

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TÊXTIL E MODA

RODRIGO PETENUCCI D'AVILA GONÇALVES

**Aplicação de têxteis na indústria da construção civil:
Membranas arquitetônicas têxteis**

São Paulo
2023

RODRIGO PETENUCCI D'AVILA GONÇALVES

**Aplicação de têxteis na indústria da construção civil:
Membranas arquitetônicas têxteis**

Versão corrigida

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Artes, Ciências e Humanidades
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciência
pelo Programa de Pós-graduação em
Têxtil e Moda

Área de Concentração:
Materiais e Processos Têxteis

Orientador:
Prof. Dr. Dib Karam Junior

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Artes, Ciências e Humanidades,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)
Brenda Fontes Malheiros de Castro CRB 8-7012; Sandra Tokarevicz CRB 8-4936

Petenuci D'Avila Gonçalves, Rodrigo
Aplicação de têxteis na indústria da construção
civil: Membranas arquitetônicas têxteis / Rodrigo
Petenuci D'Avila Gonçalves; orientador, Dib Karam
Junior. -- São Paulo, 2023.
153 p: il.

Dissertacao (Mestrado em Ciencias) - Programa de
Pós-Graduação em Têxtil e Moda, Escola de Artes, Ciências
e Humanidades, Universidade de São Paulo, 2023.
Versão corrigida

1. Arquitetura têxtil. 2. Membrana têxtil. 3.
Tensoestruturas. 4. Membrana arquitetônica. 5.
Estruturas retesadas. I. Karam Junior, Dib, orient.
II. Título.

Nome: GONÇALVES, Rodrigo Petenuci D'Avila

Título: Aplicação de têxteis na indústria da construção civil: Membranas arquitetônicas
têxteis

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Artes, Ciências e Humanidades
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciência
pelo Programa de Pós-graduação em
Têxtil e Moda.

Área de Concentração:

Materiais e Processos Têxteis

Aprovado em: ____ / ____ / _____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Agradecimentos

Queria agradecer inicialmente todos os que me incentivaram a fazer esse trabalho, nomeados aqui ou não, vocês foram essenciais para me motivar a fazê-lo e para manter a motivação para poder concluí-lo. Queria agradecer meu orientador Dib Karam Junior, que foi muito atencioso e gentil em muitos momentos nesses últimos anos, a e que infelizmente não pude conviver de maneira mais próxima devido a pandemia durante os primeiros anos do mestrado. Gostaria de agradecer imensamente aos meus queridos amigos e mentores, Paulo Fraga Burgo e Mônica Maria Donida Burgo, que desde a graduação foram fundamentais para o meu crescimento como arquiteto e pesquisador. Agradeço também aos meus pais e familiares pelo suporte e apoio, aos meus queridos amigos que sempre acreditaram em mim e me ajudaram a deixar o caminho mais ameno durante as dificuldades. Um agradecimento especial ao meu querido amigo Cristian, que assim como na graduação, me ajudou a revisar e me atentar aos pequenos detalhes da escrita do trabalho, e que sempre é um grande apoio nas horas de dificuldades, e um parceiro fantástico para pensar as loucuras que é a vida.

*“uma primeira ideia não tem por que ser seguida para todo o sempre ao pé da
letra”*

(SARAMAGO, 2017, p. 298)

RESUMO

GONÇALVES, Rodrigo Petenuci D'Avila. **Aplicação de têxteis na indústria da construção civil**: Membranas arquitetônicas têxteis. 2023. Número total de f. 153 Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Versão corrigida.

Essa dissertação tem como objetivo analisar as principais soluções têxteis para membranas arquitetônicas disponíveis, como as membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE (Politetrafluoroetileno) e as membranas de poliéster revestidas de PVC (Policloreto de vinila), além de apresentar técnicas e elementos envolvendo esse tipo de construção, os principais tipos de estruturas retesadas presentes na arquitetura e construção civil, suas características e técnicas construtivas, assim como os elementos que as compõem. Para tanto, o trabalho se deu através de uma revisão bibliográfica dos principais autores da área, tanto brasileiros quanto autores internacionais, de forma a sustentar uma posterior análise de obras construídas com esses métodos construtivos, através de construções nacionais e internacionais, identificando seus elementos, materiais e técnicas utilizadas, considerando as características construtivas e os resultados obtidos em cada um dos projetos arquitetônicos analisados, concluindo através dessas análises, que o método construtivo em questão pode ser muito eficiente economicamente se aplicado nas circunstâncias corretas, trazendo benefícios energéticos e de conforto para construção, mas que ainda encontra alguns entraves para a popularização no Brasil, como a falta de normas específicas e mão de obra qualificada.

Palavras-chave: Arquitetura têxtil. Membrana têxtil. Tensoestruturas. Membrana arquitetônica. Estruturas retesadas.

ABSTRACT

GONÇALVES, Rodrigo Petenuci D'Avila. **Textile application in the civil construction industry**: Textile architectural membranes. 2023. Number of pages p. 153 Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2023. Corrected version.

This dissertation aims to analyze the main textile solutions for architectural membranes available, such as PTFE (Polytetrafluoroethylene) coated fiberglass membranes and PVC (Polyvinyl chloride) coated polyester membranes, in addition to presenting techniques and elements involving this type of construction, the main types of tensioned structures present in architecture and civil construction, their characteristics and construction techniques, as well as the elements that compose them. Therefore, the work was carried out through a bibliographic review of the main authors in the area, both Brazilian and international authors, in order to support a subsequent analysis of works built with these constructive methods, through national and international constructions, identifying their elements, materials and techniques used, considering the constructive characteristics and the results obtained in each of the architectural projects analyzed, concluding through these analyzes that the constructive method in question can be very economically efficient if applied in the right circumstances, bringing energy and comfort benefits to construction, but which still encounters some obstacles to its popularization in Brazil, such as the lack of specific norms and qualified labor.

Keywords: Textile architecture. Textile Membrane. Tenso structures. Architectonic membrane. Tensile structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Protótipo do radome pneumático de Walter Bird	24
Figura 02: Esquema estrutural do Suncoast Dome, estádio de beisebol na Flórida	25
Figura 03: Formato de sela e a direção de suas curvaturas	27
Figura 04: Tenda Negra do Oriente Médio	30
Figura 05: Exemplo de tendas feita com ossos e pele de animais	30
Figura 06: Tenda de base cilíndrica	32
Figura 07: Tenda Yurt	34
Figura 08: Tenda Tuaregue	35
Figura 09: Planta e cortes de uma tenda negra	37
Figura 10: Tear beduíno utilizado para tecer as tendas	38
Figura 11: Tipos de ancoragem usadas em tendas negras	39
Figura 12: Tenda dos nômades do sudoeste do Marrocos	40
Figura 13: Ilustração da cobertura do teatro romano de Orange	42
Figura 14: Tenda de circo itinerante Chapiteau	44
Figura 15: Palco principal do Rock in Rio de 2001	46
Figura 16: Tenda auxiliar do Rock in Rio de 2001	46
Figura 17: Feira de rua na Vila Romana em São Paulo	47
Figura 18: Tendas militares em treinamento dos fuzileiros navais dos EUA	48
Figura 19: Abrigo para refugiados venezuelanos em Roraima	49
Figura 20: Atendimento do MSF aos refugiados venezuelanos em Roraima	50
Figura 21: Hospital de campanha contra a Covid-19 no Pacaembu em São Paulo	51
Figura 22: Abrigos para desabrigados na Turquia/Síria	52
Figura 23: Exemplo de barraca de camping	53
Figura 24: Tanque falso inflável utilizado durante a 2ª Guerra Mundial	55
Figura 25: Edifício com cobertura com cabos tensionados de Schnirch em Banska Bystrica	57
Figura 26: Esquema da estrutura do telhado de Schnirch	58
Figura 27: Corrente de sustentação do telhado da obra em Banska Bystrica	59
Figura 28: Pavilhões de Shookhov em Nijny-Novgorod, 1886	59
Figura 29: Arena Raleigh	60
Figura 30: Pavilhão de dança da Feira Federal de Horticultura em Colônia	63
Figura 31: Estádio Olímpico de Munique	64

Figura 32: Estrutura do U.S. Pavilion em Osaka no Japão em 1970	65
Figura 33: Esquema das membranas estruturais com tecelagem plana	70
Figura 34: Membrana de poliéster revestida de PVC	74
Figura 35: Membrana de fibra de vidro revestida de PTFE	76
Figura 36: Estádio Olímpico de Montreal no Canadá	78
Figura 37: Allianz Arena em Munique na Alemanha	80
Figura 38: Allianz Arena em diferentes configurações de cores.	81
Figura 39: Allianz Arena em diferentes configurações de cores.	81
Figura 40: Centro Aquático Nacional de Pequim	81
Figura 41: Khan Shatyr em Astana no Cazaquistão	83
Figura 42: Exemplos de uniões em membrana têxtil	87
Figura 43: União rígida entre duas membranas	88
Figura 44: Exemplos de conexões de canto	90
Figura 45: Exemplos de conexões de canto	90
Figura 46: Exemplos de conexão de topo em anel rígido	91
Figura 47: Terminal Hajj	94
Figura 48: Cobertura do Terminal Hajj	95
Figura 49: Abaixo da cobertura do Terminal Hajj	96
Figura 50: Abaixo da cobertura do Terminal Hajj	96
Figura 51: Relação de tamanho entre o Boeing 747, maior avião de passageiros da época da construção, e a estrutura.	97
Figura 52: Millennium Dome visto do Tâmis	98
Figura 53: Rede de cabos do Millennium Dome antes de receber a membrana de fibra de vidro revestida de PTFE	99
Figura 54: Ancoragem dos cabos que se ligam aos mastros	100
Figura 55: Visão interna dos mastros	101
Figura 56: Visão interna dos mastros	101
Figura 57: Área interna do Millennium Dome	101
Figura 58: Visão geral da cobertura do Campus Luigi Einaudi	102
Figura 59: Borda da cobertura na praça central da universidade	103
Figura 60: Planta e perspectiva da cobertura e sua padronagem	104
Figura 61: Área abaixo da cobertura	105
Figura 62: Detalhes das estruturas rígidas e sua interação com as membranas	105
Figura 63: Detalhes das estruturas rígidas e sua interação com as membranas	105

Figura 64: Burj Al Arab	106
Figura 65: Membrana da fachada vista de dentro do átrio do Burj Al Arab	107
Figura 66: Arena de Basquete dos Jogos Olímpicos de Londres	108
Figura 67: Fachada do Estádio Internacional Rei Fahd em Riad	109
Figura 68: Cobertura da Quadra Central de Wimbledon	110
Figura 69: Arena da Amazônia em Manaus	112
Figura 70: Campo e arquibancadas da Arena da Amazônia	113
Figura 71: Corte da área de arquibancada da Arena da Amazônia	114
Figura 72: Teatro de Arena Elis Regina	115
Figura 73: Fachada do Teatro de Arena Elis Regina	116
Figura 74: Outro ângulo do Teatro de Arena Elis Regina	116
Figura 75: Plateia do Teatro de Arena Elis Regina	117
Figura 76: Vista aérea do Estádio do Maracanã	118
Figura 77: Visão da área interna do Estádio do Maracanã	119
Figura 78: Visão interna da cobertura e das arquibancadas do Maracanã	120
Figura 79: Fachada do Centro Comunitário Athos Bulcão em Brasília	121
Figura 80: Interior do Centro Comunitário Athos Bulcão	122
Figura 81: Cobertura de membrana na Biblioteca de São Paulo	123
Figura 82: Visão aérea da Feira da Cidade de Ananindeua	124
Figura 83: Vista lateral da Feira da Cidade de Ananindeua	125
Figura 84: Anfiteatro da Igreja Batista Central de Fortaleza	127
Figura 85: Ginásio Paulo Skaf na cidade de Bauru/SP	128
Figura 86: Estádio Nacional de Brasília “Mané Garrincha”	130
Figura 87: Estádio Beira-Rio em Porto Alegre no Rio Grande do Sul	131
Figura 88: Aeroporto Internacional de Denver durante a noite	133
Figura 89: Cobertura do Aeroporto Internacional de Denver	134
Figura 90: Interior do terminal de passageiros do Aeroporto Internacional de Denver	135
Figura 91: Detalhes internos da cobertura	136
Figura 92: Detalhes internos da cobertura	136
Figura 93: Colchões inflados acima das paredes de vidros	137
Figura 94: Conexão de canto da cobertura do aeroporto	138
Figura 95: Detalhe da cobertura em um dos seus extremos	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Corp.	Corporation
EFL	Educational Facilities Laboratory
EUA	Estados Unidos da América
ETFE	Etileno tetrafluoroetileno
FIFA	Fédération Internationale de Football Association
GMP	Gerkan, Marg und Partner
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
MSF	Médicos sem fronteiras
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
PVC	Policloreto de vinila
PVF	Fluoreto de polivinila
PTFE	Politetrafluoroetileno
RSHP	Rogers Stirk Harbour + Partners
SESI	Serviço Social da Indústria
SOM	Skidmore, Owings & Merrill
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	METODOLOGIA	19
3	TIPOS DE ESTRUTURAS TÊXTEIS E DEFINIÇÕES	21
4	PANORAMA HISTÓRICO	29
4.1	TENDAS PRIMITIVAS.....	30
4.2	POVOS NÔMADES.....	31
4.2.1	Tendas cônicas do norte da Eurásia e norte da América.....	31
4.2.2	Tendas asiáticas.....	33
4.2.3	Tendas africanas.....	34
4.2.4	Norte da África e Oriente Médio.....	36
4.3	MUNDO ANTIGO, IDADE MÉDIA E RENASCENÇA.....	40
4.3.1	Mundo antigo.....	41
4.3.2	Idade média e renascença.....	42
4.4	ESTRUTURAS EFÊMERAS.....	42
4.4.1	Tendas para eventos, feiras e celebrações.....	42
4.4.2	Tendas militares.....	48
4.4.3	Estruturas emergenciais.....	49
4.4.4	Outras tendas e outros usos de têxteis estruturais retesados.....	53
4.5	ESTRUTURAS PERMANENTES.....	56
4.5.1	Coberturas retesadas e o uso das membranas arquitetônicas.....	62
5	MEMBRANAS TÊXTEIS.....	67
5.1	POLIÉSTER/PVC.....	72
5.2	FIBRA DE VIDRO/PTFE.....	75
5.3	OUTRAS MEMBRANAS E MATERIAIS.....	77
5.3.1	Aramida revestida de PVC.....	77
5.3.2	Fibra de vidro revestida de silicone.....	79
5.3.3	ETFE.....	79
5.3.4	PTFE expandido.....	83
5.4	COMPONENTES DAS ESTRUTURAS DE MEMBRANA ESTRUTURAL.....	84
5.5	UNIÕES, CONEXÕES E JUNÇÕES.....	86
6	ARQUITETURA TÊXTIL HOJE.....	92
6.1	OBRAS COM MEMBRANA ARQUITETÔNICA NO MUNDO.....	92

6.1.1	Terminal Hajj do Aeroporto Internacional Rei Abdulaziz.....	93
6.1.2	Millennium Dome.....	98
6.1.3	Campus Luigi Einaudi da Universidade de Turim.....	102
6.1.4	Outros projetos.....	106
6.2	OBRAS COM MEMBRANA ARQUITETÔNICA NO BRASIL.....	110
6.2.1	Arena da Amazônia.....	111
6.2.2	Teatro de Arena Elis Regina.....	114
6.2.3	Cobertura do Estádio do Maracanã.....	117
6.2.4	Outros projetos.....	120
6.3	AEROPORTO INTERNACIONAL DE DENVER.....	132
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	141
	Referências.....	145

1 INTRODUÇÃO

O uso de têxteis na arquitetura remonta ao início da construção de abrigos pelos seres humanos, que até então usavam abrigos naturais disponíveis na natureza como forma de se proteger do clima e de predadores.

As tendas, associadas à construção arquitetônica mais primitiva e natural, acompanharam a história da evolução do ser humano e continuam mantendo um papel significativo hoje. Suas origens remontam aos primórdios do homem, explicadas por restos de 40.000 anos de idade encontrados no que hoje é conhecido como Ucrânia, quando usavam ossos de mamute e peles de animais, feitos de maneira rudimentar para se proteger do clima e das agressões externas, tornando o tecido o primeiro recurso a fornecer abrigo fabricado pelo homem. (BAHAMÓN, 2004)

Além desse uso longínquo, temos usos vernaculares mais recentes e de uso mais conhecido, como abrigos tribais africanos e de povos indígenas americanos. O uso de peles de animais é amplamente visto dentro dessas comunidades, assim como o uso de fibras de origem vegetais, para a confecção de superfícies que servem de cobertura e fechamentos de seus abrigos. O uso de estruturas desmontáveis e temporárias com uso têxtil é amplamente difundido entre povos nômades, pela possibilidade de reutilização e leveza para o transporte.

As tendas e todas as arquiteturas nômades em geral, devido à sua montagem e desmontagem contínuas, precisam de uma estrutura flexível e de um sistema de transporte fácil (BAHAMÓN, 2004). Essa característica se estende à algumas estruturas de uso temporário que utilizamos com frequência, como em barracas de acampamento, tendas desmontáveis, guarda-sóis, entre outros. As tendas, ainda segundo Bahamón (2004), geralmente, consistem em formas geométricas simples, baseadas em plantas circulares ou quadradas, que permitem fácil manipulação por qualquer membro da comunidade e que se herdaram de geração para geração.

Em tempos mais recentes, vemos o uso dos têxteis em arquitetura efêmera, em comunidades itinerantes, como circos, com suas grandes tendas desmontáveis que percorrem diversas localidades. Durante toda a história, as tendas também foram usadas como estruturas temporárias em guerras, servindo de abrigo, posto de comando, hospitais, entre outros.

No século XIX vemos o surgimento dos circos itinerantes com tendas do tipo *Chapiteau*, uma tenda que é uma das precursoras das estruturas têxteis contemporâneas. Essas tendas possuíam uma estrutura de cabos e mastros, com uma cobertura têxtil retesada que podia ser feita de linho ou cânhamo (FORSTER; MOLLAERT, 2004). Ainda se tratando das estruturas de caráter temporário, podemos citar tendas de feiras e festivais, hospitais de campanha, abrigos para refugiados, abrigo temporário após desastres naturais, dentre muitas outras atividades que necessitam de um abrigo que precisará ser movido com frequência ou removido após seu uso.

Já no século XX vemos os têxteis se expandirem para usos mais diversos na construção civil, com figuras de grande renome para arquitetura, como o suíço Le Corbusier fazendo propostas de grandes construções com material têxtil aplicado para solução arquitetônica, como a proposta denominada “projeto D” do Pavilhão dos Tempos Novos na Exposição Internacional de Paris, com uma grande cobertura em lona para abrigar a feira em questão. Porém foi com Frei Otto que a arquitetura moderna encontrou um dos maiores nomes do uso de têxteis na construção civil.

Frei Otto é uma figura que marca uma virada na história da arquitetura moderna, especialmente por conta de seus estudos sobre arquitetura têxtil e membranas estruturais. (BAHAMÓN, 2004, p.10). Ele se dedicou durante toda vida às pesquisas em arquitetura, o que o motivou a fundar o *Institut für Leichte Flächentragwerke* (Instituto de Estruturas-Membranas), voltado para a pesquisa de uso de membranas retesadas na construção. (RAUTERBERG, 2009)

Durante toda a vida ele teve paixão por estruturas provisórias e pela arquitetura temporária. E isso também significa que muitos de seus prédios a muito desapareceram, tal como seu pavilhão para a Expo de Montreal, em 1967. Outras construções, como os telhados para o Estádio Olímpico de Munique, ficaram profundamente gravadas na memória coletiva. (RAUTERBERG, 2008, p.136)

O uso de têxteis se intensificou na construção civil no século XX, tendo ótimo representantes em grandes obras o Aeroporto Internacional de Denver, obra do arquiteto Curtis W. Fentress, assim como o Aeroporto Internacional de Jidá na Arábia Saudita, com uma área coberta de 440.000m². Porém o cenário no Brasil é mais discreto que o internacional, com a maioria das obras por aqui sendo de caráter

temporário, mas algumas estruturas surgiram com mais frequência na última década, com destaque para as obras de construção e reforma de alguns dos estádios que sediaram jogos da Copa do Mundo de Futebol em 2014.

Os tipos de estruturas mais comuns no Brasil são as tensionadas de pequeno porte e as estruturas temporárias em forma de tendas, armazéns e galpões industriais (nas quais as lonas ficam esticadas). Muitos dos armazéns são estruturas com formas sinclásticas (estruturas infláveis). São bastante usadas e, aparentemente, têm bom potencial de mercado, uma vez que várias empresas montadoras oferecem esta solução. (ASSIS, 2012)

Apesar de um crescente uso desse tipo de solução arquitetônica na construção civil brasileira, como no caso do Arena Amazônia em Manaus e a nova cobertura do estádio do Maracanã no Rio de Janeiro, ainda temos um cenário muito discreto na utilização de membranas têxteis no Brasil.

Nas últimas duas décadas, ocorreu o advento de uma série de empresas nacionais com condições de oferecer ao mercado estruturas de membranas retesadas para vão pequenos e médios. Muitas obras formalmente interessantes tem sido então propostas. As características do mercado brasileiro são tais contudo, que as obras existentes são propostas usualmente com materiais mais baratos, e de menor desempenho, que aqueles empregados nos países mais avançados neste campo. (PAULETTI, 2003)

O uso de membranas arquitetônicas, principalmente em grandes obras, pode ser uma solução muito viável economicamente e estruturalmente, porém a sua utilização tem algumas complexidades em relação a composição da forma e distribuição da carga estrutural, o que exige muitas vezes *softwares* específicos para sua elaboração, o que acaba dificultando o acesso ao método construtivo. Outros agravantes incluem o fato de o material utilizado em obras de caráter definitivo ser importado, além de existir pouco material técnico referente ao assunto em língua portuguesa e carecer de uma norma nacional sobre o assunto, cabendo o uso de normas internacionais para respaldo.

Assim sendo, o objetivo principal desse trabalho é analisar as soluções mais comuns de membranas têxteis disponíveis no mercado, caracterizando-as e discorrendo sobre as suas possibilidades de uso e particularidades, fazendo uso de análise de obras com esse tipo de material para facilitar a compreensão e visualização do material empregado.

Como objetivo secundário, temos a busca dos materiais e técnicas envolvidas na utilização desse tipo de material na construção civil, suas particularidades como técnica construtiva e as características únicas desse tipo de construção.

2 METODOLOGIA

A metodologia a ser empregada nessa dissertação será a revisão bibliográfica de autores que são referência no âmbito das construções retesadas e membranas arquitetônicas têxteis, que servirá de embasamento para a posterior análise de obras com o emprego do material em estudo.

Para tanto, primeiramente será feita uma contextualização histórica acerca dos materiais têxteis utilizados em construções e abrigos, os povos e civilizações que fizeram ou fazem uso de técnicas que tenham relação com as características empregadas em construção com membranas arquitetônicas têxteis, até chegarmos em tempos mais recentes que temos uma ligação mais direta entre as técnicas construtivas empregadas nesse tipo de construção e o que é empregado atualmente em construções com membranas têxteis.

A partir desse ponto, analisaremos de forma mais linear as obras mais significativas do século XIX até os dias de hoje, além de áreas correlatas que tenham características que são compatíveis com as técnicas usadas no tipo de construção estudada, até chegarmos em obras atuais com o uso de membranas têxteis arquitetônicas em grandes obras, como nos trabalhos de Frei Otto e no aeroporto de Denver nos EUA.

Para a possibilitar a conclusão dos objetivos propostos, será feita uma verificação das características e métodos construtivos necessários para a utilização de membranas têxteis na arquitetura e na construção civil, as características gerais dos principais tipos de membranas disponíveis, as técnicas envolvidas para sua utilização como componente arquitetônico e as estruturas principais e secundárias envolvidas nesse tipo de construção, que possibilitará a análise de obras internacionais e nacionais, a fim de verificar o modo de uso e as possibilidades que as membranas têxteis proporcionam na construção civil.

As obras a serem analisadas foram escolhidas com o critério principal de variedade de técnicas construtivas, de modo a ampliar as avaliações das técnicas que podem ser empregadas com as membranas arquitetônicas têxteis, as diferentes formas e possibilidades de forma e visual, bem como os impactos que a escolha esse

tipo de material trouxe para cada obra dependendo das características individuais de cada uma delas. Sendo assim, serão analisadas mais detalhadamente três obras internacionais e três obras nacionais, com um espaço para falar mais brevemente sobre outras obras e as características de cada uma delas.

3 TIPOS DE ESTRUTURAS TÊXTEIS E DEFINIÇÕES

Os materiais têxteis estão presentes nas construções há milhares de anos, e muitas técnicas e tecnologias de construção existem hoje em dia fazendo uso desse tipo de material. Algumas dessas estruturas tem caráter permanente, enquanto outras tem caráter temporário, sendo que cada uma dessas categorias ainda engloba várias técnicas de construção e vários tipos de materiais.

Um dos maiores problemas quando vamos tratar de arquitetura têxtil é a falta de consenso quando se trata da definição do termo por si só. Em sua dissertação de mestrado, Assis (2012) discorre sobre as diversas definições que se deparou enquanto realizava a pesquisa para seu trabalho, e como cada um dos autores em questão deixava de lado ou incluía certos tipos de estrutura, criando uma divergência no que deveria ser considerado ou não como arquitetura têxtil. Além disso, temos alguns outros termos que surgem em nossas pesquisas que num primeiro momento parece se tratar de coisas distintas, mas que quando analisados dentro do contexto que está sendo falado, se mostram com significado igual ou muito parecido.

Esse capítulo servirá então para condensar alguns desses termos e elucidar algumas definições, ou até mesmo estabelecer algumas definições que sirvam para o entendimento do trabalho em si, sem buscar criar um entendimento definitivo do que se trata a arquitetura têxtil e os termos relacionados a ela, mas sim para facilitar o entendimento de uma área que se mostra muito dissonante em relação as suas definições.

No desenvolvimento desse trabalho, sempre que falarmos em arquitetura têxtil, englobaremos todo material que constitua estruturalmente um elemento arquitetônico, fazendo as vezes da estrutura de sustentação em si, como no caso de membranas arquitetônicas, ou elementos de fechamento, como no caso de materiais que não sejam tensionados. Nesse caso, consideraremos também estruturas de caráter temporário e que não necessariamente sejam consideradas arquitetura, como no caso de tendas e barracas, por possuírem características que se assemelham as usadas em projetos de arquitetura, seja em sua estrutura, técnica construtiva ou materiais empregados. Essa abordagem em relação ao que considerar arquitetura têxtil é nem próxima do que considera Carrió (1991):

Naturalmente, poderíamos entrar na discussão se um “simples tecido” pode constituir arquitetura no sentido tradicional da palavra, quando o uso principal, e quase exclusivo, que se faz dele nos edifícios, tem sido um mero complemento protetor ou decorativo. Porém, a partir do momento em que o tecido não é um simples complemento, mas constitui a estrutura, o fechamento e a forma do edifício, e cumprem suas funções principais, sua categoria como material ou elemento componente atinge a de unidade construtiva e até mesmo a de sistema construtivo, e os resultados construtivos obtidos com ele podem ser considerados definitivamente como Arquitetura no sentido mais amplo do termo. (CARRIÓ, 1991, p. 9)

Com relação aos materiais empregados na arquitetura têxtil, as membranas serão as mais tratadas nesse trabalho. Termos como membrana estrutural, membrana arquitetônica, têxtil estrutural, ou simplesmente membranas, são todas expressões que se referem ao mesmo tipo de material, ou seja, membranas de composição têxtil com características estruturais utilizadas na construção civil, independente do material empregado na composição da membrana.

Outro termo que diverge com alguma frequência na literatura é a palavra “tensionada”, que em algumas vezes podemos encontrar como “tensada”, principalmente em alguma literatura de origem na língua espanhola. Nos textos do professor Pauletti, ele se refere a esse tipo de estrutura como “retesada”, que seria o mesmo que “esticada”, o que na prática é uma definição melhor que “tensionada”, por caracterizar que o objeto em questão sofreu uma tensão, foi tensionada, até estar retesada, ou seja, esticada. Obata justifica sua adoção do termo “tensoestrutura” com os mesmos argumentos, apesar da definição de Pauletti ser mais precisa.

Justificando pela incoerência de ser um termo que comporta o anglicismo e a correlação incorreta da tradução da palavra “tension”, que é tração e não tensão e também a palavra tensão não corresponde ao sistema específico das estruturas retesadas e sim um estado que toda e qualquer estrutura se encontra em sua função. Mas atualmente constata-se que o termo tensoestrutura já se encontra arraigado tanto para as coberturas com tecidos tensionados como para estruturas de membranas e cabos, o que leva a sua adoção como identificação neste trabalho. (OBATA, 2010, p. 21-22)

Nesse mesmo sentido, Pauletti (2003) argumenta o uso inadequado do termo “tensoestrutura”, já que o termo “*tension*” em inglês designa apropriadamente os estados de tensões de tração na estrutura, mas o termo em português não tem a mesma singularidade de significado, uma vez que o termo “tensão” corresponde a todos os estados de solitação interna da estrutura. Sendo assim, apesar de ser um termo usual para se referir a esse tipo de estrutura, tensoestruturas também estaria inadequado conceitualmente. E ele ainda complementa:

Neste sentido, também é inadequada a expressão “estruturas tensionadas” posto que neste estado encontram-se todas as estruturas. Também se torna inadequado falar de estruturas “tracionadas” ou “protendidas”: muitas estruturas podem estar tracionadas sem caracterizarem sistemas retesados (isto é, sem dependerem desse estado para funcionarem efetivamente), e o termo “protendido” já encontra uso corrente no contexto de outros sistemas estruturais, de modo que sua adoção no campo das estruturas retesadas pode introduzir alguma confusão conceitual. (PAULETTI, 2003, p. 1)

Apesar do termo “retesada” ser mais preciso na sua definição quando falamos desse tipo de estrutura, esse trabalho não irá limitar seu uso a esse termo, uma vez que os termos “tensionada” e “tensoestruturas” tende a aparecer com frequência nas descrições por ser um termo mais usual e encontrado mais amplamente na literatura, mesmo que conceitualmente errado. Sendo assim, quando qualquer um dos termos em questão aparecer neste trabalho, podem ser considerados o mesmo tipo de estrutura, que tem características retesadas devido aos esforços de tração a que é submetida.

Quando falamos de tensoestruturas ou estruturas retesadas, estamos falando de uma grande variedade de estruturas que possuem características em seu estado, mas que podem ser compostas por estruturas bem distintas. Quando trazemos o termo para a arquitetura têxtil, podemos dividir essas estruturas em quatro categorias: estruturas pneumáticas, redes de cabos, membranas têxteis e domo de cabos.

As estruturas pneumáticas, como diz Pauletti (2003, p. 49), são “as estruturas retesadas por excelência, pois que são as únicas em que é possível ter todos os elementos trabalhando em tração”. Esse tipo de estrutura tem essa característica por ter sua forma e estrutura mantida após ser inflada como um balão, garantindo que suas superfícies estejam esticadas (retesadas).

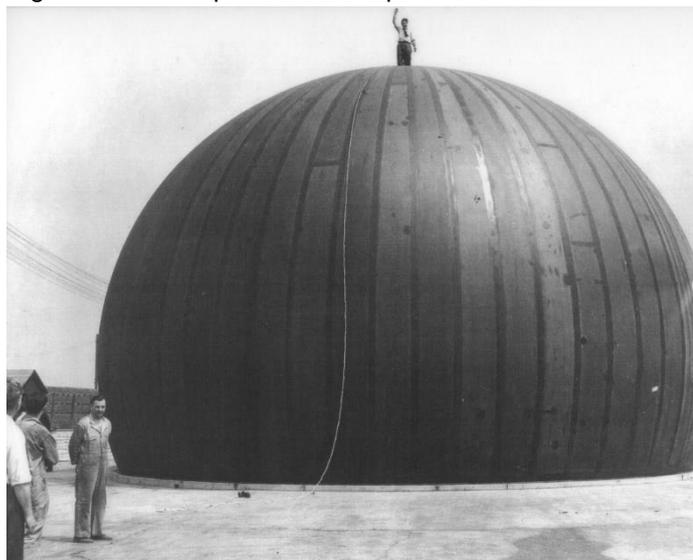
O telhado de estrutura pneumática fornece uma maneira econômica para alcançar grandes vãos. Tais estruturas foram propostas pela primeira vez por William Lanchester da Inglaterra em 1917 para uso como hospitais de campanha. Ele recebeu uma patente, mas nunca construiu uma. Em 1946, Walter Bird foi o pioneiro do radome; o primeiro foi construído em fibra de vidro revestida com neoprene¹ com diâmetro de 15 metros. Na década de 1960, sua empresa Birdair os construía com vãos de mais de 60 metros usando um tecido Dacron² laminado com revestimento de Hypalon³. (SHAEFFER, 1996 p. 1-4, tradução nossa)

¹ Borracha sintética de cloropreno

² Poliéster

³ Borracha sintética de polietileno clorossulfonado

Figura 01: Protótipo do radome pneumático de Walter Bird



Fonte: BIRDAIR, 1948.

Hoje em dia temos uma variedade diferente de materiais que estão sendo usados para compor as estruturas pneumáticas, e na grande maioria dos casos, esses materiais têm sido associados às estruturas mais duráveis, pois a confiabilidade desse tipo de estrutura era um problema no início de seu uso, principalmente em locais onde tem incidência de neve no inverno, com muitos problemas sendo encontrado nessas estruturas até o começo da década de 1970, como vazamento de ar, por exemplo. É importante deixar claro, porém, que nem todas as estruturas pneumáticas hoje em dia fazem uso do elemento têxtil, com novos materiais de comportamento semelhante, mas que não utilizam tecidos em sua composição.

As estruturas pneumáticas ainda podem ser divididas em duas categorias. A primeira delas são as estruturadas por ar, ou seja, infladas até o ponto que a pressão interna seja maior que a externa e a superfície que compõe a estrutura fique retesada. Essa diferença de pressão é adquirida através de ventiladores que sopram ar para dentro da estrutura. É interessante notar que esse tipo de estrutura não necessita de colunas, paredes, arcos ou qualquer tipo de estrutura rígida para se manter em pé. (BRADATSCHE et al., 2004)

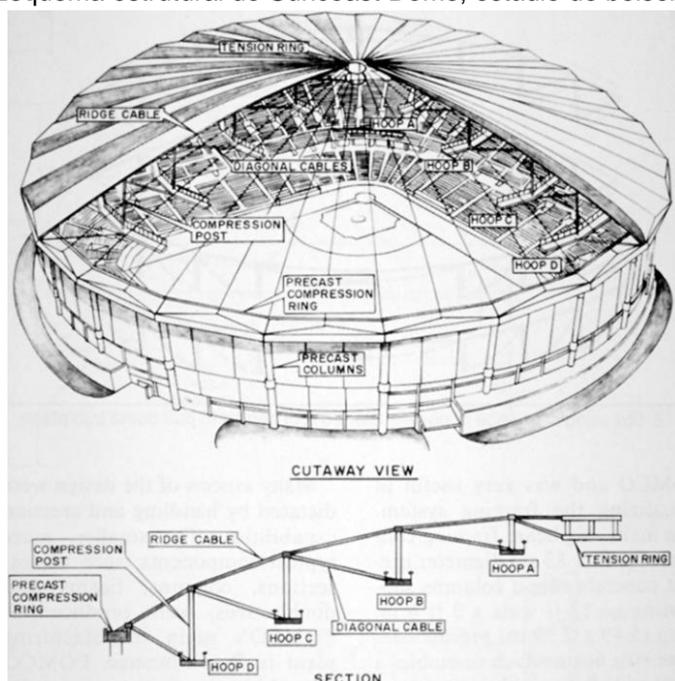
O segundo caso de estrutura pneumáticas são os colchões inflados. Esse tipo de estrutura é muito comum de ser utilizado nos dias de hoje em estruturas compostas por ETFE (Etileno tetrafluoroetileno), com colchões estruturados por cabos de aço ou fixados em uma outra estrutura rígida. Da mesma forma que o caso anterior, esses

colchões inflam com a diferença de pressão entre o ar interno e externo. (BRADATSCHE et al., 2004)

As redes de cabos são, assim como o nome diz, uma rede de cabos de aço que compõe a estrutura, normalmente em coberturas. Estrutura desse tipo foi utilizada na Arena Raleigh na Carolina do Norte, no Estados Unidos, sendo um dos marcos de estruturas tensionadas, que serviu de inspiração para muitas obras posteriores. Apesar de ser um tipo de estrutura que teve algumas obras notáveis entre a década de 1950 e 1970, se tornaram menos comuns com o surgimento das membranas arquitetônicas, sendo que sua utilização começou a ser empregada mais em conjunto com outros materiais, como reforço em estruturas pneumáticas por exemplo.

Os domos de cabos são as mais recentes dessa família de estruturas retesadas, tendo sua primeira estrutura construída com sucesso na década de 1980 em Seul na Coreia do Sul, com o projeto concebido pelo escritório de David Geiger. O sistema estrutural desses domos é baseado nos *tensegrity domes* de Buckminster Fuller, que precisaram de algumas modificações e ajustes no projeto, que foram feitas por Geiger e David Chin, como forma de superar alguns problemas decorrentes de cargas assimétricas sofridas pela estrutura. Com esses problemas superados, foi possível a construção de forma segura desse tipo de estrutura. (SHAEFFER, 1996)

Figura 02: Esquema estrutural do Suncoast Dome, estádio de beisebol na Flórida



Fonte: COLUMBIA UNIVERSITY, s/d.

As membranas arquitetônicas surgiram após as estruturas pneumáticas começarem a ser usada com mais frequência, o que trouxe a necessidade de materiais mais duráveis e resistentes para essas estruturas. Posteriormente, esses materiais foram sendo utilizados em estruturas que não eram pneumáticas, que acabaram se tornando mais comuns que as estruturas sustentadas por ar. Quando falamos de membranas arquitetônicas no presente trabalho, estamos nos referindo à materiais têxteis fabricados com objetivo de suportar altas cargas de tração, cobrir grandes vãos e possuírem alta durabilidade. Entre os materiais mais comuns para esse tipo de aplicação hoje, temos o poliéster revestido de PVC e a fibra de vidro revestida de PTFE (Teflon). Existem outros materiais que podem ser aplicados para mesma finalidade, mas sem dúvidas esses dois são os mais empregados em obras que necessitam de membranas na sua estrutura.

