



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

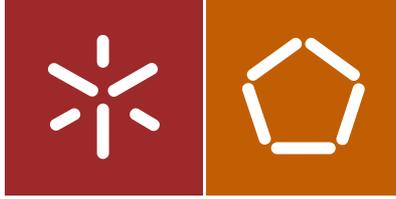
Luani Martins Costa

Desenvolvimento de Estrutura Arquitetónica
Têxtil Inteligente e Ativa em Flexão

Luani Martins Costa
Desenvolvimento de Estrutura Arquitetónica
Têxtil Inteligente e Ativa em Flexão

UMinho | 2016

julho de 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luani Martins Costa

Desenvolvimento de Estrutura Arquitetónica
Têxtil Inteligente e Ativa em Flexão

Dissertação de Mestrado
Engenharia Civil
Área de Especialização Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Raul Manuel Esteves Souza Figueiro

e coorientação de
Professor Doutor José Luís F. da Silva Ramos

DECLARAÇÃO

Nome: Luani Martins Costa

Endereço electrónico: luanimcosta@gmail.com Telefone: +351 936 213 525

Número do Bilhete de Identidade: Passaporte FH325074

Título dissertação:

Desenvolvimento de Estrutura Arquitetónica Têxtil Inteligente e Ativa em Flexão

Orientadores:

Prof. Dr. Raul Figueiro

Prof. Dr. Luís Ramos

Ano de conclusão: 2017

Designação do Ramo de Conhecimento do Mestrado:

Construção e Reabilitação Sustentáveis

Nos exemplares das teses de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respectiva, deve constar uma das seguintes declarações:

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho,

Assinatura: _____

*“A arquitectura hoje em dia precisa ser performática,
precisa provocar emoções.
Não basta ser funcional,
tem de nos inspirar.”*

AGRADECIMENTOS

Desenvolvido este trabalho, é imperativo o agradecimento a diversos intervenientes sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

A Deus, por me guiar e me acompanhar em todos os momentos.

À minha família, imensa gratidão por todo apoio para alcançar meu objetivo. Especialmente a meus pais Ademir e Vera e minha irmã Jamile, os quais nunca medem esforços para contribuírem para o meu crescimento.

Ao professor Dr. Raul Figueiro e ao professor Dr. Luís Ramos, exemplos de profissionais e mestres, obrigada pelo generoso entusiasmo dedicado a este trabalho, pela paciência e por todo ensinamento.

Aos meus novos amigos, parceiros desta jornada, Nisreen, Diego, Phelipe e Laura, pela amizade, companheirismo e por compartilhar de momentos inesquecíveis durante este período nas terras portuguesas.

Aos colegas de curso, da Universidade do Minho e de Guimarães, muito obrigada.

Aos verdadeiros amigos, serei sempre grata.

RESUMO

As inovações na tecnologia contribuem gradativamente para as transformações e adaptação do Homem perante a sociedade, como pode ser visto através da comunicação instantânea. No âmbito arquitetónico não há diferença. Tradicionalmente estática, atualmente a arquitectura traz, através dos avanços tecnológicos e do design, conceitos como dinâmica, transformação e adaptabilidade para a realidade das construções. O termo cinética aplicado neste cenário representa as buscas atuais pelo movimento nas obras arquitetónicas, visto que uma das vantagens deste é cruzar informações e resolver muitos dos problemas ambientais e ao nível de sustentabilidade. Neste contexto, vê-se um grande potencial na integração de princípios estruturais adaptativos, tais como estruturas ativas em flexão – também conhecidas como *bending-active structures* – e membrana arquitetónica, que apresentam sua relação entre formas complexas e resistência baseadas no próprio comportamento do material, ou seja, tiram proveito da composição leve e flexível para que os elementos, em virtude das deformações inerentes ao seu comportamento, sejam capazes de alcançar formas e geometrias complexas e assegurar as ações regulares. Este trabalho, portanto, visa o desenvolvimento conceitual de uma solução estrutural que engloba o conceito da cinética integrada aos princípios de estruturas adaptativas correspondentes as estruturas ativas em flexão e a membrana arquitetónica. A concepção dessa estrutura justifica-se pela possibilidade de apresentar uma solução – correspondente a um módulo – que possa ser incorporado em novas construções ou em edifícios existentes, de modo a poder ser aplicado em fachadas ou coberturas, onde os materiais leves e flexíveis, que correspondem aos princípios estruturais estudados, integrados ao movimento gerado através da aplicação do conceito da cinética, resulte em uma solução que apresente uma resposta independente, de modo a se adaptar as necessidades ambientais e dos usuários, melhorando o desempenho funcional dos edifícios. De modo a aplicar o módulo desenvolvido como solução de uma problemática real, este trabalho propõe a concepção de uma cobertura para o pátio central do edifício Paço dos Duques de Bragança, na cidade de Guimarães, Portugal – edifício este de grande importância histórica, arquitetónica e cultural - aumentando a demanda deste espaço para os usos existentes e também capacitá-lo para novos usos.

Palavras-chave: princípios estruturais adaptativos, membrana arquitetónica, estrutura ativa em flexão, arquitectura cinética, Paço dos Duques de Bragança.

ABSTRACT

Innovations in technology gradually contribute to the transformation and adaptation of the man to society, as seen through the instant communication. Within architecture is no different. Traditionally static, architecture now brings through technological advances and design concepts such as dynamics, transformation, and adaptability to the reality of the buildings. The term kinetic applied in this scenario is the current search for movement in architectural works, since one of the advantages of cross information is to solve many environmental problems and the level of sustainability. In this context, it is possible to observe a great potential in the integration of adaptive structural principles such as bending-active structures and architectural membrane, presenting their relationship between complex shapes and resistance based on their own behavior material, that is, they take advantage of lightweight and flexible composition for that the elements, by virtue of the deformations inherent in their behavior, are capable of achieving complex shapes and geometries, providing the regular actions. This dissertation, therefore, aims the conceptual development of a structural solution that encompasses the concept of integrated kinetic principles of adaptive structures corresponding bending-active structures and architectural membrane. The design of this structure is justified by the possibility of submitting a solution – corresponding to a module – which can be incorporated in new or existing buildings, as to be applied to facades or roofs, where the light and flexible material, corresponding to the structural principles studied, integrated into the movement generated by applying the concept of kinetic, resulting in a solution that provides an independent response in order to adapt to the environmental and the users needs, improving the functional performance of buildings. In order to apply the module developed as a solution to a real problem, this dissertation proposes to design a shelter for the courtyard of the *Paço dos Duques de Bragança* building in the city of Guimarães, Portugal – great historical, architectural and cultural building – increasing demand in this space for existing use and also enable new uses.

Key words: adaptive structural principles, architectural membrane, bending active structure, kinetic architecture, *Paço dos Duques de Bragança*.

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento Geral	1
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Metodologia.....	5
1.4	Estrutura do trabalho	6
2	Princípios Estruturais Adaptativos	9
2.1	Membrana Estrutural	10
2.1.1	Contexto Histórico	10
2.1.2	Caracterização	12
2.1.3	Contexto Atual	16
2.2	Estrutura Ativa em Flexão.....	20
2.2.1	Contexto Histórico	20
2.2.2	Caracterização	24
2.2.3	Contexto Atual	26
2.3	Arquitectura Cinética.....	29
2.3.1	Contexto Histórico	29
2.3.2	Caracterização	32
2.3.3	Contexto Atual	37
2.4	Considerações Finais	40
3	Componentes e Materiais	41
3.1	Elementos Estruturais.....	41
3.1.1	Elementos Flexíveis	41
3.1.2	Elementos Rígidos.....	49
3.1.3	Apoios	51
3.1.4	Acabamentos e remates	51
3.2	Elementos Construtivos	52
3.2.1	Atuadores Cinéticos	52
3.2.2	Sistemas Ativos de Controle	53
3.3	Novos Materiais	54
3.4	Considerações Finais	57
4	Proposição do Módulo	59

