete de acordo com as seguintes etapas:

Etapa 1: Escolha de um caminho para a elaboração da proposta. A partir da planta de urbanização do Campus Alegrete foi escolhido um dos caminhos que interligam os prédios.

Etapa 2: Criação de um projeto arquitetônico. Após escolhido o caminho foi feita a proposta arquitetônica do mesmo, incluindo uma maquete eletrônica com o software SketchUp Pro 8.

Etapa 3: Selecionou-se um trecho do caminho para a montagem de uma maquete física. Com o projeto definido, escolheu-se um trecho desse caminho para fazer o modelo físico.

Etapa 4: Busca da Forma. Nesta etapa, o objetivo foi encontrar a forma geométrica que mais se aproximasse da proposta arquitetônica. Para isso escolheu-se a modelagem física, em que a forma é obtida a partir da construção da estrutura, em escala reduzida 1:20. Nesta etapa também se faz necessário garantir que a estrutura responda ao estado de solicitações autoequilibrada, fazendo com que a estrutura suporte os carregamentos, tanto do que diz respeito à resistência quanto à estabilidade. No entanto esta demanda só é possível de ser atendida com a realização de modelagem numérica, com a qual pode-se calcular as tensões atuantes na estrutura e os consequentes esforços nos elementos de fixação. Mas a realização de modelagens numéricas está fora do escopo deste trabalho.

Etapa 5: Padronagem. A partir da forma obtida na modelagem física, a superfície tridimensional será dividida em pedaços. Esses pedaços são a determinação dos parâmetros de corte/emenda, em três dimensões, que serão convertidos em pedaços planos, necessários para a fabricação da estrutura.

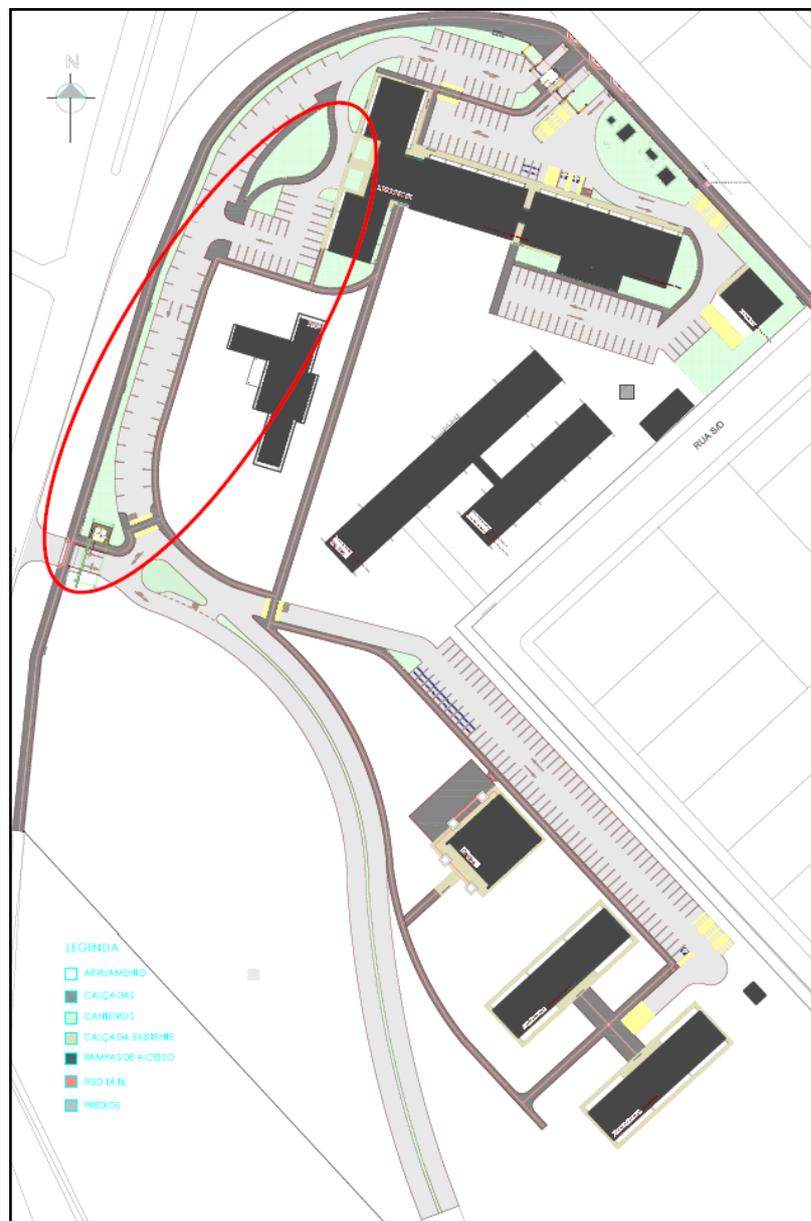
Etapa 6: Remontagem parcial da maquete a partir dos resultados obtidos na padronagem. Com as linhas de cortes definidas e devidamente planificadas, foi remontada parte da maquete, para verificar se a forma encontrada no processo de busca da forma foi atendida ao definir os padrões de corte. A parte remontada da maquete representa a estrutura final a ser construída, com desenho das faixas de membrana já definidas.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Projeto da tensoestrutura

Para dar início ao projeto, primeiramente, analisaram-se os caminhos existentes na UNIPAMPA Campus Alegrete (Figura 35), construídos para interligar os prédios do Campus. Depois de feita a análise dos mesmos, escolheram-se os trechos, marcado na Figura 35, que dão acesso à universidade pela Avenida Caverá. Estes foram escolhidos, por ser em um trecho que ligam a entrada principal aos prédios que estão em funcionamento na atualidade.

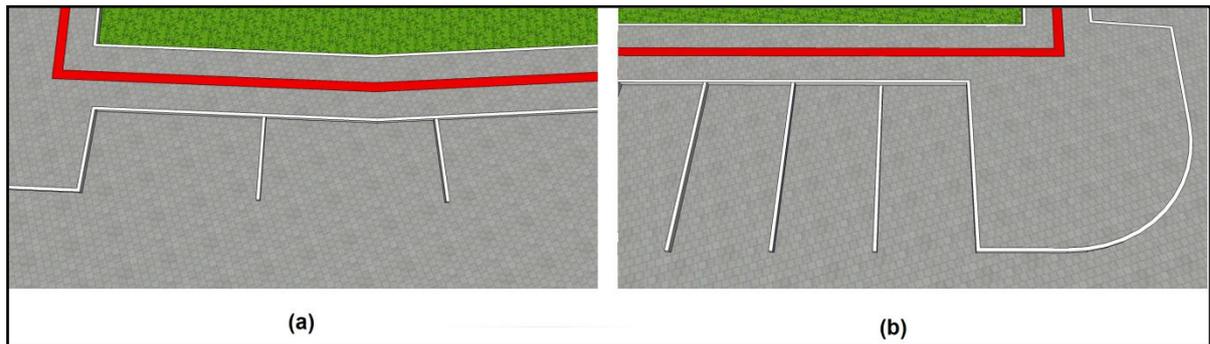
Figura 35 - Passeios da UNIPAMPA Campus Alegrete



Fonte: Projeto de urbanização UNIPAMPA

Com os trechos de passeios definidos, deu-se início a elaboração da maquete eletrônica, utilizando o software Sketchup Pro 8. Foram definidas, primeiramente, as posições dos mastros. Para isso precisou-se de uma análise cuidadosa, pelo fato de se ter estacionamento ao lado dos passeios, como mostra a Figura 36. O estacionamento possui tanto vagas paralelas (Figura 36a) como perpendiculares (Figura 36b) ao passeio, dificultando a livre escolha da locação dos mastros.

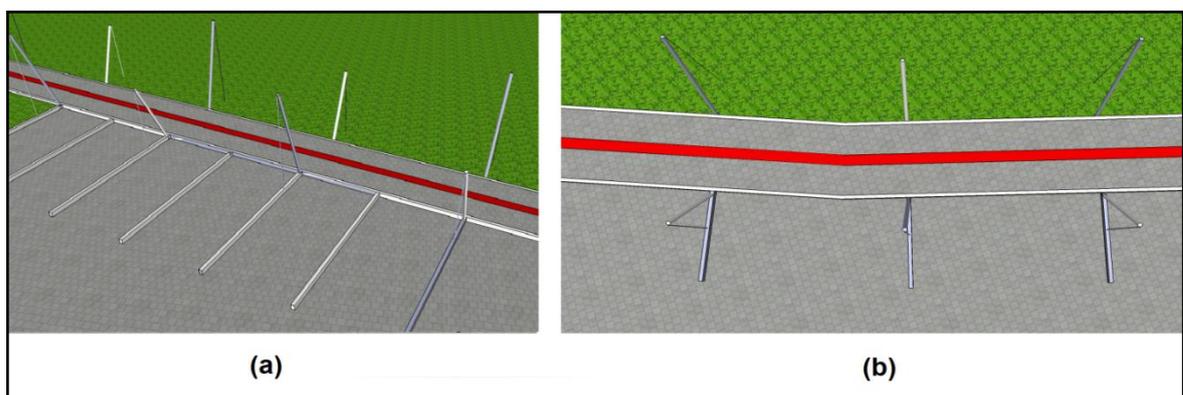
Figura 36 - Vagas de estacionamento



Fonte: Elaboração Própria

Dessa forma, para não prejudicar e inviabilizar nenhuma das vagas existentes de estacionamento, solucionou-se o problema utilizando as divisões das vagas para locação dos mastros e seus cabos de ancoragem. Desse modo, as vagas que são perpendiculares ao passeio, ficaram com um mastro a cada duas vagas como mostra a Figura 37a e as paralelas com um mastro a cada vaga (Figura 37b), com distâncias de 5,20 m e 5,10 m, respectivamente. A locação dos mastros do outro lado do passeio não teve problemas, não apresentando nenhum empecilho ou obstáculos para sua localização. No entanto, foram usados as mesmas distâncias utilizadas do lado do estacionamento.