No caso das membranas também podemos encontrar algumas variações em relação aos termos usados para se referir ao material. Em alguns lugares quando se referem à arquitetura têxtil, estão falando exclusivamente às membranas, o que não vai ser o caso desse trabalho, como explanado anteriormente. Termos como “membrana tensionada” e “membrana arquitetônica”, por exemplo, se referem sempre ao mesmo tipo de material. Outro aspecto importante a deixar claro, é que algumas estruturas, como o caso do domo de cabos, além de ser uma estrutura que é retesada por si própria, ainda usa como revestimento as membranas arquitetônicas, que também são utilizadas retesadas.

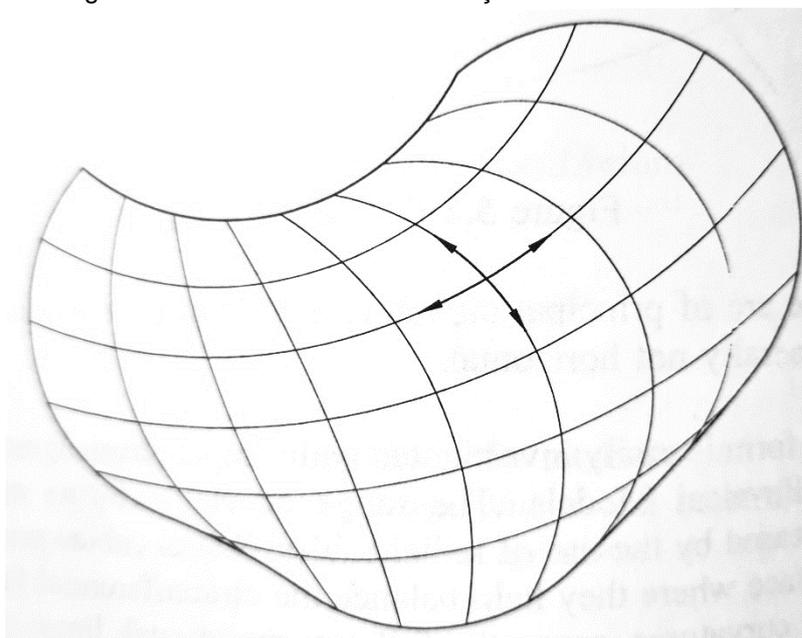
Outra definição importante a ser feita em relação as estruturas retesadas é quanto as estruturas sinclásticas e anticlásticas. Estruturas sinclásticas são aquelas que possuem curvatura sempre no mesmo sentido. Um bom exemplo desse tipo de estrutura são as pneumáticas, onde a pressão do gás interno faz com que a estrutura se infle em todos os sentidos possíveis, sempre com o mesmo direcionamento da curvatura. Esse caso se aplica a colchões de ar como nos vistos muito frequentemente com o uso do ETFE, em estruturas infladas de modo geral e estruturas que são cheias de líquidos.

As formas sinclásticas mostram curvaturas primárias em todos os pontos de sua superfície. As estruturas da membrana sinclástica são moldadas e pré-tensionadas e estabilizadas por uma diferença na pressão do fluido ou do gás através da pele da membrana. As forças na membrana são diretamente

proporcionais à curvatura da membrana com raios maiores gerando tensões maiores. Estruturas com formato hidrostático são o sistema de maior distribuição de carga na natureza. Essas características podem ser vistas em gotas de água, bem como em células vivas. A pressão hidrostática aumenta com a altura e cria formas com raios que mudam continuamente. Por outro lado, a estrutura inflada a ar na atmosfera natural pode ser considerada como sendo uniformemente carregada (BRADATSCHE et al., 2004)

Por outro lado, as estruturas anticlásticas são aquelas que possuem curvaturas em sentido distinto, algo natural em estruturas de membrana retesada por cabos por exemplo. Como descreve Ishler (1996a), “quando as principais curvaturas em um ponto são em direções opostas, como em formato de sela, a superfície é anticlástica”, como podemos ver na figura 03.

Figura 03: Formato de sela e a direção de suas curvaturas



Fonte: ISHLER, 1996a

Em uma estrutura de membrana, podemos ter diversas curvaturas em diversos sentidos distintos a depender da complexidade da estrutura e as formas adotadas. A mais básica dessas formas é justamente a de sela, com a variante de cumee vale sendo também muito utilizada em estruturas de membrana, sendo em ambos os casos superfícies com formas anticlásticas. (BRADATSCHE et al., 2004; ISHLER, 1996a)

Quando falamos de uso de têxteis na construção civil, também estamos falando de têxteis que não são necessariamente retesados, o que caracteriza que esse material não está sendo usado de maneira estrutural. Esses materiais nesses casos

normalmente são utilizados como forma de fechamento de vãos, seja nas laterais, seja na cobertura. Esse tipo de uso é característica das mais primitivas tendas construídas pela humanidade, e presente em diversas tribos e civilizações ao redor do globo.

As tendas tiveram uma importância enorme na história, sendo o primeiro abrigo artificial utilizado pelos seres humanos, e sendo utilizada nas mais diversas áreas até os dias de hoje. Encontramos tendas em feiras, festivais, eventos dos mais diversos tipos, em campos de refugiados, em hospitais de campanha, em uso militar. Seu uso é muito amplo e muito diversificado, sendo uma ótima opção por ser de fácil transporte e montagem rápida, o que sempre foi uma das grandes vantagens desse tipo de abrigo.

Além dos usos aparente de têxteis como veremos no decorrer do trabalho, onde o material é muitas vezes o que caracteriza visualmente as estruturas, podemos encontrar têxteis na construção civil e na arquitetura em diversos outros usos, seja como reforço estrutural, acabamentos, decoração, seu uso é praticamente ilimitado e extremamente diverso. Porém nesse trabalho estaremos voltados para os materiais de uso estrutural e de fechamento, focando principalmente nas membranas arquitetônicas e estruturas correlatas, seja por característica de uso do material, seja por característica de uso da estrutura.

4 PANORAMA HISTÓRICO

Os primeiros abrigos artificiais construídos pelos seres humanos eram constituídos estruturalmente de galhos e ossos de animais, com a vedação das aberturas ficando a cargo de peles de animais. A facilidade de desmonte desses abrigos possibilitava a sua locomoção para outras localidades, o que nos faz relacionar as tendas com as culturas nômades, principalmente as que vivem em regiões desérticas, que até os dias de hoje usam estruturas desse tipo em suas culturas.

Praticamente todos os povos nômades das regiões áridas e estépicas do mundo fizeram –e fazem– uso de tendas como moradias. Dentre as tendas nômades, destaca-se a tenda negra do Oriente Médio, a qual, por ter sua rigidez garantida pela protensão do tecido de cobertura, é o tipo que mais se aproxima, em termos de forma e de funcionamento estrutural, das tendas protendidas do século XX. (PAULETTI, 2003, p.4)

De uma forma ou de outra, as tendas foram adotadas de forma ampla em diversas culturas ao redor do mundo. A praticidade e a facilidade de encontrar materiais compatíveis com esse tipo de construção a tornaram muito popular entre as culturas nômades. O fato dessas culturas estarem normalmente ligadas às regiões desérticas não é ao acaso, normalmente sendo encontradas em regiões muito frias ou muito quentes, mas com o fator em comum de haver pouca precipitação no local. Essa baixa precipitação favorece as tendas como escolha por dois motivos, sendo que primeiramente uma baixa quantidade de precipitação tende a resultar em uma região com menos recursos, o que induz essas culturas a uma mudança maior de localidade para busca de novos recursos naturais. Outro aspecto é que a baixa precipitação reduz o crescimento de árvores que possam servir de material para estruturas que possam ser estabelecidas de forma definitiva. (DREW, 2019)

Embora geralmente levasse apenas um dia para construir uma casa tradicional de galhos, para os nômades que precisavam se mover rapidamente em busca de seu sustento e levar suas moradias com eles, isso era muito. Eles adotaram estruturas com componentes de construção mais leves, que eram mais transportáveis e podiam ser criadas em qualquer lugar em pouco mais de uma hora. Os tuaregues do Saara Ocidental, por exemplo, reduziram a composição de suas cúpulas de varas a um número mínimo de arcos. Cobriam suas armações com esteiras ou com peles de animais que podiam ser enroladas ou dobradas em pequenos feixes. Sistemas semelhantes de habitação móvel eram comuns em muitas partes do mundo. Entre os mais conhecidos estão os yurts usados pelos turcos, tártaros e mongóis. Yurts eram as unidades habitacionais usadas por Genghis Khan e suas tropas ao conquistarem grandes partes da Europa e da Ásia. (BERGER, 2005, p. 21)

A baixa quantidade de materiais disponíveis e a necessidade de se locomoverem para outras localidades de tempos em tempos, fizeram da tenda uma ótima opção para essas tribos, uma vez que sua leveza e capacidade de ser desmontada acabava se mostrando a opção ideal de abrigo.

Figura 04: Tenda Negra do Oriente Médio

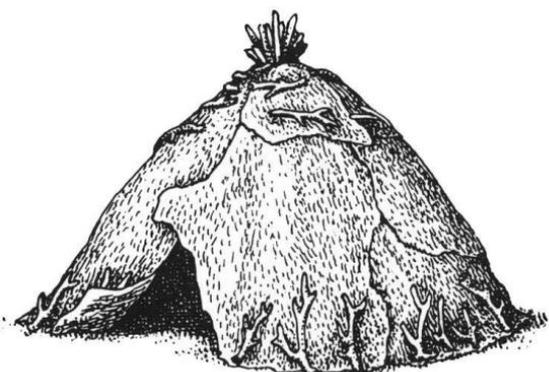


Fonte: DREW, 2019.

4.1 TENDAS PRIMITIVAS

Os achados arqueológicos das tendas encontradas na Ucrânia, datadas de 44 mil anos atrás, indicam que essas tribos viveram em situação de extremo frio. Essas suas tendas eram montadas de forma circular, usando ossos de mamute como estrutura, sendo que sua cobertura e fechamentos eram compostos de peles de animais. A presença de restos de carvão junto aos restos dessas tendas, indicam que as tribos que utilizavam esses abrigos os aqueciam durante seu uso. O formato das tendas eram um domo baixo com formato basicamente circular. (DREW, 2019)

Figura 05: Exemplo de tendas feita com ossos e pele de animais



Fonte: DREW, 2019.

Outras escavações, essas ao longo do rio Lena na região da Yakutia russa, encontraram evidências de outro tipo de tenda, que possuía uma forma cônica, sendo revestida por pele de animais ou por cascas vegetais. Em alguns casos de tendas primitivas, temos ossos de animais fazendo as vezes da sustentação estrutural da tenda, enquanto em outros casos a madeira desempenha esse papel. No caso de algumas das tendas encontradas na Ucrânia e na Rússia, a estrutura era formada por ossos de mamutes e rinocerontes. Em outras localidades, como no Alaska, os ossos eram de mamíferos marinhos, como baleias, mas com uma similaridade estrutural muito próxima das encontradas na eurásia. (DREW, 2019)

Devido ao fato dessas tendas serem de materiais biodegradáveis, é difícil determinar a quanto tempo elas estão sendo usadas. É certo que a maioria das evidências desse tipo de abrigo está localizada em climas frios do hemisfério norte, com povos da Sibéria, Alaska e Islândia, por exemplo, utilizando o mesmo método construtivo, com grandes ossos de animais como sustentação e peles de animais como fechamento para suas tendas. (BERGER, 2005)

4.2 POVOS NÔMADES

As tendas estão estritamente ligadas ao movimento dos povos pelos terrenos em que ocupam, seja no caso das culturas nômades que precisam se deslocar de tempos em tempos devido à baixa quantidade de recursos disponíveis, seja no caso do deslocamento de destacamentos militares indo para a guerra. O uso de têxteis na composição desses abrigos é notado em praticamente todos os períodos da história, seja ele no uso de estruturas fixas, seja em estruturas temporárias, a diferença mais notável fica a cargo dos casos em que esse material é meramente um fechamento do abrigo, enquanto em outros casos ele tem uma composição mais estruturada, onde ele inclusive influencia na forma final da construção.

4.2.1 Tendias cônicas do norte da Eurásia e norte da América

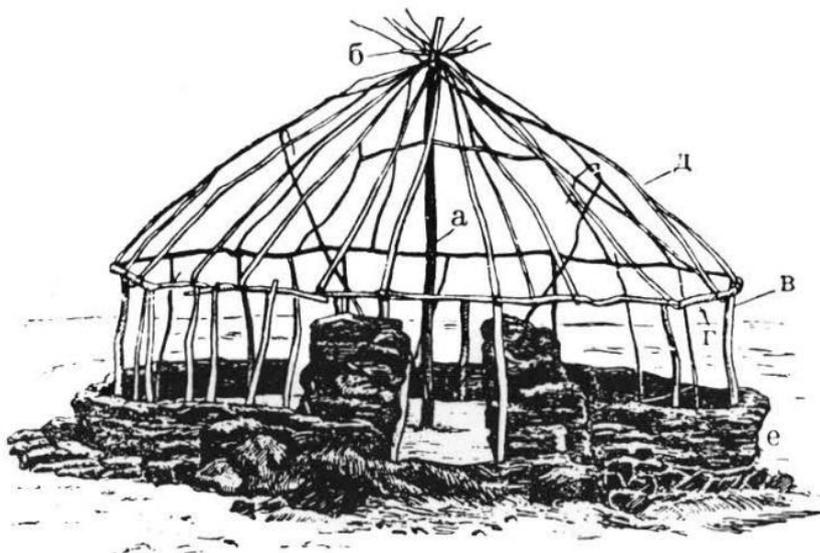
As tendas encontradas no norte da Eurásia, principalmente regiões frias como a Sibéria e Escandinava e as regiões mais ao norte da América, possuem características muito parecidas. Suas estruturas normalmente consistem em uma

estrutura de varas posicionadas em formato cônico, unidas na parte superior, enquanto sua base formam um círculo. As formas de travamento estrutural podem ter variações dependendo da região, as vezes sendo possível mais um tipo de composição estrutural nas mesmas localidades, mas sua forma visual é muito parecida uma com a outra. Como material de fechamento podemos ter couro e peles de animais, assim como casca de árvores e outros materiais vegetais.

Na região da Sibéria ainda vemos algumas variações das tendas, com um corpo poligonal ou cilíndrico, que posteriormente vai se fechando em uma forma cônica em sua cobertura.

As elaboradas tendas de inverno dos Chukchee e dos Esquimós Asiáticos possuem um poste central ao qual as extremidades superiores das escoras do telhado são amarradas. A estrutura do telhado consiste em duas camadas de escoras que irradiam do poste central como os suportes de um guarda-chuva. Os suportes principais conectam a viga anelar com o polo central, enquanto uma camada secundária inferior de suportes é empurrada no meio as escoras do telhado, assumindo um ligeira curvatura convexa como consequência. (DREW, 2019, p.14, tradução nossa)

Figura 06: Tenda de base cilíndrica



Fonte: DREW, 2019

Com exceção das tendas com base poligonal e circular que encontramos na Sibéria, as tendas encontradas na Escandinávia e América do norte são muito parecidas, com a composição de varas dispostas em círculo se encontrando na parte superior. Um outro exemplo desse tipo de estrutura são as tendas Tipi da América do

Norte. Segundo Bahamón (2004), essas tendas foram criadas para se adaptarem ao modo de vida do povo das pradarias norte-americanas. Essa estrutura era composta por mastros de madeira que se encontravam em uma das extremidades criando uma forma cônica, que posteriormente era coberta com casca de árvores, pele de animais e outros materiais. A facilidade de montagem e desmontagem era essencial para esse tipo de abrigo, que possuía uma estrutura leve para ser transportada por cavalos, e muitas vezes servindo de reboque para arrastar bens das famílias.

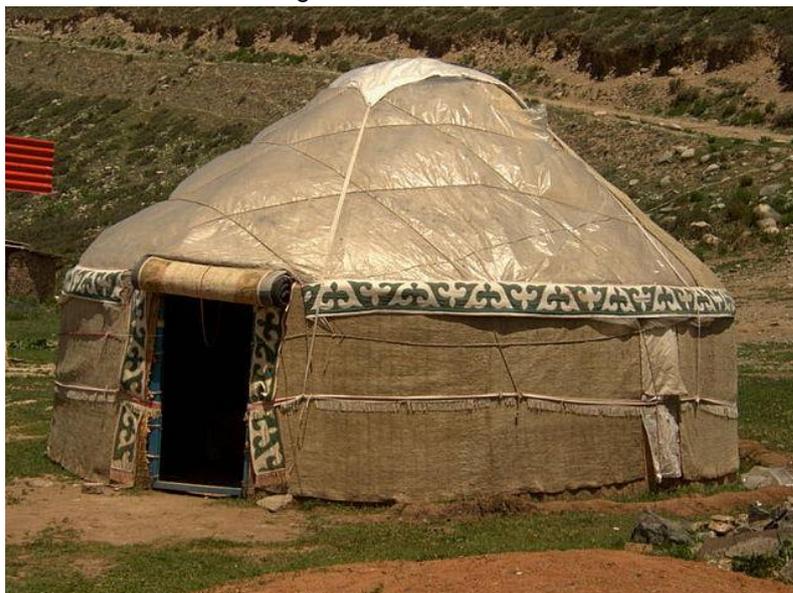
4.2.2 Tendas Asiáticas

As tendas asiáticas khibitkas ou yurts, de acordo Drew (2019) são um dos abrigos pré-fabricados e desmontáveis mais avançados da cultura tradicional, com uma forma e construção que são determinadas pelos fatores de montagem, desmontagem e transporte. Elas possuem uma circular com um telhado cônico, que normalmente é aberto ao centro devido à uma fogueira para aquecimento interno. Sua estrutura é feita de madeira, com as laterais mais verticais compostas por uma trama de madeira, enquanto as hastes que compõem o telhado se encontram em uma trave circular, onde fica a abertura do telhado. Seu fechamento normalmente é feito com feltro ou por esteiras de fibras vegetais.

Devido ao clima e aos períodos prolongados que ficam em cada local, as tendas em que vivem, chamadas de yurts, estão adaptadas para suportar baixas temperaturas. São formadas por estruturas sólidas e são um pouco mais complexas que as tenda de outras culturas. As tendas yurts são de planta circular, possuem um perímetro cilíndrico que permite a ocupação de toda a superfície interior e que se reveste com uma cobertura cônica. Estas tendas são compostas por uma estrutura robusta de madeira, construída aproximadamente com 60 mastros entrelaçados, e são relativamente fáceis de montar e desmontar. O revestimento de feltro, tecidos de lã e outros materiais vegetais isola o interior e oferece um aspecto suave e acolchoado a partir do exterior. (BAHAMÓN, 2004, p.60)

As yurts são encontradas por toda a Ásia central, com variações que vão desde a Turquia até a Mongólia, passando por China, Rússia, Afeganistão e Irã, sempre com características similares em sua composição, com estrutura desmontável, planta circular com telhado cônico e fechamentos que ajudem a manter o interior aquecido devido as baixas temperaturas das regiões em questão.

Figura 07: Tenda Yurt



Fonte: MANNERS, 2008.

4.2.3 Tendas africanas

No norte da África encontramos diversas culturas que fazem uso de tendas como abrigo, espalhadas pelo Marrocos, Líbia, Argélia, Mauritânia, Egito, entre muitos outros lugares. Essas tendas diferem bastante entre si, com algumas apresentando estruturas mais simples e rudimentares, com apoios mais simplificados, enquanto outras culturas possuem tendas com características mais elaboradas, com cabos tensionados e materiais mais elaborados.

A cultura nômade Tuaregue faz uso de tendas até os dias de hoje, e sua construção e uso está estritamente ligada às tradições desse povo. Como aponta Bahamón (2004), a construção e manutenção da tenda é de responsabilidade da mulher, isso porque elas são responsáveis pela educação dos filhos e suas tradições orais, onde suas tendas, além de abrigo, servem como espaço de educação e transmissão da cultura. A construção dessas tendas se dá a partir do momento em que há a união de um casal, onde um longo ritual entre a comunidade fornece diversos e variados materiais para a construção da tenda.

Figura 08: Tenda Tuaregue



Fonte: BROELHUIJSE, 1974.

Existem duas variações básicas das tendas Tuaregue, sendo uma delas baseada no fechamento em esteiras, outra baseada no fechamento com pele de animais, cada uma com sua característica estrutural e de composição. Drew (2019) nos mostra a diferença estrutural entre ambas e as duas características principais e o porquê de existir variações. No caso da tenda de esteiras, ela tem uma estrutura mais complexa baseada em apoios verticais e travessas horizontais de madeira, sendo que parte dessas travessas horizontais são flexionadas a ponto de criar um arco na área da cobertura, com elementos que descem até o chão. Variações dessa estrutura conta com elementos em arco que fazem a composição parede/teto em um só elemento, muito parecido com o que veríamos em uma barraca de camping atualmente. Posteriormente essas estruturas levam um fechamento de esteiras de material vegetal.

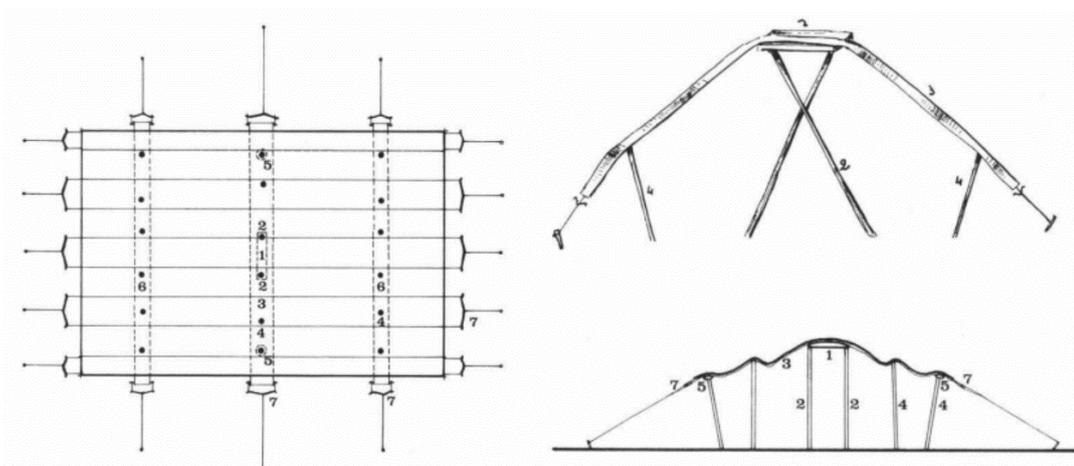
A outra variação, que tem um fechamento em pele de animais possui uma estrutura mais retangular, com apoios verticais e horizontais mais retos, fazendo uma composição mais próxima de colunas/vigas, apresentando as vezes uma curvatura ou leve inclinação no teto. Segundo Drew (2019), as tendas que possuem fechamento com pele de animais tendem a ter uma maior impermeabilização da cobertura, garantindo a estagnidade do espaço interno, funcionando de maneira mais adequada durante as estações chuvosas e as estações mais frias, enquanto as tendas com fechamento de esteira seriam mais adequadas para as estações mais quentes.

4.2.4 Norte da África e Oriente Médio

Até agora as tendas que vimos tinham o material têxtil servindo basicamente como material de vedação de uma estrutura normalmente rígida, seja ela feita de madeira, seja ela feita de ossos de animais. Nesses casos, a forma das tendas era ditada principalmente pelo formato estrutural adotado, como no caso das tendas cônicas, onde os mastros de madeira que compunham a forma da tenda mesmo antes do material de fechamento ser colocado de fato na composição. Nos exemplos que veremos a partir de agora, o material têxtil tem uma atuação muito mais importante na composição estrutural e na aparência final dos abrigos.

Os povos do deserto, como os beduínos, mouros, berberes, baludas e curdos, desenvolveram estruturas de tendas que podiam carregar em seus camelos – ou mesmo em seus cavalos – e que podiam erguer em qualquer lugar em questão de minutos, em vez de horas ou dias. A construção das tendas negras, por exemplo, mostra todas as características importantes que fazem as estruturas tensionadas funcionarem então e hoje: uma cobertura de tecido, modelada e montada a partir de tiras retangulares, colocada sobre cordas que, por sua vez, são sustentadas por postes localizados no centro e nas bordas. Cordas de ancoragem transferem as cargas do tecido às estacas que sustentam a estrutura. (BERGER, 2005, p. 25-26, tradução nossa)

Esses povos se espalham por todo o norte da África chegando até o Oriente Médio, sendo chamados genericamente de Beduínos, pois, como explica Bahamón (2004), “o nome Beduíno deriva da palavra Árabe ‘Bedu’, que significa nómada [...]”. Esses povos, assim como outros povos nômades, tem as tendas como habitação. Essas tendas têm características próprias dependendo da região e tribo em questão, com uma tenda no Marrocos, por exemplo, tendo características diferentes das tendas encontradas na Argélia. Essas diferenças podem ser dar na composição do tecido de cobertura, planta interna e sua configuração, terem uma estrutura mais ou menos complexa, mas todas tem em comum a cobertura têxtil tensionada por cabos, o que nos aproxima muito das técnicas construtivas empregadas na construção civil hoje.

Figura 09: Planta e cortes de uma tenda negra⁴

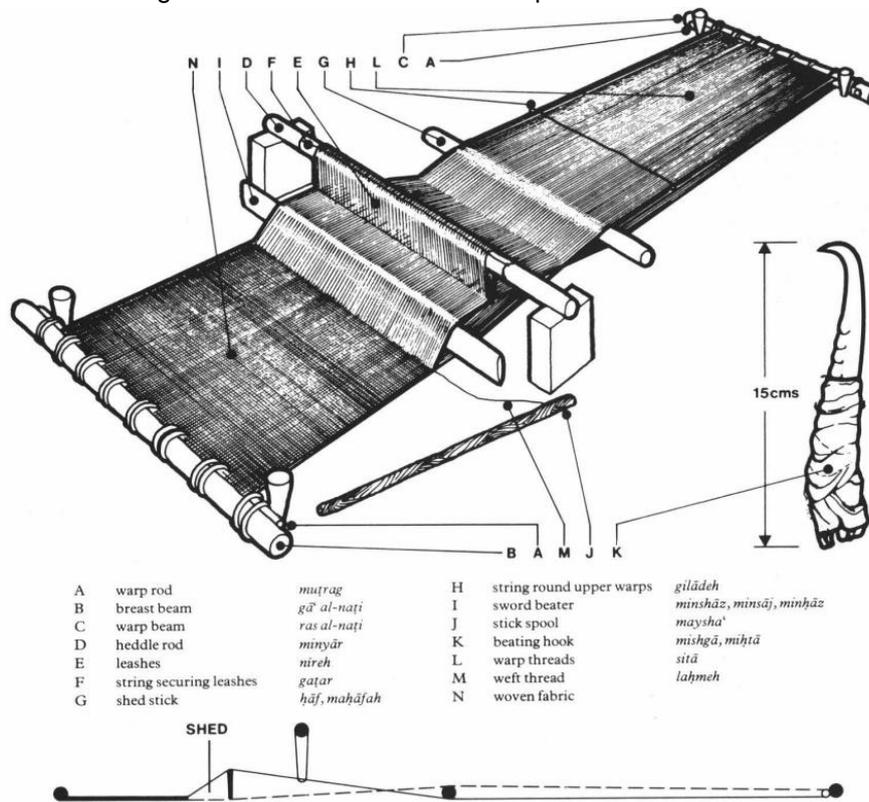
Fonte: DREW, 2019.

Essas tendas normalmente possuem um apoio central bem definido, mais alto que os outros apoios da cobertura, composto por duas traves de madeira que formam uma cumeeira no ponto mais alto da cobertura. Esse apoio central é seguido por uma linha de outros apoios que vão diminuindo conforme vão chegando à borda da tenda. Paralelamente, temos outras duas linhas de apoio com uma configuração parecida mais para a extremidade da tenda, com altura menor que os apoios dessa linha central (DREW, 2019). Dependendo da tenda em questão, variando de região para região, podemos ter alguns apoios adicionais para complementar estruturalmente o apoio do telhado, dependendo da técnica empregada ou do tamanho da tenda.

A cobertura da tenda é feita de um tecido elaborado a partir de pelo de cabras e ocasionalmente de camelos. Algumas tendas encontradas no norte da Síria e regiões do Iraque, podem também serem compostas de cânhamo, algodão e lã. O tamanho das tiras que compõem a cobertura depende da origem do material e o tamanho da tenda a ser construída. O fechamento da lateral dos abrigos pode ser feito a partir da própria cobertura, chegando até o chão, ou através de tiras que são fixadas nessa cobertura e cobrem a lateral aberta (BAHAMÓN, 2004; DREW, 2019).

⁴ Mesmo tipo de tenda da figura 04

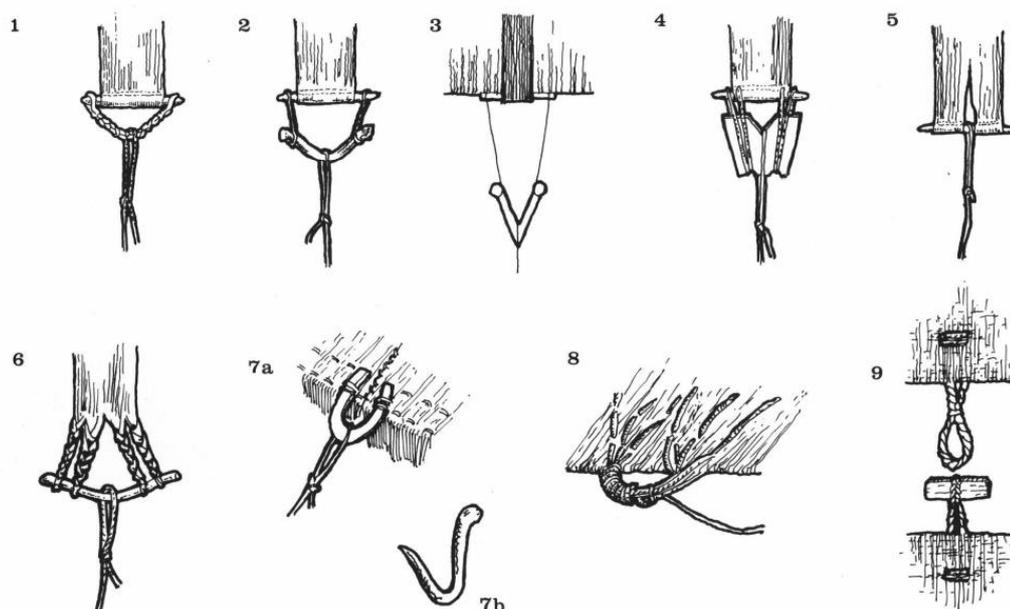
Figura 10: Tear beduíno utilizado para tecer as tendas



Fonte: DREW, 2019

A cobertura é esticada em cima das linhas de apoios e são tensionados por cordas, sendo fixadas em um ponto de ancoragem no tecido da cobertura e posteriormente presas ao solo, esticando a cobertura e dando rigidez nos pontos necessários. É nesse ponto que essas tendas têm muita similaridade com as atuais estruturas de membranas arquitetônicas tensionadas, onde temos pontos de ancoragem no próprio tecido, que são fixados em uma estrutura para esticar e dar rigidez à estrutura. Nesse caso, o tecido tem valor estrutural para a cobertura, não sendo apenas uma forma de fechamento, além de ser determinante para a forma final da tenda, já que ele vai ter um comportamento e uma forma diferente de acordo com os pontos de fixação e os pontos de apoio internos.

Figura 11: Tipos de ancoragem usadas em tendas negras

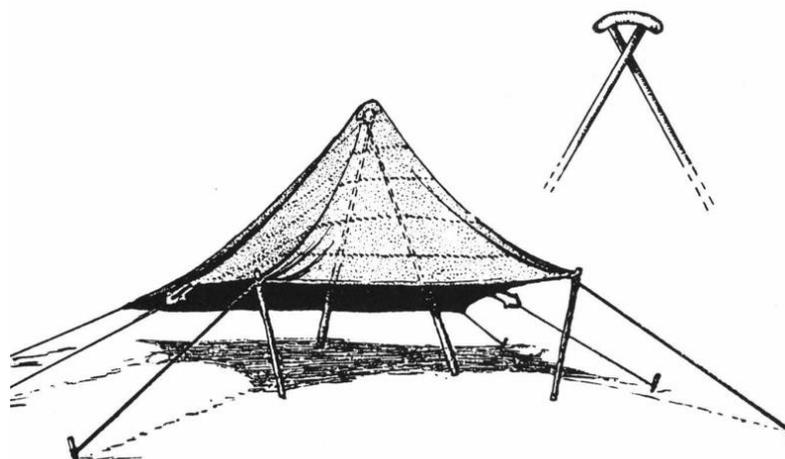


Fonte: DREW, 2019

Se pegarmos as tendas encontradas no sudoeste do Marrocos (figura 12), temos uma tenda simples com características muito interessantes. Ela tem um formato piramidal de base retangular, com a forma se dando devido ao apoio em formato de “A” em seu centro, formado por dois postes que se cruzam no topo, com um material têxtil, normalmente de lã de cabras e pelo de camelo, formado por sete ou oito tiras de tecido, colocado por cima. Nas extremidades desse tecido, temos cordas que esticam a tenda, sendo que essas cordas são fixadas ao solo com estacas. (BERGER, 2005; DREW, 2019)

É preciso pouco para transformar esta tenda antiga em uma estrutura retesada contemporânea: substituindo a lã por um tecido moderno incombustível e dando a ele um padrão computado cientificamente; substituição das cordas por cabos de aço galvanizado; fazer a estrutura em A e os postes em aço estrutural ou alumínio; colocar ancoragens de concreto no piso; e, finalmente, retesando a estrutura a um nível de tensão predeterminado. (BERGER, 2005, p. 26, tradução nossa)

Figura 12: Tenda dos nômades do sudoeste do Marrocos



Fonte: DREW, 2019

Essa tenda é um ótimo exemplo da proximidade estrutural das tendas de alguns povos nômades com as construções com membrana estrutural atuais. Além de visualmente muito semelhantes, a composição estrutural é a mesma, sendo necessário somente a substituição dos materiais por seus equivalentes. Isso mostra que apesar das construções atuais serem extremamente tecnológicas, com materiais de processo construtivo complexo e cálculo estrutural ainda mais complexos, o conhecimento para a construção desse tipo de estrutura acompanha a humanidade a muito tempo.

4.3 MUNDO ANTIGO, IDADE MÉDIA E RENASCENÇA

As tendas de tribos nômades foram e são ainda uma referência de estrutura que faz um de material têxtil em sua composição estrutural, e estão estritamente ligadas com diversas culturas, com uma arquitetura vernacular que perdura por séculos em muitos casos. Mas os têxteis foram utilizados em diversas outras situações por grandes civilizações do passado, como o antigo Egito, Grécia e Roma.

As tendas permaneceram importantes para muitos propósitos ao longo da história. Mas tendo se estabelecido em comunidades fixas, contando com a agricultura e o comércio para alimentação, as grandes sociedades dos tempos “históricos” construíram edifícios duráveis para suas casas. As tendas eram usadas para fins secundários. Eles ainda forneceram abrigo para os grandes exércitos dos persas, gregos e romanos. Serviram a esse propósito durante toda a Idade Média, a Guerra Civil Americana e as guerras deste século. Na verdade, eles ainda são determinantes para os exércitos modernos. (BERGER, 2005, p. 26-27, tradução nossa)

4.3.1 Mundo Antigo

Das civilizações antigas, temos relatos de tendas sendo usadas por egípcios e sírios durante batalhas que datam em torno de 1280 A.C. Essas tendas serviam aos exércitos, mas também para os líderes dessas civilizações, onde as tendas mais nobres tinham seus mastros adornados com prata e pedras. Na Palestina, os israelenses usavam uma tenda como espécie de santuário no deserto, o que posteriormente foi denominado tabernáculo, um espaço que seria a morada de deus na terra. Há indícios de tendas também na Assíria e na antiga Babilônia, assim como tribos árabes do mesmo período (DREW, 2019).

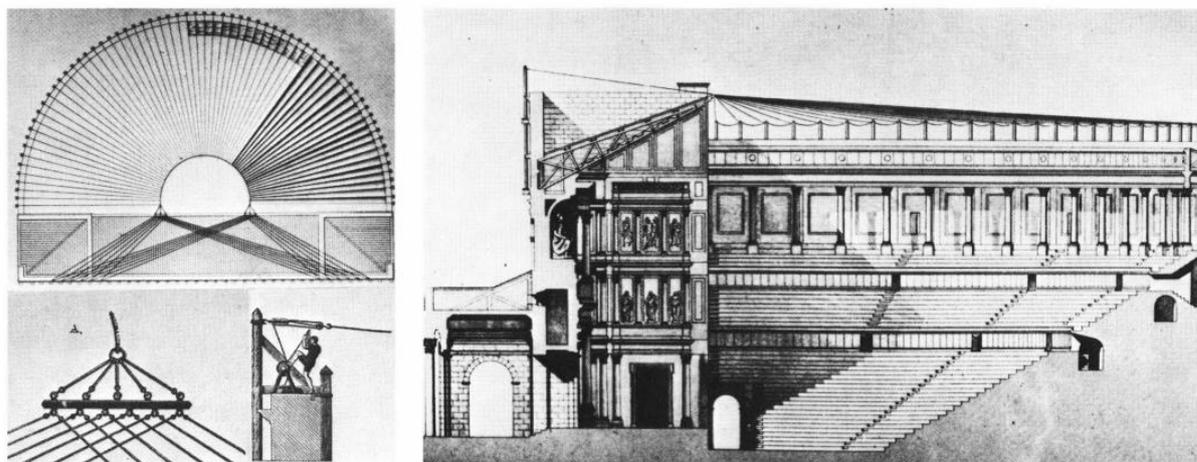
Outra civilização que fez uso de tendas foram os Persas, com grandes tendas reais provavelmente inspiradas pelas tendas dos assírios. Pouco se sabe sobre a decoração dessas tendas persas, mas elas eram grandes e impressionantes, com referências às arquiteturas palacianas dos persas. É bem provável que foram os persas que levaram as tendas para outra grande civilização antiga, a Grécia. A palavra grega para tenda só é usada posteriormente às invasões persas durante o século IV A.C. (DREW, 2019).