4.1	O Conceito	59
4.2	Definição da forma e movimento	62
4.2.1	Modelos Físicos.....	62
4.2.2	Especificação.....	66
4.3	Os Materiais	76
4.4	Aplicações	78
4.5	Considerações Finais	81
5	Aplicação: Paço dos Duques de Bragança	83
5.1	Estudo do Edifício	84
5.1.1	Embasamento Histórico	84
5.1.2	Análise Geral do Edifício	89
5.1.3	O Pátio Central	92
5.1.4	Análise Bioclimática	96
5.2	O Projeto	97
5.2.1	O Conceito.....	98
5.2.2	A cobertura.....	100
5.3	Considerações Finais	107
6	Conclusão e futuras investigações	109
	Referências bibliográficas	111
	Referências das Figuras	115
	ANEXOS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Pátios internos da Pinacoteca de São Paulo com a cobertura em aço e vidro.	2
Figura 2: (a) Vista geral do Paço dos Duques; (b) Vista do pátio central do edifício.....	3
Figura 3: (a) Tenda nômade proveniente do Norte da África; (b) Tenda nômade proveniente da Ásia Central.	10
Figura 4: (a) Pavilhão da Alemanha na Exposição de Montreal 1967; (b) Estádio olímpico de Munique 1976.	11
Figura 5: Esquema de classificação das estruturas de membrana protendida por cabos.	13
Figura 6: Esquema de classificação das estruturas pneumáticas.....	13
Figura 7: Esquema de composição de uma membrana.	14
Figura 8: Matriz de movimentos de coberturas reversíveis e retráteis.....	15
Figura 9: (a) Allianz Arena 2005; (b) Estádio Nacional de Brasília 2014; (c) Sony Center 2000.....	17
Figura 10: Expo Axis 2010; (b) Araau Bus Station 2013.	17
Figura 11: (a) Render de estudo de estrutura em membrana para áreas arqueológicas; (b) Courtyard roof, em Munique.....	18
Figura 12: (a) Umbrellas na Praça Prophet's Holy Mosque em Medina 2010; (b) Composição de fotos do auditório La Alameda 2006.	19
Figura 13: (a) Estrutura experimental 'Form Follows Tension'; (b) Torre experimental de integração entre membrana e estrutura ativa em flexão.....	20
Figura 14: Quadro demonstrativo dos métodos empíricos de construção da arquitectura vernacular.	21
Figura 15: (a) Rotunda 1895; (b) Igreja de pedra de Colônia Guell 1898.	22
Figura 16: (a) Casa do Futuro 1954; (b) Futuro 1968.	23
Figura 17: Fly's Eye Domes 1975.	23
Figura 18: (a) Multihalle Mannheim 1974; (b) Pavilhão Japonês na Expo 2000; (c) Helsinki Zoo Tower 2002.	24
Figura 19: Exemplo de deformação elástica de uma viga.....	25
Figura 20: Projeto de design experimental Loop 2006	26
Figura 21: (a) Bat-Wing-Sail Research Project 2007; (b) Material Equilibria Installation 2012.	27
Figura 22: (a) Protótipo de estrutura de membrana tensionada com elemento ativo em flexão 2015; (b) Flectofin estrutura elástica cinética.	27
Figura 23: Softhouse'at IBA Hamburgo 2013.....	28
Figura 24: Pavilhão Temático da Expo 2012 na Coréia do Sul.	28
Figura 25: Imagens do processo de movimento da fachada através da flexão dos elementos.	29
Figura 26: Instituto Mundo Arabe de 1987 em Paris.	31
Figura 27: Estrutura óssea articulada da mão humana.	31
Figura 28: Tipos de movimento na arquitectura (a) Translação; (b) Rotação; (c) Escala; (d) Deformação.	33
Figura 29: Tipologias Cinéticas (a) Estrutura transportável; (b) Estrutura independente; (c) Estrutura integrada.	34
Figura 30: Markies 1985-95 Holanda, projeto de habitação móvel do tipo transportável.....	34
Figura 31: Esquema de funcionamento de controle interno.....	35

Figura 32: Sistema de funcionamento de controle direto.....	35
Figura 33: Sistema de funcionamento de controle indireto.....	36
Figura 34: Sistema de funcionamento de controle responsivo indireto.	36
Figura 35: Sistema de funcionamento de (a) controle responsivo indireto ubíquo; (b) controle responsivo indireto heurístico.	36
Figura 36: (a) Quadracci Pavilion 2001; (b) Rolling Bridge 2004.	37
Figura 37: (a) Muscle 2003; (b) City of Justice 2006.	38
Figura 38: (a) Edifício Al Bahar 2012; (b) Módulos cinéticos da fachada responsiva do edifício Al Bahar.	39
Figura 39: (a) Eden Park construído em membrana de ETFE; (b) Cubo aquático de Pequim em ETFE.	43
Figura 40: (a) Bamboo Bar; (b) Pavilhão pesquisa da Universidade de Stuttgart.	44
Figura 41: Aglomerado de bétula.....	45
Figura 42: Hylite aplicado no Muscle ReConfigured 2004.	45
Figura 43: Exemplo de elemento arquitetônico de estrutura ativa em flexão feito em GFRP.	46
Figura 44: Seções de cabos de aço inoxidável.	48
Figura 45: Elementos de uma estrutura em membrana.	49
Figura 46: (a) Exemplo de mastros em tensoestrutura; (b) Estrutura em treliça de apoio à membrana.	50
Figura 47: (a) Estrutura conversível em membrana do Pavilhão da Venezuela Expo 2000; (b) Estrutura metálica para mobilidade estrutural tipo Umbrella.	50
Figura 48:(a) Apoio fixo numa base de fundação; (b) Articulação entre apoio fixo e base do mastro.	51
Figura 49: Modelos de ligações e acabamentos da membrana.	51
Figura 50: Modelos de ligações e acabamentos da membrana.	52
Figura 51: Tipos de mecanismos - ventiladores - em estruturas cinéticas pneumáticas.	52
Figura 52: Tipos de tubo para transferência do ar para a estrutura.	53
Figura 53: Tipologias comuns de atuadores mecânicos (a) simples; (b) articulados; (c) com cordas e (d) de banda.....	53
Figura 54: Ilustração do efeito de auto-limpeza.	55
Figura 55: (a) Efeito eletrocromático para alteração de cor em um material; (b) Efeito eletro-óptico para alteração de transparência.	56
Figura 56: Estudo de fachada com aplicação de pigmentos fotossensíveis que varia de cor de acordo com estímulos externos.	56
Figura 57: (a) e (b) Capacidade eletroluminescente dos polímeros.	56
Figura 58: SmartWrap Building, USA 2003.	57
Figura 59: Esquema conceitual da concepção da estrutura baseada na anatomia de uma folha: (1) elemento central ativo em flexão; (2) elemento de bordo ativo em flexão; (3) membrana arquitetônica; e (4) escoras.....	60
Figura 60: Imagens ilustrativas do comportamento flexível do pecíolo e nervura central.	61
Figura 61: (a) Gotas d'água repelidas na superfície de uma folha; (b) Diferentes cores para um mesmo tipo de folha ocasionado pelas mudanças climáticas.....	62
Figura 62: Definição das dimensões base da estrutura para o desenvolvimento da mesma. ...	62
Figura 63: (a) Forma desenvolvida no modelo físico 1; (b) Base do triângulo com inclinação para força contrária.....	63
Figura 64: (a) Forma desenvolvida para modelo físico 2; (b) Forma desenvolvida para modelo físico final.....	64