Figura 37 - Locação dos mastros

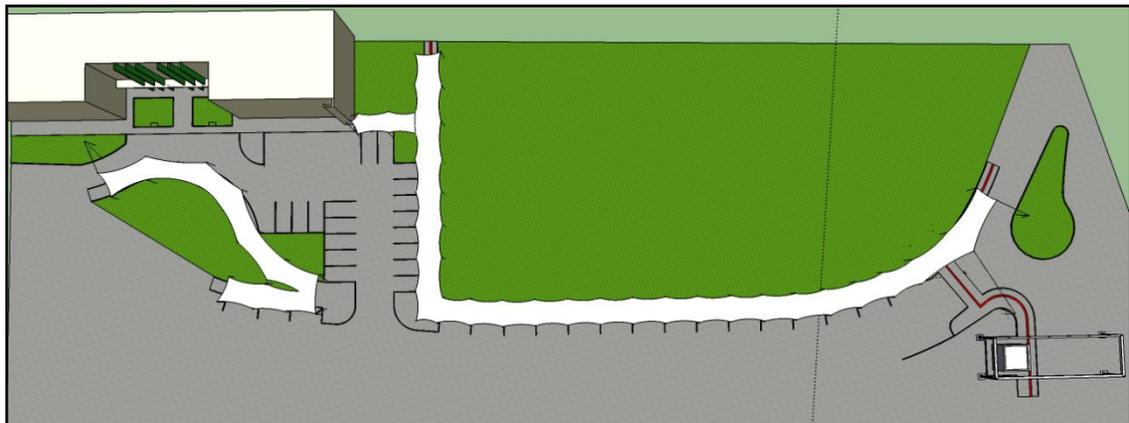


Fonte: Elaboração Própria

Com a posição das bases dos mastros estabelecidas, deu-se início ao estudo das posições dos topos dos mastros. Nesta etapa, tomou-se o cuidado de que a altura da membrana ficasse confortável, de forma a permitir o livre trânsito das pessoas e ao mesmo tempo com uma faixa de proteção abrangendo toda a largura do passeio, sem ser desproporcional as dimensões dos prédios existentes. Por fim, levou-se em conta a forma arquitetônica desejada para a membrana. Assim, optou-se por topos de mastros com diferenças de nível, sendo que topos altos e baixos ficariam alternados ao longo do comprimento do passeio. Os pontos altos ficaram com altura de 3,20 m e os baixos com 2,20 m, tendo como referência o nível do passeio.

Por conseguinte, passou-se para a colocação da membrana sobre a configuração dos mastros de todo o trecho escolhido, como mostrado na Figura 38.

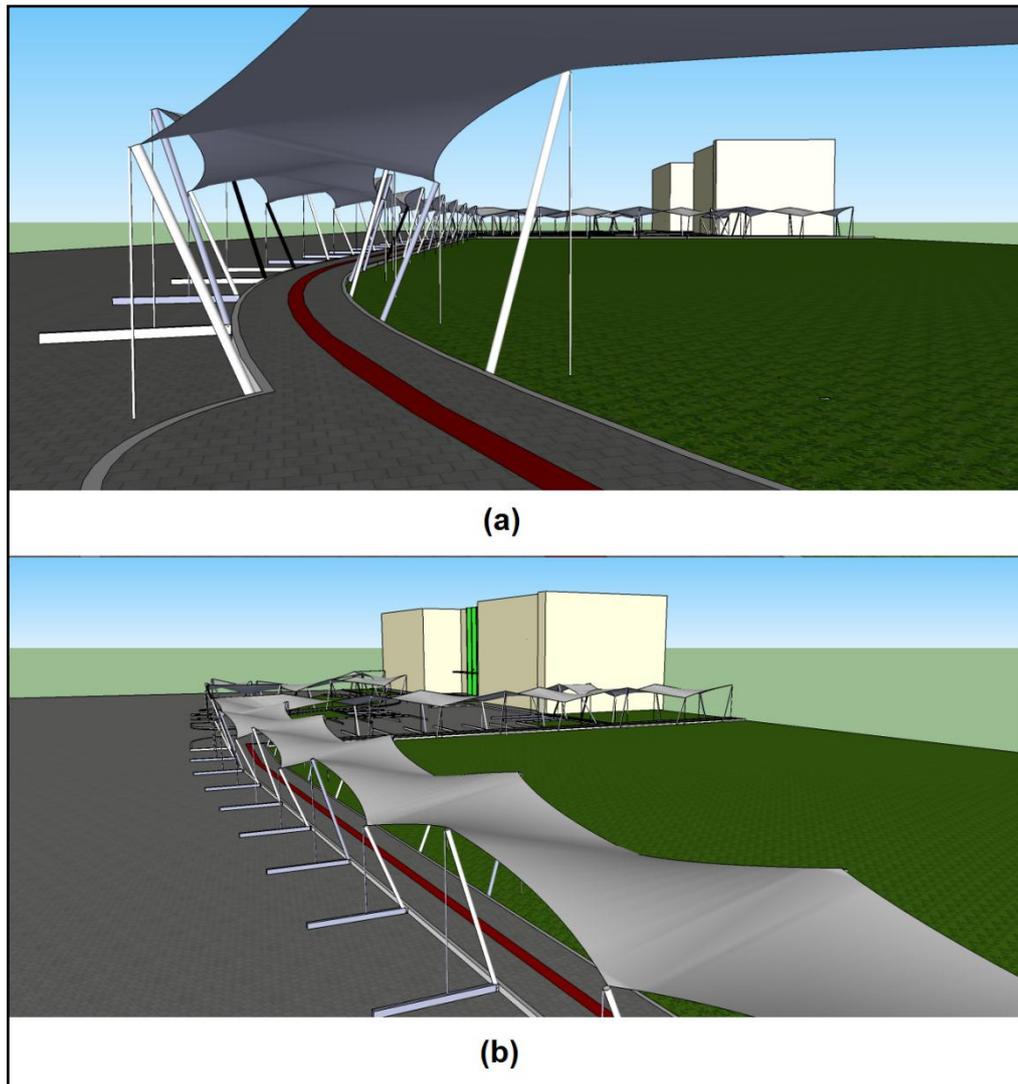
Figura 38 - Vista de todo o trecho de passeio



Fonte: Elaboração própria

A Figura 39a mostra a perspectiva da membrana do ponto de vista de uma pessoa, localizada bem próximo ao portão de acesso pela Avenida Caverá e a Figura 39b uma vista a partir de um ponto mais alto do que a membrana, distanciando-se um pouco do portão de acesso em direção ao prédio administrativo.

Figura 39 - Vistas do passeio em relação ao prédio

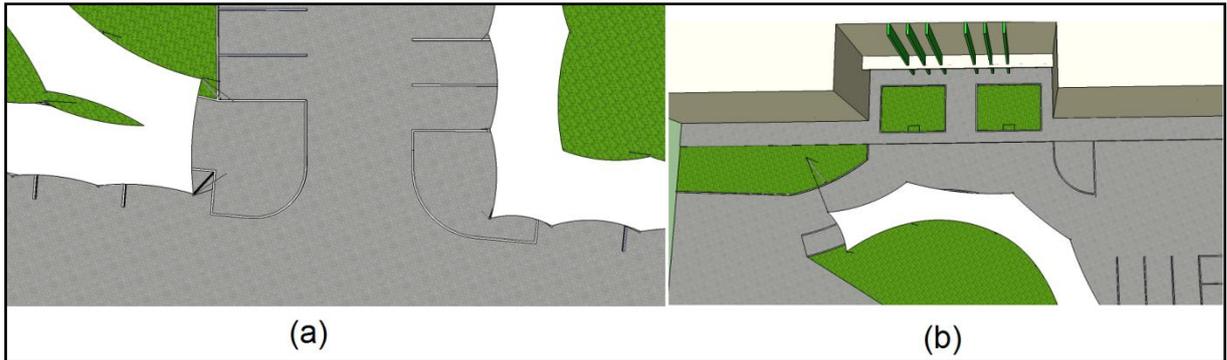


Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado na Figura 39, os mastros maiores e menores tem inclinações diferentes. Manteve-se constante a distância entre a base do mastro e o ponto de fixação dos cabos, sendo que os cabos são dispostos sempre na vertical. Com as diferentes alturas, resultou em diferentes inclinações.

Com os trechos de passeio pronto, percebeu-se a possibilidade de cobertura das faixas utilizadas por pedestres entre passeios (Figura 40a) e a faixa entre o passeio e o acesso ao prédio administrativo (Figura 40b).