Os primeiros registros são fragmentos iconográficos dos assírios (circa 3000 a.C.) e egípcios. Também os exércitos persas que guerrearam contra os gregos usavam tendas luxuosas. Por intermédio dos gregos, o uso das tendas transmitiu-se para os romanos. As primeiras tendas romanas eram cilindro-cônicas, suspensas por um único mastro central. Posteriormente, surgiu o papilio (borboleta), tenda militar de planta retangular, cuja nome decorre da particular forma de dobragem. Os romanos notabilizaram-se ainda pela construção de coberturas de linho, chamadas de velaria, para espaços e eventos públicos. A aplicação mais notável era a das coberturas retráteis dos anfiteatros, onde as velariae eram suspensas por cordas radiais, fixadas a mastros de madeira na borda externa e a um anel interno, também de corda. O sistema de fixação dos mastros, por meio de olhais entalhados em pedra, é ainda hoje visível nas ruínas dos muitos anfiteatros romanos. (PAULETTI, 2003, p.8-9)

Um pouco mais adiante, os romanos usaram tendas militares durante suas campanhas, mas os tecidos não se limitaram arquitetonicamente às tendas. Roma utilizou estruturas retráteis de cobertura têxtil em anfiteatros e arenas de luta, apesar de não terem coberto muitos dos seus anfiteatros, como o Coliseu, não sabemos se por falta de tecnologia, ou algum outro motivo. As estruturas que foram cobertas contavam com uma cobertura retrátil de tecido para sombreamento chamada de vela, estruturas que eram dispostas em forma radial, com cabos tensionados ancorados em

estruturas sólidas da arquitetura em questão. Essas estruturas eram baseadas na tecnologia de barcos a vela, com um complexo conjunto de cabos e hastes que eram ancorados na estrutura dos anfiteatros. Em algumas ruínas romanas, ainda podemos encontrar os pontos de ancoragem onde seriam fixas essas estruturas tensionadas que compunham essa cobertura retrátil. (BERGER, 2005; DREW, 2019)

Figura 13: Ilustração da cobertura do teatro romano de Orange



Fonte: DREW, 2019

Essas estruturas retráteis romanas se assemelham muito com algumas estruturas que encontramos hoje com membranas tensionadas, como no caso de estádios e arenas de futebol, onde temos um formato redondo. Nesses casos, a cobertura é ancorada na estrutura mais alta das arquibancadas, como no caso das arenas romanas, com um travamento central em arco. A membrana, ou o tecido no caso romano, faz as vezes do fechamento, criando uma proteção contra os raios solares e a chuva. Essa cobertura da figura 09 se assemelha muito visualmente com a cobertura do estádio Maracanã após a reforma para a copa do mundo no Brasil em 2014.

4.3.2 Idade Média e Renascença

O uso de têxteis aplicados a arquitetura durante a idade média, assim como muito do conhecimento usado até então, foi perdido, pelo menos no que podemos dizer em relação as civilizações ocidentais, “O uso da tenda na Europa teve um interregno, após a queda do império romano, voltando a disseminar-se a partir do

século XII, mas mostrando pouca evolução em relação aos tempos romanos” (FORSTER, 1994, apud. PAULETTI, 2003, p.9). Após esse período em que as tendas perderam o uso, elas começam novamente a serem usadas, principalmente por conta das guerras que foram travadas na Europa, ou seja, seu uso era atrelado aos militares e campos de batalha. Não se sabe ao certo se essa volta do uso se deu por conta de uma retomada da tradição romana, que vinha se recuperando aos poucos, ou a uma influência das tradições do Oriente Médio, devido ao contato com essa cultura nas Cruzadas e outras guerras.

4.4 ESTRUTURAS EFÊMERAS

As estruturas efêmeras são caracterizadas pelo seu caráter temporário. Segundo definição do dicionário Houaiss da língua portuguesa (2009), efêmero é aquilo “que é passageiro, temporário, transitório”. Existem diversos tipos de atividades e situações em que podemos encontrar estruturas com essa característica. Um dos primeiros exemplos que vêm à cabeça quando falamos de grandes tendas desmontáveis são os circos itinerantes, mas esse tipo de estrutura também é muito utilizado para atender emergências, em caso de desastres naturais, emergências sanitárias, abrigos para desabrigados ou refugiados. Além disso, as tendas ainda são o principal tipo de abrigo para os militares em campanha, e os materiais têxteis têm sido amplamente usado em estruturas temporárias de eventos e festivais ao redor do mundo.

4.4.1 Tendas para eventos, feiras e celebrações

Quando falamos de estruturas temporárias, não podemos deixar de pensar em circos, feiras e eventos, principalmente os que ocorrem ao ar livre. É muito comum esse tipo de atividade fazer uso de tendas, que são erguidas com uma velocidade relativamente alta e que possibilitam a montagem e desmontagem, o que permite que elas sejam empregadas em outra ocasião.

Provavelmente a mais icônica dessas estruturas são as de circo, que tem uma história relativamente longa de transportar sua grande tenda entre cidades e fazer seus espetáculos durante um tempo, para depois se dirigir a um novo local. Esse tipo

de característica itinerante do circo ainda se faz presente até os dias de hoje, com algumas trupes levando e montando suas grandes lonas para apresentar seus espetáculos durante uma certa temporada, que posteriormente é completamente desmontada para ser montada novamente em outra localidade, e assim sucessivamente.

Segundo Forster e Mollaert (2004) “enquanto as tendas têm uma longa história, as origens das nossas estruturas têxteis contemporâneas são encontradas no século XIX.” Essas estruturas em questão são as tendas dos circos chamadas de *Chapiteau*, com diâmetro que podia chegar até 50m, sustentada por postes e cabos, com uma cobertura que poderia ser de linho ou de cânhamo. (FORSTER; MOLLAERT, 2004).

Figura 14: Tenda de circo itinerante *Chapiteau*



Fonte: FORSTER; MOLLAERT, 2004

A composição estrutural dos circos é muito parecida com o que vemos nas estruturas de tendas retesadas, onde o material da cobertura funciona como elemento estrutural da composição. Essa estrutura é composta por alguns elementos: além do tecido de cobertura que normalmente é de origem vegetal, existem os mastros e postes, que antigamente era principalmente feitos de madeira, sendo que hoje vemos estruturas de aço, e os cabos, que podem ser feitos de cabos de aço ou cordas, com a função de retesar a estrutura e aumentar sua estabilidade, com parte desses cabos rodeando o perímetro da estrutura e sendo fixados com estacas no chão, como vemos na figura 14.

No capítulo dos espaços para espetáculos, destacam-se as tendas de circo, que ganham importância a partir do início do século XIX, quando passam a

utilizar grandes tendas para abranger tanto os artistas quanto o público, geralmente assentada em um ou vários mastros centrais altos, com a lona apoiada sobre eles e esticada em torno do seu perímetro, adquirindo uma forma frustocônica [...] (CARRIÓ, 1991, p. 16-17, tradução nossa)

Outro tipo de atividade que tem estruturas têxteis empregadas com frequência são os eventos e feiras. É possível dizer que praticamente todo evento ou festival de grande escala tem algum tipo de tenda em sua estrutura. Não raro, vemos tendas servindo de espaço de abrigo e descanso, principalmente em eventos que são feitos em locais abertos e tem seu funcionamento durante o dia. Tendas também são empregadas para espaços de venda de produtos, alimentos e souvenirs. Sua praticidade e facilidade de montagem é um dos grandes motivos para ser tão amplamente utilizadas nessas situações.

Em outros casos, temos os têxteis sendo utilizados de formas mais complexas e com uma qualidade visual muito mais elevada. Como exemplo, podemos citar as feiras em que Frei Otto fez algumas de suas grandes experimentações de estruturas com membranas têxteis estruturais. Algumas dessas estruturas são mencionadas um pouco mais adiante, nas estruturas permanentes, apesar de muitas delas terem sido feitas somente para o uso durante o evento em questão e depois desmontadas.

Aqui no Brasil, um exemplo interessante de membrana têxtil utilizada em eventos foi na edição do Rock in Rio de 2001 realizada no Rio de Janeiro. Na ocasião, foram erguidas várias tendas por todo o evento, cada uma abrigando uma estrutura do evento. A grande maioria dessas estruturas possuem o elemento têxtil retesado e funcionando de maneira estrutural, muitas delas com as curvas características que esse tipo de estrutura proporciona. Como destaque temos a estrutura de entrada do evento, que era um domo que foi pintado à mão, o que nos leva a crer que a membrana utilizada era revestida de PVC, uma vez que as membranas revestidas de PTFE não permitem pintura em sua superfície. Esse domo era feito de uma estrutura metálica onde a membrana o recobria por completo, funcionando apenas como elemento de fechamento. No segundo caso, temos o palco principal do evento (figura 15), que segundo dados da empresa que confeccionou a estrutura, contava com uma estrutura metálica de 220 toneladas coberta por mais de 10 mil metros quadrados de membrana, que foi montado em apenas 12 dias.

Figura 15: Palco principal do Rock in Rio de 2001



Fonte: FIEDLER, 2001.

Outras tendas, como a da figura 16, um pouco menores possuem uma característica muito mais próxima do que observamos em estruturas retesadas permanentes. Sua composição de estrutura de aço e cabos de aço, e principalmente usando a membrana têxtil como elemento estrutural, nos fazem recordar das estruturas experimentais de Frei Otto na década de 1960. Esse tipo de estrutura é utilizada com menos frequência do que as tendas que não usam o tecido como elemento estrutural, e são mais comuns de serem encontradas em festivais de maior dimensão, devido à complexidade estrutural e de montagem, que exige uma equipe mais especializada. Essas tendas mais complexas normalmente são encontradas onde a estrutura tem que agregar algum valor visual para o evento em questão, e não apenas cumprir uma função de cobrir determinado elemento.

Figura 16: Tenda auxiliar do Rock in Rio de 2001



Fonte: FIEDLER, 2001a.

Mas não são só os grandes eventos que tem tendas em suas estruturas. É extremamente comum em feiras locais serem encontradas muitas tendas entre os comerciantes, podendo afirmar até que a grande maioria deles possuem uma tenda para vender seus produtos. Dentre essas tendas podemos ver algumas mais improvisadas, onde uma estrutura, metálica ou de madeira, possui uma lona cobrindo a área onde ficam os produtos e o comerciante. Outras mais complexas já possuem uma estrutura mais elaborada, com algumas possuindo partes retráteis e de montagem de desmontagem menos complexa, o que facilita a mobilidade de uma localidade para outra, além de ser mais rápida de estruturar. Nesse segundo caso também vemos uma cobertura de lona, que em ambos os casos não são retesadas e não funcionam como elemento estrutural, somente como elemento de vedação.

Figura 17: Feira de rua na Vila Romana em São Paulo



Fonte: DAMASCENA, 2023.

Esse tipo de feira ao livre são encontradas com muita frequência por todo o país, mas são muito comuns em todos os continentes do mundo, e a característica das estruturas são muito parecidas, com tendas que são de fácil montagem e desmontagem, que permite que elas sejam instaladas nos locais durante o evento em questão e desmontadas rapidamente para dar lugar a atividade corriqueira daquele espaço.

4.4.2 Tendas militares

As tendas militares acompanham os exércitos há milhares de anos. Praticamente todas as grandes civilizações antigas fizeram uso dessas estruturas por sua facilidade de movimentar os abrigos conforme as tropas iam avançando ou recuando durante as campanhas militares. Como dito anteriormente, as tendas militares foram utilizadas pelos egípcios, assírios, persas, gregos, romanos, e continuaram a ser utilizadas por praticamente todos os exércitos até os dias de hoje.

Essas tendas tiveram muitas características diferentes dependendo do seu uso ou da civilização em questão, variando de tamanho e forma dependendo do caso. Hoje em dia temos uma situação bem parecida, onde diversos tipos de tendas são utilizadas por forças militares ao redor do mundo. Algumas maiores, outras menores, algumas destinadas as forças de inteligência ou comando de operações, outras menores podem ser destinada a tropas em movimento. Além disso, muitos materiais diferentes podem ser empregados dependendo do uso, com por exemplo o uso de aramida, um material de alto valor, em alguns casos específicos.

Figura 18: Tendas militares em treinamento dos fuzileiros navais dos EUA



Fonte: BIDWELL, 2007.

Não é o objetivo desse trabalho discorrer sobre os diferentes tipos de tendas militares e seus diversos usos, muito menos nos aprofundar em sua história e suas diversas características que representavam cada uma das civilizações que a utilizaram, mas é importante mencionar o fato que seu uso pelos exércitos ao longo da história ajudou a moldar e propagar a cultura do uso de tendas ao longo da história.

4.4.3 Estruturas emergenciais

Situações emergenciais podem surgir em diversas situações e por diversos motivos. É muito comum no Brasil vermos situações emergenciais proveniente de enchentes provocadas por uma grande onda de chuva em determinada região, como no caso do litoral norte do estado de São Paulo em 2023, mas podemos ter situações em que as causas são outras, como o terremoto que deixou uma onda de destruição da Turquia e na Síria no mesmo ano. Em muitas dessas ocasiões, são usados edifícios já existentes para cumprir o papel de abrigar pessoas que estão desabrigadas, como estádios e ginásios esportivos, escolas ou outros prédios. Em alguns casos se faz necessário criar um abrigo temporário, seja pela alta demanda ou pela ausência de local adequado para atender determinada situação.

São nesses casos que encontramos nossas estruturas têxteis sendo usado com muita frequência. Elas são leves e rápidas de montar, o que é um fator determinante para atender uma emergência. Estruturas emergenciais podem ser de vários tamanhos e formatos, com o emprego de diversos materiais, com uma necessidade de montagem rápida como característica que une essas construções. Alguns exemplos mais recentes que podemos pensar em estruturas com essas características, são os hospitais de campanha que foram montados para atender a alta demanda de pacientes durante a pandemia Covid19, assim como a grande quantidade de pessoas refugiadas fugindo da guerra da Síria e mais recentemente na guerra na Ucrânia.

Figura 19: Abrigo para refugiados venezuelanos em Roraima



Fonte: SERVILHANO, 2019.

No caso da estrutura montada para o acolhimento dos refugiados e migrantes venezuelanos que começaram a chegar ao Brasil em 2017, podemos notar o uso de diversos tipos de tendas. Na figura 19, podemos notar uma tenda maior, de cor branca, que tem como estrutura uma composição de pilares e treliças metálicas, com a lona fazendo as vezes do fechamento de cobertura, com seu elemento têxtil não estando retesado, de forma que ele não possui característica estrutural nesse caso. Esse tipo de tenda também é muito utilizado em vários tipos de eventos, sejam feiras ao ar livre ou festivais de música, com algumas versões menores sendo facilmente encontradas para compra para uso doméstico

Figura 20: Atendimento do MSF⁵ aos refugiados venezuelanos em Roraima



Fonte: SERVILHANO, 2019a.

Nesse segundo caso podemos ver uma tenda com estrutura mais complexa que o caso anterior, com fechamentos laterais, janelas e portas. Tendas desse tipo são mais utilizadas em casos como de abrigo para refugiados ou desabrigados de desastres, com algumas variações sendo também empregadas em hospitais de campanha e como tendas militares.

Durante o a pandemia de Covid-19 no Brasil, pudemos observar o surgimento de diversos hospitais de campanha que visavam aumentar o número de leitos disponíveis para o tratamento da doença. Grande parte desses hospitais, como o montado no estádio do Pacaembu na cidade de São Paulo (figura 21), foram

⁵ Médicos Sem Fronteiras

montados com uma estrutura metálica com fechamentos em material têxtil. Essa solução é muito utilizada para essa finalidade, sendo encontrada em diversos outros países do mundo, seja para o combate dessa mesma doença, seja para o combate de outras doenças.

Figura 21: Hospital de campanha contra a Covid-19 no Pacaembu em São Paulo



Fonte: TV GLOBO, 2020.

Esse tipo de estrutura é bem básica e muito difundida, presente não somente em estruturas emergenciais. Sua praticidade e velocidade na hora da montagem são alguns dos motivos que fazem ela uma opção tão popular. Além disso é um material acessível e bem difundido comercialmente, pelo menos quando tratamos do mercado brasileiro.

No Brasil não existem obras gigantescas e de forte impacto visual, feitas com membranas tensionadas. As obras mais comuns são aquelas de pequeno e médio portes, muitas de caráter temporário. Com relativa facilidade, são vistas tendas, barracas e coberturas nas quais as lonas são esticadas, mas não trabalham tensionadas, como no caso das tensoestruturas. (ASSIS, 2012, p. 103)

Apesar dessas estruturas com lona não trabalhar de forma que o tecido seja um elemento estrutural, ela preserva praticamente todos os elementos que encontraríamos em uma estrutura de membrana estrutural, tal qual os cabos, que não aparecem em todos os casos, mas que podem ser de aço ou outros materiais, no caso dessas estruturas temporárias. Mastros, postes e vigas, sendo que cada estrutura tem um material empregado, seja ele o plástico em estrutura mais simples, seja madeira

ou aço em estruturas maiores e mais complexas. Temos ainda as junções, pontos de ancoragem, entre muitos outros elementos menores que compõe as estruturas de membrana estrutural.

Figura 22: Abrigos para desabrigados na Turquia/Síria



Fonte: MARTIN DIVISEK, 2020.

No caso das estruturas dos abrigos emergenciais empregados na Turquia (figura 22) após o terremoto de fevereiro de 2023, vemos basicamente a mesma composição em tendas menores, onde temos uma estrutura base com postes e vigas, onde um material têxtil é colocado em suas laterais e cobertura, fazendo apenas a vedação. Como forma complementar para esticar a cobertura, são empregados cabos nas suas laterais, que posteriormente são fixados por estacas no chão. Esse retesamento da lona de cobertura visa dar mais estabilidade e diminuir o nível de deformação que possa resultar do peso de acúmulo de água e neve na cobertura, sendo que a garantia de sua forma proporciona o devido escoamento desses elementos através da inclinação da cobertura, como em um telhado comum.

Esse tipo de tenda emergencial é empregado em diversas situações e com características muito similares ao redor do mundo. Por mais que sua aparência possa destoar em algumas ocasiões, a composição estrutural é sempre muito parecida, com materiais muito parecidos na grande maioria dos casos. Como dito anteriormente, o grande diferencial desse tipo de estrutura é a facilidade e velocidade de montagem, o que é um fator essencial em uma situação emergencial.

4.4.4 Outras tendas e outros usos de têxteis estruturais retesados

Além de todos os tipos de tendas e estruturas retesadas que já vimos até o momento, temos algumas outras que não são tão óbvias de relacionar, mas que além de ter o elemento retesado na sua composição, na grande maioria dos casos se trata de um material têxtil cumprindo uma função determinante.

Primeiramente temos que mencionar as tendas domésticas e de uso recreativo. Elas são compostas basicamente por tendas que tem as mesmas características que vimos anteriormente que são usadas em feiras de rua e outros eventos. Essas tendas têm uma estrutura normalmente de aço, com um material têxtil que funciona como cobertura, servindo apenas de fechamento e não sendo um elemento estrutural. É provavelmente o tipo de tenda mais comum ao redor do mundo, já que vimos que, apesar de algumas características únicas dependendo de seu uso, a suas composições estruturais são muito próximas umas das outras.

Outra estrutura muito comum que merece ser mencionada são as barracas de acampamento (figura 23). Essas estruturas podem ser surpreendentes, pois em muitos casos o elemento têxtil que compõe a barraca não serve só como fechamento apoiado em uma estrutura previamente erguida, sendo que sua estabilidade depende da interação entre os postes, que normalmente são flexionados, e o elemento têxtil que compõe a cobertura e paredes das barracas. É bastante comum termos alguns cabos que ajudam na fixação de uma cobertura impermeável que vai por cima da barraca já montada. Apesar disso, essa não costuma ser uma estrutura de alta complexidade e que exige muita qualificação para ser montada, mas é interessante notar que os tecidos retesados podem estar mais perto do que imaginamos.

Figura 23: Exemplo de barraca de camping



Fonte: SEDLÁČEK, 2010.

Alguns dos parentes mais velhos das nossas queridas estruturas pneumáticas, que compõe algumas das obras mais incríveis nos dias de hoje, são os balões infláveis. As primeiras experiências com balões começaram ainda no século XVIII, com muitas experimentações e evolução das tecnologias empregadas neles. Essa tecnologia é a precursora do que veríamos nas estruturas pneumáticas posteriormente, com um material têxtil retesado a partir do momento que é inflado com algum tipo de gás. Em alguns balões ainda tínhamos cabos de reforço estrutural ou para fixação.

O arquétipo natural para este tipo de estrutura –as bolhas– deve ter despertado a curiosidade dos homens desde a pré-história. Logo passou-se a tirar proveito de pneumáticos como as bolsas d'água ou as boias feitas de bexigas e peles de animais. Ao longo do tempo, o uso cotidiano incorporou uma miríade de estruturas enrijecidas por pressão interna: bolas de futebol, pneus de automóveis, colchões de ar, barcos, piscinas para crianças. No entanto, somente no início do século XX, durante a Primeira Guerra Mundial, é que se considerou realisticamente o uso das estruturas pneumáticas como formas de cobertura. (PAULETTI, 2003, p. 49)

Essas estruturas pneumáticas começaram a ser pensadas na virada do século, mas somente após a Segunda Guerra Mundial é que efetivamente foi colocada em prática, com a criação dos radomes, que veremos mais adiante. Essas estruturas tinham como objetivo proteger os radares, que possuíam grandes antenas parabólicas que ficavam expostas a deformações pelo vento. A empresa pioneira dessas estruturas acabou se tornando posteriormente uma das maiores do mundo no ramo de uso de membranas arquitetônicas. (PAULETTI, 2003)

O uso de materiais infláveis, após uma grande exploração no século XIX e XX, tem um uso inusitado durante a Segunda Guerra Mundial. Com o aparecimento de tecidos sintéticos como o náilon, começaram a surgir alguns equipamentos inflados militares, como alguns abrigos e artigos de despistamento, que não passavam de estruturas infladas que se pareciam com alguma coisa com valor estratégico para a guerra, que quando visto a distância, enganava o inimigo (PAULETTI, 2003). Esses objetos inflados ajudaram muito os aliados na dissuasão durante a guerra, com batalhões inteiros de tanques e outros objetos inflados, o chamado “exército fantasma” foi usado para parecer que eles estavam movimentando suas tropas em locais e direções que não eram reais.

Figura 24: Tanque falso inflável utilizado durante a 2ª Guerra Mundial



Fonte: AVENTURAS NA HISTÓRIA, 1944.

Voltando aos ares, o pioneirismo dos aviões no final do século XIX e início do XX também fizeram uso de têxteis na composição estrutural. Como exemplo podemos citar o 14 Bis de Santos-Dumont, que possuía seu revestimento de material têxtil, assim como a grande maioria dos aviões que se seguiram na mesma época. O tecido era um material leve que proporcionava a resistência estrutural necessária para suportar as cargas aerodinâmicas que permitiam o voo. O material têxtil é empregado ainda nos dias de hoje na indústria aeronáutica e aeroespacial, principalmente sendo utilizados em materiais compósitos, mas ainda podemos ver algumas modalidades como as asas deltas e os parapentes, que tem sua sustentação fornecida por um material têxtil, funcionando de forma muito parecida com o que vimos nos primórdios da aviação.

Por último podemos mencionar os barcos a vela, que assim como as estruturas de membrana, são compostas por estruturas rígidas (os mastros), cabos, que podem ser cordas ou cabos de aço e as velas, que são os elementos têxteis da composição. Essas velas trabalham retesadas e tem uma composição estrutural muito parecida com as nossas membranas estruturais, com muitos dos componentes encontrados em um caso, sendo encontrado também no outro. Além disso, muitos dos materiais usados para fazer membrana também são utilizados para fazer velas náuticas, como o náilon, o poliéster e a aramida. A relação entre o uso de têxtil na arquitetura com os barcos a vela é muito estreita, sendo dito que seu uso em suas coberturas pelos

romanos foi inspirado justamente pela vela dos barcos e sua tecnologia de funcionamento.

O uso pelos romanos de linho colorido e sua extensão e retração pelos marinheiros, conecta essas coberturas com a navegação. *Velum* em latim significa vela. Margarete Bierber afirma que os marinheiros manipulavam o *velum* do Coliseu de uma passarela no topo da parede externa. [...] As coberturas *vela* eram suspensas por cordas de mastros verticais de madeira montados em conjuntos de suportes de pedra que ainda se encontram nas fachadas de alguns teatros e anfiteatros. (DREW, 2019, p.95, tradução nossa)

4.5 ESTRUTURAS PERMANENTES

A grande diferença das estruturas permanentes para estruturas efêmeras é obviamente o caráter fixo da estrutura, enquanto a outra é feita para ser temporária, ou seja, será desmontada após determinado período. Mas essa diferença traz uma grande mudança nas escolhas dos materiais que são empregados na estrutura, assim como o método construtivo. Na grande maioria dos casos, as estruturas de caráter temporário costumam ter estruturas onde o material têxtil funciona apenas como fechamento, como no caso de tendas cobertas por lonas, que são muito utilizadas em eventos. Essas tendas costumam ter uma estrutura metálica, de madeira ou material plástico, com um material têxtil que serve de fechamento, seja ele de cobertura ou de fechamento lateral. Esse material têxtil que é utilizado para o fechamento tem uma característica menos durável que os materiais utilizados em estruturas de caráter definitivo, assim como a tecnologia empregada costuma ser mais simples. Já as estruturas de caráter definitivo, costumam ter uma característica em comum que é ter o material têxtil retesado, seja através de cabos, através de pontos de fixação no próprio material, seja engastado em outras estruturas. Apesar disso, existem estruturas temporárias que são concebidas com os mesmos princípios das que são pensadas para não ser desmontadas, fazendo uso inclusive do mesmo tipo de membranas estruturais.

As primeiras grandes obras de cobertura retesadas suspensas começaram a surgir no início do século XIX, com uma clara influência das tecnologias de pontes suspensas. Nesse primeiro momento, os materiais têxteis não eram empregados na composição estrutural, mas a forma com que essas estruturas eram compostas e a evolução dessas tecnologias, foram o ponto de partida para o uso das membranas

estruturais posteriormente. Essas primeiras obras experimentais curiosamente surgiram primeiramente na Europa, apesar de outras culturas do oriente terem as tendas como uma influência muito mais forte no campo da construção.

De fato, é inegável a inspiração e a influência tecnológica das pontes suspensas sobre as primeiras coberturas suspensas, surgidas no início do século XIX, como no caso das obras de Bederich Schnirch (que entre 1824 e 1826, na Tchecoslováquia, substituiu por sistemas suspensos as coberturas de teatros e outros edifícios públicos destruídos por um incêndio) e do vão central do Arsenal Naval de Lorient, na França, 1840 (também neste caso, a proposta, do engenheiro francês Laurent, consistia da transposição do sistema estrutural da ponte suspensa, para vencer um vão de 42m). (PAULETTI, 2003, p.11)

Schnirch já tinha tido experiência na construção de pontes na Tchecoslováquia em 1823-24, o que levou a pensar na possibilidade de uso dessa tecnologia para a cobertura de edifícios públicos, como teatros, igrejas e armazéns. A ideia era usar os mesmos princípios de uma ponte suspensa por correntes, com um telhado maleável e incombustível. É sabido que pelo menos seis dessas estruturas foram construídas no leste europeu, sendo que uma delas sobreviveu em Banska Bystrica na Eslováquia (DREW, 2019).

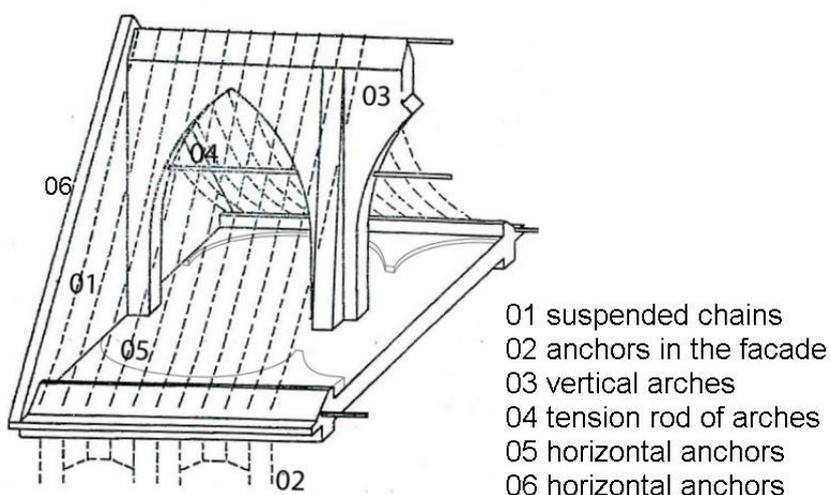
Figura 25: Edifício com cobertura com cabos tensionados de Schnirch em Banska Bystrica



Fonte: RUNNING ARCHITECT, 2016.

Apesar de podemos esperar algo que fuja do comum em uma cobertura que tenha sua estrutura baseada em pontes suspensas, de fato a aparência externa da estrutura não se diferencia muito de uma construção em sistema tradicional de madeiramento e telhas. Diferentemente do que pensamos hoje em termos de estrutura tensionada, no caso em Banska Bystrica, estrutura tensionada é usada como forma principal de sustentação do telhado, com tábuas de madeira apoiadas em cima da estrutura, com as telhas sendo instaladas nessas tábuas posteriormente. Nesse caso, não temos um elemento têxtil que serve de vedação para a cobertura, mas a estrutura que sustenta o telhado tem o mesmo princípio em comum com os cabos utilizados em coberturas têxteis, inclusive o perfil do telhado possui uma curvatura anticlástica, muito comum em obras com uso de membranas arquitetônicas.

Figura 26: Esquema da estrutura do telhado de Schnirch



Fonte: RUNNING ARCHITECT, 2016.

A estrutura era composta por várias correntes que formavam o ângulo do telhado. Essas correntes eram fixadas em ancoragens horizontais na fachada e em uma estrutura vertical, na qual formaria a cumeeira do telhado. Esse conjunto de correntes substituiriam o madeiramento do telhado e seu fechamento seria apoiado nessa estrutura. As outras obras de Schnirch no período, apesar de usar os mesmos princípios das pontes suspensas, não necessariamente tinham o mesmo esquema ou aparência da obra em Banska Bystrica. Essas correntes (figura 27) de sustentação era uma alternativa muito utilizada nas pontes suspensas da época, tecnologia que foi substituída posteriormente pelo uso dos cabos de aço.

Figura 27: Corrente de sustentação do telhado da obra em Banska Bystrica



Fonte: RUNNING ARCHITECT, 2016.

Outro nome da experimentação das estruturas retesadas no século XIX é o russo Shookhov, que em 1896 apresentou 4 tendas na exibição de Nijny-Novgorod, com um sistema de redes de fitas metálicas, com uma cobertura de finas membranas de aço. O estilo de uma das tendas escolhido por Shookhov são inspiradas na *Kibitkas (Yurt)*, com base circular e cobertura em forma cônica. Apesar das experimentações em estruturas desse tipo durante o século XIX, não houve nenhum avanço significativo após as obras de Shookhov até o meio do século XX. (DREW, 2019; PAULETTI, 2003) Essa rede de fitas metálicas tem um princípio estrutural muito parecido com as redes de cabos que foram utilizadas posteriormente, com a primeira obra de destaque sendo a Arena Raleigh nos EUA.

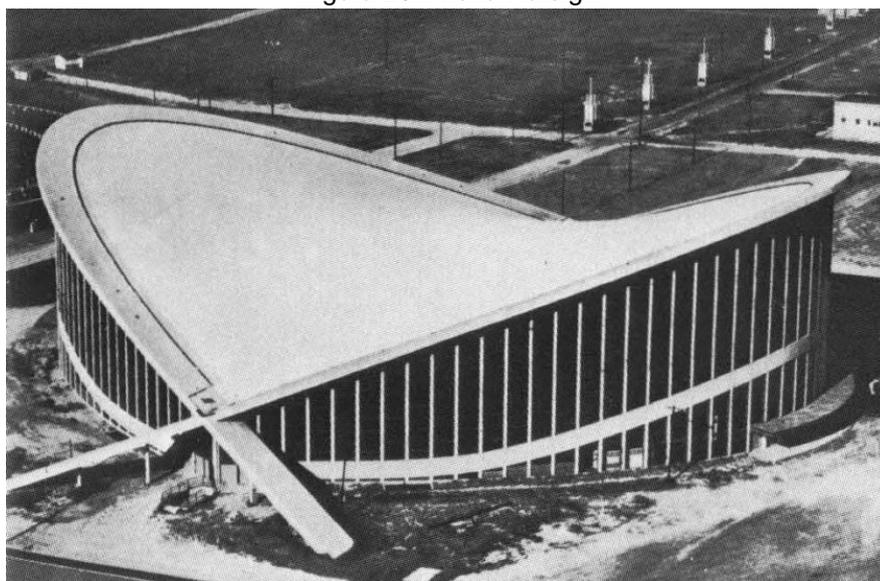
Figura 28: Pavilhões de Shookhov em Nijny-Novgorod, 1886



Fonte: DREW, 2019.

“Se os pavilhões de Shookov são reconhecidos como legítimos precursores, é quase consensual apontar a Arena de Raleigh, de 1952, na Carolina do Norte, como a pedra fundamental da modernidade das estruturas retesadas” (PAULETTI, 2003, p.13). Além de Pauletti, Shaeffer (1996, p. 7) afirma que “As precursoras das estruturas de tecido tensionados contemporâneos foram as estruturas com redes de cabo de aço”, e cita também a Arena Raleigh como a mais influente dessas estruturas. A Arena Raleigh começa a ter uma forma um pouco mais parecida com o que vemos hoje em estruturas com membrana. Sua cobertura tem uma superfície parabolóide hiperbólica, sustentada por dois conjuntos de cabos de aço cobertos por uma superfície de aço dobrado, vencendo um vão de 95m. (BERGER, 2005; PAULETTI, 2003)

Figura 29: Arena Raleigh



Fonte: DREW, 2019.

A obra de Mathew Nowicki representa uma grande mudança no caminho tomado em relação ao modo em que a estrutura da cobertura é composta. Drew (2019) diz que é a primeira vez que uma estrutura de superfície curva anticlástica retesada é apresentada, enquanto as outras obras que se tinham até aquele momento se tratava de estruturas com coberturas suspensas. Apesar do desenho e projeto serem de Mathew Nowicki, ele nunca viu a obra finalizada, e o andamento do projeto e construção ficaram a cargo de outros projetistas.

Nowicki morreu em 1950 em um acidente aéreo. Os projetistas que lhe sucederam, Fred Severud e W.H. Deitrick, modificaram o projeto inicial,

suportando os arcos parabólicos com linhas de pilares esbeltos e –mais importante– recorrendo a uma rede de cabos. Ainda desta vez, porém, o retesamento não teria sido premeditado: a construção iniciou com o sistema de cabos simplesmente suspensos, sendo os cabos transversais acrescentados para facilitar a fixação do revestimento. Foi só então que teria ocorrido aos projetistas que estes cabos transversais seriam capazes de contraventarem os cabos principais. Finalmente, a engenharia formal dava-se conta da grande estabilidade das superfícies anticlásticas retesadas, princípio que as tendas tradicionais já empregavam há muitos séculos. (PAULETTI, 2003, p.14)

A rede de cabos utilizada na Arena Raleigh é muito engenhosa apesar de ser simples. Existem dois conjuntos de cabos que vão em direções opostas, um conjunto no sentido norte-sul enquanto o outro é sentido Leste-Oeste, sendo que eles se cruzam em seu caminho até o lado oposto. Devido a geometria dos arcos do perímetro da cobertura em que são fixados os cabos, cada um desses conjuntos de cabos possui uma curvatura no sentido oposto, um com uma curvatura para cima, o outro com uma curvatura para baixo. Esse fato faz com que a estrutura consiga suportar cargas com igual eficiência nos dois sentidos, para cima e para baixo, o que garantem uma boa estabilidade estrutural. (BERGER, 2005)

Esse modelo da Arena Raleigh foi utilizado algumas vezes em obras em anos subsequentes em Berlim, em Yale nos EUA e em Tóquio. “A Arena de Nowicki marca o início da arquitetura de tração baseada na superfície em oposição aos sistemas de cabos planares” (DREW, 2019, p.166, tradução nossa). Devido a essa mudança de paradigma, essa obra na Carolina do Norte marca a verdadeira mudança em como as estruturas tensionadas são usadas no mundo. Essas estruturas de redes de cabos de aço, são tidas como as precursoras das estruturas tensionadas com tecidos. A Arena Raleigh é provavelmente a mais importante e mais influente estrutura desse tipo, sendo que dito que foi a estrutura que teve impacto significativo em Frei Otto quando ele visitou os Estados Unidos ainda como estudante. (SHAEFFER, 1996)

Um pouco antes da rede de cabos da Arena Raleigh mudar os rumos das estruturas retesadas, outro tipo de estrutura começou a ser estudada e utilizada, e seu uso é de extrema importância para os rumos que tivemos em relação as membranas estruturais e as estruturas retesadas de forma geral. As estruturas pneumáticas começaram a ser estudadas e testadas por Walter Bird, o fundador da

Birdair, uma das maiores empresas atualmente quando falamos de construção com tecnologia têxtil.

Essas experimentações começaram com o *Radome* na década de 1940, uma estrutura pneumática inflada que tinha como objetivo proteger grandes antenas parabólicas de radares. Os primeiros *Radomes* eram compostos por um tecido de fibra de vidro revestida de Neoprene, posteriormente mudando o material para poliéster laminado com Hypalon. Esses protótipos levaram a uma experimentação em estruturas infláveis para a composição de coberturas de vários projetos nos anos seguintes, como para o U.S. Pavilion para a Feira Mundial de Osaka em 1970, com uma cobertura pneumática inflada com mais de 10 mil metros quadrados de área.

Além dessas, várias outras obras foram executadas, principalmente nos Estados Unidos, sendo que algumas dessas estruturas tiveram alguns problemas de durabilidade e confiabilidade, principalmente em ambientes com inverno mais rigoroso, onde a neve acabava por comprometer as estruturas. Porém esses problemas foram benéficos para a indústria de têxteis na construção civil, uma vez que a necessidade de acabar com esses problemas, levaram a pesquisa e a introdução de novos materiais, que acabaram por mudar para sempre as estruturas retesadas.