Figura 65: (a) Esqueleto do modelo em FRP com fibra de vidro e carbono; (b) Cordões para aplicação de força e simulação de movimento.....	64
Figura 66: Perspectiva do modelo físico 3 (final) com a aplicação de força através do movimento, demonstrando a alteração da sua forma e a adaptação dos materiais.	65
Figura 67: Visões gerais do modelo físico 3 (final). (a) Vista superior forma inicial; (b) Vista lateral forma inicial; (c) Vista superior alteração da forma nível 1; (d) Vista lateral alteração da forma nível 1; (e) Vista superior alteração da forma nível 2; (f) Vista lateral alteração da forma nível 2.	65
Figura 68: Vista da base do triângulo com especificações dos elementos.....	66
Figura 69: (a) Imagem tridimensional da estrutura – Forma inicial; (b) Pontos fixos da estrutura e forças atuantes para geração de movimento.....	66
Figura 70: Detalhamento do mecanismo de engrenagem de parafuso sem fim para geração do movimento da estrutura.....	67
Figura 71: (a) Primeiro nível de deslocamento; (b) Segundo nível de deslocamento.....	68
Figura 72: (a) Perspectiva simulando abertura com primeiro nível de deslocamento; (b) Perspectiva simulando abertura com segundo nível de deslocamento.....	68
Figura 73: (a) Corte da estrutura base rígida; (b) Exemplificação da direção da inclinação de 2% da parte interna da caleira.	69
Figura 74: Cortes de diferentes formações da base rígida em outras situações e aplicações...	69
Figura 75: Vista da base do triângulo com identificação das ligações.....	70
Figura 76: Vistas frontal, superior e lateral da ligação 1 com as dimensões gerais.....	70
Figura 77: (a) Perspectiva da ligação 1; (b) Vista superior da ligação 1 com os pontos de fixação na base rígida e sua relação com a membrana.....	71
Figura 78: Vistas frontal, superior e lateral da ligação 2 com as dimensões gerais.....	71
Figura 79: (a) Perspectiva da ligação 2; (b) Vista superior da ligação 2 e sua relação com os esticadores.	71
Figura 80: Vistas frontal, superior e lateral da ligação 3 com as dimensões gerais.....	72
Figura 81: (a) Perspectiva da ligação 3; (b) Vista superior da ligação 3 e sua relação com os esticadores.	72
Figura 82: (a) Vistas frontal, superior e lateral da ligação 4 com as dimensões gerais; (b) Perspectiva da ligação 4.	73
Figura 83: (a) Perspectiva da ligação 4; (b) Detalhe da barreira para a fixação da peça no elemento ativo em flexão lateral.	73
Figura 84: (a) Vistas frontal, superior e lateral da conexão 5 com as dimensões gerais; (b) Perspectiva da conexão 5.	73
Figura 85: (a) Mudança de angulação da escora em relação aos elementos ativos em flexão através do movimento; (b) Ligação da ligação 5 com o elemento ativo em flexão central.	74
Figura 86: Detalhe da nervura com a escora embutida.	74
Figura 87: Projeção da nervura.	75
Figura 88: Mecanismo parafuso com rosca de espaçamento para o tracionamento das membranas.	75
Figura 89: Ciclo de mudança da forma da estrutura.	76
Figura 90: Seção do elemento central em alumínio e sua relação com os outros elementos, apontando os materiais adotados.....	77
Figura 91: Vista superior e frontal de uma composição de 5 módulos intercalados, ilustrando a ventilação e iluminação natural possibilitada pela estrutura após a sua mudança de forma...	79
Figura 92: Composição dos módulos intercalados horizontal e verticalmente para fachadas.	80

Figura 93: Composição circular dos módulos.....	80
Figura 94: (a) Disposição circular dos módulos na forma inicial com espaçamento; (b) Disposição circular dos módulos após o movimento e a alteração formal.	81
Figura 95: (a) Composição com alteração da escala da estrutura; (b) Composição com alteração das angulações da estrutura.....	81
Figura 96: (a) Fotografia geral da implantação do edifício próximo ao Castelo de Guimarães; (b) Paço dos Duques de Bragança.	83
Figura 97: Período de abandono e degradação do edifício.	84
Figura 98: Vista geral do Paço dos Duques de Bragança e seu pátio central.	85
Figura 99: Período em que o edifício foi utilizado como quartel militar.	85
Figura 100: (a) Reconstrução das chaminés; (b) Reconstrução das alvenarias.....	86
Figura 101: (a) Execução estrutura dos telhados; (b) Reconstrução do claustro e pátio interno.	86
Figura 102: Planta térrea: (a) antes da restauro; (b) depois da restauro.	87
Figura 103: Planta primeiro pavimento: (a) Antes do restauro; (b) Depois do restauro.	88
Figura 104: Planta segundo pavimento: (a) Antes do restauro; (b) Depois do restauro.	88
Figura 105: Inauguração do edifício após período de obras de restauro.....	89
Figura 106: Diferenciação entre alvenaria da construção primitiva e a reconstrução.	90
Figura 107: (a) Diferenciação da alvenaria na fachada principal; (b) vãos góticos presentes na fachada posterior.	91
Figura 108: Esquema de funcionalidade atual do edifício.	91
Figura 109: Ambientes internos decorados utilizados como Museu.....	92
Figura 110: (a) Planta com as dimensões do pátio central; (b) Vista do pátio central para o claustro; (c) Vista geral do pátio central.	93
Figura 111: (a) Escadaria construída e demolida durante a restauração; (b) Evento musical; (c) Recepção/jantar utilizando estrutura efêmera como cobertura.	93
Figura 112: (a) Vista do elemento destaque do claustro com altura; (b) Pequenas aberturas na lateral; (c) Alpendre triangular.	94
Figura 113: (a) Balcão junto a cobertura do primeiro pavimento; (b) Drenagem da água pluvial nos telhados; (c) Queda da água pluvial para o alpendre de uma água do claustro.	95
Figura 114: (a) Saída da água pluvial para o alpendre de uma água do claustro; (b) Queda de água para o pátio central; (c) Drenagem da água nos quatro cantos do pavimento do pátio central.	95
Figura 115: Vista da nave noroeste e o pátio central.	95
Figura 116: Análise bioclimática - incidência solar e ventos - esquemática.	96
Figura 117: Estudo de sombreamento do edifício no solstício de verão.....	97
Figura 118: Área total para aplicação da cobertura.....	98
Figura 119: Esquema do conceito da estrutura para cobertura do pátio.	99
Figura 120: Exemplo de estrutura incorporando o módulo baseada numa palmeira.....	99
Figura 121: Vista superior das estruturas em relação ao espaço delimitado para a implantação da cobertura no edifício.	100
Figura 122: Corte esquemático 1.	101
Figura 123: Corte esquemático 2.	101
Figura 124: (a) Projeção da implantação de caleira para recolha da água da chuva; (b) Ilustração da caleira com tubo de queda no canto do pátio e tubo de queda dentro da coluna treliçada da estrutura.	102

Figura 125: (a) Movimento da coluna de apoio das estruturas; (b) Secção exemplo de braço da estrutura com diferente angulação em relação ao eixo x.	103
Figura 126: Ordem de montagem da estrutura.	103
Figura 127: Vista superior da cobertura com identificação estética dos módulos.	104
Figura 128: Perspectivas do pátio central do edifício com a estrutura para cobertura proposta: (a) sem incidência direta do sol; (b) com incidência direta do sol; (c) alteração da cor dos módulos em ETFE devido o ganho de energia térmica; (d) emissão de luz ao anoitecer dos módulos em ETFE com materiais luminescentes; e (e) a estrutura durante a noite.....	105
Figura 129: Perspectivas gerais do edifício com a cobertura no pátio central. (a) Estética inicial da estrutura; (b) Estética final da estrutura.....	106
Figura 130: Visão da cobertura com alguns módulos com alteração da forma inicial.	107
Figura 131: Outras perspectivas do espaço interno do pátio com a aplicação da cobertura em relação ao edifício.	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

As inovações tecnológicas estão constantemente a revolucionar a sociedade, contribuindo para uma transformação e adaptação gradual do Homem e sua vivência desde os antepassados até os dias atuais. A relação que se estabelece com o tempo já não é mais a mesma, sendo perceptível a sensação de que o ritmo de vida da nossa sociedade mudou. A internet e a comunicação instantânea passaram a fazer parte da rotina do Homem, acelerando as atividades diárias pessoais e profissionais, originando rápidos desenvolvimentos em várias áreas como a ciência. Na arquitetura, engenharia e construção não é diferente.