Figura 40 – Trecho entre passeios e entrada do prédio administrativo

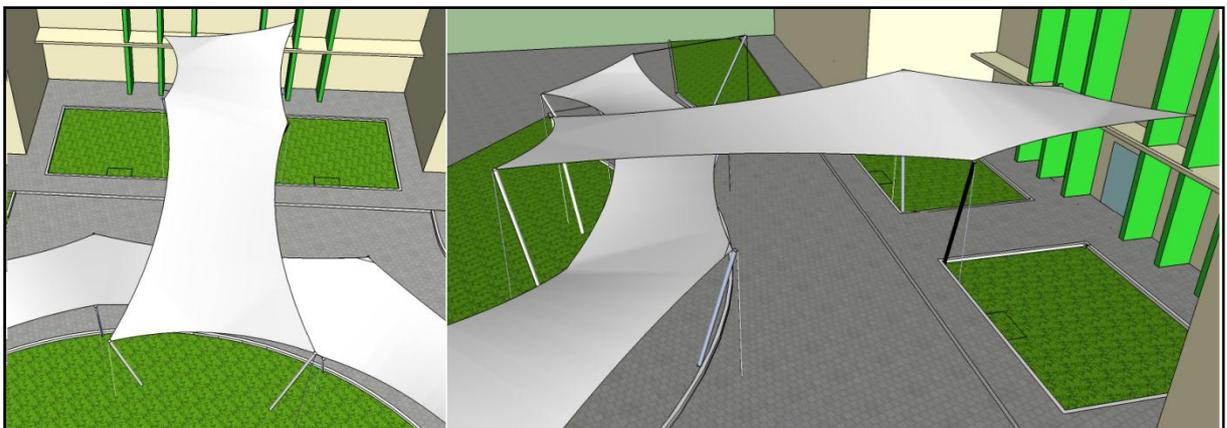


Fonte: Elaboração própria

Neste sentido, projetaram-se coberturas para esses trechos, de forma independente das demais coberturas do passeio, tendo a possibilidade de ser ou não construídas, sem prejudicar o restante do projeto. Para seguir a mesma forma dos demais passeios, as configurações de alturas de topos de mastros ficaram com as mesmas características, em que uns mastros são altos e outros baixos. No entanto, para estas coberturas ficarem independentes dos demais passeios, projetou-se uma cobertura mais alta, assim os mastros altos ficaram com de 4,5 m de altura de topo e os baixos com 3,5 m, deixando-se 30 cm de diferença mínimas entre as coberturas.

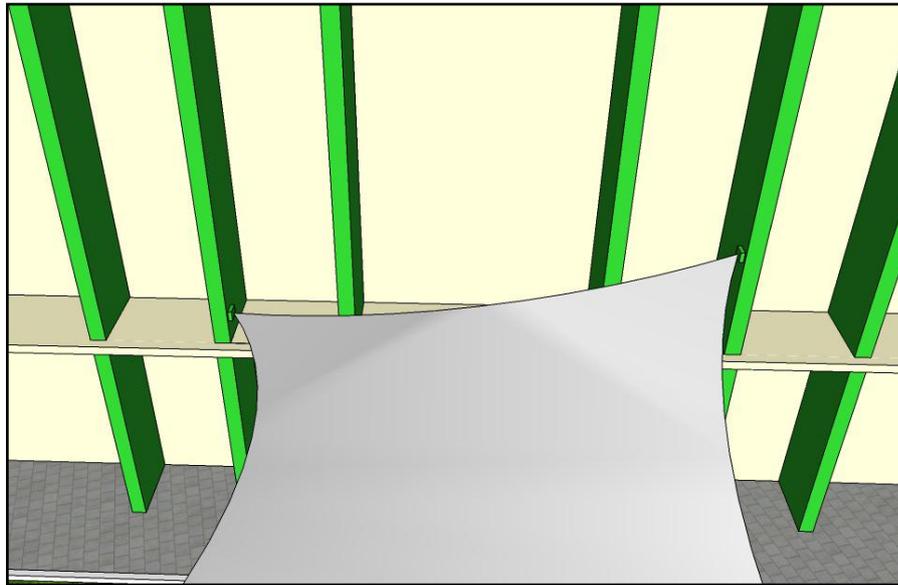
Para a cobertura que liga o passeio e o acesso ao prédio administrativo foram necessários 4 mastros, sendo 2 altos e 2 baixos. Considerou-se ainda dois pontos de fixação da membrana na estrutura do prédio administrativo (Figuras 41 e 42).

Figura 41 - Cobertura entre o passeio e ao prédio administrativo



Fonte: Elaboração própria

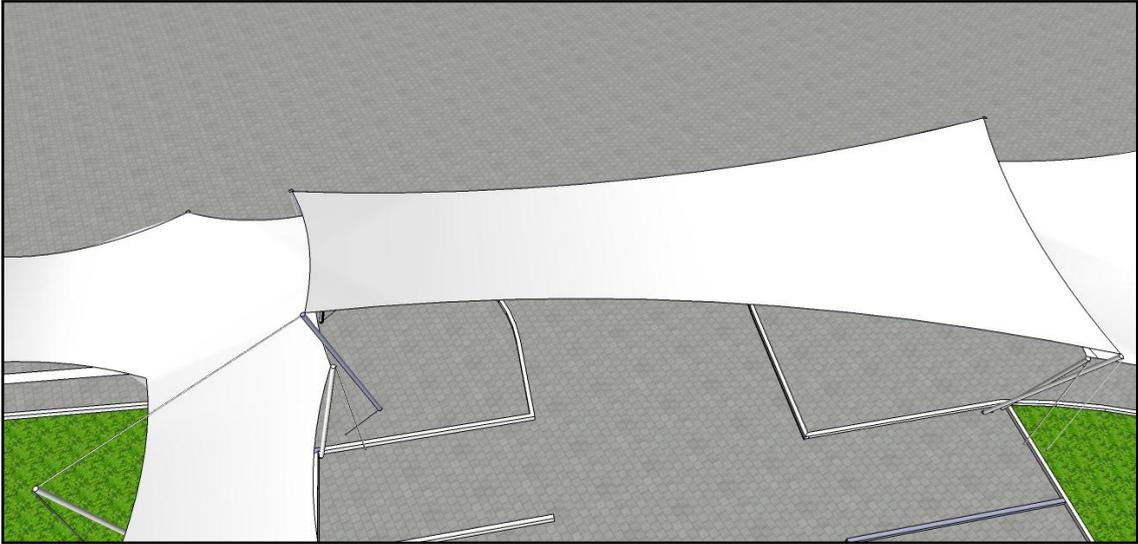
Figura 42 - Detalhe da ligação com a parede do prédio



Fonte: Elaboração própria

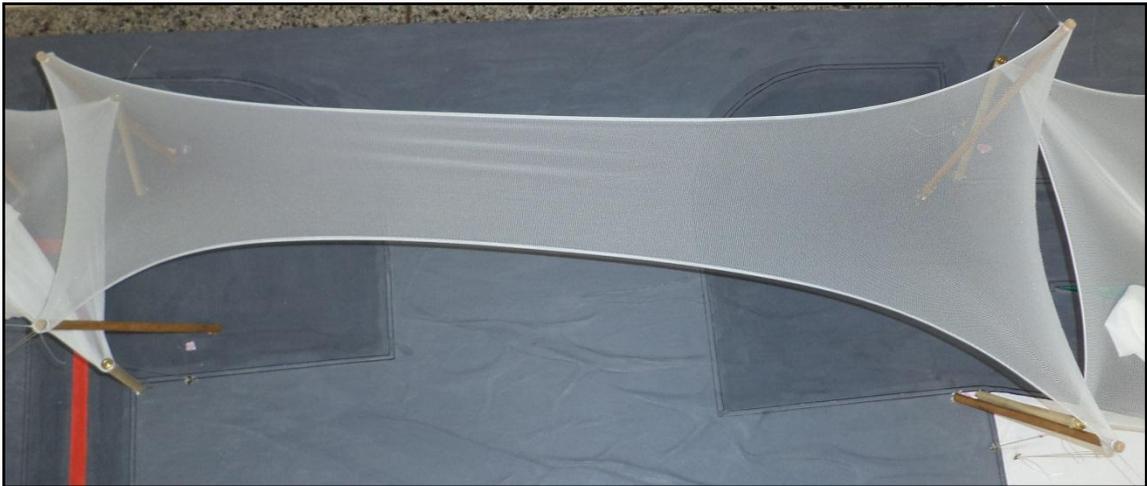
Para a cobertura entre os passeios, inicialmente pensou-se em apenas mastros nas extremidades, sendo dois baixos e dois altos, de forma alternada, com altura de topo de mastro de 3,5 e 4,5 m, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 43. Mas devido à distância entre os passeios ser grande – 17,00 m entre as bases dos mastros – a estrutura quando reproduzida na maquete física mostrou-se pouco eficiente, pois a largura da faixa ficou muito estreita assim não protegendo os pedestres como desejado, como pode-se observar na Figura 44, e também pelo fato de apresentar curvatura diferente das demais, podendo apresentar acúmulo de água na região central.