4.5.1 Coberturas tensionadas e o uso das membranas arquitetônicas

As obras arquitetônicas com cobertura tensionada, e principalmente o uso de tecidos em sua construção, começam a ter um grande avanço a partir da década de 1950, com um nome em especial que inicia grandes experimentações com esse tipo de estrutura. Segundo Shaeffer (1996, p. 7) "a era moderna dos tecidos tensionados começa com um pequeno coreto projetado por Frei Otto para a Feira Federal de Horticultura em Cassel, na Alemanha em 1955".

Frei Otto fez diversos projetos envolvendo coberturas retesadas e uso de tecidos para várias feiras e exposições a partir de 1955, com estruturas cada vez mais complexas. Porém essas estruturas tinham uma limitação em tamanho devido as deficiências de resistência do material disponível naquele momento, sendo que sua dimensão era limitada a algo em torno de 25 metro ou menos. Entre esses projetos,

estão inclusos o pavilhão de entrada e o pavilhão de dança da Feira Federal de Horticultura de Colônia (figura 30), ainda na Alemanha. (SHAEFFER, 1996)

Figura 30: Pavilhão de dança da Feira Federal de Horticultura em Colônia



Fonte: ATELIER FREI OTTO WARMBRONN, 1957.

As limitações estruturais desses tecidos só foram superadas com a criação de novos materiais, que inicialmente foram pensados para uso em outro tipo de estrutura retesada, as pneumáticas. Na feira mundial de 1970 no Japão, o U.S. Pavilion (figura 32) foi feito com uma membrana de fibra de vidro revestida com PVC, para uma cobertura inflada de 139 x 78 metros, bem maior que as estruturas experimentais de Otto. (SHAEFFER, 1996)

Enquanto os materiais têxteis limitavam seu uso em obras com grandes dimensões e vãos quando não sustentadas de maneira pneumática, Otto experimentava outras maneiras de superar as limitações que eram apresentadas pelos materiais disponíveis na época. Um exemplo disso é uma de suas obras mais icônicas, o Estádio Olímpico de Munique de 1972. Essa é uma obra que usa uma rede de cabos de aço para sustentação de sua cobertura, como uma evolução das soluções apresentadas na Arena Raleigh. Essa rede de cabos tem uma característica muito similar as encontradas em soluções com membranas, com as formas anticlásticas muito marcante de selas, um conjunto composto por nove delas, com mastros de sustentação e cabos de aço tracionando a estrutura. O fechamento dessa cobertura de 34.000 metros quadrados e de característica altamente complexa é feita por folhas

de acrílico, uma solução que podemos considerar como precursora da utilização de ETFE.

Figura 31: Estádio Olímpico de Munique



Fonte: MONTO, 2014.

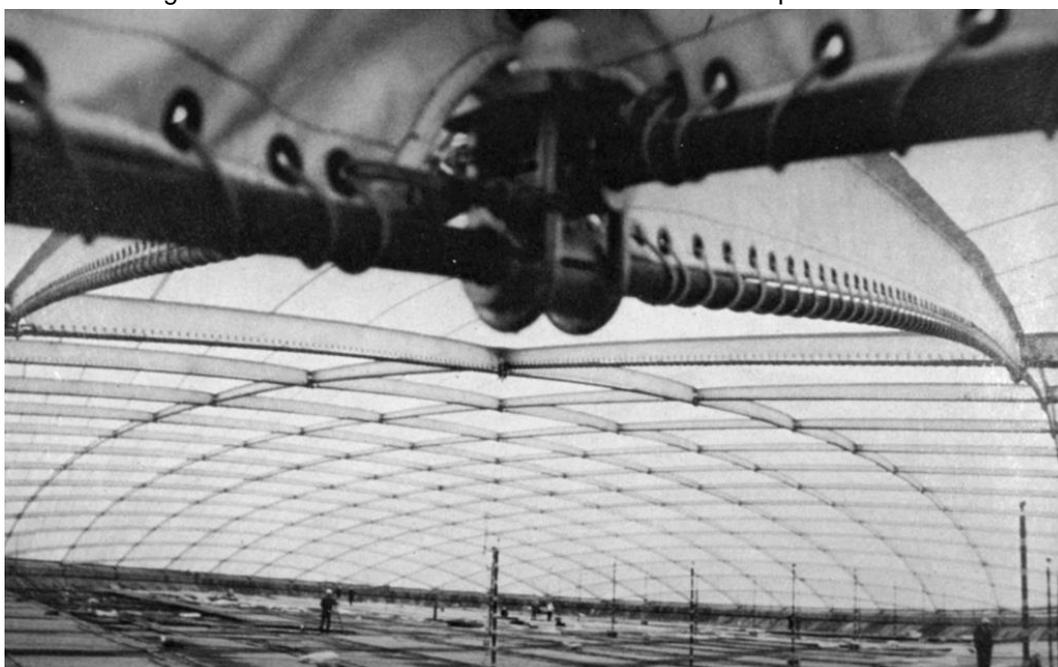
O estádio, com suas formas e soluções inovadoras para época, resiste até os dias de hoje no local. A obra de Otto se tornou um ícone da arquitetura retesada, e é considerada por muitos a sua obra-prima, que serviu de inspiração para muitas obras que vieram posteriormente.

A obra-prima de Frei Otto é a cobertura do Estádio Olímpico de Munique, construído para os Jogos Olímpicos de 1972. Uma poderosa catenária forma sua borda interior. Os mastros voadores são montados em cabos suspensos que descem dos altos mastros e correm para a catenária. Eles ajudam a criar os pontos altos que geram os volumes abobadados do teto ondulado que se eleva sobre este grande espaço. Apesar da interferência geométrica da cobertura de painéis de acrílico rígido (imposta aos projetistas pelos extravagantes requisitos de luz diurna das televisões), essas poderosas formas retesadas tornam a estrutura um dos grandes marcos do século XX. (BERGER, 2005, p. 39, tradução nossa)

Ainda na década de 1970 começaram a surgir alguns materiais novos. A EFL, um braço da Fundação Ford, estava em busca de maneiras de prover abrigo temporário para atletas. A ideia era o uso de estruturas pneumáticas infladas, que tivessem tanto resistência ao fogo quanto a deterioração por raios UV. Um time formado por importantes nomes do setor, como o engenheiro David Geiger e John Effenberger da DuPont, propuseram o uso de fibra de vidro revestida com um novo

material desenvolvido pela NASA para uso em trajes espaciais, o PTFE, popularmente conhecido como teflon. Essas estruturas pneumáticas infladas foram muito utilizadas em diversos projetos durante os anos que se seguiram, porém apresentaram alguns problemas de durabilidade quando expostas a condições de tempo desfavoráveis, principalmente quando tínhamos neve envolvida na questão. Sistemas de aquecimento para o derretimento da neve muitas vezes se mostraram inadequados, assim como o sistema de controle da pressão que muitas vezes não era sofisticado o suficiente. (SHAEFFER, 1996)

Figura 32: Estrutura do U.S. Pavilion em Osaka no Japão em 1970



Fonte: COLUMBIA UNIVERSITY, 1970.

A partir desse momento, vemos uma expansão muito grande do uso de membranas em estruturas que não são pneumáticas. Muitas dessas obras utilizaram o novo material de fibra de vidro revestido com PTFE, que se tornaria o material mais comum no caso de estruturas que exigiam longa durabilidade, principalmente as construções de caráter permanente. Paralelamente também vemos um grande uso de poliéster revestido de PVC tanto em estruturas permanentes como em estruturas temporárias. Fora esses dois tipos de membranas que são as mais comuns, ainda temos experimentações com alguns outros tipos de composição, como a fibra de vidro revestida de silicone, ou aramida revestida de PVC, sem contar novos materiais que surgiram com a evolução dos sistemas construtivos e tecnologias. Com o passar dos

anos, surgem estruturas cada vez maiores e mais complexas com esse tipo de material sendo feitas em diversos lugares do mundo, se tornando uma ótima opção para grandes coberturas agregadas ao baixo peso de sua composição.

5 MEMBRANAS TÊXTEIS

Para podermos dar andamento com as membranas têxteis, é preciso esclarecer alguns termos para facilitar o entendimento dos tipos de estruturas, pois nem toda estrutura retesada é feita com material têxtil, como vimos nas obras precursoras desse tipo de arquitetura. Além disso, nem todo material têxtil utilizado para fechamento de estruturas são membranas estruturais. Alguns desses materiais, apesar de ter uma aparência visual similar as membranas arquitetônicas, não possuem características que o permita ser retesadas ao ponto de compor a estrutura, sendo um material apenas de fechamento. São o caso de algumas tendas, que são vistas com muita frequência em feiras ao ar livre, cobertura de alguns eventos, em alguns casos em estruturas de emergência e em algumas tendas militares.

Visualmente os materiais de estruturas com membrana e sem membrana são muito parecidos, sendo que em alguns casos a composição do material que não é retesado pode ser até a mesma do caso das membranas, sendo o poliéster um dos materiais mais utilizados. A principal diferença é que as membranas arquitetônicas são projetadas para fornecer capacidade estrutural para o edifício, enquanto os tecidos que não são membranas estruturais, funcionam apenas como elemento de fechamento ou vedação. Essa característica é muito similar ao visto anteriormente nas tendas, com situações em que o elemento têxtil funciona somente como vedação, enquanto nos casos das tendas negras por exemplo, ele também tem características estruturais que compõe o conjunto. Quando aplicadas, a principal diferença visual são as formas que as membranas estruturais podem ter, com grandes áreas lisas e esticadas, criando formas mais orgânicas e fluídas, enquanto os materiais que são apenas de fechamento, em geral têm uma aparência mais solta, com planos menores e estruturas de menor porte.

Apesar disso, é importante notar ainda, que existem casos em que o material têxtil fornece estrutura para o abrigo em si, como no caso de barracas de acampamento e estruturas menores com características similares. Nesses casos em específico, o material têxtil se comporta de maneira muito similar as membranas arquitetônicas que abordaremos em sequência, sendo tensionadas por cabos ou postes flexíveis, garantindo uma estabilidade estrutural e determinando a forma final pelo comportamento do material. Porém esses materiais são limitados devido as suas

características, que os impedem de serem usados em obras de maior porte, como durabilidade e propriedades física e estrutural.

Quanto aos elementos construtivos, as estruturas retesadas dividem-se basicamente em dois grandes grupos, as estruturas de cabos e as estruturas de membrana. Os cabos são elementos lineares, capazes de suportar carregamentos externos apenas desenvolvendo esforços axiais de tração. Membranas são elementos superficiais que equilibram os esforços externos desenvolvendo tensões de tração e cisalhamento, tangentes à sua superfície. (PAULETTI, 2003, p. 2)

Essa distinção entre as estruturas retesadas é importante para determinar quando temos o elemento têxtil presente na estrutura. Quando falamos de estruturas de membrana, o elemento têxtil está presente, pois a composição da membrana é de base têxtil, seja fibra de vidro, poliéster, náilon, ou outro, revestido de um material que melhoram as características gerais do tecido, como o PTFE e o PVC. No caso das estruturas de cabos, não necessariamente temos o elemento têxtil, mas ele pode sim ser usado em conjunto com uma estrutura de cabos.

A distinção entre estes dois grupos não é nitidamente demarcada: as redes de cabos, por exemplo, têm um comportamento global muito semelhante ao das estruturas de membrana. Por outro lado, o tecido de uma membrana pode ser entendido como uma rede de cabos de malha muito fina. Cabos e membranas podem ainda aparecer combinados, gerando estruturas retesadas de tipo misto. Este tipo de combinação tem-se tornado bastante freqüente, principalmente em estruturas pneumáticas, quando uma rede de cabos reforça a membrana de vedação. (PAULETTI, 2003, p. 2-3)

No caso das estruturas pneumáticas, para ser caracterizada com uma estrutura retesada têxtil, temos que necessariamente observar o tipo de material que está sendo utilizado, uma vez que existem materiais como os filmes de ETFE que não são materiais têxteis, diferentemente das membranas estruturais que são feitas com tecidos revestidos.

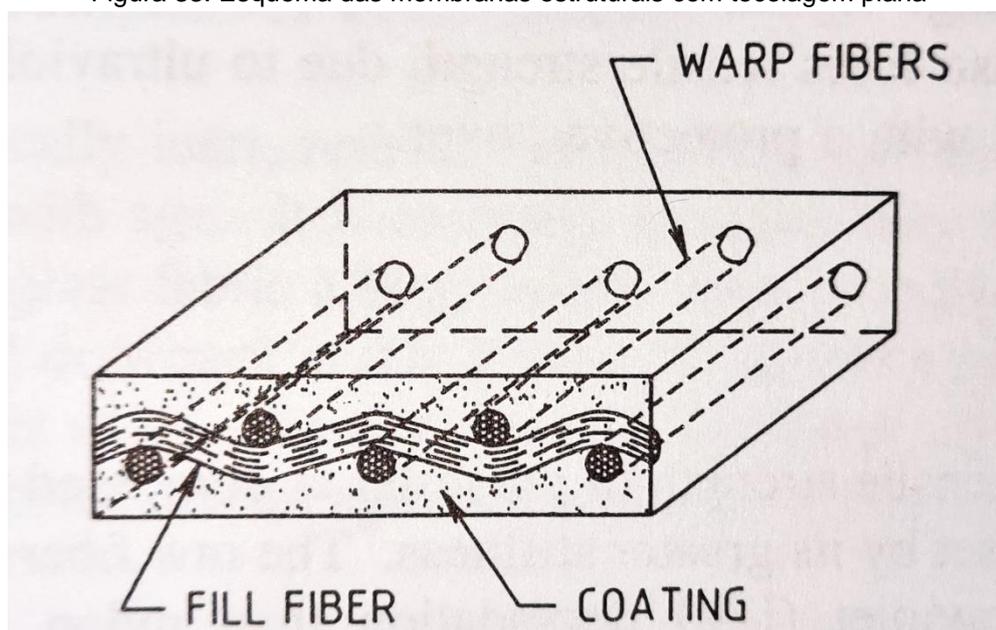
As membranas têxteis podem ser feitas de vários materiais diferentes, sendo que cada tipo de material tem suas vantagens e desvantagens, o que acabam por caracterizar seu tipo de uso. Fatores como durabilidade, custos, características físicas e estruturais, são determinantes para determinar qual o tipo de membrana ideal para cada situação. Além disso, os tecidos estruturais necessitam de algumas características para cumprir com sua função de forma satisfatória, como explica Horst Berger:

Tecido estrutural é o material que define as estruturas retesadas leves. Como um componente estrutural primário, o tecido estrutural deve ter resistência para se estender entre os elementos de suporte, suportar cargas de neve e vento e ser seguro para se caminhar sobre. Como elemento de fechamento, ele precisa ser hermético, à prova d'água, resistente ao fogo e durável. Na maioria dos casos, ele também precisa transmitir a luz do dia, refletir o calor, controlar o som e ser fácil de manter limpo. (BERGER, 2005, p. 55, tradução nossa)

Essas características são de extrema importância para que ela possa cumprir seu papel de forma adequada. Algumas dessas características são obtidas desde a concepção do material em si, como o fato dele precisar ser à prova d'água e hermético, já que a maior parte do uso desse tipo de material é para coberturas, o que não faria nenhum sentido que ela deixasse qualquer tipo de elemento externo adentrar ao ambiente que ela está vedando. Outros aspectos, como a resistência ao fogo fundamental para a segurança do edifício, principalmente de caráter público, como a maioria dos casos em que as membranas são aplicadas.

As membranas são compostas por alguns elementos, sendo os fios, que compõe o elemento têxtil, o revestimento (*coating*) e a cobertura (*topping*). Os fios são, na grande maioria das membranas, de náilon, poliéster, fibra de vidro ou de aramida. Esses fios podem ser dispostos de maneiras diferentes, cada um com suas vantagens e desvantagens. No caso dos fios tecidos temos duas situações possíveis, com uma tecelagem mais aberta e uma mais fechada. No caso das mais abertas, temos uma adesão mecânica maior do revestimento (*coating*), além de uma maior resistência à rasgos, enquanto as desvantagens ficam por conta da menor resistência à tração, além do fato de precisar de mais material de revestimento para ocupar os espaços entre os fios. No caso da tecelagem mais fechada temos uma maior resistência à tração, além de uma facilidade de aplicação de revestimento líquidos em sua superfície, devido ao menor espaço entre os fios. A desvantagem provém do fato da menor distância entre os fios, que diminui aderência mecânica do revestimento aos fios, dependendo exclusivamente da aderência química. Outras desvantagens incluem uma menor resistência à rasgos, além de possuir uma espessura um pouco maior. (BRADSHAW, 1996)

Figura 33: Esquema das membranas estruturais com tecelagem plana



Fonte: BRADSHAW, 1996

Como podemos observar na figura 33, os fios da trama (*fill*) e do urdume (*warp*) ficam dispostos de maneira diferente dentro da membrana, o que gera um comportamento distinto entre os fios quando colocamos uma carga sobre o material. Além disso, após a tecelagem, os fios da trama tendem a dobrar levemente os fios do urdume devido às tensões geradas pela tecelagem. Os dois casos geram uma distorção geométrica que causam um comportamento ortotrópico na membrana, ou seja, temos um comportamento distinto em cada uma das direções do material. Uma forma de minimizar esse efeito, muitas membranas são retesadas antes da aplicação do revestimento, o que faz com que o comportamento da membrana fique mais parecido em ambas as direções. (BRADSHAW, 1996)

Temos ainda o caso das membranas que não são tecidas, onde os fios são colocados uns sobre os outros em direções opostas. Esse tipo de membrana tem a vantagem de ser um pouco mais fina que as membranas tecidas, com uma resistência maior à rasgos, além de um bom equilíbrio entre a adesão mecânica e química do revestimento aplicado. As desvantagens ficam pela pouca interação entre os fios de urdume e da trama por não serem entrelaçados, e conseqüentemente tem um comportamento parecido em ambas as direções, com uma baixa capacidade de alongamento do material. (BRADSHAW, 1996)

Os revestimentos (*coatings*) tem como objetivo principal aumentar a qualidade e resistência da membrana, dando a ela características de impermeabilidade e capacidade de vedação. A aplicação desses revestimentos também ajuda a mitigar a deterioração das fibras aos raios ultravioleta, assim como impedir uma penetração de sujeira e poluição entre as fibras, uma vez que sua superfície fica bem mais lisa e uniforme após a aplicação do revestimento. Esses revestimentos também ajudam a garantir uma maior durabilidade a umidade e microrganismos. Os principais *coatings* aplicados às membranas são o policloreto de vinila (PVC) e o Politetrafluoroetileno (PTFE ou Teflon).

Características como a transmissão da luz do dia, reflexão do calor e controle de som não são aspectos primários do material, mas são aspectos que fazem das membranas uma escolha diferenciada para muitos casos justamente por essas características. Hoje em dia as principais membranas do mercado possuem a característica de ser translúcida, ou seja, ela permite a passagem de luz do sol para dentro do ambiente, e conseqüentemente, a luz do ambiente para o ambiente externo durante a noite. O fato da maioria dessas membranas serem brancas também ajudam na reflexão dos raios solares, o que acaba por ajudar na manutenção da temperatura interna dos ambientes. Sobre as características das membranas, Horst Berger (2005) diz:

A translucidez é a mais importante delas, uma vez que trazer a luz do dia para dentro do edifício pode resultar em uma economia significativa de energia e na produção de um ambiente interno mais saudável, funcional e atraente. A baixa absorção de calor permite maior economia de energia, às vezes até a eliminação do ar-condicionado. As propriedades da superfície que evitam o acúmulo de ruído ou facilitam a remoção da sujeira acumulada, ajudam a manter não apenas a aparência brilhante que agora está associada às estruturas têxteis, mas também ajudam a manter os níveis de translucidez e refletividade necessários para o funcionamento eficiente do edifício. (BERGER, 2005, p. 65, tradução nossa)

Outros aspectos, como a durabilidade do material e sua facilidade de limpeza são conseguidos através de outros beneficiamentos, como uma cobertura (*topping*) que faz um acabamento no revestimento (*coating*) que visa melhorar ainda mais as características do material. Esses *toppings* tem como objetivo aumentar as características autolimpante das membranas, além de aumentar sua resistência aos raios UV e durabilidade, pois além dos raios, a poluição e sujeira são fatores que diminuem a translucência do material e acabam por degradar o material mais

rapidamente, além de prejudicar a sua estética. O *topping* mais comum de ser utilizado, tanto nos revestimentos de PTFE quanto os revestimentos de PVC é o fluoreto de polivinila ou PVF, comercialmente conhecido como Tedlar, mas também podemos encontrar membranas com *topping* de fluoreto de polivinilideno (PVDF), acrílicos ou uretano. (BRADSHAW, 1996)

5.1 POLIÉSTER/PVC

O poliéster é um dos materiais mais empregados em membranas têxteis, principalmente nas de caráter temporário. Apesar do poliéster ter uma resistência um pouco menor que a do náilon, e naturalmente ser mais suscetível à degradação por raios ultravioleta em seu estado natural, o fato de ele ter um módulo de elasticidade maior que o náilon, faz dele uma opção mais viável para membranas tensionadas, pois quando aplicamos um revestimento (*coating*) de proteção, ele se torna mais resistente a degradação dos raios UV. (BRADSHAW, 1996; GOLDSMITH, 2013)

O poliéster é o principal material quando falamos de estruturas retesadas de tecido, com uso nesse tipo de construção se iniciando nos anos 1960, com sua aplicação se dando em estruturas de caráter definitivo, mas principalmente sendo utilizado em estruturas itinerantes. Sua vida útil é normalmente estimada em torno de 15 anos para estruturas definitivas, mas existem casos em que a estrutura desse tipo com mais de 20 anos de idade. Uma importante característica desse material, é que hoje em dia já é possível sua reciclagem, diminuindo os impactos do seu descarte, principalmente pelo fato da sua durabilidade ser menor que as membranas de fibra de vidro. (BRADSHAW, 1996; GOLDSMITH, 2013)

O policloreto de vinila, tradicionalmente conhecido como PVC, é um material macio e flexível, o que o torna ideal para aplicação como revestimento em membranas estruturais. Ele é resistente aos raios UV e está disponível em uma grande variedade de cores, o que o torna uma boa opção quando se trata de estética. É o material normalmente utilizado para o revestimento de membranas de poliéster (BRADSHAW, 1996; GOLDSMITH, 2013). O PVC também é utilizado como revestimento para membranas de náilon, trazendo os mesmos benefícios que as membranas de poliéster, com as diferenças já citadas entre os materiais. Um dos problemas do PVC é que após o uso em torno dos 15 anos, ele começa a apresentar uma característica

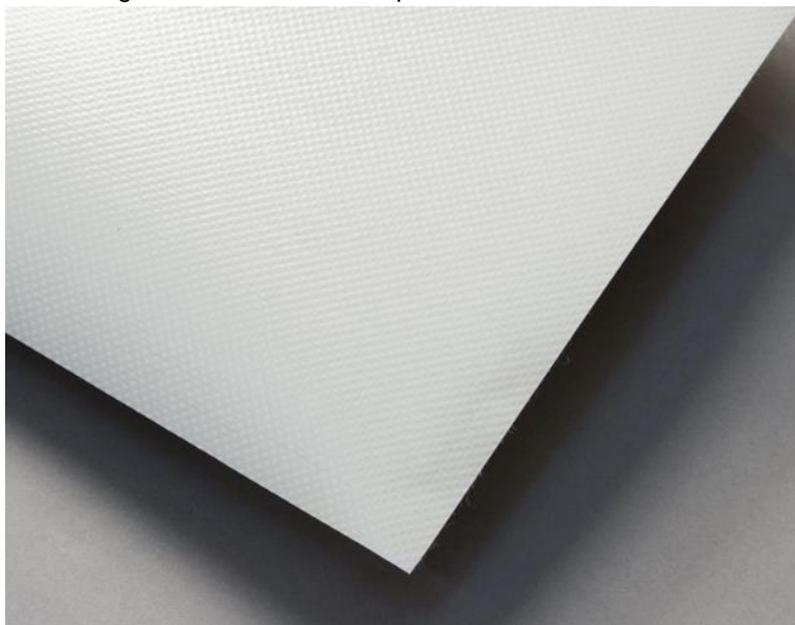
quebradiça, sendo esse o principal motivo para a necessidade de manutenção e troca das membranas revestidas com esse material após esse período. (GOLDSMITH, 2013)

O PVC é um material muito versátil, com a possibilidade de ser pintado ou impresso com tintas à base de PVC, o que o torna uma opção ainda mais interessante para personalizar estruturas. Porém ele tem uma característica de não ser antiaderente como o teflon, o que pode fazer com que sujeira seja aderida a sua superfície, o que se torna ainda pior em locais com altas temperaturas, que podem tornar essa sujeira permanente, estragando o apelo estético do material. A solução para isso é a aplicação do já citado PVF, que aumenta a resistência do material aos raios UV e adicionam características autolimpantes ao material. Outra opção as vezes utilizada é o PVDF. (GOLDSMITH, 2013)

Os tecidos de poliéster com revestimento de PVC, de longe os materiais mais baratos disponíveis, podem durar de 15 a 20 anos se forem tomadas precauções especiais para proteger o poliéster contra os raios ultravioleta. A segurança contra incêndio depende do mecanismo de abertura das costuras, uma vez que esses materiais são combustíveis. A resistência à sujeira requer acabamentos de superfície especiais. (BERGER, 2005, p. 65, tradução nossa)

As membranas de poliéster/PVC são frequentemente empregadas em estruturas temporárias, sendo utilizadas nas mais diversas atividades, que vão de estruturas emergenciais às tendas em grandes eventos de música. A opção para esse tipo de membrana em relação as de fibra de vidro/PTFE é principalmente em relação aos custos. As membranas de poliéster/PVC costumam ter um custo que costuma ser pelo menos 50% menor que uma membrana de fibra de vidro/PTFE, além de algumas características físicas que facilitam a desmontagem e a remontagem dessas membranas. Além disso, as membranas de fibra de vidro/PTFE são mais quebradiças que as fibras de náilon e poliéster, o que dificulta e as vezes impossibilita que o material seja dobrado, sendo necessário enrolar para um transporte adequado, o que implica em uma mão de obra mais especializada, tanto para a montagem e desmontagem do material, quanto para o acondicionamento e transporte para outra localização.

Figura 34: Membrana de poliéster revestida de PVC



Fonte: BIRDAIR, s/d.

As membranas de poliéster/PVC também são utilizadas em estruturas de característica permanente, e possuem muitas das vantagens que as membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE possuem, como sua translucência, que uma das características mais desejáveis das membranas, por possibilitar a passagem da luz durante o dia, o que mantém o ambiente iluminado e pode trazer uma grande economia energética, pelo fato de necessitar de uma quantidade menor de iluminação artificial dentro dos ambientes internos durante o dia.

A grande vantagem desse tipo de membrana em relação as de fibra de vidro é a sua facilidade de armazenamento e transporte, por não ter a deficiência de ser quebradiça. Isso se mostra muito desejável em estruturas que necessitam ser montadas e desmontadas por diversas vezes, o que implica também em seu armazenamento e transporte. Com isso, a mão de obra não carece de tanta atenção e cuidado para o seu manuseio, além do seu transporte acabar sendo mais simplificado, o que reduz os custos para o uso em estruturas itinerantes. Com essas características, esse material acaba sendo o preferido para estruturas que serão desmontadas posteriormente, como em grandes feiras e eventos de música, onde se faz necessária uma grande estrutura para acomodar muitas pessoas.

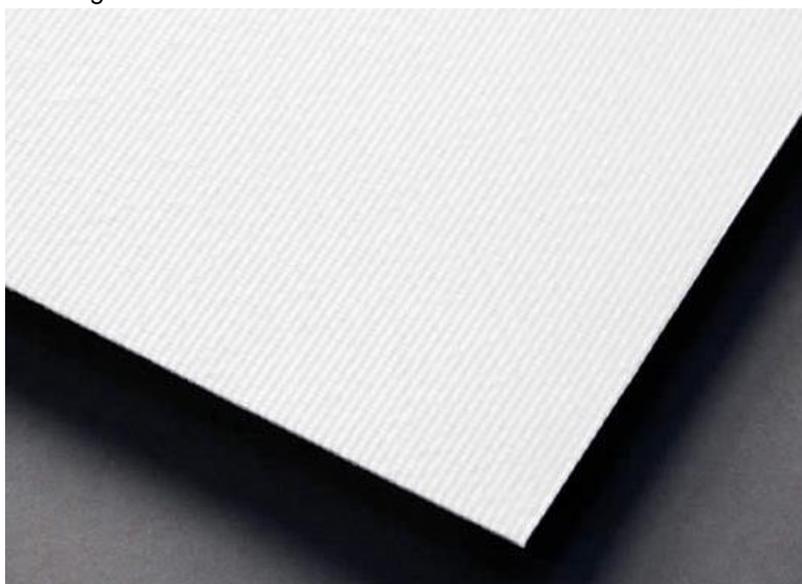
5.2 FIBRA DE VIDRO/PTFE

As membranas de fibra de vidro são uma ótima opção para a utilização em estruturas retesadas devido ao seu alto módulo de elasticidade e sua alta resistência à tração. Apesar disso, sua característica quebradiça acaba sendo um problema, que é contornado inicialmente com a utilização de fibras de diâmetro bem reduzido, o que não acaba definitivamente com o problema, mas o reduz bastante. Ainda assim, é necessário ter um cuidado com repetidas flexões, o que pode levar à danos na membrana, o que torna seu transporte e armazenamento mais complicado e deve ser realizado com mais cuidado. Essa característica quebradiça é um dos principais motivos para esse tipo de membrana não ser utilizado em instalações temporárias, onde a constante montagem e desmontagem da estrutura, assim como seu armazenamento e transporte constante pode ser um grande risco para a integridade da estrutura. (BRADSHAW, 1996; GOLDSMITH, 2013)

Quimicamente, tanto o revestimento de Teflon quanto as fibras de vidro são totalmente inertes. A fibra de vidro deve ser protegida contra a umidade para evitar tensões superficiais perigosas que diminuiriam muito a resistência das minúsculas fibras. Como o Teflon é uma substância relativamente rígida com minúsculas rachaduras, a proteção contra umidade deve ser fornecida por uma camada de silicone. A fibra de vidro revestida de Teflon é não inflamável, muito fácil de manter limpa, altamente reflexiva e altamente translúcida. Na maioria das condições, os tecidos de fibra de vidro revestidos de Teflon devem ter uma vida útil de 25 a 35 anos. As desvantagens são seu alto custo inicial, difícil manuseio devido à rigidez do tecido, sua baixa resistência ao rasgo e seu comportamento altamente não linear em baixas tensões. (BERGER, 2005, p. 65-66, tradução nossa)

O politetrafluoretileno (PTFE), conhecido popularmente como Teflon, se mostrou como um ótimo revestimento para membranas devido a sua característica química inerte, sua alta resistência à umidade e à microrganismos (BRADSHAW, 1996). Essas características do PTFE aliada as características da fibra de vidro, tornam a membrana uma das mais utilizadas em estruturas retesadas de caráter permanente.

Figura 35: Membrana de fibra de vidro revestida de PTFE



Fonte: BIRDAIR, s/d.a.

A alta resistência à tração da fibra de vidro permite que ela seja usada em vãos de grandes dimensões, e o revestimento de PTFE cria uma verdadeira barreira para a alta durabilidade do material, uma vez que sua alta resistência à umidade e microrganismos faz com que o material possa ser empregado em diversos climas diferentes, com uma alta durabilidade garantida independente da situação. Outro fator importante para a durabilidade da membrana é o fato de o vidro não ser suscetível à degradação por raios UV. Essas características permitiram que esse material fosse empregado na Arena Amazônia, estádio de futebol construído para a copa do mundo de 2014 no Brasil, localizado na cidade de Manaus, que possui uma localização bem próxima à Linha do Equador, com grande taxa de insolação durante todo o ano, além de ser uma cidade cravada no meio da floresta amazônica, conhecida por sua alta umidade.

Além da versatilidade e possibilidade de uso em diversos tipos de ambientes, as membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE tem algumas características que ajudam em alguns aspectos interessantes para a concepção de um projeto arquitetônico. Apesar de não estar disponível em cores além da branca, isso não é de fato um problema na hora de elaborar um projeto, uma vez que sua cor acaba ajudando na refletividade dos raios UV provenientes dos raios solares, o que ajuda na manutenção de temperatura interna do edifício, o que é uma grande vantagem em situações em que empregamos cobertura com grande área. Outra vantagem é a sua

translucência, ou seja, ela permite a passagem de luz através do material, o que pode representar uma grande economia de energia, uma vez que não é necessária tanta iluminação artificial dentro do edifício durante o dia.

5.3 OUTRAS MEMBRANAS E MATERIAIS

Existem ainda outros materiais que podem ser utilizados nas estruturas retesadas, sendo que algumas são membranas arquitetônicas, outros são materiais não têxteis que se comportam de maneira parecida em determinadas situações. No caso das membranas utilizadas com revestimento de PVC, além do já citado poliéster, que é o mais comum para esse caso, também temos o náilon. Em situações que necessitamos de uma maior resistência e durabilidade, tivemos o uso da aramida, que acabou não se tornando um produto tão popular, principalmente devido ao seu alto custo.

Temos ainda os materiais não têxteis, como o caso do ETFE, um polímero que pode ser utilizado retesado em estruturas pneumáticas, como no caso do estádio Allianz Arena em Munique, construído para a Copa do Mundo de Futebol de 2006 na Alemanha, ou utilizado em estruturas em que a transparência seja um fator determinante para o projeto, mas que o vidro se mostre uma opção menos viável.

5.3.1 Aramida revestida de PVC

A aramida (Kevlar) diferentemente das outras membranas é um material orgânico, que pode possuir um alto módulo de elasticidade e força, podendo suportar consideravelmente mais flexões que a fibra de vidro, porém não tanto quanto o náilon ou o poliéster. Além disso, esse material é suscetível à degradação por raios UV, sendo necessário um revestimento que iniba essa deficiência (BRADSHAW, 1996). Essas características poderiam fazer da membrana de aramida uma opção interessante para coberturas retesadas, não fosse o fato do seu altíssimo custo de produção, o que pode explicar a raridade desse material empregado em construções. Seu uso, porém, pode valer o custo quando suas características únicas podem fazer dela a opção mais viável. O seu uso mais conhecido é no Estádio Olímpico de Montreal, mas ela é também muito utilizada em projetos militares (GOLDSMITH,

2013). No caso do Estádio Olímpico de Montreal (figura 36) a aramida foi empregada com um revestimento (*coating*) de poliuretano e PVC, numa cobertura retrátil que foi finalizada somente mais de 10 anos após as olimpíadas de 1976, devido a vários problemas durante a construção e necessidade de revisões do projeto. (SHAEFFER, 1996)

Figura 36: Estádio Olímpico de Montreal no Canadá



Fonte: COLISEUM, 2023

A cobertura lapidada que cobre o centro do estádio, não estava presente durante sua inauguração para os jogos olímpicos de Montreal, sendo que mesmo após a sua finalização tardia, a cobertura encontrou alguns problemas durante os anos, sendo que atualmente ela apresenta alguns problemas graves de degradação e sua troca se faz necessária, de modo que está vedada a realização de eventos no local dependendo das condições do tempo, por medidas de segurança.

Apesar disso, seriam necessários estudos mais aprofundados sobre o estado da cobertura e as causas de sua degradação, sendo que não possível afirmar que a situação atual se dá pela escolha do material utilizado, por alguma falha projetual ou durante a execução.

5.3.2 Fibra de Vidro revestida de Silicone

O uso do silicone como revestimento das fibras de vidro era bem frequente até a década de 1980, porém é um material que mostrava uma alta tendência a incorporar partículas aéreas e sujeira, o que atrapalhava algumas das características desejáveis das membranas arquitetônicas. Ele é um material com ótima resistência aos raios UV, boa flexibilidade, resistência ao fogo, além de contar com uma alta capacidade de transmissão de luz. Tecnologias mais novas têm melhorado as características autolimpantes do silicone, o que tem feito das membranas revestidas com esse material uma opção viável novamente, até porque a sua vida útil é estimada em torno de 25 anos, muito próxima da vida útil das membranas revestidas de PTFE. (GOLDSMITH, 2013)

Esse tipo de membrana tem algumas peculiaridades em relação aos outros tipos que citamos até agora. As costuras de união, diferentemente das opções anteriores, têm que necessariamente serem feitas de linhas de PTFE, ou usar adesivos de silicone para que essa união seja adequada. (GOLDSMITH, 2013)

5.3.3 ETFE

O ETFE (Etileno-tetrafluoroetileno) não é um material têxtil e sim um polímero de alta durabilidade utilizado em lâminas. Diferentemente materiais citados até agora, ele não pode ser usado como uma membrana estrutural, sendo que seu uso tem que ser associado a outros materiais estruturais, como uma rede de cabos de aço por exemplo. É importante salientar que esse tipo de material é usado exclusivamente em estruturas de caráter permanente. (GOLDSMITH, 2013)

Por se tratar de um material transparente, ele é um ótimo substituto para o vidro e o acrílico, sendo que ele pode ser usado de várias formas diferentes, como no caso de painéis rígidos, como uma folha de vidro por exemplo, ou como um travesseiro inflado, no caso de estruturas pneumáticas. No segundo caso, temos que ressaltar que ele não funciona como um elemento estrutural, sendo somente um elemento de vedação, mas que pode trazer vários recursos para a construção, sendo as principais delas o isolamento acústico e térmico do edifício. Essas características fizeram esse material primeiramente ser utilizado em estufas, por ter um bom isolamento térmico e

ainda permitir a passagem de luz, mas posteriormente tendo seu uso expandido para outros tipos de estruturas.

Uma das mais famosas construções com ETFE é o estádio Allianz Arena em Munique na Alemanha (figura 37), construído para a Copa do Mundo de Futebol de 2006. O estádio aproveita brilhantemente as características do material, que foi utilizado em travesseiros inflados fixados em uma estrutura metálica que compõe toda a fachada e cobertura do edifício. Sua capacidade de isolamento acústico é perfeita para um local onde o nível de ruído produzido pela torcida pode ser muito alto. Sua capacidade de isolamento térmico faz dele o material ideal em um local onde a temperatura média é abaixo dos 20º durante todos os meses do ano.