Tradicionalmente, a arquitetura é vista como sendo algo completamente estático. Em confronto com parâmetros que a influenciam como o clima e a função, ou necessidade humana, esta deve ser pensada de diferentes formas para enfrentar uma infinidade de fatores de grande relevância nas construções. Desta forma, avanços da tecnologia e do design buscam responder às necessidades do Homem em constante mudança, através da busca da forma ou elementos arquitetônicos que tenham a capacidade de se adaptar as várias necessidades dos utilizadores e ao meio ambiente, de uma forma independente. Assim sendo, a cinética na arquitetura tem como base a aplicação de vários conceitos como dinâmica, transformação e adaptabilidade para as construções. Alinhados a este conceito, outros princípios estruturais existentes há muito tempo no contexto histórico da construção civil como a estrutura ativa em flexão e a membrana estrutural vêm sendo estudados em investigações e incorporados em construções contemporâneas juntamente com a cinética, tirando proveito dos materiais leves e resistentes que compõe tais estruturas. No que concerne às arquiteturas em membrana, Obata *et al.* (2011) cita que a condicionante de dinamismo é incidente decorrente da condição de construções leves e flexíveis, uma vez que a leveza dessas estruturas possibilita a aplicação de mecanismos e automismos. A mesma teoria pode ser aplicada as estruturas ativas em flexão.

As buscas atuais pelo movimento nas obras arquitetônicas decorrem em parte das demandas energéticas e ecológicas quanto à proteção ambiental, visto que uma das vantagens mais importantes deste cruzar de informação é talvez resolver muitos dos problemas ambientais e ao nível de sustentabilidade. De acordo com Moreira (2013), a libertação da arquitetura das suas funcionalidades básicas de conforto humano, vistas durante o Modernismo, iniciado na Europa na última década do século XIX e difundido no Brasil a

partir da primeira década do século XX, obrigou a recorrer ao uso da tecnologia para gerar calor, frio, luz e ventilação, a fim de tornar os espaços mais habitáveis, levando a um maior gasto energético. Como consequência disto, as necessidades humanas de conforto voltaram a ser um ponto extremamente importante na concepção arquitetônica, estando o termo sustentabilidade cada vez mais ligado às novas construções, a tornar extremamente necessário encontrar maneiras de diminuir o impacto ambiental causado por essa indústria, através da combinação de novos materiais e técnicas que possam responder ativamente às alterações climáticas, de modo a melhorar o desempenho do edifício, sem comprometer o conforto dos utilizadores.

Em contraponto às importantes inovações na arquitetura, engenharia e construção, tem-se a preservação dos edifícios antigos que tem passado, nos últimos anos, por uma grande consciencialização. Essa consciencialização, segundo Teobaldo (2007) é o resultado de uma maior dedicação e esforço para a consolidação, reutilização e requalificação de edifícios com valor patrimonial ou com potencial de reutilização para novos fins. Uma obra bastante emblemática e exemplo deste contexto é a Pinacoteca de São Paulo (Figura 1). Concluída em 1998, é uma obra de intervenção do arquiteto Paulo Mendes da Rocha no antigo edifício sede do Liceu de Artes e Ofícios datado de 1900.

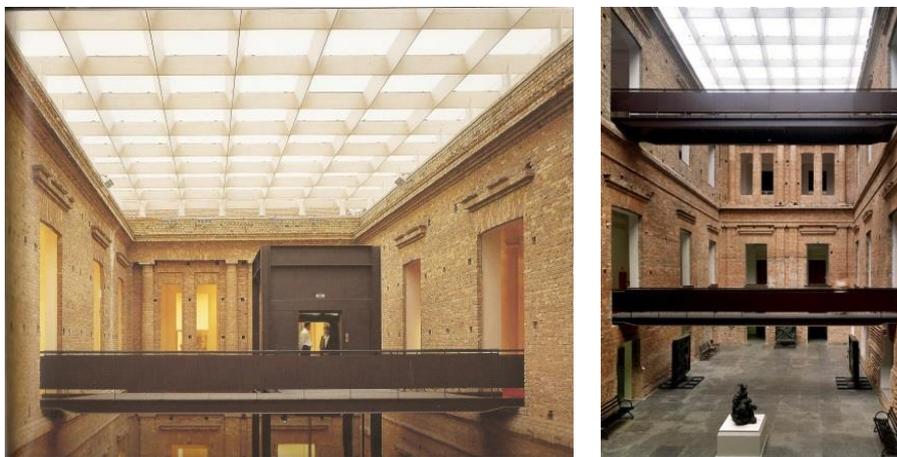


Figura 1: Pátios internos da Pinacoteca de São Paulo com a cobertura em aço e vidro¹.

A caracterização arquitetônica original deste edifício apresenta pátios internos que foram cobertos durante a intervenção com estruturas estáticas de aço e vidro, desenhadas para criar novos espaços e dotar o edifício a um novo uso. Para Rios (2013) esta intervenção arquitetônica consegue reverter à lógica da construção preexistente, oferecendo uma visão

¹ Todas as fontes/referências das figuras deste trabalho estão listadas ao fim juntamente com as referências bibliográficas.

histórica crítica uma vez que, de certa forma, descaracteriza a configuração da arquitetura original.

Neste contexto, os conceitos de adaptabilidade de estruturas nos edifícios podem ser uma solução, uma vez que indicam uma ideia de reconfiguração espacial, respondendo a um maior número de funções, sendo esta a resultante principal para uma não descaracterização de importantes características arquitetônicas em edifícios preexistentes. Assim, a motivação neste trabalho está em perceber de que forma os avanços tecnológicos podem ser integrados na arquitetura, desde a sua concepção e, principalmente, na arquitetura preexistente, como algo que potencie a construção e a relação que esta mantém com o usuário e o meio ambiente. Para além disto, torna-se interessante colocar em prática os conceitos estudados, através da concepção de uma solução estrutural a nível conceitual, de modo que beneficie pesquisas futuras.

Na cidade de Guimarães localiza-se um dos principais edifícios simbólicos da identidade e história de Portugal. Construído originalmente no ano de 1420 como residência da família Ducal de Bragança, o Paço dos Duques (Figura 2a) tem como seu principal uso um museu e é também utilizado esporadicamente como espaço para eventos, como por exemplo, jantares, casamentos e apresentações musicais, que comumente acontecem no pátio central do edifício (Figura 2b), o que acarreta certa dependência de instalação de proteções efêmeras para a cobertura.



Figura 2: (a) Vista geral do Paço dos Duques; (b) Vista do pátio central do edifício.

Apresentando uma *média de 12 eventos por ano e um gasto anual considerável*² para a aplicação de uma cobertura efêmera para cada evento, a escolha deste edifício para aplicação de uma estrutura adaptativa torna-se relevante, uma vez que poderá apresentar a criação de uma solução estrutural única, pensada especificamente para o edifício, além de tirar partido

² Informação obtida em reunião com a Diretora do Paço dos Duques e com o responsável pelos eventos realizados no edifício.

das possibilidades de adaptação da estrutura, possibilitando acomodar diversos eventos ou atividades no pátio central.

Como embasamento para tal proposição, a Carta de Veneza (1964) explicita que a conservação dos monumentos é sempre favorecida por sua destinação a uma função útil à sociedade, não podendo alterar a disposição ou a decoração do edifício. É somente dentro destes limites que se deve conceber e se podem autorizar as intervenções exigidas pela evolução dos usos e costumes. Destaca também que o monumento antes da intervenção deve ser alvo de estudo e análise, de modo a realizar uma correta intervenção. Já Brandi (2004) articula a importância da máxima conservação e preservação dos bens construídos, enfatizando que qualquer construção/intervenção adjacente deve seguir os princípios do seu tempo, respeitando a imagem da construção existente.