Figura 43 - Cobertura entre passeios



Fonte: Elaboração própria

Figura 44 - Vista da maquete física da cobertura entre passeios

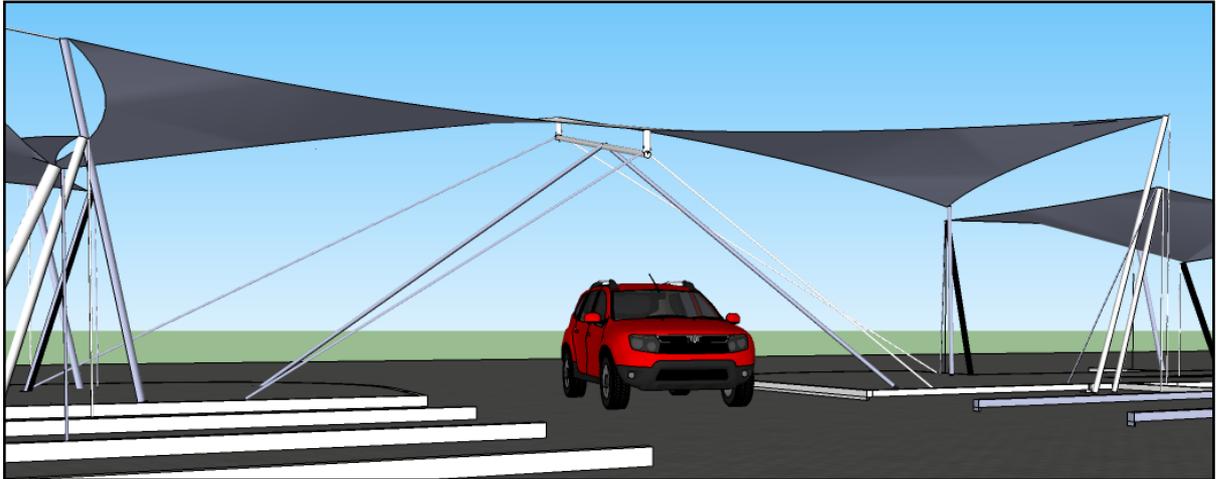


Fonte: Elaboração própria

A fim de solucionar o problema acima descrito, optou-se por adicionar uma barra central de comprimento 5,35 m apoiada em dois mastros inclinados, ligados em seus topos (Figura 45). Colocaram-se dois cabos de aço, ligados ao solo, em cada extremidade da barra para que a estrutura se mantenha estável.

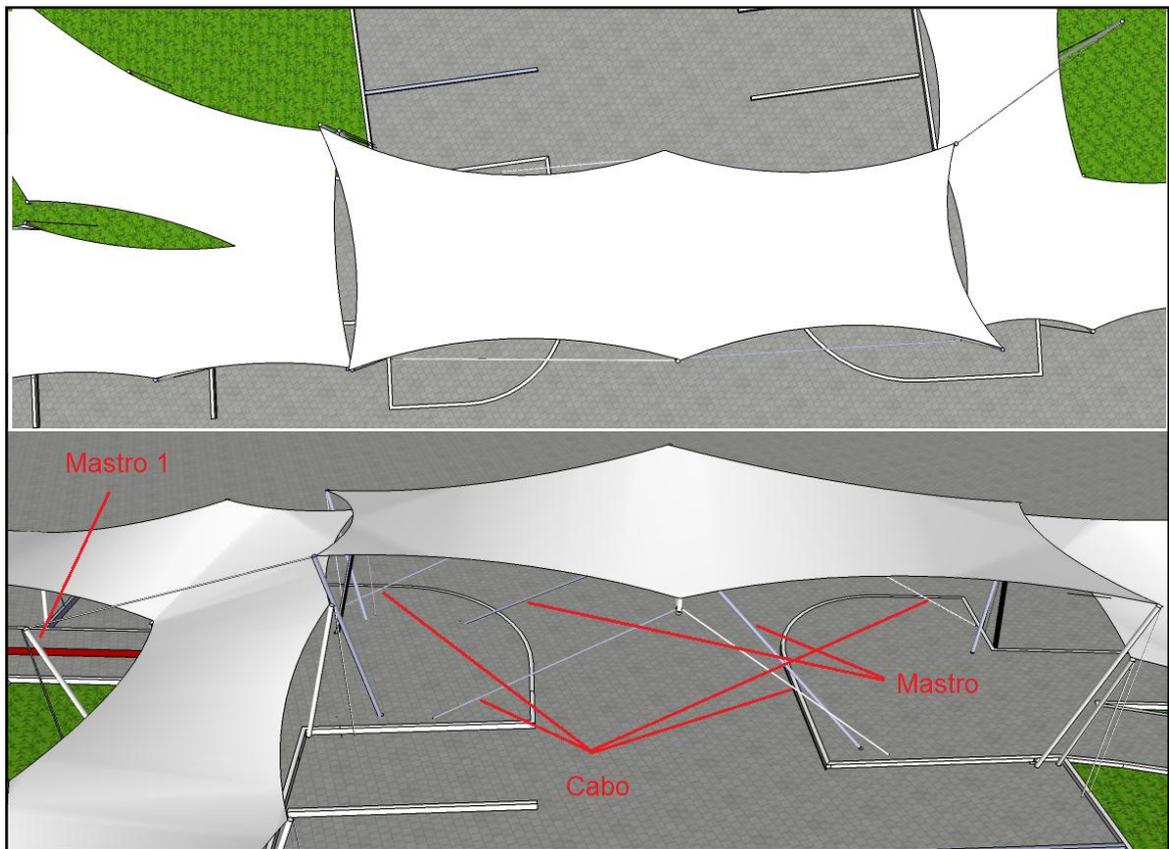
Na Figura 46 é mostrada a nova concepção da estrutura, mantendo-se as curvaturas dos demais trechos e proporcionando uma melhor proteção aos pedestres.

Figura 45 - Detalhe da barra e mastros da cobertura entre passeio



Fonte: Elaboração própria

Figura 46 - Cobertura entre os passeios



Fonte: Elaboração própria

Considerasse a seguir a inclinação dos mastros. No caso dos passeios os mastros altos tem uma angulação de  $73^{\circ}$  e os baixos  $66^{\circ}$ , sendo que foi mantida em

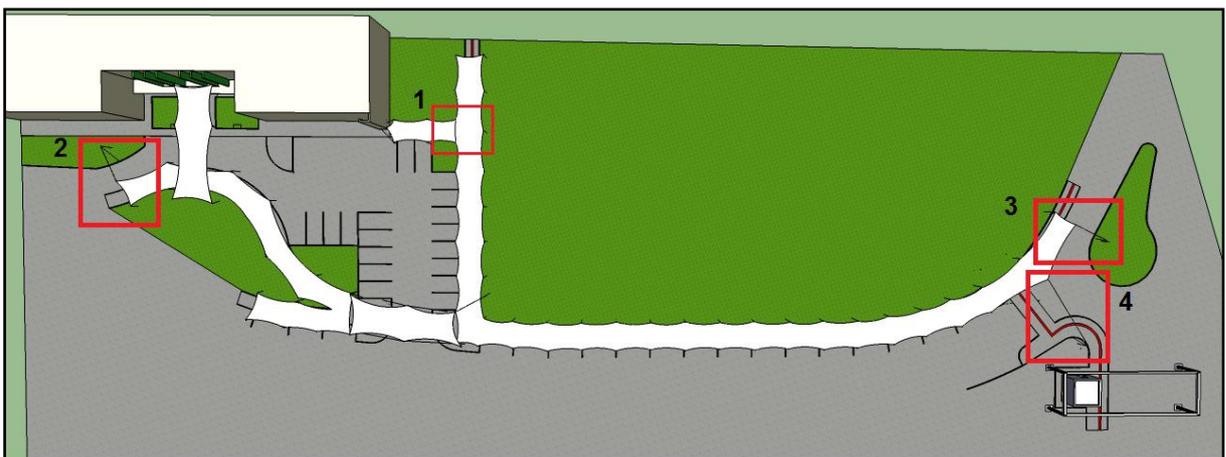
1,00 m a distância entre a base do mastro e o ponto de ancoragem do cabo (a esta distância chamaremos daqui pra frente de base).

Para o caso dos mastros da cobertura entre passeios têm-se inclinações diferentes. As diferenças são em razão das extremidades da cobertura dos passeios não serem iguais, desse modo para se conseguir uma cobertura que mantivesse as mesmas formas, priorizou-se a definição da posição do topo do mastro para depois identificar o ponto de apoio dos mastros e as ancoragens dos cabos.

Considerando-se a Figura 46, o mastro alto da esquerda, no primeiro plano, tem base de 1,00 m, resultando em uma inclinação de  $77^\circ$ . Mantendo-se a esquerda, o mastro baixo do segundo plano tem base de 1,35 m e inclinação de  $69^\circ$ . Analisando o lado direito da figura, o mastro baixo do segundo plano tem base de 1,00 m e inclinação de  $74^\circ$ . No caso do mastro alto do primeiro plano, não foi possível manter o mesmo padrão da ancoragem dos demais mastros. Foi necessário fazer a ancoragem do cabo, distante da base do mastro, posicionando-a do outro lado da membrana do passeio, sendo necessário um mastro auxiliar identificado na Figura 46 como mastro 1. Este com base de 1,00 m e inclinação de  $77^\circ$ .

No projeto da maquete virtual alguns pontos tiveram algumas dificuldades para serem resolvidos como mostra na Figura 47.