Figura 37: Allianz Arena em Munique na Alemanha

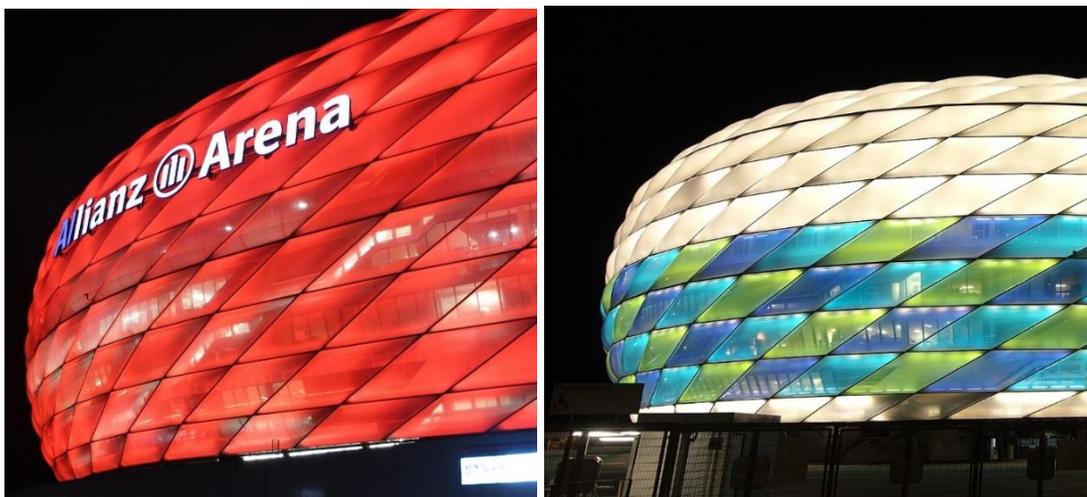


Fonte: DÖRRBECKER, 2007

Além das características já citadas do material, no caso desse estádio, as possibilidades que foram trazidas permitem configurações estéticas diversas. Com a capacidade de acender cada um desses painéis individualmente, o estádio é capaz de mudar sua cor dependendo do time que está jogando no local. Essa foi uma das ideias norteadoras da concepção do estádio, que é a casa de dois times de futebol, o Bayern de Munique, time que tem o vermelho como sua principal, e o Munique 1860 (TSV 1860 München), que tem a cor principal do time em azul. Fora essas duas cores, o estádio pode ser configurado em uma infinidade de outros padrões, sendo que já ficou nas cores da bandeira alemã, nas cores do arco-íris, nas cores da bandeira da

Ucrânia, dentro muitos outros. Essa característica “camaleão” proporcionada pelo ETFE faz o Allianz Arena uma das construções mais dinâmicas do mundo em sua aparência.

Figura 38 e 39: Allianz Arena em diferentes configurações de cores



Fonte: MIN-JOON, L, 2016 e MITTERER, C, 2012.

Outro projeto que aproveitou de maneira muito feliz as características do ETFE foi o Centro Aquático Nacional de Pequim (figura 40), construído para os Jogos Olímpicos de 2008 que aconteceram na capital chinesa. Assim como o caso anterior, o ETFE foi utilizado em travesseiros inflados fixados em uma estrutura metálica que compõe toda a fachada e a cobertura do edifício. Nesse caso, ao invés de painéis trapezoidais como no Allianz Arena, foram escolhidos painéis de diferentes tamanhos com aspecto de bolhas, justamente para fazer esse *link* visual entra a estrutura e seu uso interno.

Figura 40: Centro Aquático Nacional de Pequim



Fonte: KOHARA, 2010.

Seus painéis também são iluminados, o que cria um grande destaque na construção, principalmente durante a noite. A cor predominantemente utilizada era justamente o azul, para remeter às atividades esportivas aquáticas que ocorreram no local. Assim como no caso anterior, a escolha do material foi muito bem aproveitada pelos projetistas. Sua característica de isolamento térmico ajuda o local a manter uma temperatura agradável dentro do edifício, já que as piscinas no local têm temperatura controlada, e isso faz que exista uma troca de calor bem menor com o ambiente externo, economizando energia. O fato de existir um isolamento acústico também foi muito bem-vindo para o local, uma vez que outras construções destinadas aos jogos foram construídas nas proximidades, e essa característica ajuda a isolar os sons externos, assim como ajuda a não propagar os sons das atividades que ocorreram no local.

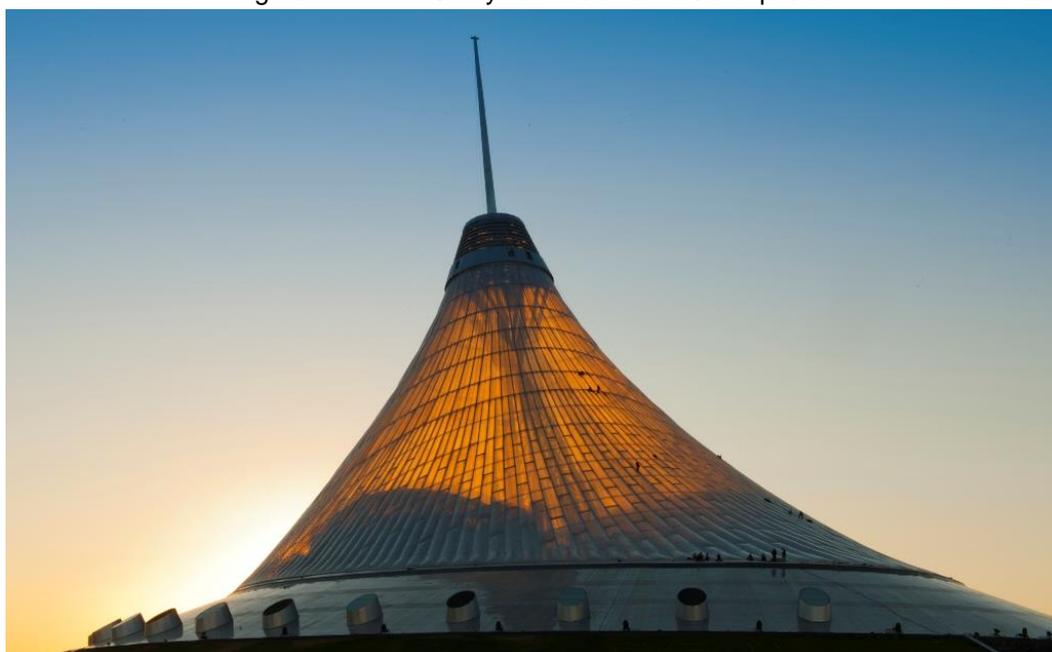
Outra característica muito interessante obtida com esse material no local é a transparência na cobertura, o que dá a impressão da atividade estar ocorrendo em um local aberto. Esse fato também proporciona uma alta insolação dentro do ambiente, criando uma necessidade menor de compensar com iluminação artificial. Todas essas características foram possíveis sem o efeito estufa que aconteceria com uma cobertura de vidro por exemplo, já que esses travesseiros inflados possibilitam uma manutenção térmica interna muito melhor.

Um terceiro projeto que vale a pena ser citado é o Centro de Entretenimento Khan Shatyr (figura 41), localizado na capital do Cazaquistão, Astana. Essa é considerada hoje a estrutura de membrana mais alta do mundo com 150 metros de altura. Sua estrutura é composta por uma rede de cabos de aço fixadas no topo de uma estrutura treliçada de tubos de aço, com sua base tendo uma forma elíptica de 200 metros por 195 metros. O fechamento dessa imensa rede de cabos é justamente o ETFE, com colchões de três camadas inflados, que permitem a passagem da luz do dia para dentro do ambiente interno, além de proporcionar uma vista praticamente sem obstrução do céu da cidade.

A escolha do ETFE para o revestimento não foi ao acaso, e novamente suas propriedades de isolamento térmico foram um dos principais motivos para escolha do material. Os arquitetos do escritório Foster+Partners, responsável pelo projeto, optaram por esse material segundo as diretrizes do projeto, onde era desejável um

espaço em que não tivesse as grandes variações de temperaturas que são encontradas na cidade, indo de 35°C no verão para até -35°C no inverno. A adoção do ETFE para o revestimento possibilita o local manter uma temperatura de 14°C durante o rigoroso inverno, enquanto as temperaturas no verão ficam em torno de 29°, mesmo com a transparência do material. Além disso, o alto nível de transparência do material e alta quantidade de luz natural no ambiente interno possibilita a criação de vários tipos de vegetação no local.

Figura 41: Khan Shatyr em Astana no Cazaquistão



Fonte: YOUNG, s/d.

As características obtidas pelos projetistas com essa grande cobertura de ETFE tornam o ambiente interno uma opção de amenidade climática para os moradores da cidade durante todo o ano. Seu objetivo era criar um espaço para atividades que normalmente são praticadas ao ar livre dentro de um ambiente fechado. Além de possuir diversos tipos de atividades como um grande shopping, com lojas e restaurantes, o local conta com pistas para corrida e parques dentro desse refúgio criado em Astana.

5.3.4 PTFE expandido

O PTFE (teflon) expandido é uma opção mais recente de materiais têxteis disponíveis para uso em arquitetura retesada, utilizado principalmente em estruturas de caráter temporário. Diferentemente do caso das membranas de fibra de vidro, onde

o teflon é utilizado como um revestimento para melhorar as características do material final, aqui ele é transformado em fibras, o que permite a criação do próprio tecido do material. Esse material é muito resistente a umidade e microrganismos, uma das propriedades que fazem dele uma ótima opção de *coating* para fibra de vidro, além de ter uma característica muito desejada, que é o fato de ser antiaderente. Além disso, a membrana de PTFE expandido, tem uma alta translucência, permitindo a passagem de até 40% da luz externa, o que possibilita a criação de vários tipos de vegetações dentro do ambiente interno em que ele está cobrindo. O ponto negativo desse material é seu alto custo de produção. (GOLDSMITH, 2013)

5.4 COMPONENTES DAS ESTRUTURAS DE MEMBRANA ESTRUTURAL

Uma estrutura com membrana estrutural é composta por outros elementos além do tecido. Essa estrutura pode ser composta de colunas, vigas, mastros, anéis, cabos, além da fundação. Cada projeto tem suas especificidades e os elementos que compõe sua estrutura podem variar caso a caso.

O tecido, como dito anteriormente, é escolhido com base no uso em que ele vai ser submetido, se vai ser uma estrutura temporária ou uma definitiva, quais as necessidades estruturais, custos de implantação e manutenção, local de implantação, dentre outros fatores. As alternativas mais comuns, como já vimos, são as membranas de poliéster revestida de PVC e as membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE.

Para que estruturas tracionadas funcione adequadamente deve haver uma hierarquia de elasticidade dos materiais. A membrana deve ser mais flexível que os cabos. Eles, por sua vez, devem esticar mais do que os membros rígidos que os sustentam. Quando existe tal hierarquia, as estruturas são fáceis de construir e se comportam de maneira previsível e eficiente sob carga. (BERGER, 2005, p. 56, tradução nossa)

As estruturas complementares de mastros, colunas e vigas vão ser determinadas pelo projeto em questão. Alguns projetos, como os que temos um formato cônico, possuem um mastro central que se eleva até o topo da estrutura com um elemento onde será fixada a membrana. Em outros casos temos a membrana fixada em um quadro que fixa em todo o seu perímetro, em outros temos um pórtico central que serve de apoio para a membrana formando uma cumeeira. As possibilidades são muito diversas e vai depender muito das intenções projetuais, tanto

com determinações estéticas quanto estruturais. Dito isso, podemos encontrar estruturas tubulares, treliças de chapa dobrada, treliças de tubos, mastros de tubo, mastros treliçados, estruturas articuladas, dentre muitos outros, a depender de cada projeto.

Os elementos rígidos de suporte são mastros, escoras, pórticos, arcos e vigas de borda. Eles são geralmente feitos de materiais que agora consideramos “convencionais”, apesar do fato de que nenhum deles existia há cem anos. Esses materiais incluem aço de alta resistência, concreto armado e protendido, madeira laminada, alumínio estrutural e, mais recentemente, vários materiais sintéticos compostos. BERGER, 2005, p. 56, tradução nossa)

Os cabos de aço podem ser encontrados em diversas espessuras e são utilizados de diversas formas nas estruturas de membrana. Eles podem servir de reforço estrutural nas bordas das membranas, servir de ponto de fixação da estrutura, como cabo de tracionamento nos cantos, fazer uma rede de cabos que posteriormente será coberto por um material têxtil, servir de reforço estrutural para colchões inflados de ETFE. Seu uso é muito diverso e constante, principalmente devido a sua flexibilidade. (BERGER, 2005)

As fundações podem ser feitas de diversas formas a depender de cada caso, sobre isso Ishler (1996) diz:

As fundações para estruturas de membrana retesadas devem normalmente resistir a significativas cargas de elevação. Onde a estrutura de suporte tem peso significativo ou fundações maiores por outras razões, o custo adicional para adicionar uma membrana pode ser mínimo. Se uma membrana for a estrutura primária, o custo das fundações pode ser significativamente maior do que seria para uma estrutura mais convencional. (ISHLER, 1996, p. 6, tradução nossa)

Isso se deve ao fato de a membrana estrutural ter um peso desprezível se comparado a uma estrutura convencional, sendo assim, quando adicionado a um projeto em que ela serve de complemento e não como estrutura principal, como no caso da cobertura do estádio do Maracanã por exemplo, é pouco provável que se faça necessário aumentar as dimensões da fundação. Em casos em que a membrana é a estrutura principal, como a coberturas apresentada por Frei Otto no Pavilhão de dança da Feira Federal de Horticultura em Colônia, não pode se fazer proveito de uma estrutura rígida e pesada para sustentar as cargas resultantes da cobertura, se faz necessária uma fundação específica para essa estrutura.

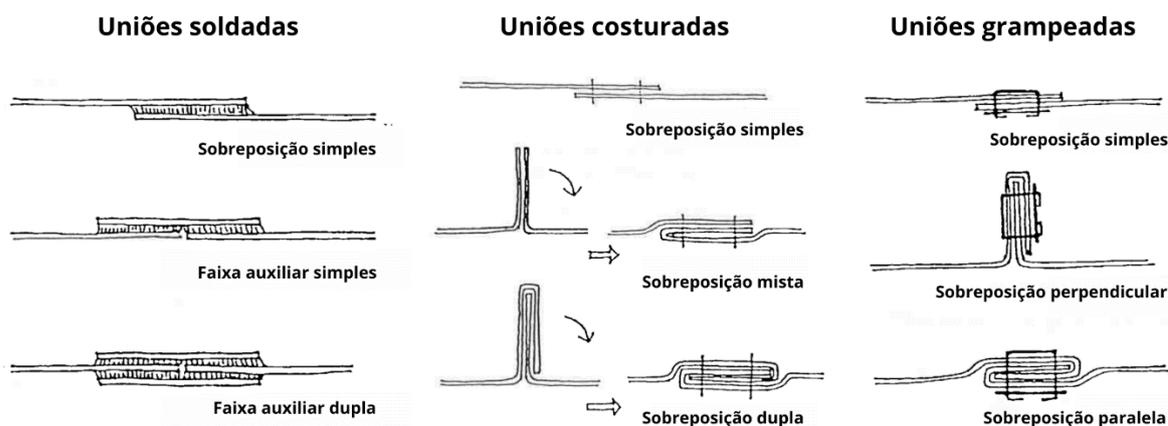
5.5 UNIÕES, CONEXÕES E JUNÇÕES

As membranas têxteis são fabricadas a partir da tecelagem de fios de algum material, normalmente o poliéster ou a fibra de vidro. Esses materiais têm uma dimensão máxima determinada pelo método de tecelagem escolhido para sua fabricação, o que implica que essas membranas não podem ser fabricadas já no tamanho e formato adequado para serem utilizadas na obra, elas precisam ser unidas para que tenham o tamanho e forma adequados para o projeto em que serão empregadas. Normalmente o processo de produção das membranas permitem que ela tenha uma largura entre três e quatro metros, enquanto um rolo completo pode ter em torno de 30 metros ou mais de comprimento. A partir do projeto em que a membrana vai ser aplicada, é criado um padrão de corte para compor a peça final, com esses modelos estabelecidos o tecido é cortado no formato adequado para posteriormente ser unido de maneira adequada. (BRADSHAW, 1996; TERRY; WIEBER, 1996)

Existem diversos tipos de costuras que podem ser utilizados para união dessas partes, dependendo do tipo de material que vai ser empregado ou a situação em que ele vai ser utilizado. Essa união tem que ser feita de modo que toda a superfície da membrana atue de maneira uniforme, como se fosse só um material, sem haver pontos fracos que reduzam seu desempenho, ou seja, temos que garantir que as características mecânicas e físicas nessas costuras sejam as mesmas que o restante da membrana. Sendo assim, precisamos nos preocupar o seu correto desempenho frente as atuações das tensões, as características mecânicas, elasticidade, estanqueidade, impermeabilidade, resistência química, ao fogo e aos raios UV. (CARRIÓ, 1991; TERRY; WIEBER, 1996)

As costuras podem ser feitas de diversas maneiras: elas podem ser costuradas com pontos utilizando linhas, podem ser coladas, podem ser soldadas, grampeadas, ou até mesmo utilizar mais de um tipo em um sistema misto. Além disso, as vezes se faz necessária uma união que precisa ser desfeita, ou executada no momento da montagem, ou ter fácil acesso à algum tipo de manutenção, nesses casos podem ser feitas uniões conversíveis com cremalheiras, elementos metálicos ou cordões. (CARRIÓ, 1991; TERRY; WIEBER, 1996)

Figura 42: Exemplos de uniões em membrana têxtil



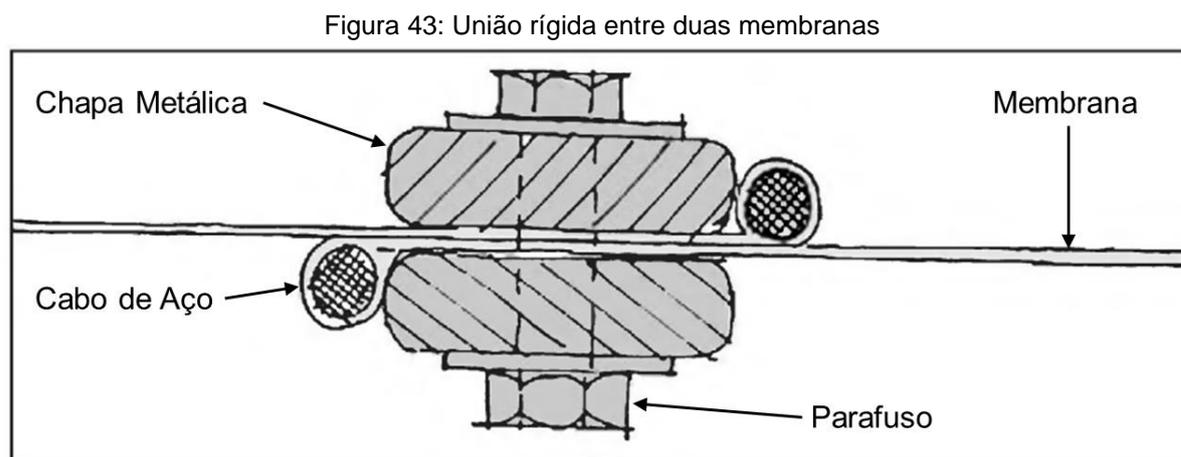
Fonte: Adaptado de CARRIÓ, 1991.

As uniões costuradas com pontos são feitas como em qualquer outro material têxtil, com uma linha que seja compatível com o material em questão, normalmente do mesmo material que o tecido base da membrana, mas há exceções, como as membranas de fibra de vidro e silicone, que necessita de fios de PTFE. Essas costuras são feitas por máquinas industriais e normalmente são utilizadas em membranas que não possuem revestimento ou tecidos que não podem ser soldados. Por abrir buracos no tecido, é necessário que as costuras sejam posteriormente cobertas para garantir sua impermeabilidade e estanqueidade. São preferencialmente usadas em casos em que a membrana sofre cargas perpendiculares, como no caso das pneumáticas. (CARRIÓ, 1991; GOLDSMITH, 2013; HOUTMAN; WERKMAN, 2004)

As uniões coladas, como o nome sugere, faz uso de um material adesivo que une as partes em questão, porém não são as mais comuns em membranas. As grampeadas fazem uso de um grampo que une as duas partes de maneira mecânica, enquanto as soldas são feitas aproveitando as propriedades termoplásticas do material de revestimento, fundindo as partes da união. (CARRIÓ, 1991; HOUTMAN; WERKMAN, 2004)

Costuras soldadas são mais comumente usadas devido à sua impermeabilidade inerente e aos processos de produção controlados empregados. As soldas são geralmente feitas pela simples sobreposição das bordas dos painéis. A largura da sobreposição determina a largura da solda. O processo de soldagem funde os revestimentos das duas peças de material sobrepostas. Esta é uma diferença importante com costuras de pontos. As costuras de pontos possuem uma conexão mecânica entre os dois panos. (HOUTMAN; WERKMAN, 2004, p. 151 tradução nossa)

Ainda temos um tipo de união mais rígida, que é composta por placas metálicas aparafusadas umas às outras, com as membranas entre as chapas (figura 43). Esse tipo de união cria um elemento estético bem definido na membrana, com uma faixa que não se mistura visualmente com o restante. Nas extremidades da membrana que vai ser fixada dessa maneira, corre um cabo de reforço, que ajuda na transferência das cargas. (HOUTMAN; WERKMAN, 2004; TERRY; WIEBER, 1996)



Fonte: Adaptado de HOUTMAN; WERKMAN, 2004.

Este tipo de conexão é instalado *in loco*, tem um forte aspecto visual e é utilizado para unir grandes painéis de membrana pré-fabricados. Pode ser feito de uma variedade de materiais capazes de suportar a carga, por ex. madeira, aço, alumínio.

As conexões com placas de fixação podem ser usadas para subdividir tecidos com áreas muito grandes para facilitar o manuseio na oficina.

Uma única camada de placas de fixação pode ser usada de maneira semelhante para prender uma borda de membrana diretamente em uma viga perimetral. (HOUTMAN; WERKMAN, 2004, p. 154-155 tradução nossa)

As técnicas de costura também são utilizadas para fixar outros elementos na membrana, como o caso da relinga, um cabo que serve de reforço para o material têxtil em suas bordas. As costuras também são feitas para criar um reforço estrutural na membrana onde haverá conexões com outros elementos construtivos, como cabos e fixações. Essas dobras costuradas nos perímetros dos materiais têxteis são feitas para permitir que o material não desfie e acabe comprometendo sua integridade, criando uma bainha, como é tradicionalmente feita na maioria dos artigos têxteis. (CARRIÓ, 1991)

Nas bordas das membranas podemos ter dois tipos de situação para sua fixação, uma em que a membrana é fixada em um elemento rígido e outra em que ela

é fixada em um elemento flexível. Como elemento flexível podemos ter a própria lateral da membrana reforçada com um material em sua costura de borda, um cabo de aço que passa por uma cavidade formada a partir da costura da borda da membrana, ou um cabo de aço correndo por fora da membrana, fixada por ganchos ou cabos. Outra situação em que temos os mesmos casos, com um cabo correndo por dentro da costura ou por fora dela, mas dessa vez um elemento rígido ao invés de um cabo de aço. Tanto um caso como o outro, são referidos por Carrió (1991) como relinga, um elemento de reforço do material têxtil comumente utilizado em velas de embarcações, que assim como no caso das membranas, corre nas extremidades do material. (CARRIÓ, 1991; HOUTMAN; WERKMAN, 2004; TERRY; WIEBER, 1996)

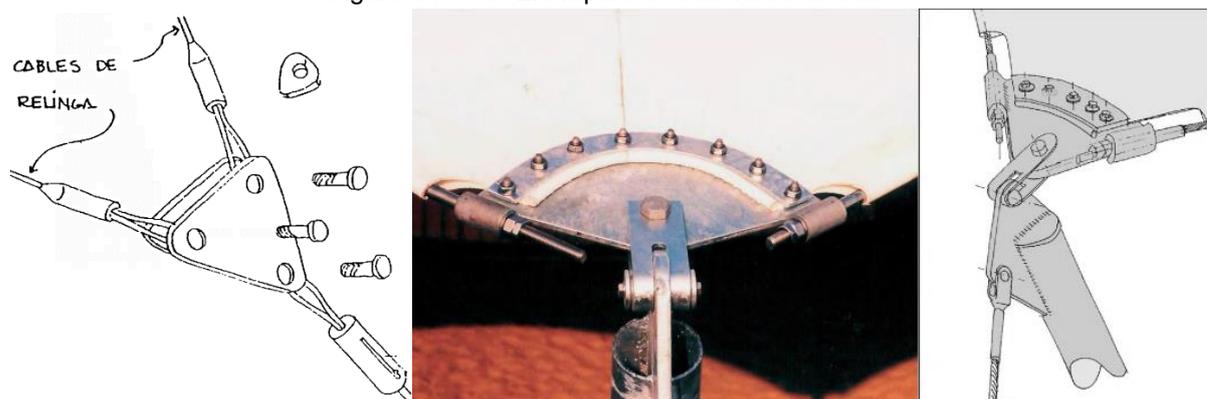
A outra situação de fixação são em elementos rígidos. Nesse caso temos a membrana sendo fixada em uma estrutura rígida que dá o formato final, como em um quadro em que a tela é fixada nas extremidades da moldura. Essa fixação pode ser feita de diversas maneiras, por ganchos, cabos, ou até mesmo fixada diretamente na chapa estrutural, num modelo muito parecido com a união rígida citada anteriormente. (HOUTMAN; WERKMAN, 2004)

Ainda temos situações em que temos a membrana apoiada sobre estruturas rígidas ou de cabos. Nesses casos, como numa estrutura de rede de cabos por exemplo, podemos ter a membrana fixada nesse elemento ou não, sendo que quando apoiada em elementos rígidos, existe um reforço de costura nesse local. Ainda é importante mencionar que muitas das emendas predeterminadas pela padronagem em projeto, fica em local já determinado para a passagem desses elementos rígidos ou cabos de aço, de forma que exista um reforço na área onde haverá o contato. (TERRY; WIEBER, 1996)

Os cantos das membranas são um ponto crítico da estrutura, devido ao fato de ser o local de distribuição das forças atuantes na membrana para o elemento em que ela está fixada. As forças são distribuídas para as extremidades da membrana, onde temos os cabos de relinga ou o engaste nas estruturas fixas, que posteriormente distribuem essas cargas para os cantos, onde posteriormente são distribuídas para algum outro elemento estrutural do conjunto ou diretamente para a fundação em que a membrana está ancorada. Existe vários tipos de conexões que são colocadas nos cantos, sendo que seu desenho e modo de atuação são determinados em projeto,

uma vez que é um elemento que possui muitas particularidades dependendo da forma que foi estabelecida para estrutura, como as cargas são distribuídas, além de muitas vezes possuir um apelo estético para o conjunto. (CARRIÓ, 1991; HOUTMAN; WERKMAN, 2004; TERRY; WIEBER, 1996)

Figura 44 e 45: Exemplos de conexões de canto

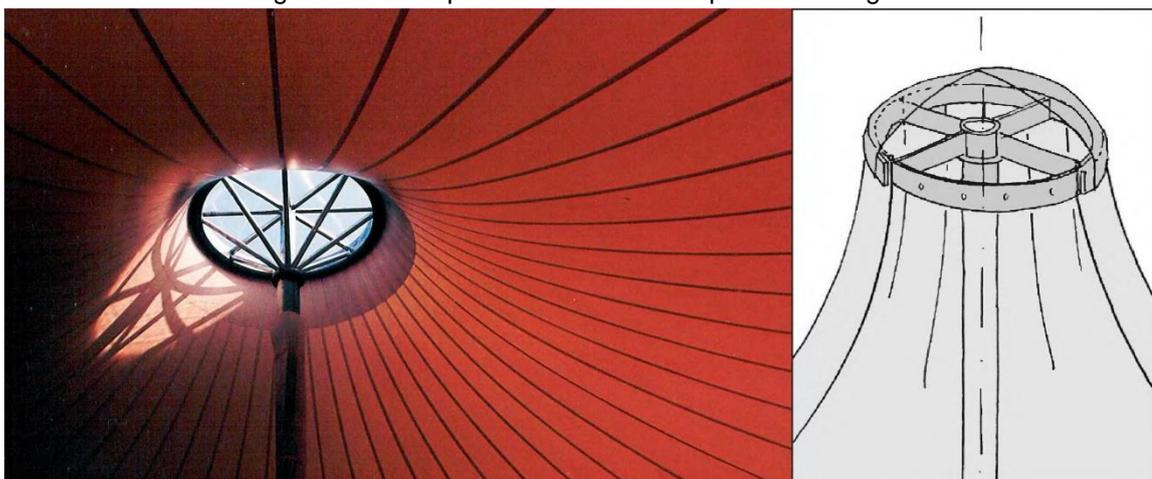


Fonte: CARRIÓ, 1991; HOUTMAN; WERKMAN, 2004.

Nas estruturas cônicas, como as vistas no projeto do Aeroporto Internacional de Denver, temos um elemento de fixação no topo desse cone. Nesse caso, temos um anel rígido onde a membrana é fixada por todo o perímetro, com posterior fixação no sentido contrário na outra extremidade, criando um cone curvado característico das estruturas de membrana têxtil. Essa fixação de topo tem como objetivo transferir as cargas para um poste central que se eleva até o topo desse cone. Existem algumas estruturas que tem o cone invertido, com a ponta mais estreita voltada para baixo. Nesses casos a fixação também acontece da mesma maneira, apenas com as posições invertidas. (CARRIÓ, 1991; HOUTMAN; WERKMAN, 2004)

Essas fixações de topo podem ser feitas de várias maneiras diferentes, como o já citado anel rígido, ou através de cabos que são fixados em uma relinga flexível no ponto mais estreito da membrana, ou até mesmo em uma roseta de laços na qual a membrana é fixada, existem vários tipos de fazer essa conexão e elas não se limita aos exemplos mencionados nesse trabalho. Em todos os casos, a função dessa fixação é o mesmo de transferir as cargas para esse mastro central que se eleva até o topo da estrutura. (CARRIÓ, 1991; HOUTMAN; WERKMAN, 2004)

Figura 46: Exemplos de conexão de topo em anel rígido



Fonte: HOUTMAN; WERKMAN, 2004.

Além dessas conexões específicas no uso de membranas têxteis, ainda temos outros tipos de uso corrente em outras estruturas. Conexões de cabo de aço, postes de fixação, pontos de fixação em fundação, não diferem muito do encontrado em outros métodos construtivos. Postes e mastros por exemplo, podem ser articulados ou não, dependendo da sua função na estrutura. Os articulados por exemplo, permitem uma flexibilização da estrutura, sendo que eles podem ser estabilizados por cabos de aço ou pela própria membrana. Essas fixações entre uma estrutura e outra pode ser feita por parafusos, chapas de aço (ou outro material), soldas, chumbadas diretamente numa estrutura rígida como as fundações, tudo irá depender do uso e da necessidade específica de cada projeto. (CARRIÓ, 1991)

6 ARQUITETURA TÊXTIL HOJE

A arquitetura têxtil evoluiu muito a partir da segunda metade do século XX, com muitos materiais e técnicas aparecendo a partir da experimentação de novas estruturas. O surgimento das membranas de poliéster e de fibra de vidro elevaram as possibilidades de utilização de materiais têxteis na construção civil, com estruturas cada vez maiores e cada vez mais complexas.

É extremamente comum vermos esses materiais sendo usado na construção civil, principalmente em estruturas temporárias, mas cada vez mais em estruturas definitivas também. O uso de membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE e de poliéster revestidas de PVC já é amplamente encontrada ao redor do mundo, mas recentemente vemos um avanço de uso de outros materiais retesados, como o ETFE, que apesar de não ser um material têxtil se apropria de muitas das técnicas usadas com têxteis, e mais recentemente outras membranas, como as de tecido PTFE, que começam a aparecer como opção interessante em determinadas situações.

Nesse capítulo analisaremos algumas obras com uso de membranas arquitetônicas têxteis em sua estrutura, como o material foi incorporado na concepção geral e algumas das técnicas e tecnologias utilizadas caso a caso. Para tanto, foram selecionados projetos com características distintas, fazendo o uso dos mesmos materiais com técnicas e aparências bem distintas em alguns casos, visando justamente mostrar os possíveis caminhos a se seguir com esse tipo de material.

6.1 OBRAS COM MEMBRANA ARQUITETÔNICA NO MUNDO

De uma forma geral, a arquitetura têxtil tem sido cada vez mais utilizada mundo a fora, com grandes obras com esses materiais sendo construídas principalmente para eventos de grandes proporções, como os Jogos Olímpicos ou a Copa do Mundo de Futebol. Outras grandes obras com membranas também são muito frequentes em estruturas para o mundo dos esportes, sendo muito comum encontrarmos esse tipo de material sendo utilizados em arenas e estádios de esportes, autódromos, dentre outras estruturas esportivas. Em uma escala menor, também é bem comum encontrar a membrana sendo utilizada como complemento em alguma estrutura, não sendo o elemento principal do conjunto.

6.1.1 Terminal Hajj do Aeroporto Internacional Rei Abdulaziz

O terminal Hajj do Aeroporto Internacional Rei Abdulaziz, localizado em Jidá, na Arábia Saudita, foi construído para um objetivo muito específico: acomodar milhares de peregrinos que se destinam a região todos os anos. Hajj é o nome do ritual de peregrinação dos muçulmanos à Meca, cidade que fica a pouco mais de 80 quilômetros de Jidá. Esse terminal serve como abrigo para esse número muito alto de pessoas que se dirigem à cidade em uma determinada época do ano e funciona especialmente durante esse período.

Na primavera de 1977, o escritório de arquitetura Skidmore Owens & Merrill, em Nova York, foi solicitado a projetar um terminal para o aeroporto de Jeddah, na Arábia Saudita, para atender o enorme número de peregrinos que chegam de avião todos os anos durante o mês sagrado do Hajj a caminho de Meca, a apenas 72 quilômetros de distância. Com até cem jatos jumbo chegando por dia durante o Hajj, foram estimadas 24 horas para receber e processar esses peregrinos e transferi-los de aeronaves para ônibus. Para protegê-los contra o calor do deserto da Arábia Saudita, foi necessária a maior estrutura de telhado já construída; na verdade, um telhado com características ambientais especiais. (BERGER, 2005, p.95, tradução nossa)

Por se tratar de uma cidade muito quente durante o dia, em torno de 35°C, com uma alta insolação, era necessário criar um abrigo do sol e do calor para uma grande quantidade de pessoas. Uma construção convencional com paredes e teto isolados, com condicionamento interno de ar estava fora de questão, devido à grande área que deveria ser construída e os altos custos de construção para um terminal que permaneceria fechado durante 11 meses do ano. Dentro das opções de cobertura sem fechamento lateral, a membrana estrutural de fibra de vidro se mostrou uma opção viável frente as outras opções de telhas de aço ou cobertura de concreto. Sua superfície reflexiva e sua baixa massa impediriam um grande aumento da temperatura abaixo da cobertura, sendo que sua translucência eliminaria a necessidade de uso de iluminação artificial durante o dia, reduzindo os impactos do sol desértico da região, e reduzindo o calor ao mesmo encontrado à sombra de árvores. (BERGER, 2005)

O projeto do Terminal Hajj do Aeroporto Internacional Rei Abdulaziz ficou a cargo do escritório de arquitetura e engenharia SOM, tradicional empresa do ramo de construção fundada em Chicago na década de 1930, com vários escritórios ao redor do mundo. O escritório Geiger Berger Associados ficou a cargo de investigar a

possibilidade de utilizar uma estrutura têxtil para cobertura e posteriormente se encarregou de projetá-la com a base inicial de design do SOM.

Figura 47: Terminal Hajj



Fonte: CORNING, s/d.

A estrutura do terminal é composta por um conjunto de dez módulos com 21 tendas em cada módulo, sendo três linhas de tendas contendo sete unidades em cada uma delas, cada tenda possuindo uma base quadrada de com 45 metros de cada lado, o que totaliza 135m de um lado e 315m do outro em cada módulo. Isso faz com que cada um dos dez módulos possua uma área de mais de 42 mil metros quadrados de área coberta, totalizando mais de 420 mil metros quadrados se considerarmos todos os dez módulos (BERGER, 2005). Para efeito de comparação, a área ocupada pela cobertura do Terminal Hajj ocupa uma área equivalente a mais de 80 campos de futebol, uma área gigantesca se considerarmos a sazonalidade de seu uso.

A estrutura tem uma variedade incrivelmente pequena de componentes. As unidades de tenda consistem em tecido, cabos radiais, cabos de borda e cabos de cumeeira. Possuem anéis de suporte na parte superior e elementos de conexão nos cantos. Os anéis são sustentados por cabos de suspensão e estabilização que transportam as cargas para os pilares e suas sapatas. (BERGER, 2005, p.104, tradução nossa)

A cobertura possui uma composição simples apesar da aparente complexidade que a forma final apresenta. Temos várias tendas de membrana que são elevadas e

sustentadas por pilares nas laterais, enquanto o anel central, que normalmente é fixado em um mastro central que se eleva até o pico, nesse caso é sustentado por cabos de aço que se conectam nos pilares que ficam nas bordas das tendas. As laterais de cada uma das tendas são conectadas aos pilares a uma altura de 20 metros do chão, sendo essa a altura mínima do pé direito interno do espaço, enquanto a parte mais baixa do anel central da cobertura fica localizado a uma altura de 34 metros do chão, enquanto a altura máxima que os pilares chegam é de 45 metros de altura em relação ao piso em que a estrutura está localizada. (BERGER, 2005)

Figura 48: Cobertura do Terminal Hajj



Fonte: CORNING, s/d.