Desta forma, esta dissertação incide sobre o estudo e a concepção de uma estrutura arquitetônica inteligente, que abrange os conceitos de arquitetura cinética com o uso de membrana arquitetônica integrada a elementos ativos em flexão, que corresponde a um módulo estrutural, o qual possa ser incorporado em novas construções ou em reabilitações de edifícios existentes, resultando em uma solução que apresente a capacidade de se adaptar as necessidades ambientais e dos usuários, melhorando o desempenho energético dos edifícios. Como maneira de exemplificar sua possível aplicação, a estrutura será incorporada em escala conceitual a um edifício emblemático da história da cidade de Guimarães, Portugal – o Paço dos Duques de Bragança – visando possibilitar a utilização do pátio central do edifício para novos usos e beneficiar usos já existentes, focalizando a potencialidade de princípios estruturais adaptativos para intervenções em edificações de interesse histórico.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é realizar o estudo e o desenvolvimento conceitual de uma solução estrutural arquitetônica que englobe três princípios estruturais adaptativos – membrana arquitetônica, estrutura ativa em flexão e arquitetura cinética – representando uma estrutura arquitetônica têxtil inteligente e ativa em flexão, de maneira que corresponda a um módulo estrutural que possa ser aplicado ou incorporado em novas construções ou em edifícios existentes, resultando em uma solução que apresente a capacidade de adaptação às necessidades ambientais e dos usuários, e que seja capaz de melhorar o desempenho funcional dos edifícios.

Além deste objetivo geral, a dissertação também pretende:

- Promover um quadro de entendimento através de uma revisão das membranas estruturais, estruturas ativas em flexão e arquitetura cinética;
- Trazer novos conhecimentos sobre os princípios estruturais adaptativos estudados e, principalmente, da integração entre eles, servindo como base para estudos e desenvolvimentos futuros;
- Realizar a concepção de modelos físicos em escala reduzida da estrutura proposta, fundamentado nos conceitos previamente analisados, de maneira a obter respostas sobre o seu comportamento e desempenho empiricamente;
- Aplicar a estrutura a nível conceitual na proposição de uma cobertura adaptativa para o pátio central (interno) do edifício Paço dos Duques de Bragança, na cidade de Guimarães, explorando os conceitos de adaptabilidade e movimento, de modo a ser capaz de responder à mudança das condições climáticas e as necessidades dos usuários, capacitando o espaço do pátio para novos usos;
- Destacar o potencial do uso de estruturas adaptativas em conjunto a novos materiais para intervenção em edifícios de interesse histórico.

1.3 METODOLOGIA

Para alcançar tais objetivos, a dissertação divide-se em duas componentes, uma componente teórica e uma prática, de tal modo que é possível dividir a metodologia aplicada em cinco etapas principais:

- Realizar o estudo dos conceitos, contexto histórico e as diferentes abordagens dos princípios estruturais – estrutura ativa em flexão e membrana arquitetônica – analisando simultaneamente o desenvolvimento tecnológico como embasamento de uma sociedade em constante mudança e sua influência na evolução da construção e arquitetura contemporânea em questões de maior adaptação do ambiente construído com os usuários através do estudo da arquitetura cinética;
- Destacar os principais materiais e componentes aplicados para a composição desses princípios estruturais, de modo a melhorar a compreensão e definir quais apresentam melhor desempenho, juntamente com o menor impacto ao meio ambiente, tendo como norteador a sustentabilidade;
- Desenvolver uma estrutura arquitetônica têxtil inteligente e ativa em flexão, fundamentada nos conceitos previamente estudados dos princípios estruturais,

através da concepção de um modelo conceitual, definindo todos os elementos e materiais necessários para a sua funcionalidade, além de destacar possíveis aplicações e composições no contexto arquitetônico;

- Reproduzir modelos físicos em escala reduzida da estrutura, fundamentada nos conceitos previamente analisados, buscando demonstrar mais claramente o movimento e posterior comportamento global da estrutura;
- Aplicar a estrutura como caso de estudo na proposição de uma cobertura para o pátio central do edifício Paço dos Duques de Bragança, realizando previamente o embasamento histórico referente ao edifício, o seu levantamento e análise, principalmente nas componentes funcionais, construtivas e estéticas, com ênfase no pátio central, como maneira de entender e propor a melhor solução como cobertura adaptativa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Visando à melhor disposição do conteúdo, esta dissertação está organizada em sete capítulos.

O capítulo 1 contém a introdução à pesquisa, em que são ressaltados a importância do tema na conjuntura atual, os objetivos a serem alcançados na investigação e a descrição da estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte, em que são abordados os conhecimentos disponíveis na bibliografia, os contextos históricos e atuais, e a caracterização dos princípios estruturais adaptativos, destacando também as integrações existentes entre os princípios estudados nos dias de hoje.

No terceiro capítulo é realizada a descrição dos materiais e componentes utilizados para o desenvolvimento dos princípios estruturais estudados no Capítulo 2. Aqui são apontados os principais elementos que compõe cada estrutura, o comportamento mecânico dos principais materiais utilizados e a abordagem de materiais inovadores para este contexto.

O capítulo 4 envolve a proposição do módulo que engloba a integração de conceitos dos três princípios estruturais adaptativos, sendo dissertado desde o conceito utilizado para a concepção da estrutura, os modelos físicos iniciais, a especificação de todos os elementos que compõe o módulo, os materiais a serem utilizados e a análise dos resultados num modelo físico final.

O capítulo 5 exemplifica a aplicação do módulo desenvolvido para uma problemática real, tendo como caso de estudo a concepção de uma cobertura adaptativa para o pátio central do edifício Paço dos Duques de Bragança, na cidade de Guimarães, Portugal.

Por fim, o capítulo 6 indica as conclusões obtidas através desta investigação e as possíveis pesquisas futuras a serem realizadas.

Adicionalmente, apresentam-se as referências bibliográficas e as referências das figuras utilizadas para ilustrar este trabalho e os anexos.

2 PRINCÍPIOS ESTRUTURAIS ADAPTATIVOS

Na arquitetura, a noção de movimento é geralmente representada por configurações que implicam relações de causa e efeito, através de técnicas passivas como deformação, justaposição, ausência ou exagero, que são capazes de expressar movimento e transformação. Essas técnicas utilizadas são baseadas na ideia de que a sucessão não está apenas diretamente relacionada ao movimento físico, mas também indiretamente relacionada à expressão formal. Por outro lado, a maioria das estruturas na engenharia civil reage às solicitações exteriores de forma passiva. Para além disso, são projetadas para se manterem essencialmente estáticas, salvo algumas estruturas transformáveis existentes no contexto das estruturas, como as coberturas retráteis em estádios ou pontes levadiças.

Uma nova abordagem que vêm sendo bastante estudada e utilizada em algumas construções contemporâneas é a de conferir às estruturas um caráter adaptativo. Segundo Barbarigos (2012) as estruturas adaptativas têm a capacidade de alterar a sua forma, as suas propriedades ou a sua geometria inicial, respondendo mais eficazmente face às ações que estão sujeitas, quer sejam ações estáticas, quer ações dinâmicas.

De acordo com Adam e Smith (2008), as estruturas podem adaptar-se, alterando sua forma inicial, através de mecanismos ou por um sistema composto por sensores, atuadores e um computador que fornece a capacidade de aprender e melhorar a resposta da construção às mudanças do ambiente. Este conceito de adaptabilidade de forma dinâmica origina-se a partir do conceito da cinética na arquitetura, sendo possível encontrar várias definições relacionadas com o tema. Para Sobek *et al.* (2001), as estruturas adaptativas são sistemas com a capacidade de manipular a distribuição das forças internas ou sistemas que influenciam suas cargas externas ao longo do tempo. Indo além, para uma definição mais completa, Wada *et al.* (1991) propõem que uma estrutura adaptativa inclui atuadores que lhes permite mudar de estado ou características de uma forma controlada, conceituando como estrutura sensorial a que inclui sensores que monitoram e determinam seu estado ou características, sendo ambas as estruturas – adaptativa e sensorial – consideradas estruturas ativas.