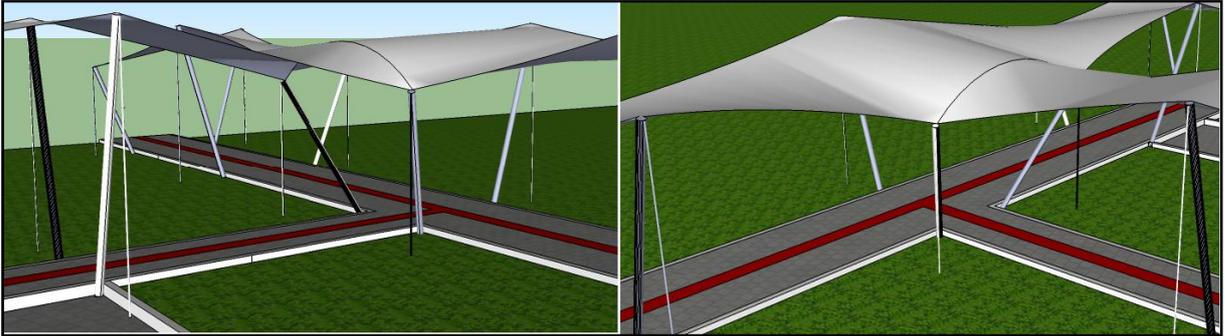
Figura 47 – Pontos que sofreram alteração



Fonte: Elaboração própria

No ponto 1, identificado na Figura 47, necessitou-se da colocação de uma barra com curvatura para cima, afim de evitar de acúmulo de água (Figura 48).

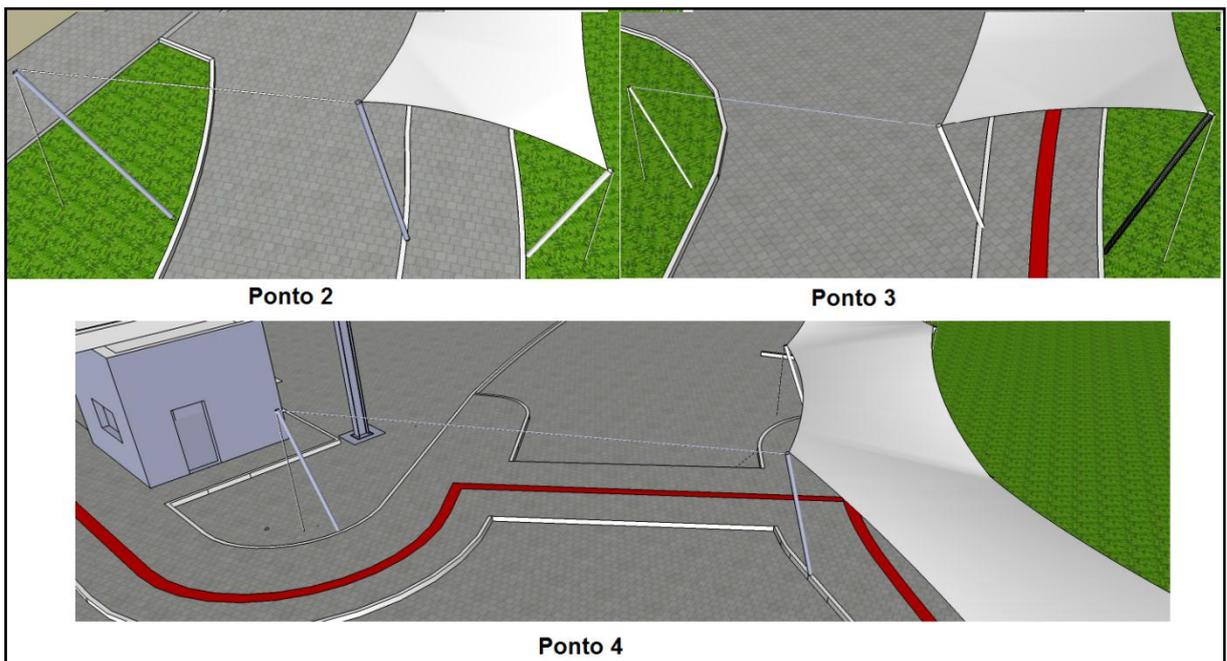
Figura 48 - Ponto 1



Fonte: Elaboração própria

Para os pontos 2, 3 e 4, (também identificados na Figura 47) foi necessário que a ancoragem do mastro fosse do outro lado do passeio (Figura 49), bem como na cobertura entre passeios citado anteriormente.

Figura 49 – Detalhes dos pontos 2, 3 e 4

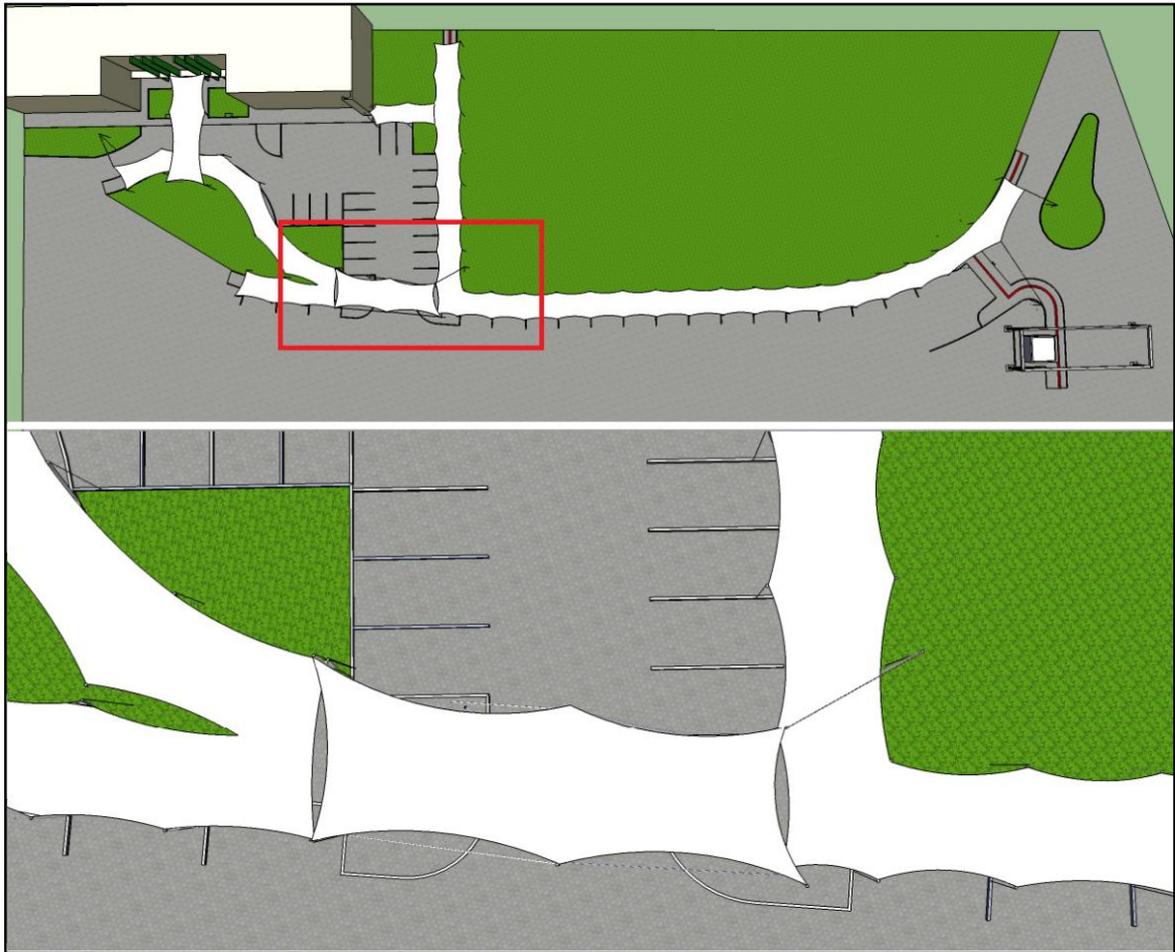


Fonte: Elaboração própria

#### 4.2 Projeto da maquete

Com os trechos da maquete eletrônica prontos, elegeu-se um para a construção da maquete física, mostrado na Figura 50. Este trecho serviu de intenção arquitetônica para que com o auxílio da maquete física fossem gerados padrões de cortes.

Figura 50 - Vista da maquete virtual



Fonte: Elaboração própria

Para a construção da maquete, utilizou-se escala reduzida de 1:20. Para desempenhar a função da membrana foi utilizado um tecido denominado Tule, para os mastros metálicos varetas de madeira, para os cabos de aço empregaram-se linhas de nylon e para as fundações usou-se parafuso gancho com rosca fechado. O tecido foi fixado ao topo das varetas através de percevejo<sup>1</sup>.

Considerando-se a escala utilizada e o trecho selecionado para a maquete física, optou-se para representar o passeio e o estacionamento uma placa de madeira compensada, medindo 2,50 m de comprimento e 60 cm de largura, com 14 mm de espessura. Em umas das laterais da placa de compensado foram adicionadas outras duas do mesmo material, com dimensões de 0,50 x 0,30m, para melhorar representação da continuação da membrana.

<sup>1</sup> Anexo A consta alguns exemplos de fixação da membrana com o mastro.