As unidades das tendas vêm em três variações: unidades internas, de borda e de canto. Todos possuem 32 facetas⁶, com cabos radiais localizados em bolsos de tecido ao longo das costuras. Os cabos de catenária de borda definem as bordas externas das unidades de canto e borda. Os cabos de cumeeira estão localizados ao longo de suas bordas internas. Os cantos são conectados aos pilares 20 m (65 pés) acima do solo. Na extremidade superior das unidades da tenda, os cabos de tecido e radiais terminam em um anel de aço de 4,5 metros de diâmetro [...](BERGER, 2005, p.104, tradução nossa)

Essa altura elevada das tendas ajuda a criar um amplo espaço embaixo da cobertura (figuras 49 e 50), além de permitir uma ventilação e minimizar o possível

⁶ Módulos de tecido que compõe a tenda, sendo 8 em cada uma das 4 laterais que se unem de forma circular no anel de sustentação no topo

aquecimento do ambiente pela troca de calor da cobertura, apesar do material já minimizar esse efeito em relação a alternativas consideradas para cobrir o espaço. Além disso, a translucência do material mantém o local iluminado mesmo reduzindo drasticamente os efeitos do sol, criando um ambiente muito mais confortável para a espera dos peregrinos enquanto tem seu destino definido pelas autoridades do aeroporto.

Figuras 49 e 50: Abaixo da cobertura do Terminal Hajj



Fonte: CORNING, s/d.

Os pilares que compõe a estrutura também têm configurações diferentes conforme a posição em que se encontram. Nos cantos temos um conjunto de quatro pilares que são interligados por vigas metálicas no topo e no meio da estrutura. Nas bordas das tendas, os pilares são duplos, com vigas fixando um ao outro na mesma altura que o caso anterior, no topo e no meio da estrutura. Os pilares que se encontram entre as tendas por usa vez são individuais. Essas diferentes configurações ficam possíveis de serem visualizadas mais claramente na figura 51, com o conjunto de quatro pilares mais à esquerda da foto, seguido pela dupla de pilares ao seu lado, assim como mais à frente da foto, enquanto os individuais são encontrados mais ao fundo da imagem.

Figura 51: Relação de tamanho entre o Boeing 747, maior avião de passageiros da época da construção, e a estrutura



Fonte: CORNING, s/d.

Os pilares são dispostos de maneira que não sejam necessários cabos de aço no perímetro da estrutura ligando os mesmos a alguma outra fundação. Esses pilares de aço tubular possuem um diâmetro de 3,66m em sua base, sendo que no topo reduzem para 1,83m, sendo que sua altura chega aos 45 metros nos pontos mais alto. Esses pilares são responsáveis por coletar todas as forças exercidas pelas estruturas e direcioná-las para a fundação. Esse é um trabalho mais fácil para os pilares individuais do interior, já que sua posição é balanceada pela forma uniforme que os cabos e a membrana atuam. Nas bordas e cantos por sua vez, eles precisam resistir à falta de balanceamento que a estrutura provoca, uma vez que as cargas provêm do peso e atuação somente de um dos lados, por isso que sua configuração é mais robusta nesses locais do que no interior da estrutura. (BERGER, 2005)

Esse projeto do terminal Hajj é ainda hoje a maior construção com membrana têxtil do mundo, com seus mais de 420 mil metros quadrados. É um projeto incrível tanto por suas dimensões quanto pelas soluções adotadas, que além de proporcionar uma construção rápida e leve, ainda trouxe um contexto interessante ao utilizar a tenda em uma região que tem uma estreita relação histórica com esse tipo de estrutura.

6.1.2 Millennium Dome

O Millennium Dome foi um projeto desenvolvido para abrigar uma grande exposição planejada pelo Reino Unido para comemorar a virada do milênio no ano 2000. Localizado na península de Greenwich em Londres, margeado pelo rio Tâmesa, foi projetado pelo escritório do arquiteto Richard Rogers, hoje conhecido como RSHP (Rogers Stirk Harbour + Partners), com sede no Reino Unido.

Figura 52: Millennium Dome visto do Tâmesa



Fonte: JIN, 2004.

A estrutura do Millennium Dome conta com uma rede de cabos de aço (figura 53) tracionados arranjados de forma radial, em um diâmetro de 365 metros, elevando o domo a uma altura de mais de 40 metros em seu ponto mais alto. O domo é composto por 12 mastros treliçados de aço tubular que se elevam a 100 metros de altura, de onde cabos de aço se projetam até a superfície do domo e são fixados para sustentá-lo. Seu fechamento é feito por uma membrana de fibra de vidro revestida de PTFE, que cobre o domo com mais de um quilômetro de circunferência e uma área em torno de 80.000 m².

O telhado foi originalmente projetado com poliéster revestido com policloreto de vinila (PVC). Naquele momento, esperava-se que o Domo fosse temporário e o objetivo era minimizar os custos. No entanto, em junho de 1997, foi decidido que todas as opções deveriam ser mantidas em aberto em relação ao uso a longo prazo do Domo, e uma revisão subsequente concluiu

que a fibra de vidro revestida com PTFE seria um material mais apropriado. A expectativa de vida da cobertura seria muito mais longa, e a fibra de vidro revestidas com PTFE não sofre com a retenção de sujeira e problemas de descoloração experimentados por poliéster revestido de PVC. (LIDDELL; WESTBURY, 1999, p. 174, tradução nossa)

Figura 53: Rede de cabos do Millennium Dome antes de receber a membrana de fibra de vidro revestida de PTFE



Fonte: RSHP, s/d.

A estrutura do Millennium Dome, apesar de ser um domo, não é um domo de cabos de aço como o elaborado por David Geiger para a estrutura do Estádio Olímpico de Ginástica para os Jogos Olímpicos de 1988 por exemplo. O conceito por trás do domo de cabos é descrito brevemente no terceiro capítulo desse trabalho. A estrutura do Millennium Dome é uma rede de cabos de aço, como as que foram utilizadas por Shookov no final do século XIX, e que depois mudou os paradigmas das estruturas retesadas com a Arena Raleigh na década de 1950. O seu formato de domo é proporcionado pelos cabos de aço que são fixados na parte superior da cobertura e direcionam as cargas para o topo dos mastros, diferentemente de um domo convencional em que as cargas são distribuídas através da curvatura de uma superfície rígida até o anel externo.

Os grandes mastros que se projetam acima do domo são fixados em quatro pontos em sua base (figura 55), além de outras ancoragens feitas por cabos de aço a bases de concreto na área perimetral externa (figura 54). A fixação central se dá pela própria rede de cabos a qual os mastros sustentam, sendo assim, estabilizados por cabos de aço em todas as direções.

Os cabos de aço que compõe a rede de cabos são sustentados pelos cabos de aço que liga a cobertura aos mastros, como dito anteriormente. No perímetro, os cabos se encontram em um último anel de cabos que forma o perímetro externo do domo, que posteriormente é alongado em alguns pontos e fixados a estruturas fixas que ancoram a cobertura ao chão, como visto na figura 54.

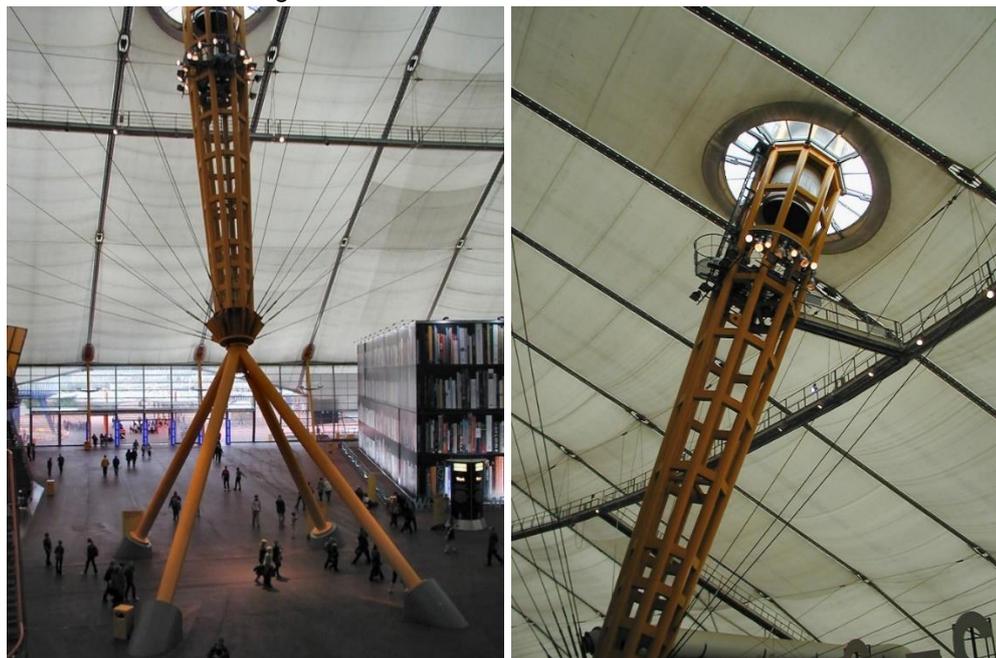
Figura 54: Ancoragem dos cabos que se ligam aos mastros



Fonte: DIXON, 2012.

Os mastros, internamente, também servem como apoio para estruturas complementares do edifício. Eles dão acesso a estruturas de manutenção e suporte técnico, com passarelas elevadas que ficam suspensas por cabos ligados a rede de cabos principal. Nos mastros também são fixados anéis que fazem a junção as membranas (figura 56), como nos casos citados anteriormente, onde o mastro sobe até o pico da estrutura cônica, apesar da diferença geométrica nesse caso do domo.

Figuras 55 e 56: Visão interna dos mastros



Fonte: DIXON, 2012.

Essa enorme estrutura proporciona um espaço interno gigantesco, com ampla capacidade de abrigar as mais diversas atividades e exposições. Sua cobertura de membrana permite a iluminação natural durante o dia, o que como já explicado anteriormente, reduz drasticamente a necessidade de iluminação artificial durante as horas do dia. Mas apesar de sua aparência monumental e sua grande área, é interessante notar que sua estrutura ocupa uma área de pouco mais de 20% da área ocupada pelo Hajj Terminal na Arábia Saudita.

Figura 57: Área interna do Millennium Dome



Fonte: PETTITT, 2000

6.1.3 Campus Luigi Einaudi da Universidade de Turim

O Campus Luigi Einaudi da Universidade de Turim é mais um exemplo das possibilidades de uso das membranas estruturas arquitetônicas. Seu projeto, desenvolvido pelo escritório britânico Foster + Partners, possui uma forma muito mais orgânica do que visto nos dois projetos anteriores. Nesse caso, a membrana é o revestimento de cobertura ideal, possibilitando formas curvas, com diferenças geométricas e um acréscimo de peso estrutural praticamente desprezível.

Figura 58: Visão geral da cobertura do Campus Luigi Einaudi



Fonte: D'OTTAVIO, M, s/d.

Quando visto em planta, o edifício de implantação triangular com uma grande praça circular ao centro parece ter uma cobertura tradicional monótona, se estendendo ao longo de edifício de maneira uniforme. Porém quando colocada em perspectiva, as diferentes alturas da cobertura, aliada a seções estratégicas na sua composição, nos passa a impressão de estarmos vendo uma estrutura muito mais orgânica do que ela realmente é. Isso é possível pela adoção de diferentes alturas nas estruturas de apoio da cobertura, aliada as curvaturas anticlásticas naturais das membranas, que nos transmitem uma sensação de movimento na cobertura. Esse efeito curvo foi utilizado com alguma similaridade na Arena das Dunas em Natal, com diferentes níveis na cobertura criando a sensação de movimento e organicidade, como

veríamos em dunas. Porém o projeto do estádio brasileiro fez uso de placas de PVC rígido e não membrana estrutural.

Figura 59: Borda da cobertura na praça central da universidade

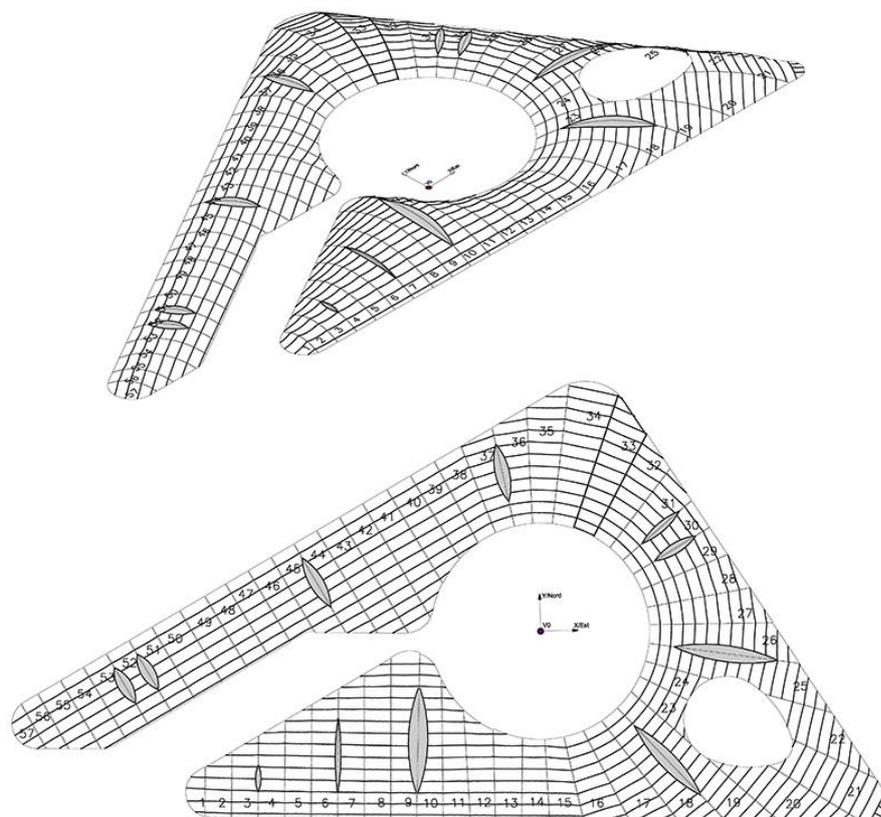


Fonte: FORSTER + PARTNERS, s/d.

A cobertura é feita de uma membrana de fibra de vidro revestida de PTFE, com uma área de mais de 16.000m². Na figura 60, é possível notar a padronagem dos cortes do tecido, que é instalado apoiado e fixado em estruturas rígidas, o que possibilita o aspecto uniforme e contínuo das bordas da cobertura (figura 59), sem as curvaturas tradicionais que são criadas em ancoragens laterais flexíveis. Essa característica dá ao edifício um aspecto futurista, com seu acabamento curvado nas extremidades e seu forro plano. Esse acabamento curvado é instalado por cima das fixações da membrana nas ancoragens de borda, criando essa continuidade visual entre a membrana da cobertura, as bordas e o forro instalado na parte inferior.

Diferentemente do que vimos no projeto do Terminal Hajj na Arábia Saudita e do Millennium Dome no Reino Unido, a cobertura nesse caso não é o material principal da construção, com sua participação mais restrita a função de telhado do terraço dos prédios da universidade. A escolha da membrana, mais uma vez, permite a passagem da luz para as áreas do terraço, criando ambientes cobertos ao ar livre, e fazendo um aproveitamento da área da cobertura do edifício, além de possibilitar essa aparência mais orgânica para o visual, sem demandar uma complexidade extremamente alta com outro tipo de material para cobertura.

Figura 60: Planta e perspectiva da cobertura e sua padronagem



Fonte: FORM TL, 2013

Outra grande diferença entre esse projeto e os outros dois anteriores é a composição estrutural. Não temos uma estrutura de cabos complexa, nem grandes colunas ou mastros que elevam e sustentam a cobertura. Nesse caso temos uma estrutura rígida e complexa de treliças metálicas tubulares, com diversos tamanhos e formatos, que tem a função de servir de base que possibilite as características curvas que vemos na cobertura. As membranas são apoiadas nessa estrutura rígida pela maior parte do tempo, e suas extremidades são fixadas também em elementos rígidos, o que faz que suas bordas não tenham a curvatura característica de quando essa fixação é feita nos cantos, deixando o perímetro da membrana “solto”. Essa solução de estrutura rígida impede que a membrana crie a forma natural que é característica em estruturas onde a membrana é protagonista, porém a solução permite fazer uso da maleabilidade do material e usar isso a favor para criar uma cobertura com formas mais orgânicas e diferenciadas.

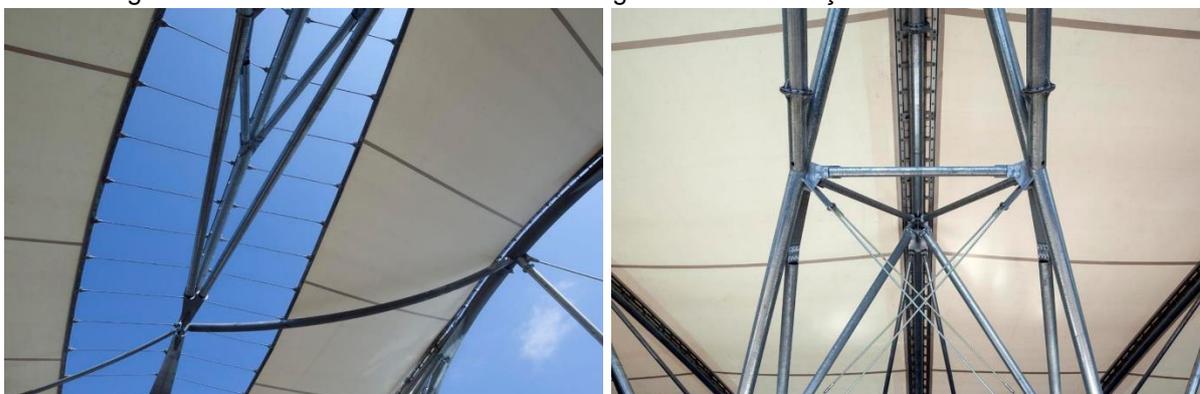
Figura 61: Área abaixo da cobertura



Fonte: FORSTER + PARTNERS, s/d.

Continuando com as diferenças estruturais encontradas nesse projeto, podemos observar na figura 61 que as treliças metálicas são todas apoiadas na construção que vem logo abaixo, sem cabos de aço conectados a ancoragens de solo como visto no Millennium Dome. Não temos também estruturas elevadas que fazem a sustentação aérea por cabos de aço, toda a membrana é apoiada na estrutura rígida das treliças, o que proporciona um visual bem diferenciado dos casos anteriores.

Figuras 62 e 63: Detalhes das estruturas rígidas e sua interação com as membranas



Fonte: VICARIO, 2013.

Nas figuras 62 e 63, podemos notar alguns detalhes estruturais adotados na cobertura da universidade, visualmente são muito mais complexos que a simplicidade

aparente das estruturas anteriores. Interessante notar, que por fazer uso de muito mais estrutura rígida que cabos e outros elementos retesados, a abordagem para concepção estrutural desse projeto pode ser feita de forma muito mais tradicional, com a membrana servindo mais como elemento de fechamento do que como elemento estrutural, apesar do seu uso retesado e das suas características estruturais serem aproveitadas no projeto.

6.1.4 Outros projetos

Os três projetos que vimos nesse capítulo nos mostram a versatilidade de aplicação de membranas estruturais na construção civil, mas temos outros exemplos bem notáveis. Um deles é o Burj Al Arab em Dubai nos Emirados Árabes Unidos. Sua fachada conta com uma grande área de membrana que não é muito perceptível dentro do contexto do edifício, mas que tem uma função muito importante para o funcionamento do projeto. A grande obra de quase 300 metros de altura em formato de vela, erguida em uma ilha artificial na costa da cidade, possui uma planta base em formato de “V”, que não é percebida ao olhar para sua fachada (figura 64).

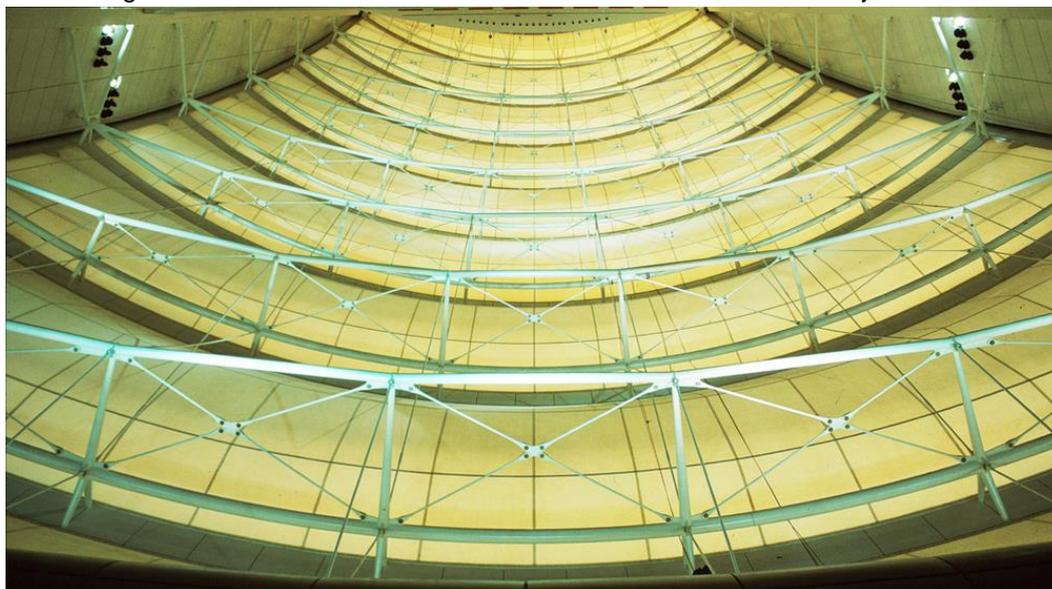
Figura 64: Burj Al Arab



Fonte: WKK, s/d.

A membrana na fachada, ligada aos dois cantos desse “V” cria um grande átrio na entrada do prédio (figura 65). Essa membrana tem dupla função: primeiramente ela serve para deixar a fachada do edifício com menos resistência ao vento, uma vez que a cava do formato da planta a aumentaria consideravelmente. O segundo motivo é a manutenção térmica e de insolação nessa “fachada” que fica escondida por essa superfície, regulando a passagem de luz, mas sem impedi-la completamente, devido a translucência da membrana de fibra de vidro revestida de PTFE, além de diminuir o aquecimento de uma insolação direta na estrutura do prédio. Essa membrana é fixada na própria estrutura rígida do edifício, além de uma estrutura treliçada de aço tubular que garante essa característica ondulada na fachada.

Figura 65: Membrana da fachada vista de dentro do átrio do Burj Al Arab



Fonte: WKK, s/d.

A Arena de Basquete dos Jogos Olímpicos de Londres 2012 (figura 66) tem uma aparência de edifício definitivo, mas foi pensado desde a sua concepção para ser uma estrutura temporária e totalmente desmontável após seu uso. Sua estrutura é feita de uma estrutura de aço tubular, o que a deixa muito mais leve que uma estrutura tradicional de estádios e arenas, que faz muito uso de concreto. Sua fachada e cobertura é revestida com uma membrana de PVC reciclada, que é fixada nessa estrutura rígida de aço, com apoios que permitem esse “movimento” em sua forma, adicionando curvas e dando uma aparência orgânica em uma estrutura que é basicamente um cubo.

Figura 66: Arena de Basquete dos Jogos Olímpicos de Londres



Fonte: SUMNER, 2012.

Esse projeto possui uma peculiaridade que é o fato da cobertura, que apesar de ser translúcida, não teve essa característica aproveitada. Enquanto na fachada a translucência da membrana permitiu que fosse feito um jogo de luzes que faziam o estádio “acender”, algo parecido com o que vimos anteriormente no Allianz Arena em Munique, sua cobertura teve adicionado um forro do tipo blecaute, ou seja, que impede completamente a passagem da luz para o interior do edifício.

O Estádio Internacional Rei Fahd (figura 67) é mais uma das grandes obras de membrana estrutural no mundo árabe, ficando localizado em Riad, capital da Arábia Saudita. Esse é um caso que sua forma remete mais claramente a influência das tendas nômades em sua concepção. Dotado de um conjunto de 24 tendas disposta de forma radial no estádio, cada uma delas possui um grande mastro que se eleva em seu centro, fazendo sua fixação no topo por um anel de fixação. Enquanto suas laterais unem uma tenda a outra, suas pontas do lado externo do edifício são ancoradas no chão, enquanto o arco criado por essa ancoragem é fixado em outro poste que mantém a estrutura retesada, criando um vinco bem definido, como uma cumeeira. Do lado interno a membrana é fixada em um grande anel circular de estrutura metálica treliçada que cobre toda a arquibancada, deixando somente a área esportiva exposta.

Figura 67: Fachada do Estádio Internacional Rei Fahd em Riad



Fonte: JRA, s/d.

O estádio de Riad é um exemplo de uso onde a membrana tem uma função estrutural mais determinantes, com ela cobrindo grandes áreas sem apoio de estruturas rígidas ou uma rede de cabos de aço, fazendo dela o elemento principal da composição. Nesses casos, vemos muito mais uso de cabos de aço para fazer as ancoragens e a estabilização da estrutura, diferente do que vemos em estruturas rígidas como o Burj Al Arab e a Arena de Basquete de Londres.

A Cobertura da Quadra Central Wimbledon (figura 68) é um caso interessante de ser mencionado por dois fatores: primeiramente ela é uma cobertura reversível, que pode ser aberta ou fechada em questão de minutos; o segundo motivo é que o material empregado é uma membrana têxtil feita somente de PTFE, tanto nos fios quanto no revestimento da membrana.

A cobertura retrátil foi uma solução exigida pela necessidade de dar continuidade aos torneios de tênis mesmo com o tempo não favorável à prática do esporte. Essa quadra é onde acontecem os jogos mais importantes do torneio icônico, inclusive abriga as finais, que já tiveram jogos adiados devido ao mal tempo. A escolha do material se deu por conta das características únicas frente aos outros tipos de membrana. Ela possui uma alta resistência como as membranas de fibra de vidro, mas com uma maior maleabilidade como as membranas de PVC, o que é mais

adequado em uma cobertura que se movimenta e não pode sofrer danos em sua estrutura no processo. O outro motivo é que as membranas de PTFE são mais translúcidas que as membranas de poliéster revestidas de PVC e as membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE. Enquanto as membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE permitem a passagem em torno de 40% da luz, as membranas compostas apenas de PTFE permitem a passagem de até 60%, criando um ambiente mais favorável para as partidas, já que elas acontecem durante o dia.

Figura 68: Cobertura da Quadra Central de Wimbledon



Fonte: SCHMID, s/d.

6.2 OBRAS COM MEMBRANA ARQUITETÔNICA NO BRASIL

No Brasil, vimos um aumento do uso de membrana arquitetônica em estruturas permanentes principalmente durante os anos que precederam a Copa do Mundo de Futebol em 2014 e os Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro em 2016. Como exemplo disso, dos 12 estádios utilizados durante a Copa do Mundo no país, 5 deles fizeram uso de membranas estruturais arquitetônicas como as apresentadas nesse trabalho, como Beira-Rio, Maracanã, Arena Amazônia, Mané Garrincha, Fonte Nova, sendo que pelo menos outros dois utilizaram algum outro tipo de solução de membrana têxtil não estrutural, seja para impermeabilização da cobertura ou outro tipo de fechamento de fachada.

Tradicionalmente o Brasil não é uma referência no uso de membranas arquitetônicas para grandes obras. É muito mais comum encontrarmos esse tipo de solução sendo utilizada em estruturas temporárias, como feiras e eventos, e o uso de outros tipos de materiais têxteis em soluções temporárias não retesadas. Mesmo com as grandes obras dos estádios e arenas de futebol durante a Copa do Mundo, o uso da membrana não foi elemento de destaque das estruturas, como no estádio de Riad na Arábia Saudita, servindo normalmente como estrutura complementar, principalmente em coberturas.

Apesar disso, temos algumas obras que se destacam com uso mais pronunciado dessa solução arquitetônica, além de outros projetos de menor escala que são encontrados pelo país, mesmo que alguns deles tenham alguns problemas de concepção ou execução.

No Brasil, a solução arquitetônica já é utilizada, mas, na maior parte dos casos, de forma tímida e, às vezes, com algumas falhas de projeto, execução e/ou manutenção, ocasionando maus exemplos. Os próprios engenheiros, arquitetos e projetistas que aqui trabalham apontaram como sendo as principais desvantagens desse tipo de cobertura a falta de normas técnicas e legislação específica e também a falta de conhecimento. (ASSIS, 2012, p. 119-120)

Apesar do cenário desfavorável e as limitações técnicas e de conhecimento, temos visto um aumento do uso dessa solução ao longo dos anos, mas ainda sem o impacto em comparação com o grande uso que é visto em outros locais do mundo. Como forma de ilustrar os caminhos que estão sendo tomados em relação ao uso de membranas arquitetônicas estruturais no país, listaremos mais detalhadamente três obras com o uso dessa solução no projeto, e ao final do capítulo, algumas outras obras relevantes, como visto anteriormente com as obras internacionais.

6.2.1 Arena da Amazônia

Dentre os projetos de estádios e arenas de futebol em território brasileiro, a Arena da Amazônia (figura 69) é provavelmente um dos projetos que conseguem aproveitar da melhor forma as características da membrana, não só em sua cobertura como na maioria dos casos, mas também em sua fachada. O padrão escolhido para a fachada, com suas linhas bem definidas e com os fechamentos com membrana têxtil, cria um elemento único em meio a cidade amazônica de Manaus.

Figura 69: Arena da Amazônia em Manaus



Fonte: BREDET, 2014.

A membrana utilizada nesse projeto é a de fibra de vidro revestida de PTFE. A escolha da membrana se deu pelas suas diversas características que já foram citadas várias vezes no decorrer desse trabalho: translucência, leveza e propriedades térmicas. A cidade de Manaus está localizada muito próxima à linha do equador, fazendo com que ela seja uma cidade muito quente, além de muito úmida, dada as características da região em que se encontra. O fato de a membrana possuir características que ajudam a isolar termicamente o edifício, com baixa condutividade térmica, capacidade de reflexão dos raios solares e baixa massa, fizeram dela uma opção muito interessante para o projeto da arena.

Além disso, o fato de a membrana ser translúcida, permite que seja utilizada menos iluminação artificial durante o dia, além de fazer com que o estádio se “acenda” durante a noite, devido a iluminação artificial interna. Pesa a favor do uso da membrana a seu baixíssimo peso, o que acaba por adicionar uma carga mínima na estrutura, o que é muito desejável quando se trata de uma cobertura com grandes dimensões e que não permite apoios em sua área central, apenas em seu perímetro.

Figura 70: Campo e arquibancadas da Arena da Amazônia



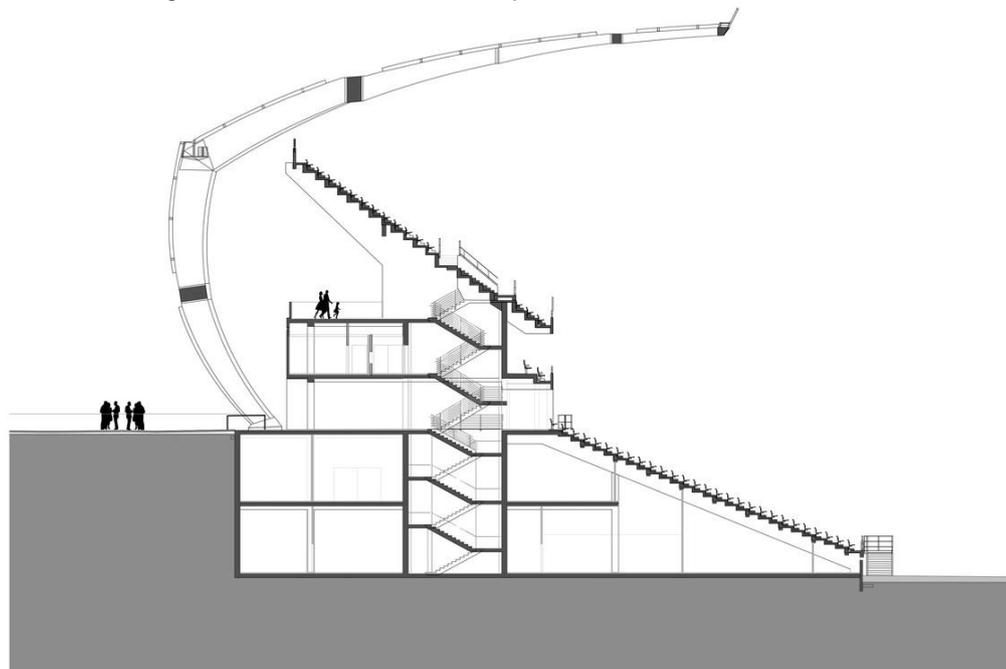
Fonte: BREDT, 2014.

A estrutura base do estádio não é muito diferente do visto tradicionalmente em outras obras do mesmo tipo, com grande uso de concreto armado na base que compõe o edifício e suas arquibancadas. Cobrindo toda essa estrutura básica, temos uma grande casca com uma estrutura metálica, como é possível observar na figura 70, que serve de moldura para as membranas que são aplicadas em aberturas que formam os padrões de losango por toda a fachada e cobertura. Esse tipo de abordagem com a membrana é muito parecido com o que vimos anteriormente na Universidade de Turim e na arena de basquete das Olimpíadas de Londres, com a diferença que não temos variações de altura nas estruturas que causam um aspecto mais orgânico na forma final. Nesse caso, temos uma estrutura mais sóbria onde as formas geométricas e sua padronagem que dão o efeito desejado na fachada, com a membrana proporcionando um acabamento mais “liso” e sem ondulações.

É interessante que o mesmo tipo de utilização, com a membrana fixada em grandes quadros, servindo apenas de fechamento, possibilite a criação de obras tão distintas como as vistas até agora. Isso nos mostra cada vez mais a versatilidade do material e as possibilidades que ele traz na concepção da forma arquitetônica do edifício, e em casos como o da Arena da Amazônia, não existe uma característica tão complexa e distinta para utilização desse material que não estaria presente na escolha

de outro revestimento. Sendo assim, é possível afirmar que nem todas as estruturas que fazem uso de membrana estrutural arquitetônica, tem necessariamente uma complexidade estrutural que limite seu uso frente a outros materiais.

Figura 71: Corte da área de arquibancada da Arena da Amazônia



Fonte: GMP ARCHITECTS, s/d.

Por se tratar de um projeto em que a membrana se encontra fixada em todos os cantos em uma estrutura rígida fixa, não vemos o uso de cabos de aço como em estruturas como o do Terminal Rajj ou o Estádio de Riad. A abordagem nesse caso, como dito anteriormente, é mais próxima do que foi visto na Universidade de Turin, apesar que a complexidade da cobertura da universidade exigir uma estrutura mais distinta, enquanto na Arena da Amazônia vemos uma padronagem por toda a fachada. Essa padronagem facilita a fabricação do material têxtil, uma vez que o padrão da fachada permite a confecção de várias peças do mesmo tamanho, com uma produção menos variada.

6.2.2 Teatro de Arena Elis Regina

O Teatro de Arena Elis Regina está localizado na cidade de Americana no interior do estado de São Paulo. Esse é um projeto em que tem algumas das características clássicas de estruturas que fazem uso de materiais têxteis, com

grandes planos de tecido esticados por uma estrutura e fixado em vários pontos por mastros e cabos de aço.

Figura 72: Teatro de Arena Elis Regina



Fonte: PREFEITURA DE AMERICANA, s/d.

O teatro permaneceu por muitos anos sem uma cobertura, até por isso foi batizado como teatro de arena, por não ser um teatro fechado, tendo uma característica mais próxima de um anfiteatro. A sua cobertura atual é composta por uma grande treliça de aço tubular que vai de um lado ao outro da construção, criando uma espinha dorsal, ou uma crista (figura 72), que funciona como uma cumeeira e base estrutural para o restante da cobertura. Essa cumeeira tem uma função parecida com os mastros centrais que vemos em estruturas cônicas, mas ao invés da membrana ser fixada em um anel no topo desse mastro, nesse caso ela é fixada na treliça. Essa escolha cria uma forma bem definida e bem diferente do visto usualmente nesse tipo de estrutura.

A cobertura tem aquela curvatura anticlástica clássica de estruturas de membrana estrutural, fixada nos pontos mais altos na treliça principal, o entorno da membrana é fixado em postes articulados. Por toda a treliça, seu topo é coberto também por membrana, com um aspecto ondulado que lembra mesmo uma coluna vertebral, o que é interessante, devido a sua importância estrutural para composição do edifício. Fora a aparente treliça no interior do teatro, temos a membrana cobrindo toda a área interna sem a necessidade de uma estrutura complementar que a sustente.

Figura 73: Fachada do Teatro de Arena Elis Regina



Fonte: PREFEITURA DE AMERICANA, s/d.

No perímetro da cobertura, podemos ver poster articulados onde a membrana é fixada em pontas. Entre essas fixações é criada a curva característica que é obtida quando as laterais da membrana são estruturadas por cabos de aço e não são fixadas em elementos rígidos. Os postes ao longo do perímetro são ancorados ao chão por cabos de aço, enquanto no sentido oposto são fixados na grande treliça central da cobertura, fazendo um contrabalanço nos dois sentidos, enquanto o equilíbrio lateral é proporcionado pela própria membrana.

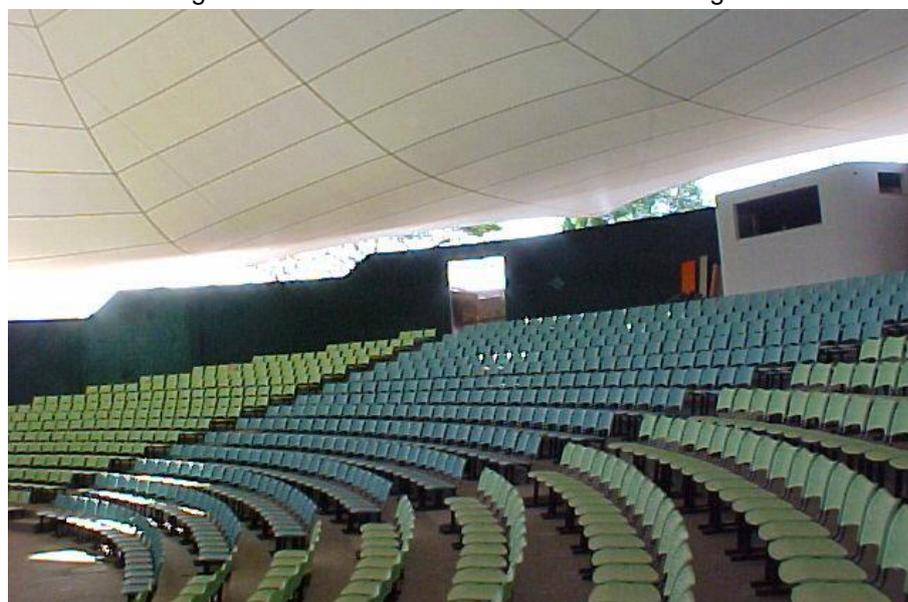
Figura 74: Outro ângulo do Teatro de Arena Elis Regina



Fonte: PREFEITURA DE AMERICANA, s/d.