Alguns princípios estruturais, tais como a membrana estrutural e a estrutura ativa em flexão tiram proveito de sua composição leve e flexível para que os seus elementos, em virtude das deformações inerentes ao seu comportamento, sejam capazes de alcançar formas e geometrias complexas e assegurar as ações regulamentares. Num tempo em que soluções leves, inteligentes e que, sobretudo, se possam adaptar às diferentes exigências de cada

tempo, vêm a ser aplicada cada vez mais no contexto atual, acarretando soluções de elevado valor arquitetônico, fazem com que as membranas e as estruturas ativas em flexão estejam cada vez mais presentes no contexto da cinética na arquitetura e, conseqüentemente, na realidade das construções.

Portanto, realizar-se-á a seguir a caracterização e uma abordagem do panorama histórico e atual destes princípios estruturais e, acima de tudo, do potencial de integração com a arquitetura cinética, que também será estudada mais aprofundadamente.

2.1 MEMBRANA ESTRUTURAL

2.1.1 Contexto Histórico

Originalmente, as estruturas de membrana encontram-se nas tendas e nos toldos tradicionais, que remontam há muitos anos atrás. Ao longo da história e por todo o mundo, eram usadas tendas feitas de peles de animais ou materiais entrelaçados (Figura 3), particularmente nas sociedades nômadas, como uma das primeiras formas espontâneas de habitações construídas pelo homem, devido à necessidade do homem de se defender das intempéries e de coberturas portáteis, permanecendo até os dias atuais, com alterações em nível de materiais e qualidade, mas não de conceito.



Figura 3: (a) Tenda nômade proveniente do Norte da África; (b) Tenda nômade proveniente da Ásia Central.

É o caso de alguns povos nômades (mongóis e turcos na Ásia, beduínos e árabes da África do Norte dedicados à criação de animais – cabras, camelos), sendo que cada cultura apresenta tipologias construtivas próprias que possibilitam a adaptação e proteção às

excessivas variações climáticas das regiões desérticas em que se inserem. Nesses exemplos de tipologias primitivas intuitivas que incorporam a mudança reconhecem-se algumas características da construção industrializada, como a logística de fabricação, execução, montagem e transporte, onde a capacidade de transporte dos animais e à força humana para a montagem é alcançada na modulação e dimensões dos materiais.

Entre os tempos romanos e o século XIX, pouco foi desenvolvido em relação às tendas. Foi então na Segunda Guerra Mundial, sendo utilizadas para refúgios de militares, assim como hangares temporários para armazenar aviões, que as estruturas em membrana tiveram um grande desenvolvimento. A sua rápida aplicabilidade e funcionalidade era uma realidade na altura, propagando-se no pós-guerra para a construção de toldos e tendas em circos e habitações (Mériada & Fanguero, 2012).

Entretanto, a era moderna das estruturas em membranas essencialmente iniciou-se apenas, de acordo com Oliveira (2001), com os estudos com modelos físicos por Frei Otto, onde resultados importantes foram alcançados. Este arquiteto iniciou suas pesquisas nos anos 50, observando as formas e estruturas da natureza, buscando identificar o consumo de matéria e energia desses sistemas, além de explorar empiricamente uma série de superfícies com formas livres e com duplas curvaturas – analisando geometria, comportamento e tensão – com redes de cabos, membranas (tecidos) elásticas e filmes de sabão (Nunes, 2008).

Em 1967, Frei Otto construiu o Pavilhão da Alemanha na Exposição de Montreal (Figura 4a), sendo utilizada uma rede de cabos com uma membrana sob ela, visto que nesta época não existia membrana com resistência suficiente para ser suspensa pelos mastros e tracionada pelos cabos de borda, dando a membrana apenas função de vedar. Após isso, realizou outras obras emblemáticas, como o Estádio Olímpico de Munique (Figura 4b) em 1976, dando uma nova luz para as estruturas em membrana no panorama da construção.



Figura 4: (a) Pavilhão da Alemanha na Exposição de Montreal 1967; (b) Estádio olímpico de Munique 1976.

Essas estruturas provocaram uma mudança significativa, uma revolução na cultura construtiva, que de acordo com Addis (1994), impulsionaram o desenvolvimento da engenharia e de novos materiais, devido à contribuição dos arquitetos e engenheiros em desenvolver novos procedimentos de projetar.

Atualmente, o mercado das membranas estruturais tem crescido consideravelmente nos últimos 30 anos. Através dos avanços tecnológicos sobre este material, é possível conceber estruturas esbeltas, com grandes vãos, permeáveis à luz e que necessitam um número reduzido de elementos de apoio, o que contribui para o aumento do interesse pelo seu uso. Entretanto, para Marques (2015) o conhecimento de como as dimensionar e as construir é consideravelmente limitado a um reduzido número de especialistas e construtores, o que não retira as estruturas em membrana da classificação de construção especial.

2.1.2 Caracterização

Membranas arquitetônicas são estruturas flexíveis que resistem às ações devido sua forma, às suas características físicas, ao pré-tracionamento e às ações variáveis, sendo as principais características que as distinguem das restantes a sua resistência limitada à tração e resistência nula à compressão (Oliveira *et al.* 2005). Para os mesmos autores, essas estruturas, normalmente utilizadas em coberturas, constituem um sistema construtivo formado, na sua grande parte, pela membrana, a qual para além da sua função estrutural tem a função de vedar e podem ser uma solução economicamente viável, eficiente e esteticamente agradável. Denominadas como ‘estruturas leves’, que segundo Majowiecki (2005) é devido ao peso próprio dessas estruturas (carga permanente) ser muito menor que o peso suportado (sobrecarga e cargas variáveis), visto a substituição da ‘massa’ do material pela ‘forma’ para alcançar a estabilidade estrutural, destacam-se normalmente por vencer grandes vãos, pela facilidade de fabrico e montagem, pelo uso de telas de fibras sintéticas de alta resistência e, principalmente, por alcançar formas arquitetônicas complexas.

De acordo com Obrebsk (2002), as membranas podem se estruturar, ou seja, alcançar o pré-tracionamento através do seu estiramento por meio de cabos que compõe o seu suporte ou pela atuação da pressão de gases. Quando o pré-tracionamento é alcançado através do estiramento de cabos, são chamadas estruturas de membrana protendida por cabos (Figura 5). Estas dependem de cabos de aço como suporte base, tendo como aspecto característico uma superfície com dupla curvatura. Já quando alcançado pela pressão de gases, estas estruturas são chamadas de estruturas pneumáticas (Figura 6). Estes sistemas suportados por ar utilizam a engenharia mecânica para criar uma pressão de ar interna positiva, a fim de apoiar o tecido.

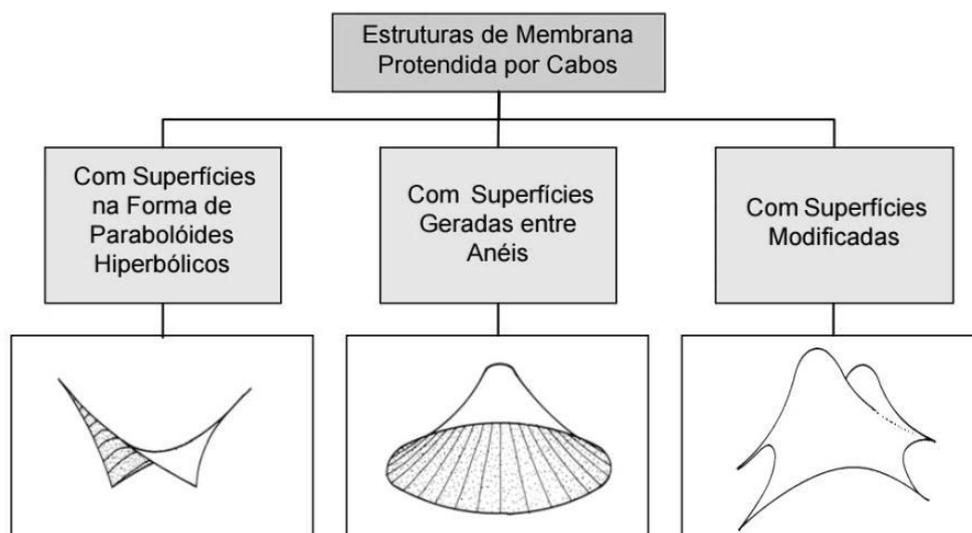


Figura 5: Esquema de classificação das estruturas de membrana protendida por cabos.