Prosseguiu-se com a colocação das varetas de madeira, sendo que suas bases foram primeiramente locadas no compensado, posteriormente foram feitos furos de 8,5 mm de diâmetro, respeitando-se a inclinação de cada mastro. A fixação das varetas (Figura 51) se deu por engastamento na maquete para melhor fixação. No entanto, nas construções reais os mastros, normalmente, são articulados na base<sup>2</sup>.

Figura 51 - Detalhe dos mastros, cabos e fundação



Fonte: Elaboração própria

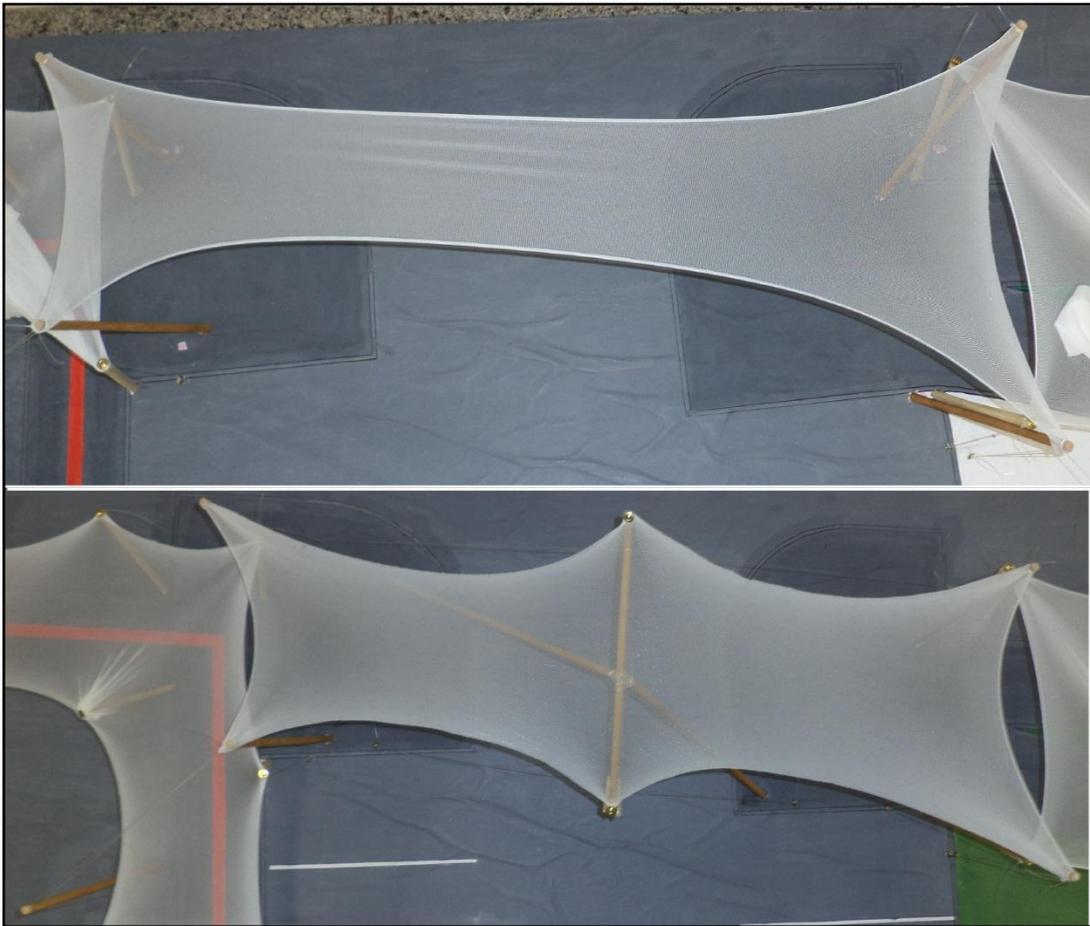
Os fios de nylon foram fixados no topo da vareta através de cavas. A outra extremidade do fio foi preso ao parafuso gancho com rosca que representa a fundação (Figura 51).

Como foi descrito no projeto arquitetônico (item 4.1), houve uma alteração na cobertura entre passeios, com a colocação da barra transversal, que proporcionou uma melhor forma e proteção. Na Figura 52 é mostrada essa modificação.

---

<sup>2</sup> No Anexo B são mostrados alguns exemplos de estruturas dos mastros e cabos e suas ligações, os mastros metálicos são escolhidos conforme é a solicitação da força de compressão e os cabos devido a solicitação de tração.

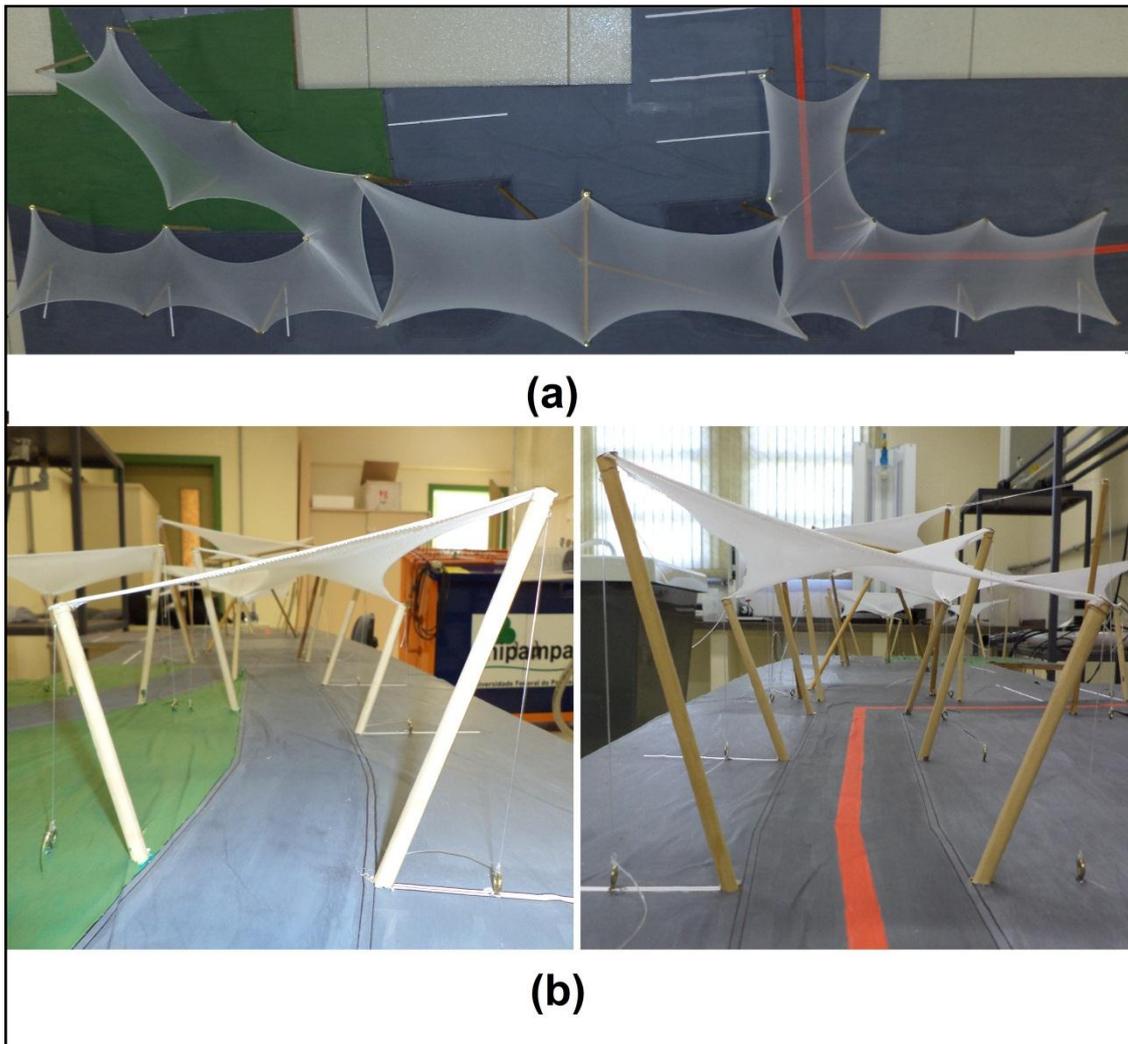
Figura 52 - Detalhe da membrana entre passeios sem e com a barra transversal



Fonte: Elaboração própria

A maquete física pronta é mostrada na Figura 53, sendo que na Figura 53a é apresentada uma vista de cima e na Figura 53b duas imagens do ponto de vista dos pedestres.

Figura 53 - Maquete física



Fonte: Elaboração própria

### 4.3 Padronização

Com a maquete física pronta, selecionou-se um dos trechos para fazer o processo de padrão de corte. Esta é uma análise muito importante e fundamental no projeto e execução de uma tensoestrutura para que não apareçam enrugamento e rasgos que comprometam a estrutura. O trecho escolhido para se fazer os padrões de cortes é mostrado da Figura 54.

Figura 54 - Trecho selecionado para criar padrões de corte



Fonte: Elaboração própria

Para fazer a identificação das linhas de corte, utilizou-se papel branco e caneta. O papel branco foi colocado sobre o tule e com uma caneta transferiu-se as curvas do tecido para o papel. Nesta fase surgiram algumas dificuldades pelo papel não ser muito maleável e não se moldar como pede a forma, além da falta de experiência em identificar as linhas de corte. Na Figura 55 é mostrada a primeira versão das linhas de corte.