Sobre a membrana que cobre o teatro não foram encontradas informações sobre a sua composição, mas é bem possível que seja feita de poliéster revestida de PVC, pois sua aparência já mostra alguns sinais do tempo de instalação, com uma coloração amarelada e meio suja, que é menos vista em membranas revestidas de PTFE. As características da membrana mais uma vez permitem que o ambiente interno seja iluminado durante o dia sem a necessidade de iluminação artificial, com uma grande redução da insolação no ambiente, uma das principais funções de uma tenda.

Figura 75: Plateia do Teatro de Arena Elis Regina



Fonte: PREFEITURA DE AMERICANA, s/d.

6.2.3 Cobertura do Estádio do Maracanã

O Estádio do Maracanã é um caso interessante e tem algumas características particulares para podermos analisar as possibilidades de uso de membrana em projetos de arquitetura e construção civil.

A fachada do Maracanã é tombada pelo IPHAN⁷, o que impede qualquer tipo de intervenção no local que descaracterize sua forma e aparência original. Esse é sempre um desafio para os arquitetos que precisam fazer uma mudança radical em um edifício sem a liberdade de alterar qualquer coisa que ache necessário para

⁷ Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

adequar o projeto as necessidades. Esse era o caso do Estádio Jornalista Mário Filho, o Maracanã, que foi construído para a Copa do Mundo de Futebol de 1950 e precisava se adequar aos rígidos padrões da FIFA para abrigar jogos da copa de 2014 e a grande final do mundial.

Com essas restrições impostas por ser um patrimônio, e as rígidas exigências impostas para abrigar os jogos, a solução foi alterar a estrutura interna do estádio e fazer as mudanças necessárias sem que houvesse um impacto na fachada do edifício. Sendo assim, uma das necessidades foi criar uma cobertura para as arquibancadas, e a solução escolhida foi o uso de membranas estruturais.

Figura 76: Vista aérea do Estádio do Maracanã



Fonte: RAMALHO, s/d.

A estrutura que compõe a cobertura é um misto de soluções rígidas e flexíveis, composta por estruturas tubulares de aço e cabos de aço. Nas imagens 77 e 78 é possível ver que existe um anel central que une toda a cobertura e um anel um pouco mais ao meio da cobertura, com dimensões bem maiores, que compõe uma treliça mista de estrutura rígida e cabos de aço. Essa é uma solução bem mais complexa do que vista em outros estádios e arenas de futebol, mas trouxe a leveza estrutural necessária que foi buscada para o projeto.

Figura 77: Visão da área interna do Estádio do Maracanã



Fonte: FERNANDES ARQUITETOS ASSOCIADOS, s/d.

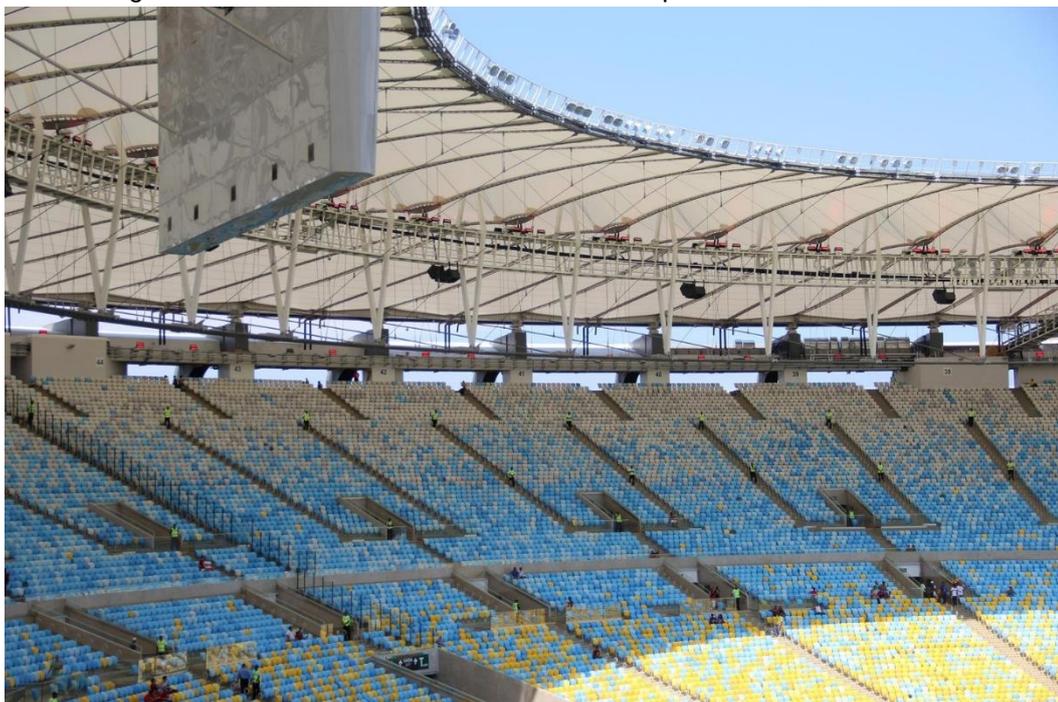
A membrana escolhida para a cobertura foi novamente a fibra de vidro revestida de PTFE, uma solução que como vimos anteriormente é a mais utilizada em obras definitivas. As características e as vantagens para o projeto são as mesmas vista até aqui: translucência, que permite a passagem da luz diminuindo a luz artificial, diminuição da incidência do sol, propriedades térmicas que são desejáveis em uma cidade quente como o Rio de Janeiro e um peso muito baixo que impacta positivamente na composição estrutural.

Sua aparência externa cria vincos ao longo da cobertura (figura 76), como se fosse várias cumeeiras, com um ponto de junção e mudança de sentido na cobertura, justamente onde está essa treliça que fica mais ao meio de cobertura. É importante mencionar que apesar das grandes dimensões dessa cobertura, ela não é visível do plano da rua, conseqüentemente ela não muda as características da fachada tombada.

Esse projeto é um belo exemplo de como as estruturas com membrana podem ser extremamente complexas, mesmo com um sistema misto entre estrutura rígida e flexível. Enquanto no projeto da Arena da Amazônia a membrana servia basicamente como fechamento para a fachada e cobertura, no caso do Maracanã ela tem uma função estrutural muito mais bem definida, com uma importância crucial para o conjunto da cobertura. Isso nos mostra que a escolha do material não

necessariamente é garantia de complexidade ou simplicidade no projeto, sendo que diversos fatores, como a forma que se escolhe usar o material e as escolhas projetuais, afetam diretamente no nível de dificuldade de concepção e posteriormente na execução.

Figura 78: Visão interna da cobertura e das arquibancadas do Maracanã



Fonte: FERNANDES ARQUITETOS ASSOCIADOS, s/d.

6.2.4 Outros Projetos

A quantidade de obras que fazem uso de membranas têxteis tem crescido consideravelmente no Brasil nas últimas décadas. Ainda com um uso discreto frente a outras soluções arquitetônicas, elas têm tido usos cada vez mais diversos, como elementos complementares em algumas obras, sendo que em outras ela é o elemento principal da estrutura. Algumas dessas obras serão listadas a seguir, para analisarmos brevemente seu uso e termos uma ideia mais clara de como esse material tem sido empregado na arquitetura brasileira.

O primeiro exemplo de uso de membrana é o Centro Comunitário Athos Bulcão, localizado na Universidade de Brasília. O centro é uma estrutura de vales e cumes, com quatro mastros dispostos de maneira retangular ao centro, sendo q outros dois mastros menores são dispostos na lateral, sendo um de cada lado. O conceito segue

a ideia base de uma estrutura com picos cônicos apresentados anteriormente, onde os mastros se erguem até o topo da estrutura, onde um anel de fixação é conectado a membrana. Nos “vales” as membranas se conectam umas às outras, formando a parte mais baixa da cobertura.

Figura 79: Fachada do Centro Comunitário Athos Bulcão em Brasília



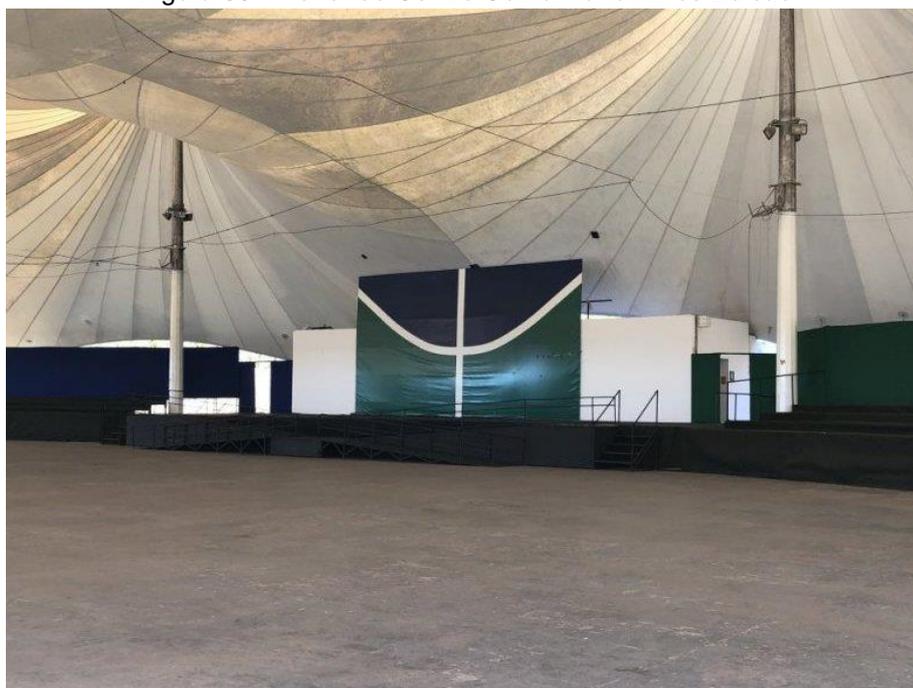
Fonte: PRADO, 2018.

As membranas são ancoradas ao chão através de postes articulados que se fixam na membrana através de conexões próprias. Esses postes articulados são estabilizados por cabos de aço que são fixados em pontos no solo. No topo dos mastros que se erguem para formar os cones da estrutura, também vemos cabos de aço que conectam um mastro ao outro, além de cabos de estabilização ancorados ao solo.

A cobertura forma um grande espaço interno que serve para vários tipos de atividades na universidade, criando um espaço coberto que não perde toda a iluminação natural devido a translucência da membrana. A leveza da membrana contrasta com uma grande marquise de concreto armado na entrada do local, assim como outros elementos característicos da influência da arquitetura modernista brasileira.

O centro comunitário tem uma arquitetura única com sua cobertura que se destaca em meio aos outros prédios da universidade, porém nem tudo vai bem com a estrutura. Nas fotos do próprio site da prefeitura da Universidade de Brasília (figura 80), é possível notar que a cobertura tem um certo desgaste do tempo, assim como uma aparência encardida, provavelmente proveniente da escolha inadequada do material, que deveria possuir um *topping* que adicionasse uma característica autolimpante para membrana, o que ajudaria a preservar suas características por mais tempo. Essa sujeira que deteriora a membrana, além de diminuir muito o aspecto visual da cobertura, que fica mais opaca, com aspecto sujo, diminui a capacidade de passar a luz externa para dentro do ambiente interno, já que diminui consideravelmente sua translucência.

Figura 80: Interior do Centro Comunitário Athos Bulcão



Fonte: PREFEITURA DA UNB, s/d.

A Biblioteca de São Paulo, localizada no Parque da Juventude na cidade de São Paulo, onde antigamente funcionava a Casa da Detenção do Carandiru, possui uma estrutura de membrana estrutural em um espaço complementar a área da biblioteca. Em uma de suas laterais, o ambiente externo é coberto por essa membrana, que se aproveita, mais uma vez, da translucência do material para criar uma área externa cobertura que ainda possui iluminação natural.

A cobertura é fixada na lateral do edifício da biblioteca, com uma fixação rígida que faz com que a membrana fique completamente alinhada nesse ponto, enquanto do lado oposto ela é fixada através de cabos de aço em postes articulados em seus pontos mais altos e por cabos de aço diretamente a ancoragens de solo em pontos intercalando aos postes. Os postes, por sua vez, são ancorados por cabos de aço tanto ao solo como as laterais do prédio da biblioteca. Essa configuração faz com que a membrana lembre muito uma vela de barco visto lateralmente, com uma aparência em seu perímetro externo muito parecido com o que vimos anteriormente no estádio de Riad, com a diferença que na parte interna temos uma linha reta ao invés da continuidade do vinco que vemos no estádio.

Figura 81: Cobertura de membrana na Biblioteca de São Paulo



Fonte: Acervo do Autor, 2013.

A membrana da Biblioteca de São Paulo, diferentemente da anterior do Centro Comunitário, não parece ter sofrido com a sujeira e a poluição da cidade, pelo menos até a data da visita em que a foto foi tirada. Porém desde os primeiros registros fotográficos da estrutura, é possível notar rugas na membrana, o que pode ter sido causado por diversos fatores, como falha na padronagem do tecido, perda ou insuficiência de retesamento, falha na concepção estrutural e/ou posicionamento dos elementos que compõe a estrutura. Com tantas possibilidades diferentes, é impossível

afirmar com certeza os motivos sem uma análise minuciosa da estrutura e seus componentes.

A Feira da Cidade localizada em Ananindeua no estado do Pará (figura 82), é uma das maiores obras no Brasil feitas com membrana arquitetônica. Sua área passa dos 3.000 m², com uma estrutura que mescla vários sistemas individuais para compor uma cobertura complexa e com vários volumes. O terreno triangular é ocupado por várias estruturas hexagonais, compostas de em três formatos diferentes: uma forma cônica, uma forma de guarda-chuvas ou guarda-sol, e a que aparece com mais frequência, é referido pelos arquitetos como “cálice”, que seria um cone invertido, com o anel de fixação da membrana na parte inferior da sustentação, em uma área mais baixa que as laterais da membrana.

Figura 82: Visão aérea da Feira da Cidade de Ananindeua



Fonte: CARDOSO, s/d.

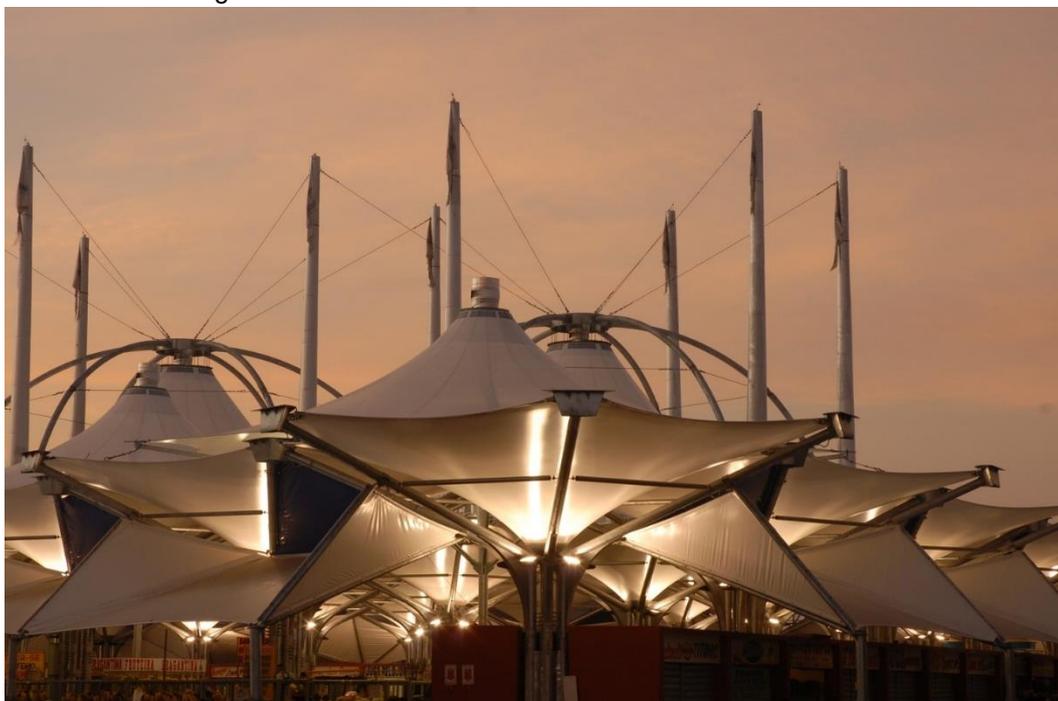
Esse “cálice” é o elemento que aparece com mais frequência no projeto, com um total de 42 unidades, enquanto o “guarda-chuvas” aparecem por um total de 4 vezes; o maior elemento da composição, os elementos cônicos, surgem em uma área mais centralizada por duas vezes. Além dos elementos que criam essa composição, temos ainda uma outra faixa de cobertura em uma das laterais que ocupa um nível abaixo dos “cálices”, que é possível ver na fachada da figura 83.

A composição estrutural faz uso de algumas soluções muito inteligentes. Primeiramente o módulo que mais aparece no conjunto, o cálice, é um sistema

autoportante, ou seja, ele se mantém independente do restante do conjunto. Ao usar o sistema hexagonal, os responsáveis pelo projeto se aproveitam de uma das padronizações mais perfeitas da natureza, como uma colmeia de abelhas, que pode se adicionar ou retirar módulos indefinidamente conforme for necessário. Essa característica permite executar duas soluções no projeto: interligar as membranas nos perímetros que os módulos de cálice se encontram, fazendo uma junção como uma só cobertura, e retirar quatro elementos de cálice dessa composição, justamente onde encontramos as estruturas de guarda-chuva.

Essas estruturas de guarda-chuva se parecem mesmo com um guarda-chuva, com um poste central que se eleva acima do nível das estruturas de cálice, com um anel de fixação para membrana em seu topo, criando um cone com uma elevação não tão pronunciada em relação a sua lateral. Além disso, existem alguns complementos estruturais na parte inferior da cobertura que formam aros como um guarda-chuvas antes de ser aberto completamente. Os cantos dessa cobertura, que também possui seis lados, são fixados nas estruturas de cálice que a rodeiam por cabos de aço.

Figura 83: Vista lateral da Feira da Cidade de Ananindeua



Fonte: CARDOSO, s/d.

A tenda mais alta e cônica do conjunto, que também possui a maior área, é fixada de maneira diferente ao conjunto. Dez postes se elevam do centro dos cálices

que circundam a área onde ela é implantada, criando as fixações para essa cobertura somente acima das outras coberturas, uma vez que o ponto de fixação dos postes ao solo é compartilhado como sistema do cálice. Nesses postes elevados, temos seis estruturas em arco que se dirigem ao anel de topo do cone da membrana, além de cabos de aço que ligam esse anel de fixação ao topo dos postes (figura 83).

A última cobertura, que fixa abaixo do nível dos cálices em uma área mais ao perímetro do terreno, é fixada na parte inferior das estruturas de cálice mais próxima, e posteriormente seus cantos são conectados a vários postes espalhados pelo perímetro.

Estruturalmente falando, a obra é composta por vários elementos de aço tubular, nos postes, arcos e outros elementos rígidos, com cabos de aço fazendo algumas fixações complementares, principalmente nas tendas maiores e guarda-chuvas. A maioria dos cantos das membranas são reforçados por cabos de aço, garantindo o aspecto curvo em sua lateral nos postos onde ela não faz junção com outro elemento da estrutura ou da própria membrana. O material usado para a cobertura é uma membrana de poliéster revestido de PVC, que mais uma vez faz proveito do fato de ser translúcida para economizar com iluminação artificial no ambiente abaixo da cobertura.

Assim como na obra da Biblioteca de São Paulo, é possível notar algumas rugas em alguns pontos da estrutura, principalmente na cobertura que fica no nível mais baixo, e assim como no caso anterior, são diversos os motivos que podem ter causado esse aspecto, que não é o ideal, tanto no aspecto estético quanto estrutural para a obra.

O Anfiteatro da Igreja Batista Central de Fortaleza (figura 84), capital do estado do Ceará, é uma obra com a membrana protagonizando da melhor forma a sua capacidade de retesamento e composição estrutural. Ela é uma estrutura simples com dois mastros que formam um duplo conoide, com dois picos e um vale pouco acentuado entre eles. A lateral da membrana é fixada em sete pontos distintos, sendo dois em cada lado, enquanto um dos lados com um maior perímetro tem apenas uma fixação central, criando uma assimetria na estrutura e conseqüentemente uma maior complexidade visual.

Figura 84: Anfiteatro da Igreja Batista Central de Fortaleza



Fonte: METALICA, s/d.

Os mastros são compostos de uma estrutura treliçada de aço tubular, que se ligam ao topo da estrutura em um anel de fixação, criando a forma do cone. Seus cantos são fixados em ancoragens rígidas com postes duplos em ângulo, formando algo como um “V” invertido. O restante das fixações e ancoragens são complementadas por cabos de aço, que se projetam do topo dos mastros e das ancoragens de borda, garantindo a estabilidade da tenda. A membrana é de poliéster revestido de PVC, mas pelas descrições encontradas sobre o projeto, foram tomadas precauções de escolher uma membrana com cobertura (*topping*) de PVDF e Dióxido de Titânio, que aumentam muito a resistência aos raios UV da membrana, além de garantir uma melhor característica autolimpante para a cobertura, o que possibilita que ela tenha uma maior vida útil sem deterioração como visto em casos anteriores.

Esse é um ótimo exemplo para visualizarmos a capacidade estrutural da membrana. Apesar de ser uma estrutura simples, com apenas dois mastros centrais, além dos pontos de fixação do perímetro, ela consegue cobrir uma área de quase 3.000 m² sem nenhum outro tipo de sustentação para a cobertura além da própria membrana. Suas dimensões são de aproximadamente 70 metros por 50 metros, o que provavelmente faz dela ainda hoje a maior estrutura de membrana com bordas flexíveis no Brasil.

O Ginásio Paulo Skaf (figura 85) é a casa do time do SESI Vôlei Bauru, uma obra inaugurada há menos de 2 anos na cidade de Bauru, no interior do estado de São Paulo. A estrutura de membrana é complementar a estrutura do ginásio, que tem sua base estrutural feita de concreto nas arquibancadas, enquanto a cobertura é composta por uma estrutura metálica em arcos em diferentes alturas. As coberturas de membrana estão localizadas nos dois extremos do ginásio e tem a mesma forma e composição estrutural em ambos os lados.

A estrutura conta com uma membrana fixada na lateral da cobertura do ginásio em seu ponto mais alto, seguindo o formato curvo da estrutura. Na sua extremidade ela é fixada em oito postes articulados dispostos de maneira equidistantes, que posteriormente são ancorados ao solo por dois cabos de aço por poste. No topo, o poste também é ancorado com cabo de aço na estrutura metálica da cobertura principal do ginásio.

Figura 85: Ginásio Paulo Skaf na cidade de Bauru/SP



Fonte: Acervo do Autor, 2023.

No momento da visita ao ginásio, ele se encontrava em obras, com algumas atividades sendo feitas no seu entorno, com instalação de piso intertravado em alguns pontos, e algumas obras de acessibilidade, além de algumas outras adequações. Essas obras, e a conseqüente sujeira proveniente das atividades, principalmente poeira, podem ter dado o aspecto opaco e sujo encontrado nas membranas no

momento da visita, apesar do relato de alguns funcionários que a manutenção da cobertura tem sido difícil, mesmo que a membrana tenha sido declarada autolimpante. Porém não foi possível determinar com certeza se se trata de uma patologia na construção ou somente uma situação temporária.

Foi notado, porém, que a membrana em seu canto, entre os postes mais externos e a junção na estrutura da cobertura, apresenta rugas como as vistas nos casos da Biblioteca de São Paulo e a Feira da Cidade de Ananindeua. Como nos casos anteriores, é difícil fazer um diagnóstico preciso quanto ao motivo das rugas estarem presentes na membrana, mas ela aparenta ter sido dimensionada de maneira inadequada nesses pontos, uma vez que a membrana se apresenta retesada em toda sua extensão, somente apresentando essa deficiência nos quatro cantos citados. É importante notar que essa é uma análise prévia e com pouquíssima informação disponível e tempo utilizado para analisar a patologia, não sendo de forma alguma um diagnóstico final e preciso sobre as circunstâncias que levaram a esse defeito.

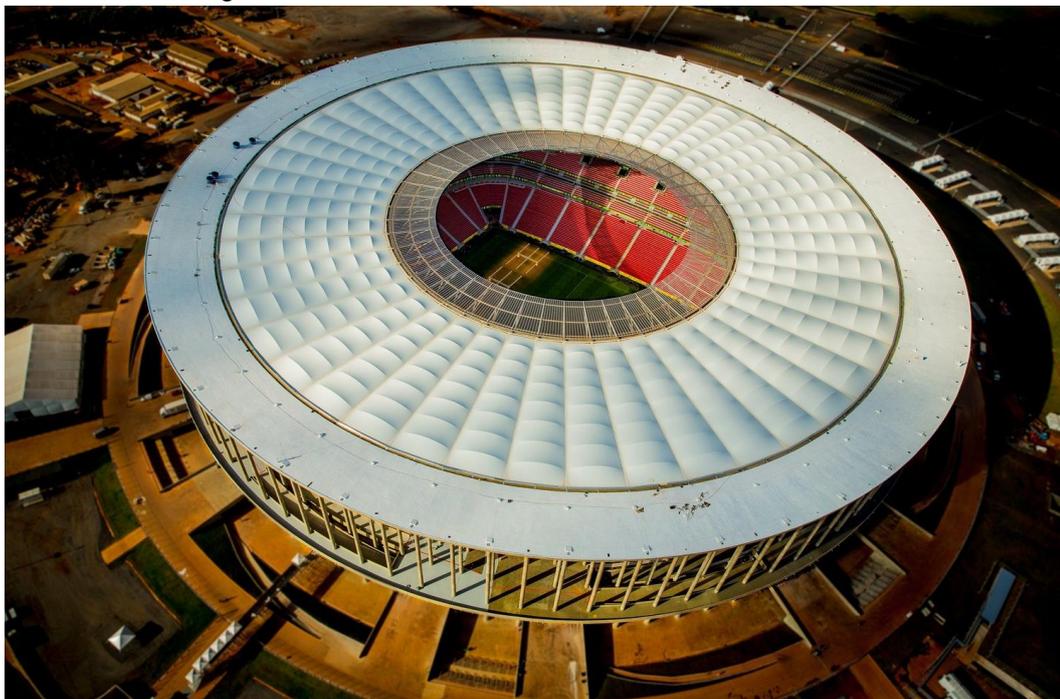
O Estádio Nacional de Brasília, conhecido como Mané Garrincha, é mais um dos estádios e arenas construídos ou reformados para a Copa do Mundo de Futebol de 2014 realizada no Brasil, que fez uso de membrana arquitetônica em sua estrutura. O caso desse estádio é muito parecido com o do Maracanã, onde a fachada foi preservada, com intervenções na área interna do estádio, com mudanças no campo e arquibancadas, e uma cobertura de membrana complementando a estrutura existente do estádio.

O projeto original contemplava uma cobertura parcial da arquibancada nos setores mais altos dos anéis mais externos, com um anel de compressão sustentado pelos diversos pilares espalhados pela fachada do estádio. A solução dos arquitetos foi a instalação de uma membrana de fibra de vidro revestida de PTFE para complementar essa cobertura e assim poder atender as normas exigidas para o estádio poder abrigar os jogos da competição.

A cobertura tem uma estrutura mista de concreto armado, estrutura metálica e cabos de aço, com uma marcação ondulada na cobertura, proveniente dos apoios onde a membrana é posicionada. Na área interna do estádio, existe um forro na parte inferior das treliças de sustentação da cobertura, que limitam a visão direta da

estrutura da cobertura e deixam o visual mais limpo, mas sem impedir a passagem da luz do sol proporcionada pela translucidez da membrana. Esse forro também ajuda na manutenção térmica do estádio, com um obstáculo a mais para as trocas térmicas provenientes da cobertura.

Figura 86: Estádio Nacional de Brasília “Mané Garrincha”



Fonte: VIANA, s/d.

Esse estádio é mais um exemplo de uso de membrana para a cobertura de grandes espaços, optando pela solução devido principalmente a sua leveza que adiciona pouca carga a estrutura de sustentação da cobertura, o que permitiu a cobertura praticamente total do estádio sem a necessidade de intervenções maiores e mais complexas na estrutura já existente no local.

Para finalizar a passagem de obras com membrana estrutural no Brasil, iremos falar brevemente do Estádio Beira-Rio em Porto Alegre, no Rio Grande do Sul. Mais um dos estádios reformados para a copa, o Beira-Rio sofreu intervenções em seu campo, arquibancadas e interior, assim como os outros estádios reformados, além de receber uma nova cobertura, com um elemento que reformulou completamente a fachada do estádio, com uma “casca” criada no entorno do estádio existente.

Figura 87: Estádio Beira-Rio em Porto Alegre no Rio Grande do Sul



Fonte: DONADUSSI; HEUSI, s/d.

Essa nova fachada é composta por estruturas metálicas que se iniciam no perímetro do estádio, fazendo um arco por cima da estrutura das arquibancadas, onde se unem em um anel mais ao centro do estádio para formar a cobertura. Essa estrutura é composta por treliças metálicas tubulares posicionadas em “V”, com uma posterior união com travessas horizontais que dão unidade ao elemento. Essas treliças ocorrem por todo o entorno do estádio, criando um padrão de “cristas” em sua cobertura, o que causa uma impressão de movimento em sua forma.

Mais uma vez a membrana é a responsável pelo fechamento dessa estrutura, fixada nos quadros formados por essas treliças, e permitindo mais uma vez, a passagem de luz para o interior do estádio mesmo com uma grande área coberta. A membrana utilizada no Beira-rio é de fibra de vidro revestida de PTFE, com um detalhe interessante: foi utilizado duas variantes da membrana nessa obra, uma mais opaca e aparência mais branca, enquanto a outra, que ocupa faixas menores na cobertura, é mais translúcida e permite ainda mais a passagem da luz para o interior.

Existem ainda muitas outras obras com membrana espalhadas pelo país. Assis (2012) citou mais de 50 obras por todo o Brasil em seu trabalho, e algumas das obras relacionadas nesse trabalho são posteriores ao escrito por ela. Essas obras, principalmente relacionadas aos estádios e arena de futebol no país, começaram a colocar a membrana como solução em grandes obras, mas ainda ela é mais utilizada

para fechamentos das grandes estruturas do que a grande protagonista estrutural como no caso visto do Anfiteatro da Igreja Batista em Fortaleza.

6.3 AEROPORTO INTERNACIONAL DE DENVER

Existem diversas obras pelo mundo feitas com membranas estruturais, como muitos dos exemplos apresentados até aqui, mas uma das mais icônicas é o Aeroporto Internacional de Denver no estado do Colorado no Estados Unidos. Sua grande cobertura têxtil com várias tendas de diferentes tamanhos, torna sua estética única no mundo, sendo um dos melhores exemplos de obras fabricadas com membranas têxteis.

O projeto retorna ao uso sensato da forma de estrutura retesada mais básica: a tenda. Duas fileiras de mastros descem ao longo do grande saguão do terminal, sustentando uma longa progressão de unidades de telhado para cobrir os 275 metros de comprimento do espaço e fornecem saliências protetoras para as amplas paredes de vidro que o cercam. Cabos do topo se projetam dos mastros alternando com cabos de vale curvados para cima. Estes cabos são tudo o que é necessário para lidar com as cargas de neve e vento da membrana de tecido e transmiti-las aos topos dos mastros e às ancoragens do telhado. Nenhuma estrutura de telhado poderia ser mais simples, mais leve, mais direta em sua forma intencional. (BERGER, 2005, p. 171, tradução nossa)

Essa descrição de Horst Berger sobre a estrutura da cobertura do aeroporto de Denver diz muito sobre a simplicidade de composição das estruturas de tenda. São necessários apenas alguns conjuntos de mastros e postes, cabos de aço e a própria membrana para que seja possível lidar com uma cobertura de grandes proporções que cobrem uma grande área, contando com uma leveza inigualável por outros métodos construtivos.

A forma da cobertura, com seus muitos picos proporcionados pelas tendas, foi proposta pelo arquiteto norte americano Curtis W. Fentress para representar as Montanhas Rochosas, uma cordilheira que atravessa grande parte dos Estados Unidos até o Canadá, sendo um dos símbolos do estado do Colorado, onde a cidade de Denver é a capital e o local onde foi construído o aeroporto, que começou a funcionar em 1995.

Curt Fentress estava procurando maneiras de relacionar a forma do edifício com as montanhas que dominam a paisagem de Denver. Ele havia

investigado vários materiais e sistemas estruturais sem resultados satisfatórios. As formas de tenda pareciam oferecer uma resposta natural. Do carrossel cheio de slides que apresentei, foi a cobertura do Estádio de Riad, com seus enormes picos e dobras profundas, que mais o atraiu. E um slide de um tipi⁸ dos índios das planícies chamou sua atenção. Estas eram as imagens que ele estava procurando. (BERGER, 2005, p. 172, tradução nossa)

Figura 88: Aeroporto Internacional de Denver durante a noite

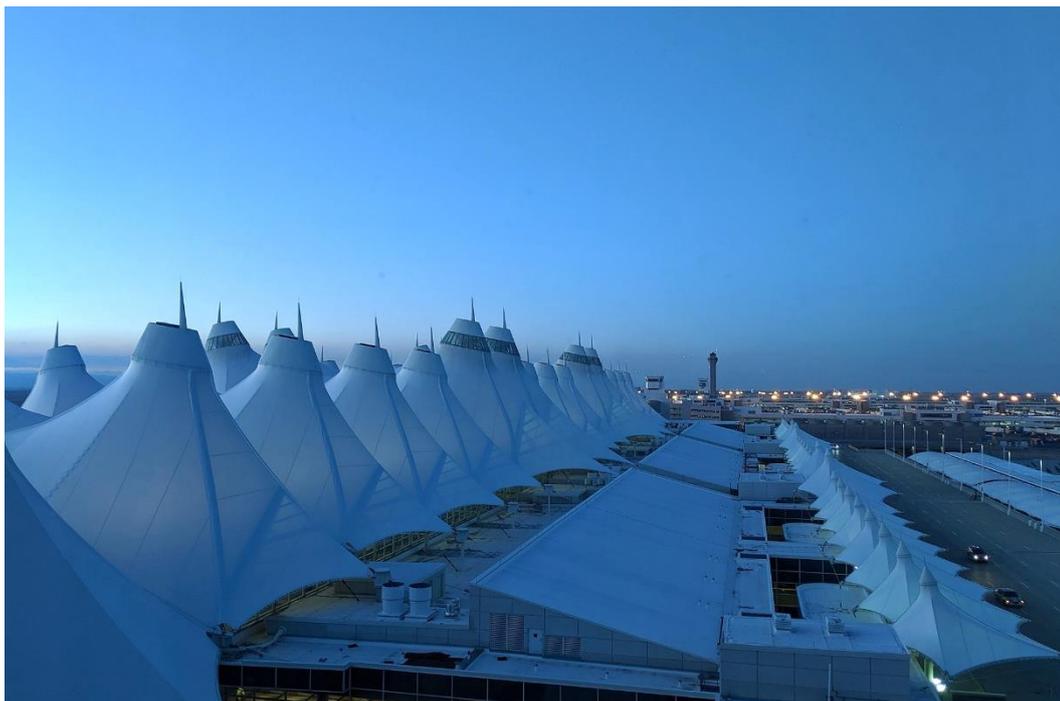


Fonte: ZACCARIA, 2017.

A cobertura principal é composta por duas fileiras de 17 tendas em cada uma delas, totalizando 34 tendas, sendo que cada fileira conta com três tipologias diferentes de tendas: uma um pouco menor que fica nas extremidades das fileiras; uma de tamanho médio que são a grande maioria da cobertura, com um total de 11 para cada uma das fileiras; a última tipologia são as tendas mais altas, que são um total de quatro por fileira, localizadas um pouco mais ao centro da cobertura em conjunto de duas, separadas por três tendas de tamanho médio em cada fileira. Além da cobertura principal, temos uma outra cobertura auxiliar formada por tendas de cobertura têxtil, localizadas nas laterais do edifício (possível visualizar a direita na figura 59), com duas tipologias distintas e dimensão bem inferior a cobertura principal central. Em ambas as coberturas, a membrana adotada para as estruturas foi a fibra de vidro revestida de PTFE.

Figura 89: Cobertura do Aeroporto Internacional de Denver

⁸ Tenda cônica típica de algumas civilizações norte-americanas, mencionada no capítulo 4.2.1 Tendas cônicas do norte da Eurásia e norte da América



Fonte: WIKIMEDIA COMMONS, 2019.

A estrutura menor é formada por conoides assimétricos distribuídos por toda a fachada lateral, com um mastro metálico tubular e uma estrutura que se projeta horizontalmente em direção à rua, formando uma cruz irregular. Os mastros estão posicionados mais perto da estrutura da fachada, e a projeção em direção à rua por essa outra estrutura, cria o aspecto irregular da cobertura. A tipologia menor se faz presente em uma sequência de mesmo tamanho e distância, até ser interrompida por duas das tendas maiores, que estão posicionadas alinhadas as tendas maiores da cobertura principal. Essas tendas maiores têm estrutura similar as menores, mas a maior distância entre elas do que a distância entre as tendas menores deixa os cones ainda mais assimétricos nesse ponto da cobertura. No topo dos mastros das coberturas, a membrana é fixada por anéis metálicos, com as membranas se unindo lateralmente por toda a extensão da estrutura, enquanto a distribuição e fixação da estrutura ao solo é feita pelo mastro principal de cada uma dessas tendas, além de um elemento de junção entre as tendas, que é ancorado ao solo quase que verticalmente por cabos.