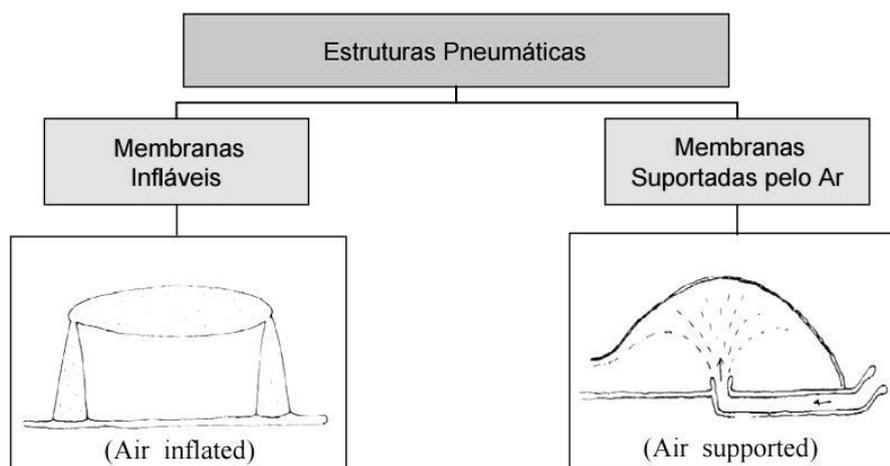


Figura 6: Esquema de classificação das estruturas pneumáticas.

Os esquemas anteriores exemplificam como podem ser as configurações espaciais da membrana estrutural em ambos os tipos de suporte. Esse tipo estrutural tem na sua forma livre a sua principal vantagem, pois adequam-se muito facilmente às diversas situações. Entretanto, as membranas arquitetônicas podem também ser estruturadas por meio de elementos rígidos (escoras) combinados com cabos, onde a forma como o sistema se organiza e a geometria dos componentes construtivos, associados ao estado de tensão (bem tenso e não frouxo) revela a sua capacidade de suportar os esforços e mantém o equilíbrio interno. A condição mínima para possibilitar a estabilidade e a rigidez de uma superfície flexível é quando um par de elementos da superfície está ancorado e tracionado em direções opostas, formando assim uma dupla curvatura.

Para além das características destacadas até agora, pode-se atentar as características gerais da membrana. De acordo com Birdair (2016), estas estruturas têm: (1) design flexível,

possibilitando a composição de formas elegantes e distintas, graças às suas características intrínsecas; (2) translucidez, que durante o dia oferecem luz natural difusa, reduzindo os custos energéticos; (3) boa durabilidade, que apresentando materiais adequados na sua concepção, são uma ótima solução em climas inóspitos, tais como frio e calor elevados; (4) natureza leve, pois requer menos aço estrutural para suporte em comparação com soluções estruturais convencionais, permitindo grandes vãos sem apoios intermediários; (5) baixa manutenção em relação aos outros sistemas comuns; (6) boa relação custo-benefício, pois grande parte das membranas tem alta reflexão dos raios solares e baixa absorção, resultando em menores gastos energéticos; e (7) uma variedade de composições de materiais para responder a diferentes objetivos específicos.

Em relação a sua composição, as membranas arquitetônicas são constituídas por uma malha fibrosa, que dependendo do seu uso, pode ou não ter um revestimento. Como comumente são utilizadas no exterior para coberturas, Marques (2015) destaca que estas têm a necessidade de ser revestidas por um material, geralmente polimérico, que confere as propriedades térmicas, acústicas e de impermeabilidade. Porém, em situações em que a membrana seja utilizada essencialmente de sombreamento, maioritariamente interiores, o revestimento pode ser dispensado.

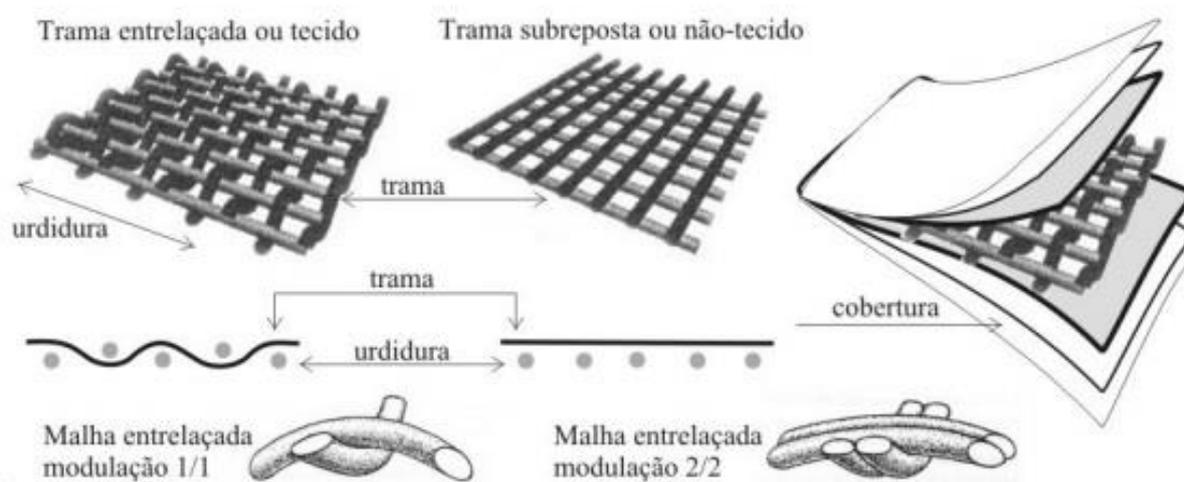


Figura 7: Esquema de composição de uma membrana.

Essa malha fibrosa é composta por fios que podem ser dispostos de duas maneiras principais, podendo estar entrelaçados alternadamente uns sobre os outros, ou simplesmente colocados uns sobre os outros. As entrelaçadas, ainda, podem ter uma configuração larga ou apertada. Essas duas direções dos fios podem ser denominados de *warp* e *weft* na literatura internacional, que correspondem à urdidura – também conhecida como teia - e a trama, respectivamente (Figura 7). A teia são os fios retos, sendo estes tencionados aquando do

fabrico da membrana, enquanto a trama são os fios perpendiculares à teia, de maneira sobreposta ou entrelaçada. Uma diferença entre a malha entrelaçada e a plana está na sua espessura, uma vez que na entrelaçada pode-se ter uma espessura de três diâmetros de fios, e na malha plana têm-se somente dois diâmetros.

Outro aspecto relevante a ser destacado nas membranas, segundo Obata *et al.* (2011) é a capacidade de ser utilizada para aplicações com mecanismos e automatismos. Isso é possível graças a sua leveza e à flexibilidade do têxtil, que dependendo de sua constituição, permite a repetição de movimentos de dobramento e desdobração, por exemplo, ou como já citado anteriormente, inflar e desinflar – no caso das estruturas pneumáticas - sem que o material entre em ruptura por fadiga. Podem também ser projetadas para uma fácil montagem e desmontagem, incluindo o transporte, fazendo com que a portabilidade seja uma vantagem.

Sistema construtivo	Tipo de movimento	Direção do movimento			
		Paralelo	Central	Circular	Perimetral
Membrana apoiada em estrutura fixa	Puxadas ou içadas				
	Enrolada				
Membrana apoiada em Estrutura móvel	Deslocada ou transladada				
	Dobrada				
	Rotacionada				
Construção rígida	Deslocada ou transladada				
	Dobrada				
	Rotacionada				

Figura 8: Matriz de movimentos de coberturas reversíveis e retráteis.