Figura 55 – Primeira versão das linhas de corte



Fonte: Elaboração própria

Na primeira versão conseguiu-se reproduzir bem a forma, no entanto as faixas apresentaram larguras muito distintas umas das outras. Com o intuito de uniformizar as faixas, foram criadas novas linhas de corte sobre superfície gerada com as faixas de papel, resultam em faixas que variam entre 1,70 m e 2,00 m na escala real. Na Figura 56 são mostradas as faixas redesenhadas sobre a primeira superfície de papel (linhas na cor vermelha).

Figura 56 – Faixas redesenhadas sobre a primeira superfície de papel



Fonte: Elaboração própria

A Figura 57 mostra as novas faixas definidas, estabelecendo um novo padrão de corte.

Figura 57 – Novas faixas definidas



Fonte: Elaboração própria

Com as novas faixas, reproduziu-se outra cobertura em papel (Figura 58), esta utilizando as linhas de cortes encontradas e apenas prolongando as faixas de forma a cobrir uma maior área.

Figura 58 – Resultado da padronização em papel



Fonte: Elaboração própria

Nesta etapa observaram-se algumas dificuldades na colagem das faixas, devido ao fato de o papel não ser tão flexível como o desejado, assim não se obtendo a acomodação esperada nas emendas.

Passou-se, a seguir, para a confecção da cobertura, utilizando agora um tecido um pouco mais maleável, permitindo assim fazer as curvas definidas da nova padronização, dessa forma conseguir uma boa aproximação com a forma gerada na intenção arquitetônica.

Na Figura 59 é mostrado a substituição da cobertura de papel pelo tecido costurado<sup>3</sup>. Nesta etapa foram necessários pequenos ajustes nas emendas das faixas, mostrando que os padrões de cortes escolhidos foram de certa forma bem definidos.

Figura 59 - Maquete física com o novo tecido



Fonte: Elaboração própria

---

<sup>3</sup> Anexo C mostra como são feitas as emendas das membranas e emendas nos cabos de bordo em estruturas reais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tensoestruturas são estruturas que se diferem grandemente das demais pelo fato de serem estruturas compostas por elementos estruturais mais simples, mas com arranjos estruturais complexos. Boa parte dos elementos resiste apenas um tipo de esforço, excetuando-se os mastros que resistem tanto à tração, à compressão e a flexão.

Os resultados obtidos permitem concluir que a solução encontrada para a cobertura dos passeios da UNIPAMPA Campus Alegrete é funcional e exequível, já que atende a necessidade de proteger os pedestres das intemperes. Outro argumento favorável é o fato de que foram preservadas as estruturas existentes no Campus sem ocupar nenhuma vaga de estacionamento e nem inviabilizar a passagem de automóveis.

No entanto, para que o projeto resultante possa ser executado, algumas etapas ainda são necessárias. São elas: análise de tensões, para subsidiar a escolha dos materiais; dimensionamento das partes componentes, como a membrana, mastros, fundações e ancoragens; detalhamento dos elementos de ligação.

Indica-se, como metas para trabalhos posteriores, o que segue:

- Projetar o restante dos passeios.
- Determinar os esforços atuantes nos elementos estruturais.
- Encontrar os padrões de corte para todos os trechos através de análise numérica.
- Fazer uma análise de custo.
- Fazer o detalhamento dos elementos de ligação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGES FILHO, J. P. **Projeto de tensoestruturas em membrana com aplicação de programação não-linear**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

DIAS JÚNIOR, U. de S. **Determinação dos padrões de corte em estruturas de membrana por linhas geodésicas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GOOGLE IMAGENS. **Imagem da Arena de Raleigh**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/search?q=Arena+de+Raleigh&hl=pt-BR&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=RKkjUsfPMYbq8QTthYDwDg&ved=0C4QsAQ&biw=1366&bih=630>>. Acesso em: 07 ago. 2013, 11:06:13.

GOOGLE IMAGENS. **Imagem do Estádio Hohey**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/search?q=Est%C3%A1dio+de+Hockey+de+Yale&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=0qcjUq-SG4eK9ATJp4GACA&ved=0CDgQsAQ&biw=1366&bih=667>> Acesso em: 07 ago. 2013, 11:25:09.

GOOGLE IMAGENS. **Imagem do Estádio Olímpico de Roma**. Disponível em: <[https://www.google.com.br/search?q=Est%C3%A1dio+Ol%C3%ADmpico+de+Roma&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=SqgjUpX\\_BJO49gTAnYGYCA&ved=0CAcQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=667](https://www.google.com.br/search?q=Est%C3%A1dio+Ol%C3%ADmpico+de+Roma&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=SqgjUpX_BJO49gTAnYGYCA&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1366&bih=667)>. Acesso em: 07 ago. 2013, 12:10:56.

GOOGLE IMAGENS. **Imagem do Estádio Rei Fahd**. Disponível em:<[https://www.google.com.br/search?q=Est%C3%A1dio+Rei+Fahd&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=uKgjUufuLoTo9gTp4IG4AQ&ved=0CAcQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=667](https://www.google.com.br/search?q=Est%C3%A1dio+Rei+Fahd&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=uKgjUufuLoTo9gTp4IG4AQ&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1366&bih=667)>. Acesso em: 07 ago. 2013, 13:11:31.

GOOGLE IMAGENS. **Imagem do Pavilhão São Cristóvão**. Disponível em:<[https://www.google.com.br/search?q=Pavilh%C3%A3o+S%C3%A3o+crisov%C3%A3o&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=D6kjUvukJ4Lc9ASR2ID4Dw&ved=0CAcQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=667](https://www.google.com.br/search?q=Pavilh%C3%A3o+S%C3%A3o+crisov%C3%A3o&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=D6kjUvukJ4Lc9ASR2ID4Dw&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1366&bih=667)>. Acesso em: 07 ago. 2013, 13:21:19.

GOOGLE IMAGENS. **Imagem do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <[https://www.google.com.br/search?q=Pavilh%C3%A3o+do+rio+grande+do+sul+sao+paulo&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=66gjUqqAHYrO9QSIzYGwDg&ved=0CAcQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=667](https://www.google.com.br/search?q=Pavilh%C3%A3o+do+rio+grande+do+sul+sao+paulo&hl=pt-BR&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=66gjUqqAHYrO9QSIzYGwDg&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1366&bih=667)>. Acesso em: 07 ago. 2013, 13:25:20.

GOOGLE IMAGENS. **Imagem do Terminal de Passageiros de Jeddah**. Disponível em:<<https://www.google.com.br/search?q=Terminal+de+Passageiros+de+Jeddah&sa=X&hl=pt-BR&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ei=f6gjUsqQGZDa9ASsnoGwDg&ved=0CEUQsAQ&biw=1366&bih=667>>. Acesso em: 07 ago. 2013, 12:21:21.

MARTINS, C. B. **Estudo do efeito do escorregamento dos cabos de borda em estruturas de membranas**. Dissertação de Mestrado. . Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

NUNES, E. F. **Tensoestruturas – elementos e cabos metálicos associados a membranas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

OLIVEIRA, M. B.; BARBATO, R. L. A. **Estudo das estruturas de membrana: uma abordagem integrada do sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v.7, n. 22, p. 107-122, 2005.

OLIVEIRA, V. M. B. **Análise e projeto de tenso-estrutura têxteis para coberturas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

PASQUAL, T. C. S. **Um estudo sobre a ação do vento nas estruturas de membrana**. Ed. Revisada. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PAULETTI, R. M. de O. **Considerações sobre o projeto e análise de estruturas retesadas**. Revista Técnica, ed. 175, p. 74-82, out. 2011.

PAULETTI, R. M. de O. **Projeto e Análise de Estruturas Retesadas (“Tensoestruturas”) Uma visão Geral – nota de aula**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PAULETTI, R. M. de O. **História, Análise e Projeto das Estruturas Retesadas**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PAULETTI, R. M. de 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.

PAULETTI, R. M. de O; BRASIL, R. M. L. R. F.; ALVIM, R. A. A. **A Large Membrane Roof for the Baptist Church of Fortaleza: from Models to Realization**. The International Association for Shell and Spatial Structures, Montpellier, 2004.

PONI, 2004. **Alta Costura**, Disponível em:<  
<http://piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/alta-costura-79733-1.aspx>>. Acesso em: 22 fev. 2014, 7:18:52.

PORTAL METALICA, 2013a. **A cobertura da IBC: Igreja Batista Centrak em Fortaleza**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/vvvvvv/a-cobertura-da-ibc-igreja-batista-central-em-fortaleza>>. Acesso em: 11 ago. 2013, 18:28:56.

PORTAL METALICA, 2013b. **Cobertura Tensionada do Anfiteatro Memorial dos Povos**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/cobertura-tensionada-do-anfiteatro-memorial-dos-povos>>. Acesso em: 11 ago. 2013, 18:30:02.

PORTAL METALICA, 2013c. **Vila da Copa: Jockey Club, SP**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/vila-da-copa-jockey-club-sp>>. Acesso em: 11 ago. 2013, 18:42:23.

PORTAL METALICA, 2013d. **Tensoestruturas: Shopping Spazio Desing**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/tensoestruturas-shopping-spazio-design>>. Acesso em: 11 ago. 2013, 18:43:54.