Figura 90: Interior do terminal de passageiros do Aeroporto Internacional de Denver



Fonte: WIKIMEDIA COMMONS, 2005.

A cobertura principal do terminal de passageiros é composta por várias tendas que são unidas lateralmente. As estruturas conoides das tendas são compostas por um mastro central de aço tubular que se eleva até o topo da estrutura, com anéis rígidos treliçados para a fixação da membrana, que se abre em direção ao chão, até encontrar outra membrana a qual será unida, enquanto dos lados onde não tem outra tenda, é ancorada por cabos de aço nas correspondentes estruturas, sejam elas mastros articulados, sejam elas ancoragens junto as outras estruturas do aeroporto.

No caso dessa cobertura principal, temos uma característica interessante de ser destacada: enquanto no topo temos vários picos representando as Montanhas Rochosas, no interior do terminal não é possível ver essa elevação toda em direção aos cumes da cobertura. Isso se deve ao fato de existir um segundo conjunto de membrana abaixo da cobertura principal, que funciona como forro para área interna do terminal, o que garante um melhor isolamento acústico e térmico para o edifício.

Embora a membrana da cobertura tenha uma área total de superfície de 35.000 m², não são necessárias juntas de dilatação. Isso se deve à natureza flexível do sistema de estrutura de tecido dobrado, que absorve facilmente deformações de variação térmica com alteração insignificante de tensão em seus componentes estruturais. Dentro das paredes perimetrais, a cobertura consiste em duas camadas de tecido formadas pela membrana externa descrita acima, e um forro interno localizado aproximadamente sessenta centímetros abaixo da membrana externa. A função do forro interno é proporcionar isolamento térmico e absorção acústica. Ele é sustentado por

um sistema próprio de cabos de cumeeiras e vales; no perímetro, está ligado às estruturas superiores do sistema de caixilharia da parede de vidro. (BERGER, 2005, p. 179, tradução nossa)

Apesar de existir essa dupla camada de membrana, ainda existe uma grande porção de luz que é transmitida para dentro do terminal, como é possível ver nas figuras 90, 91 e 92, além de acender o aeroporto para a noite da cidade de Denver, como é possível ver na figura 88. Essa característica, como mencionada muitas outras vezes durante essa dissertação, diminui consideravelmente o uso de iluminação artificial dentro do edifício durante as horas de sol, o que diminui consideravelmente a demanda energética do local. A quantidade de iluminação proveniente da cobertura, aliada aos grandes painéis de vidro nos fechamentos laterais do terminal, possibilita inclusive a criação de alguns tipos de vegetação no local⁹.

Figuras 91 e 92: Detalhes internos da cobertura



Fonte: HARTMANN, 2005 e FLICKR, 2008.

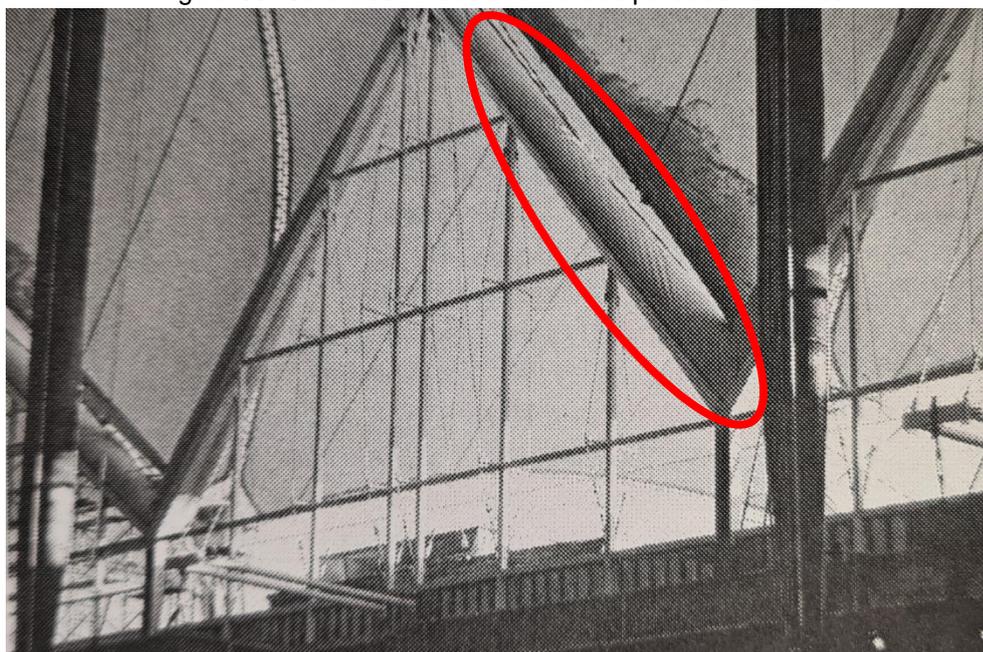
A junção dos elementos extremamente flexíveis da cobertura, com os grandes painéis de vidro rígidos encontrados na lateral do terminal, teve a necessidade de soluções criativas para lidar com o comportamento muito distinto dos materiais envolvidos. Enquanto a cobertura de membrana possibilita grandes deformações devido à sua grande flexibilidade, principalmente com altas cargas de vento e neve,

⁹ Essas vegetações internas podem ser vistas nas figuras 90, 91 e 92.

ambos presentes com frequência no local, as grandes paredes de vidro têm uma capacidade muito baixa de lidar com essa flexão, o que se tornou um problema para a união dos elementos nas fachadas.

A própria cobertura de tecido sofre grandes deformações sob condições de carga de vento e neve. Isso é típico para uma estrutura de membrana retesada que absorve cargas por mudança de forma tanto quanto por aumento de tensão. Para cobrir a lacuna entre as paredes rígidas e o telhado de membrana flexível, tivemos que desenvolver painéis de fechamento que pudessem acomodar os movimentos do telhado sem causar tensões inaceitáveis no tecido ou nas paredes e ainda possuir resistência suficiente para resistir às cargas de vento. A resposta final para este difícil problema de engenharia foi introduzir cilindros inflados de tecido de até 90 centímetros de diâmetro sobre os clerestórios¹⁰ e até 150 centímetros de diâmetro sobre as paredes norte e sul. Interligá-los por meio de seções de mangueiras de plástico, dotá-los de válvulas acionadas por mola e manter sua inflação por meio de pressão de pequenas bombas, deu-lhes a flexibilidade necessária. Como eles estão posicionados logo acima da superfície interna do forro, por dentro eles não são visíveis, enquanto do lado de fora eles ficam bem embaixo das bordas salientes da cobertura. (BERGER, 2005, p. 179, tradução nossa)

Figura 93: Colchões inflados acima das paredes de vidros



Fonte: Adaptado de BERGER, 2005.

¹⁰ Parte superior da basílica, iluminada pelas janelas que se abrem na nave maior. (KOCH, 2009) O nome é proveniente de uma área da parte superior da parede das naves das igrejas ogivais, ficando logo acima dos trifórios (corredor abaixo das citadas janelas, num nível mais alto que as naves laterais) muito comum na arquitetura gótica medieval. Atualmente o nome é normalmente utilizado para se referir a parte superior de uma parede, onde são instaladas janelas mais próximas ao teto ou forro do ambiente.

Essa solução de cilindros de colchões de membrana inflados (figura 93) é muito interessante do aspecto estrutural da edificação, com uma combinação de soluções retesadas bem distintas uma da outra. Esses colchões tem uma característica muito parecida com as utilizadas em colchões de ETFE, como no Allianz Arena em Munique, com a diferença que no caso do estádio alemão a solução funciona como fechamento e possui um grande apelo estético para a fachada, enquanto a solução do aeroporto de Denver tem caráter estrutural além de fechamento, funcionando como um “amortecedor” entre as diferentes estruturas, e se encontra quase que completamente escondida da visão, com um apelo estético praticamente inexistente para o conjunto.

Figura 94: Conexão de canto da cobertura do aeroporto



Fonte: FLICKR, 2006.

De uma forma geral, todas as estruturas parecem estar em harmonia no conjunto. As junções onde são ligados as membranas e os cabos de aço, como na figura 94, são de um contraste estético interessante, com uma grande peça metálica que parece flutuar em meio aos elementos que são visualmente mais leves que ele, como os próprios cabos que ele conecta e as membranas. As membranas por sua vez são claramente extremamente reforçadas, com um duplo reforço em suas bordas, como é possível ver na mesma imagem, e uma união mecânica entre a membrana das tendas bem mais parruda do que as soluções abordadas anteriormente.

Figura 95: Detalhe da cobertura em um dos seus extremos



Fonte: GOBETZ, 2011.

A grande cobertura de tecido se destaca tanto em relação ao restante do aeroporto, que ela virou referência quando tratamos de construções com membrana têxtil, e apesar de ser uma das maiores construções com o material no mundo, com seus 35.000 m² de área, ela é uma porção mínima do Aeroporto de Denver, que é maior aeroporto em área ocupada dos Estados Unidos, incluindo pistas, terminais, hangares e outras estruturas, com uma área de aproximadamente 136 km² ¹¹. Mas mesmo considerando somente o terminal de passageiros que a grande tenda cobre, é uma proporção relativamente pequena, como pode ser visto na figura 95.

Essa obra é uma grande representação das possibilidades de uso de membrana têxtil na arquitetura e construção civil, alcançando os objetivos de se tornar um marco para a cidade, representando a paisagem icônica das Montanhas Rochosas, fazendo um grande uso de uma estrutura leve e visualmente muito agradável, que ainda trouxe muitos benefícios em relação ao conforto térmico e acústico para o terminal em que é utilizada, sem contar as economias energéticas que a translucidez que a membrana têxtil proporciona. Esse tipo de construção pode trazer desafios, como os da relação das estruturas incompatíveis das grandes paredes de vidro e a membrana, mas que quando contornados de maneira criativa e com

¹¹ 136.000.000 m²

segurança, podem fazer da membrana arquitetônica têxtil uma opção de material muito viável para a construção civil.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tendas e os materiais têxteis têm acompanhado a humanidade por milhares de anos, fazendo parte de praticamente todas as civilizações conhecidas em maior ou menor intensidade. Ao longo dos séculos, essas estruturas foram praticamente as mesmas, com seu uso muito parecido mesmo em civilizações muito distantes, com algumas exceções mais complexas, como as tendas negras árabes, elas se limitavam a cobrir uma estrutura rígida com forma predeterminada. Algumas soluções mais ousadas e de maior dimensão foram experimentadas durante o império Romano, mas muito pouco evoluiu até o século XIX.

Com as novas experimentações no leste europeu, com as obras retesadas de Schnirch e posteriormente Shookov, foi dado o pontapé para novas experimentações para esse tipo de estrutura. Com uma evolução lenta até a década de 1940, quando foram criadas as primeiras estruturas arquitetônicas pneumáticas, as estruturas retesadas deram um grande salto de experimentação nas décadas seguintes, com o grande ponto de virada sendo a Arena Raleigh na Carolina do Norte, um grande divisor de águas para esse tipo de construção.

A partir desse ponto, os estudos de Frei Otto na Alemanha, junto a grande experimentação de materiais e técnicas construtivas nos Estados Unidos, as estruturas retesadas, principalmente as estruturas retesadas com material têxtil, experimentaram uma evolução como nunca vista antes na história. Grandes obras foram feitas, cada vez maiores e mais ousadas, com grande experimentação em novas técnicas e materiais, que possibilitaram o surgimento dos principais materiais que são usados hoje na indústria da construção civil, quando tratamos de membranas têxteis retesadas: as membranas de poliéster revestidas de PVC e as membranas de fibra de vidro revestidas de PTFE.

O uso cada vez mais difundido dessas membranas e sua popularização ao redor do mundo, possibilitou que fossem feitas grandes obras que são ícones de construção com membrana têxtil, como o Terminal Hajj do Aeroporto de Jidá na Arábia Saudita e o Aeroporto Internacional de Denver nos Estados Unidos. Essa popularização ao redor do mundo possibilitou a criação de obras com esses materiais também no Brasil, que apesar de um uso discreto durante muito tempo, teve um

avanço na quantidade de obras com esses materiais, principalmente nas estruturas definitivas, durante a Copa do Mundo de Futebol de 2014, onde as membranas fizeram parte de muitos coberturas e fachadas de estádios e arenas de futebol que abrigam os jogos para o evento esportivo.

Apesar de um maior número de obras usando esse tipo material, ainda é possível notar algumas falhas construtivas com membranas no Brasil, como as apresentadas nas obras vistas nesse trabalho. Algumas rugas, falhas na escolha do material adequado, algumas deficiências construtivas, são defeitos que podem ter sido causadas tanto pela falta de conhecimento técnico na elaboração do projeto ou na execução da construção. A inexistência de normas técnicas nacionais, baixa popularidade e pouca mão de obra qualificada podem ser alguns dos motivos que explicam essas falhas mesmo em obras grandes, como a Biblioteca de São Paulo no Parque da Juventude.

As membranas possuem qualidades que podem ser uma alternativa extremamente viável para construção civil, principalmente quando tratamos de construções de médio e grande porte. Sua capacidade de cobrir grandes vãos com um baixo peso estrutural, sua maleabilidade que possibilita formas mais orgânicas, suas propriedades térmicas e acústicas, e talvez um dos seus maiores trunfos, a translucidez, fazem da membrana uma possibilidade de material mais sustentável e muitas vezes mais econômico, se o projeto for adequadamente desenvolvido e o material for empregado de forma correta.

Mas para que essas condições sejam adquiridas, se faz necessário um estudo aprofundado nas técnicas de construção, que utilizam peças móveis, junções específicas para cada projeto, cabos de aço, elementos têxteis e técnicas que não são muito usuais em um país que tem o modernismo e seu concreto armado de forma muito enraizada nos estudos e na aplicação de forma geral na construção civil. Para que esse conhecimento seja possível, e a mão de obra se torne mais qualificada, desde a concepção do projeto até a execução de uma obra de membrana arquitetônica têxtil, se faz necessária um maior conhecimento e uma normatização nacional que possibilite o avanço de construções com esses materiais no país. Isso seria possível por exemplo se as universidades se dedicassem a apresentar aos alunos técnicas construtivas alternativas que fogem ao usual nacional, como o caso

das membranas arquitetônicas, de forma a ampliar o repertório de técnicas e materiais para a concepção de projetos. Porém esse seria só um primeiro passo para introduzir aos profissionais as técnicas em questão.

As membranas têxteis por sua vez, se mostraram ao longo das análises dos projetos, um material muito versátil e com características bem desejáveis para a construção civil. Seu baixo peso se torna um material com alta possibilidade de economizar em estruturas que fazem a sua sustentação, principalmente quando inserida em um sistema que possua estruturas complementares de aço ou concreto, em que ela possa ser fixada ou ancorada, sem a necessidade de uma estrutura específica para isso. Porém, vimos casos também em que a membrana usada em sua forma mais pura, como um grande tecido atado a postes e cabos de aço, como o Anfiteatro da Igreja Batista de Fortaleza, pode cumprir sua função com uma forma e beleza que só é possível em obras com membrana têxtil.

As membranas têxteis também podem servir como material de fechamento, como no caso da Universidade de Turim e da Arena da Amazônia, onde temos um quadro onde ela é afixada. Pode ser aplicada também sobre uma rede de cabos de aço, como no Millennium Dome em Londres, ou servir de cobertura para tendas, como no caso dos dois aeroportos apresentados aqui, ou no Estádio de Riad, ou como elemento para diminuir a incidência solar como no Burj Al Arab. As possibilidades são muitas, e suas características permitem uma grande versatilidade de uso.

A característica mais notável da membrana talvez seja sua translucidez. A capacidade de trazer a luz do ambiente externo para o ambiente interno, diminuindo sua radiação, talvez faça desse material uma das opções mais sustentáveis para as grandes obras. A iluminação natural normalmente é um dos grandes objetivos buscados por arquitetos e projetistas durante a elaboração de um projeto, muitas vezes alcançada por vidros. O vidro, porém, tem o inconveniente de não diminuir a radiação solar e ainda ser responsável por um efeito estufa no ambiente, algo que pode ser sanado com películas ou o advento de múltiplas lâminas de vidro. A membrana, por sua vez, consegue ser aplicada em uma grande área sem muitos dos problemas causados pelas características do vidro, ficando atrás do vidro em características, talvez, somente na capacidade do vidro de ser completamente transparente. Outro material que tem se mostrado muito viável em diversas situações

para a substituição do vidro na construção é o ETFE, que além de possuir muitas das características das membranas têxteis, ainda é transparente, porém com um custo elevado e uma complexidade muito maior na cadeia de produção e execução que o vidro. O que talvez diminua um pouco o apelo sustentável das membranas é a sua vida útil, que ainda não atinja níveis como das construções mais tradicionais, sendo necessária à sua substituição de tempos em tempos, principalmente no caso das membranas de poliéster revestida de PVC.

As membranas arquitetônicas têxteis são um material muito versátil com grandes possibilidades de uso, que podem possuir uma alta complexidade dependendo da maneira que é aplicada, mas também pode funcionar de maneira muito similar aos sistemas construtivos mais convencionais. Talvez o que ainda falte para alavancar seu uso no país seja uma maior difusão do conhecimento do material, além de mais estudos que possam embasar normas que auxiliem os profissionais no momento da concepção e aplicação do material.

Referências

- AGKATHIDIS, A.; BERDOS, Y.; BROWN, A. Active membranes: 3D printing of elastic fibre patterns on pre-stretched textiles. **International Journal of Architectural Computing**, v. 17, p. 74–87, 2019.
- ANSELL, M; HILL, C; ALLGOOD, C. Architectural PTFE-Coated Glass Fabrics - Their Structure and Limitations. **Textile Reseach Jornal**. v.53. 1983.
- ASADI, H. et al. Water influence on the uniaxial tensile behavior of polytetrafluoroethylene-coated glass fiber fabric. **Materials**, v. 14, n. 4, p. 1–22, 2021.
- ASHADUJJAMAN, M. et al. Enhancing the mechanical properties of natural jute yarn suitable for structural applications. **Materials Research Express**, v. 8, 1 maio 2021
- ASSIS, R. G. **Um estudo sobre arquitetura têxtil no Brasil: o segmento de mercado das estruturas tensionadas feitas com membranas de poliéster/PVC**. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.
- ATELIER FREI OTTO WARMBRONN, **Pavilhão de dança da Feira Federal de Horticultura em Colônia**. 1957. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/763706/12-coisas-que-voce-nao-sabia-sobre-frei-otto-vencedor-do-premio-pritzker-2015?ad_medium=gallery>. Acesso em: 27 mar. 2023.
- AVENTURAS NA HISTÓRIA. **Tanque falso inflável utilizado durante a 2ª Guerra Mundial**. 1944. Disponível em: <<https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/reportagem/esquadrao-fantasma-aliados-enganaram-hitler-com-uma-producao-digna-de-hollywood.phtml>>. Acesso em: 26 abr. 2023.
- BAHAMÓN, A. **Arquitetura Efémera Textil**. 1. ed. Lisboa: Dinalivro, 2004.
- BERGER, H. Form and function of tensile structures for permanent buildings. **Engineering Structures**. v.21. p.669-679. 1999.
- BERGER, H. **Light Structures, Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture**. 2. ed. Bloomington: AuthorHouse, 2005.
- BIDWELL, J. **Tendas militares em treinamento dos fuzileiros navais dos EUA**. 2007. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:US_Navy_070206-N-3589B-007_Overview_of_tent_city,_set_up_by_Charlie_Company_of_Amphibious_Construction_Battalion_One_\(ACB-1\)_during_the_Humanitarian_Support_over_the_Shore_\(HSOTS\)_2007.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:US_Navy_070206-N-3589B-007_Overview_of_tent_city,_set_up_by_Charlie_Company_of_Amphibious_Construction_Battalion_One_(ACB-1)_during_the_Humanitarian_Support_over_the_Shore_(HSOTS)_2007.jpg)>. Acesso em: 25 abr. 2023.

BIRDAIR. **Membrana de fibra de vidro revestida de PTFE**. s/d.a. Disponível em: <<https://www.birdair.com/membrane/ptfe-fiberglass/>>. Acesso em: 31 de ago. 2023.

BIRDAIR. **Membrana de poliéster revestida de PVC**. s/d. Disponível em: <<https://www.birdair.com/membrane/pvc/>>. Acesso em: 31 de ago. 2023.

BIRDAIR. **Protótipo do radome pneumático de Walter Bird**. 1948. Disponível em: <<https://www.birdair.com/company/>>. Acesso em: 31 de ago. 2023.

BRADATSCH, J. et al. Form. Em: FORSTER, B.; MOLLAERT, M. (Eds.). **European Design Guide for Tensile Surface Structures**. 1. ed. [s.l.] TensiNet, 2004. p. 44–96.

BRADSHAW, R. Characteristics of Fabrics. Em: SHAEFFER, R. E. (Ed.). **Tensioned Fabric Structures: A Practical Introduction**. 1. ed. Reston: ASCE, 1996.

BREDT, M. **Arena da Amazônia / gmp architekten**. 2014. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/624013/arena-da-amazonia-gmp-architekten>>. Acesso em: 11 maio 2023.

CARDOSO, O. **Feira da Cidade / MEIA DOIS NOVE Arquitetura & Consultoria**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/623364/feira-da-cidade-meia-dois-nove-arquitetura-e-consultoria>>. Acesso em: 19 maio 2023.

CARRIÓ, J. La Arquitectura Textil. **Informes de la Construcción**, v. 36, n. 367, 1985.

CARRIÓ, J. **Introducción a la Arquitectura Textil - Cubiertas Colgadas**. 1. ed. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1991.

CHILTON, J; ELNOKALY, A; WILSON, R. **Environmental Aspects of Tensile Membrane Enclosed Spaces**. Nottingham: University of Nottingham. 2002.

COLISEUM. **Estádio Olímpico de Montreal no Canadá**. 2019. Disponível em: <<https://www.coliseum-online.com/quebec-commits-to-montreal-olympic-stadium-revamp/>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

COLUMBIA UNIVERSITY. **Esquema estrutural do Suncoast Dome, estádio de beisebol na Flórida**. s/d. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/TIMELN/suncoast/sun-03.jpg>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

COLUMBIA UNIVERSITY. **Estrutura do U.S. Pavilion em Osaka no Japão em 1970**. 1970. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/TIMELN/osaka/osaka.html>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CORNING, J. **AD Classics: Hajj Terminal, King Abdulaziz Airport / SOM**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/777599/ad-classics-hajj-terminal-king-abdulaziz-airport-som>>. Acesso em: 09 maio 2023.

DAMASCENA, B. **Feira de rua na Vila Romana em São Paulo**. 2023. Disponível em: <<https://imoveis.estadao.com.br/guia-de-bairros/a-importancia-das-feiras-de-rua-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

Dicionário Houaiss da língua portuguesa, 1 ed. São Paulo: Objetiva, 2009.

DICKSON, M. Frei Otto: Researcher, Inventor and Inspired Instigator of Architectural Solutions. **AA Files**, n. 50, p. 36–49, 2004.

DIVISEK, M. **Abrigos para desabrigados na Turquia/Síria**. 2020. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/mundo/turquia-desabrigados-terremotos/>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

DIXON, C. **Millennium Dome**. 2012. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/chris_j_d/albums/72157631400061566>. Acesso em: 09 maio 2023

DONADUSSI, M; HEUSI, G. **Estádio Beira-Rio em Porto Alegre no Rio Grande do Sul**. s/d. Disponível em: <https://www.galeriadaarquitetura.com.br/projeto/santini-rocha-arquitetos/_estadio-beira-rio/463>. Acesso em: 19 maio 2023.

DÖRRBECKER, M. **Allianz Arena em Munique na Alemanha**. 2007. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M%C3%BCnchen_-_Allianz-Arena_\(Luftbild\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M%C3%BCnchen_-_Allianz-Arena_(Luftbild).jpg)>. Acesso em: 10 abr. 2023.

D'OTTAVIO, M. **Visão geral da cobertura do Campus Luigi Einaudi**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-138753/campus-luigi-einaudi-slash-foster-plus-partners>>. Acesso em: 02 set. 2023.

DREW, P. **Tensile Architecture**. 1. ed. Nova Iorque: Routledge, 2019.

ENGEL, H. **Sistemas estruturais**. 1. Ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2001.

FANG, R. **The Design and Construction of Fabric Structures**. Dissertação de mestrado. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009.

FERNANDES ARQUITETOS ASSOCIADOS. **Estádio Jornalista Mário Filho – Maracanã / Fernandes Arquitetos Associados**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-156118/estadio-jornalista-mario-filho-nil-maracana-slash-fernandes-arquitetos-associados>>. Acesso em: 11 maio 2023.

FIEDLER. **Palco principal do Rock in Rio de 2001**. 2001. Disponível em: <<https://www.fiedler.eng.br/portfolio/rock-in-rio>>. Acesso: 25 abr. 2023.

FIEDLER. **Tenda auxiliar do Rock in Rio de 2001**. 2001a. Disponível em: <<https://www.fiedler.eng.br/portfolio/rock-in-rio>>. Acesso: 25 abr. 2023.

FLICKR. **Conexão de canto da cobertura do aeroporto**. 2006. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/augenfang/240438080/in/photostream/>>. Acesso em: 25 maio 2023.

FLICKR. **Detalhes internos da cobertura**. 2008. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/30203479@N00/2734554306/>>. Acesso em: 25 maio 2023.

FORM TL. **Turin University**. 2013. Disponível em: <<https://www.form-tl.de/en/project/membrandach-campus-turin-i/>>. Acesso em: 09 maio 2023

FORSTER, B.; MOLLAERT, M. Engineered fabric architecture. Em: FORSTER, B.; MOLLAERT, M. (Eds.). **European Design Guide for Tensile Surface Structures**. 1. ed. TensiNet, 2004. p. 25–42.

FORSTER + PARTNERS. **Turin University**. s/d. Disponível em: <<https://www.fosterandpartners.com/projects/turin-university>>. Acesso em: 09 maio 2023

GARRIÓ, J. La Arquitectura textil. **Informes de la Construcción**, v36, n.367. 1985. MONTICELLI, C.; ZANELLI, A. Structural membranes in architecture: An eco-efficient solution for the future? **TECHNE**, v. 16, p. 235–246, 2018.

GLAESER, L. **The work of Frei Otto**. 1. ed. Greenwich: MOMA, 1972.

GMP ARCHITECTS. **Corte da área de arquibancada da Arena da Amazônia**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/624013/arena-da-amazonia-gmp-architekten>>. Acesso em: 11 maio 2023.

GOBETZ, W. **Detalhe da cobertura em um dos seus extremos**. 2011. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/wallyg/6134786955/>>. Acesso em: 25 maio 2023.

GOLDSMITH, N. The Material Characteristics of Fabric. Em: HUNTINGTON, C. (Ed.). **Tensile Fabric Structures: Design, Analysis, and Construction**. 1. ed. Reston: American Society of Civil Engineers, 2013.

HARTMANN, N. **Detalhes internos da cobertura**. 2005. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2005_Denver_airport.jpg>. Acesso em: 25 maio 2023.

HOUTMAN, R.; WERKMAN, H. Detailing and Connections. Em: FORSTER, B.; MOLLAERT, M. (Eds.). **European Design Guide for Tensile Surface Structures**. 1. ed. TensiNet, 2004. p. 147–174.

HUNTINGTON, C. Connections. Em: **Tensile Fabric Structures: Design, Analysis and Construction**. 1. ed. Reston: American Society of Civil Engineers, 2013. p. 104–125.

ISHLER, M. Form Determination. Em: SHAEFFER, R. (Ed.). **Tensioned Fabric Structures: A Practical Introduction**. 1. ed. Reston: American Society of Civil Engineers, 1996a.

ISHLER, M. Analysis and Design. Em: SHAEFFER, R. (Ed.). **Tensioned Fabric Structures: A Practical Introduction**. 1. ed. Reston: American Society of Civil Engineers, 1996b.

JIN, J. **Millennium Dome visto do Tâmbisa**. 2004. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/jamesjin/58712717/>>. Acesso em: 09 maio 2023

JRA. **Fachada do Estádio Internacional Rei Fahd em Riad**. s/d. Disponível em: <https://www.jrarchitects.co.uk/projects_gallery_leisure03.html>. Acesso em: 16 maio 2023

KOCH, W. **Dicionário dos Estilos Arquitetônicos**. 4. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2009.

KOHARA, Y. **Centro Aquático Nacional de Pequim**. 2010. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Water_Cube_-_panoramio.jpg>. Acesso em: 10 abr. 2023.

KUUSISTO, T. K. **Textile in Architecture**. Dissertação de Mestrado. Tampere: Tampere University of Technology, 2010.

LIDDELL, I.; WESTBURY, P. Design and construction of the Millennium Dome, UK. **Structural Engineering International**, v. 9, n. 3, p. 172–175, 1999.

LIDDELL, I. Frei Otto and the development of gridshells. **Case Studies in Structural Engineering**. V.4. p.39-49. 2015.

MAJORANA, C; MAZZUCCO, G; PAULETTI, R; SALOMONI, V. Large Membrane Roof Analysis: Nonlinear Modeling of Structures, Connectors, and Experimental Evidences. **Journal of Architectural Engineering**. v.16. p.151-163. 2010.

MARK, E. **Optimizing solar insolation in transformable fabric architecture: A parametric search design process**. Automation in Construction. V. 22. mar. 2012.

MATOS, C. K. **Aplicação de Têxteis Inteligentes na Arquitetura de Interiores**. Dissertação de Mestrado—Braga: Universidade do Minho, jan. 2013.

MAZZOLA C; ALESSANDRO L. La Temponaneità dell'architettura tessile: innovazioni a confronto. **International Journal of Architecture, Art and Design**, p. 195–202, 2018.

MENDES, J. L.; FINKIELSZTEJN, B. **Estruturas Bio-Têxteis e suas aplicações em objetos de Design e Arquitetura**. Rio de Janeiro: [s.n.].

MÉRIDA, K. R.; FANGUEIRO, R. Arquitetura têxtil: liberdade de design, funcionalidade e sustentabilidade. **REDIGE**, v. 2, n. 2, 2 ago. 2012.

METALICA. **Anfiteatro da Igreja Batista Central de Fortaleza**. s/d. Disponível em: <<https://metalica.com.br/a-cobertura-da-ibc-igreja-batista-central-em-fortaleza/>>. Acesso em: 19 maio 2023.

MILOSEVIC, V.; IGIC, T.; KOSTIC, D. Tensile structures as the most advanced lightweight structures. **Facta universitatis: Architecture and Civil Engineering**, v. 11, n. 3, p. 269–284, 2013.

MIN-JOON, L. **Allianz Arena em diferentes configurações de cores**. 2016.

Disponível em:

<[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Allianz_Arena_in_red_\(Pixabay_1181668\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Allianz_Arena_in_red_(Pixabay_1181668).jpg)>. Acesso em: 18 abr. 2023.

MITTERER, C. **Allianz Arena em diferentes configurações de cores**. 2012.

Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Allianz_Arena_Illumination_Uefa_Champions_League_2011-2012_1.jpeg>. Acesso em: 18 abr. 2023.

MONTO, T. **Estádio Olímpico de Munique**. 2014. Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Munich_-_Olympic_Stadium.jpg>. Acesso em: 10 abr. 2023

MORALES-GUZMÁN, C. C. Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura. **Revista de Arquitectura**, v. 20, p. 71–87, 2018.

NUNES, E. **Investigação Qualitativa da Eficiência de um Projeto de Cobertura em Membrana Estrutural**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

NUNES, E. F. **Tensoestruturas - Elementos e cabos metálicos associados a membranas**. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, jun. 2008.

OBATA, S. H. **Condicionantes projetuais e tecnológicos: arquiteturas têxteis e tensoestruturas complexas**. Tese de Doutorado. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2010.

PAULETTI, R. M. **HISTÓRIA, ANÁLISE E PROJETO DAS ESTRUTURAS RETESADAS**. Tese de Livre-Docência. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.

PAULETTI, R. M. Anotaciones sobre el proyecto y el análisis de las estructuras tensadas. **Entre Rayas**, n. 88, p. 30–41, jan. 2011.

PETTITT, M. **Área interna do Millennium Dome**. 2000. Disponível em:

<<https://www.flickr.com/photos/mdpettitt/18154745103/>>. Acesso em: 09 maio 2023

PRADO, L. **Fachada do Centro Comunitário Athos Bulcão em Brasília**. 2018.

Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-156118/estadio-jornalista-mario-filho-nil-maracana-slash-fernandes-arquitetos-associados>>. Acesso em: 19 maio 2023.

PREFEITURA DA UNB. **Interior do Centro Comunitário Athos Bulcão**. s/d. Disponível em: <<https://prefeitura.unb.br/index.php/jardins/16-centro-comunitario-athos-bulcao/detail/159-centro-comunitario-athos-bulcao?tmpl=component>>. Acesso em: 22 maio 2023.

PREFEITURA DE AMERICANA. **Teatro de Arena "Elis Regina"**. s/d. Disponível em: <<https://www.americana.sp.gov.br/americana-index.php?a=ponto-turistico-arena>>. Acesso em: 11 maio 2023.

RAMALHO, E. **Vista aérea do Estádio do Maracanã**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/623889/arena-maracana-slash-fernandes-arquitetos-associados>>. Acesso em: 11 maio 2023.

RAUTERBERG, H. Minha paixão é pela leveza e mobilidade. Em: **Entrevistas com Arquitetos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Viana & Mosley, 2009. p. 136–141.

RSHP. **Rede de cabos do Millennium Dome antes de receber a membrana de fibra de vidro revestida de PTFE**. s/d. Disponível em: <<https://rshp.com/projects/culture-and-leisure/the-millennium-dome/>>. Acesso em: 15 maio 2023

RUNNING ARCHITECT. **Bedrich Schnirch. The first suspended steel roof**. Blog. 2016. Disponível em: <<https://runningarchitect.com/2016/02/07/bedrich-schnirch-the-first-suspended-steel-roof/>>. Acesso em: 29 abr. 2022.

SÃO JOÃO, L. C. C. F. **Estudo da Degradação de Membranas Arquitetônicas**. Dissertação de Mestrado. Braga: Universidade do Minho, 2015.

SARAMAGO, J. **Ensaio sobre a lucidez**. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2017.

SEDLÁČEK, J. **Exemplo de barraca de camping**. 2010. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Husky_Tent_near_scout_camp_near_Kouty,_T%C5%99eb%C3%AD%C4%8D_District.jpg>. Acesso em: 26 abr. 2023.

SEIDEL, M. **Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction**. 1. ed. Berlin: Ernst & Sohn, 2009.

SERVILHANO, V. **Abrigo para refugiados venezuelanos em Roraima**. 2019. Disponível em: <<https://www.msf.org.br/noticias/necessidades-humanitarias-e-medicas-de-migrantes-e-solicitantes-de-asilo-venezuelanos-em/>>. Acesso em: 09 fev. 2023.

SERVILHANO, V. **Atendimento do MSF aos refugiados venezuelanos em Roraima**. 2019a. Disponível em: <<https://www.msf.org.br/noticias/necessidades-humanitarias-e-medicas-de-migrantes-e-solicitantes-de-asilo-venezuelanos-em/>>. Acesso em: 09 fev. 2023.

SHAEFFER, R. History and Development of Fabric Structures. Em: HUNTINGTON, C. (Ed.). **Tensile Fabric Structures: Design, Analysis and Construction**. American Society of Civil Engineers, 2013.

SHAEFFER, R. E. **Tensioned Fabric Structures: A Practical Introduction**. 1. ed. Reston: American Society of Civil Engineers, 1996.

SCHMID, A. **Cobertura da Quadra Central de Wimbledon**. s/d. Disponível em: <<https://www.architonic.com/en/project/sefar-retractable-roof-on-centre-court-wimbledon/5102417>>. Acesso em: 16 maio 2023

SON, M. **The Design and Analysis of Tension Fabric Structures**. Dissertação de mestrado. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2007.

SUMNER, E. **Arena de Basquete dos Jogos Olímpicos de Londres**. 2012. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-63476/basketball-arena-de-londres-2012-wilkinson-eyre-architects>>. Acesso em: 17 maio 2023

TERRY, W.; WIEBER, R. Connections. Em: SHAEFFER, R. (Ed.). **Tensioned Fabric Structures: A Practical Introduction**. 1. ed. Reston: American Society of Civil Engineers, 1996.

TV GLOBO. **Hospital de campanha contra a Covid-19 no Pacaembu em São Paulo**. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2020/03/31/coronavirus-apos-10-dias-de-obras-hospital-de-campanha-no-pacaembu-sera-entregue-nesta-quarta-feira.ghtml>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

UCCELLI, C. Cobertura huaca Cao: Complejo Arqueológico El Brujo, Ascope, Perú. **ARQ**, 2009.

VIANA, B. **Estádio Nacional de Brasília “Mané Garrincha”**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/623873/estadio-nacional-de-brasilia-mane-garrincha-castro-mello-arquitetos>>. Acesso em: 19 maio 2023.

VICARIO, D. **Detalhes das estruturas rígidas e sua interação com as membranas**. s/d. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-138753/campus-luigi-einaudi-slash-foster-plus-partners>>. Acesso em: 09 maio 2023

WIKIMEDIA COMMONS. **Cobertura do Aeroporto Internacional de Denver**. 2019. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver_International_Airport_Main_Terminal_at_dusk_3.jpg>. Acesso em: 25 maio 2023.

WIKIMEDIA COMMONS. **Interior do terminal de passageiros do Aeroporto Internacional de Denver**. 2005. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver_International_Airport_security.jpg>. Acesso em: 25 maio 2023.

WKK. **Burj Al Arab Hotel**. s/d. Disponível em: <<https://wkkarchitects.com/aburj-al-arab-dubai-2>>. Acesso em: 16 maio 2023

YOUNG, N. **Khan Shatyr em Astana no Cazaquistão**. s/d. Disponível em: <<https://archello.com/project/khan-shatyry-entertainment-centre>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ZACCARIA, M. **Aeroporto Internacional de Denver durante a noite**. 2017. Disponível em: < <https://www.flickr.com/photos/geoclio/51787579962/>>. Acesso em: 02 set. 2023.