PORTAL METALICA, 2013e. **Mercado do Peixe - Angra dos Reis, RJ**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/mercado-do-peixe-angra-dos-reis-rj>>. Acesso em: 11 ago. 2013, 18:46:34.

PORTAL METALICA, 2013f. **A Feira de Ananindeua, Belém PA**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/a-feira-de-ananindeua-construcao-e-montagem>>. Acesso em: 11 ago. 2013, 18:50:53.

PORTAL METALICA, 2013g. **Anfiteatro do Parque dos Direitos da Criança e Adolescentes, SBC SP**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/anfiteatro-do-parque-dos-diretos-da-crianca-e-adolescentes-sbc>>. Acesso em: 11 ago. 2013, 18:50:19.

PORTAL METALICA, 2014h. **Tensoestrutura: Cobertura de Estruturas de Membrana Tensionada – Tensoestrutura**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/tensoestrutura-processo-projetivo>>. Acesso em: 18 fev. 2014, 15:49: 20.

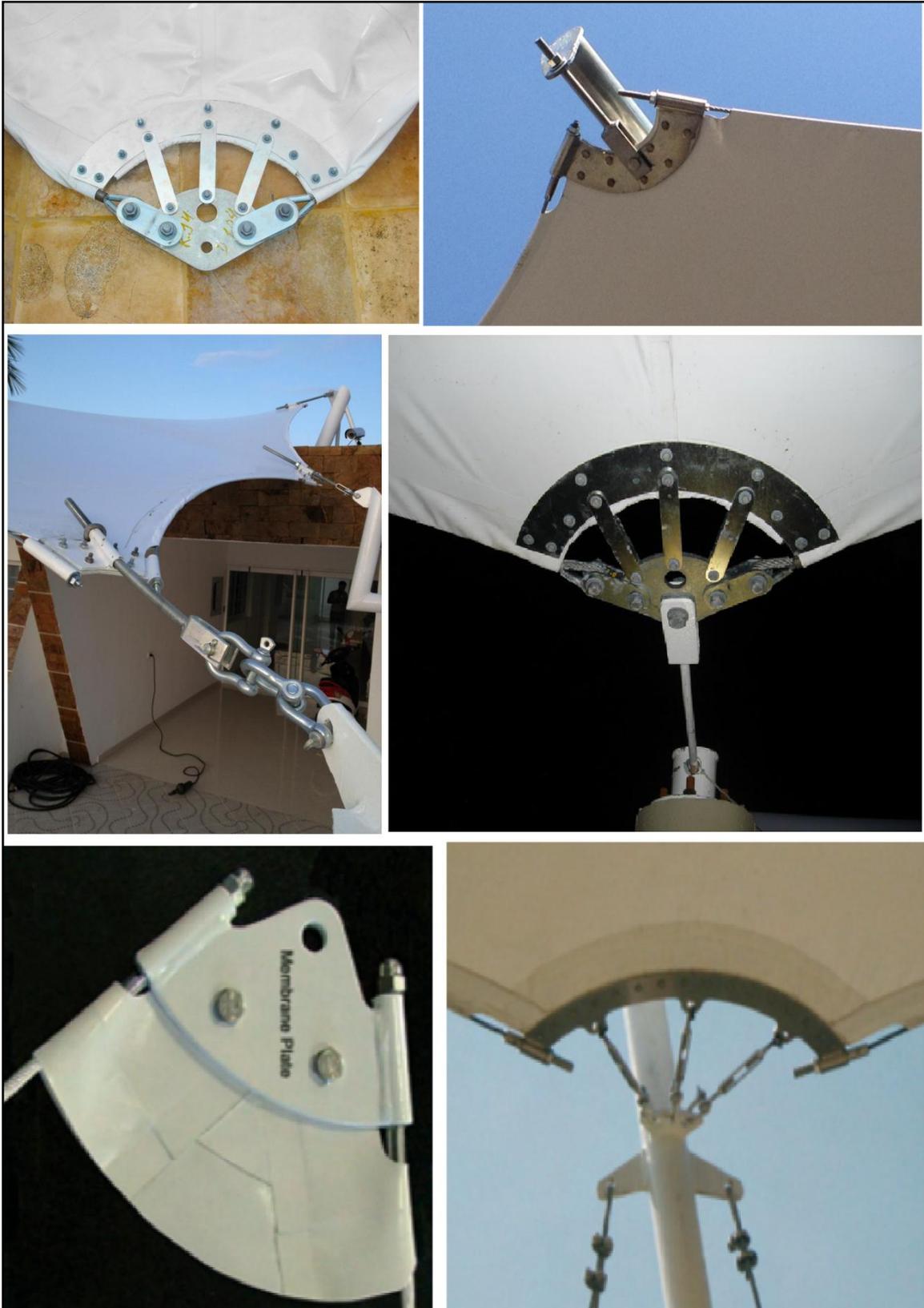
SALVADORI, Mario. **Porque os edifícios ficam de pé**. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

SERGE FERRARI, 2014. **Tipos de membranas**. Disponível em: <<http://www.sergeferrari.com/>>. Acesso em: 16 fev. 2014, 12:48:20.

SILVA, C. A. B. **Modelo computacional para a análise da tensoestrutura de cobertura do centro comunitário da universidade de Brasília**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

TECNO STAFF ENGENHARIA E ESTRUTURAS LTDA. **Shopping Spazio - Juiz de Fora - MG**. Disponível em: < <http://www.tecnostaff.com.br/artigos.html> >. Acesso em: 12 ago. 2013.

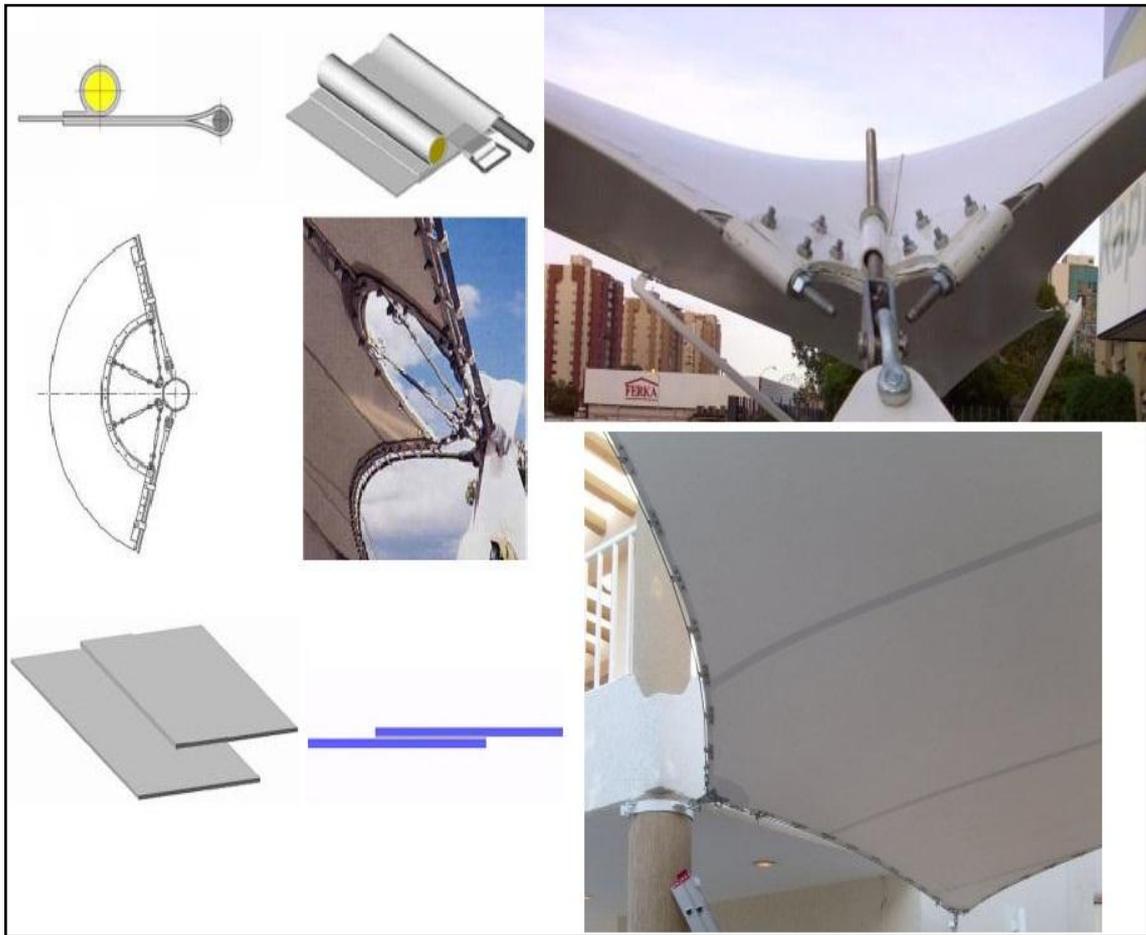
## ANEXO A – Exemplos de fixação da membrana com o mastro



Fonte: Impacta Tens. Disponível em: <<https://www.facebook.com/impactatens>>. Acesso em: 25 fev de 2014, 20:02:12.



## ANEXO C - Emendas das membranas e emendas nos cabos de bordo



Fonte: Impacta Tens. Disponível em: <<https://www.facebook.com/impactatens>>. Acesso em: 25 fev de 2014, 20:02:12.