Otto (1971 apud Obata *et al.* 2011) exemplifica no quadro da figura 8 uma matriz de movimentos relacionada às membranas estruturais, possíveis de serem projetados. Portanto,

de acordo com o quadro, o movimento e transformação das membranas estruturais podem ser basicamente definidos de duas formas: reversível ou retrátil. As estruturas reversíveis são as que a forma é transformada por conversão, e na qual ocorrem mudanças, tais como dobrar e desdobrar, inflar ou desinflar. Enquanto as estruturas retráteis são as que possuem mecanismos que permitem movimentos para terem partes ocultadas, recolhidas ou ficarem aparentes. Segundo Foster (1994) as coberturas retráteis já são vistas desde os romanos para proteção do sol sobre pátios internos, praças, ruas, teatros e arenas (com o Coliseu, em Roma) e segundo Otto (1979), impulsionadas pela construção de barcos à vela, essas coberturas constituíam-se de tecidos de linho, suspensas em cordas radiais fixadas a mastros de madeira, travessas e de um mecanismo que possibilitava se recolherem rapidamente.

Essas formas de movimento da arquitetura têxtil são também atualmente englobadas no termo da cinética na arquitetura, termo este que será mais bem caracterizado adiante, no qual contempla combinação de movimento e recentes tecnologias, possibilitando uma mudança de forma e desempenho de modo ativo.

A estrutura da aplicação da membrana deve ser pré-determinada por um processo considerado complexo. Segundo Iványi (2013), ao longo dos anos e de acordo com os diferentes projetos de membranas arquitetônicas investigados, alguns aspectos realçam como etapas fundamentais na concepção de uma estrutura com uso de membrana. São esses aspectos o projeto conceitual, o apuramento da forma da membrana, a geração de tecnologia de padrão e a análise sob o carregamento.

2.1.3 Contexto Atual

As coberturas têxteis têm sido utilizadas nas cidades desde seus primórdios. Exemplos desses usos em espaços urbanos podem ser encontrados nos dias de hoje nos mercados ao ar livre ou em feiras. As estruturas de membrana apresentam notáveis qualidades estéticas devido à sua leveza natural e transparência. Ao mesmo tempo, elas oferecem soluções estruturais eficientes, combinando elementos de compressão e tensão puros (Shling *et al.* 2015). Numa realidade mais atual e especialmente nos últimos anos, observaram-se diversas construções em membrana em maior escala, principalmente em arenas desportivas, sendo esta uma das áreas que mais projeta com estruturas de membrana em todo o mundo. São exemplos o Allianz Arena (Figura 9a) em Munique, Alemanha de 2005, que apresenta na fachada e cobertura painéis de membrana insuflados e a renovação do Estádio Nacional em Brasília (Figura 9b), Brasil de 2014, que recebeu uma cobertura de membrana de fibra de vidro. Em uma vertente diferente da desportiva, outras obras de grande presença como o Sony Center

(Figura 9c) em Berlim, Alemanha de 2000, utiliza a membrana como cobertura de um espaço que contempla restaurantes, cinemas, exposições, entre outras atividades de lazer.

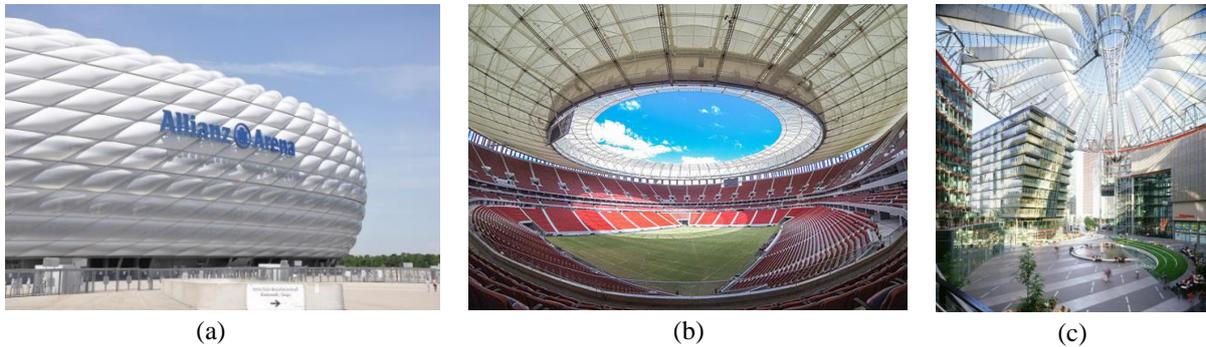


Figura 9: (a) Allianz Arena 2005; (b) Estádio Nacional de Brasília 2014; (c) Sony Center 2000.

Para Llorens (2015), as membranas arquitetônicas são muito bem adaptadas para criar espaços condicionados entre o tecido urbano, porque elas são adaptáveis, flexíveis, leves e abertas, de tal maneira que elas não interferem na continuidade espacial. Além disso, a sua forma curvilínea facilita a adaptação à geometria regular das ruas ou praças, e a outras irregularidades que ocorrem em situações urbanas. São exemplos físicos deste contexto a *Expo Axis* em Shanghai (Figura 10a) de 2010 e a *Aarau Bus Station* na Suíça (Figura 10b) de 2013. A incorporação desse princípio estrutural no tecido urbano condiciona a criação de atmosfera, delimitação e proteção, apresentando uma capacidade destacável de reversibilidade, pois podem ser removidos facilmente sem deixar vestígios, não comprometendo os locais em que são instalados.



Figura 10: (a) Expo Axis 2010; (b) Aarau Bus Station 2013.

Outros estudos enfatizam a potencialidade da membrana para usos mais específicos. Barozzi *et al.* (2015) destacam a membrana para concepções inovadoras de coberturas para áreas arqueológicas (Figura 11a). Os autores citam que a peculiaridade da membrana para este

uso está na sua capacidade de adaptação e versatilidade, tanto na forma como na dimensão do espaço coberto. Adicionalmente, citam sua rápida e fácil ação de montagem e desmontagem, o que as torna soluções reversíveis, minimizando o impacto sobre a área ambiental em torno das escavações e ainda simplificam a gestão de áreas arqueológicas, uma vez que podem ser adaptadas aos fluxos turísticos, restaurações e atividades de manutenção.



Figura 11: (a) Render de estudo de estrutura em membrana para áreas arqueológicas; (b) Courtyard roof, em Munique.

Alinhado ao desenvolvimento da membrana quanto a material e composição, o movimento nessas estruturas é algo que está bastante relacionado com o seu contexto atual. Hub *et al.* (2015), ao estudar pormenores de estruturas retráteis (Figura 11b) em membrana de pequena e média escala, destaca que estas oferecem uma solução econômica para enfrentar os distúrbios em locais ao ar livre, entretanto apresentam requisitos técnicos envolvidos mais complexos ao comparar com coberturas de membrana fixas, pois vários componentes mecânicos são necessários a fim de movimentar a cobertura de uma maneira confortável. Tais requisitos podem significar um aumento no custo dessas estruturas, mas podem ser extremamente significativos positivamente em termos de poupança quando utilizado em maior escala como, por exemplo, uma cobertura de um estádio.

Para Obata *et al.* (2011) o movimento nas estruturas em membrana deve ser a diretriz, principalmente na busca do partido arquitetônico, na composição da equipe de projeto e dos custos de mecanização e automação quando requerido, visto que a decisão de adoção de movimento, mesmo que permita a flexibilidade do espaço, ganhos energéticos e condicionamento térmico em regiões de climas adversos, pode ser um ato político e de atendimento a impactos diversos. Exemplos a seguir demonstram a capacidade da membrana de ser incorporada em projetos para estruturas móveis. A Figura 12(a) trata-se das *Umbrelas* na Praça da Prophet's Holy Mosque de 2010, em Medina, em que a membrana é utilizada para estruturas dobráveis de apoio central do tipo guarda-sol, assim como a composição de fotos na Figura 12(b) exemplifica outra estrutura dobrável com membrana, desta vez com

arcos metálicos com apoios laterais, da cobertura do Auditório La Alameda de 2006, em Jaen, Espanha.

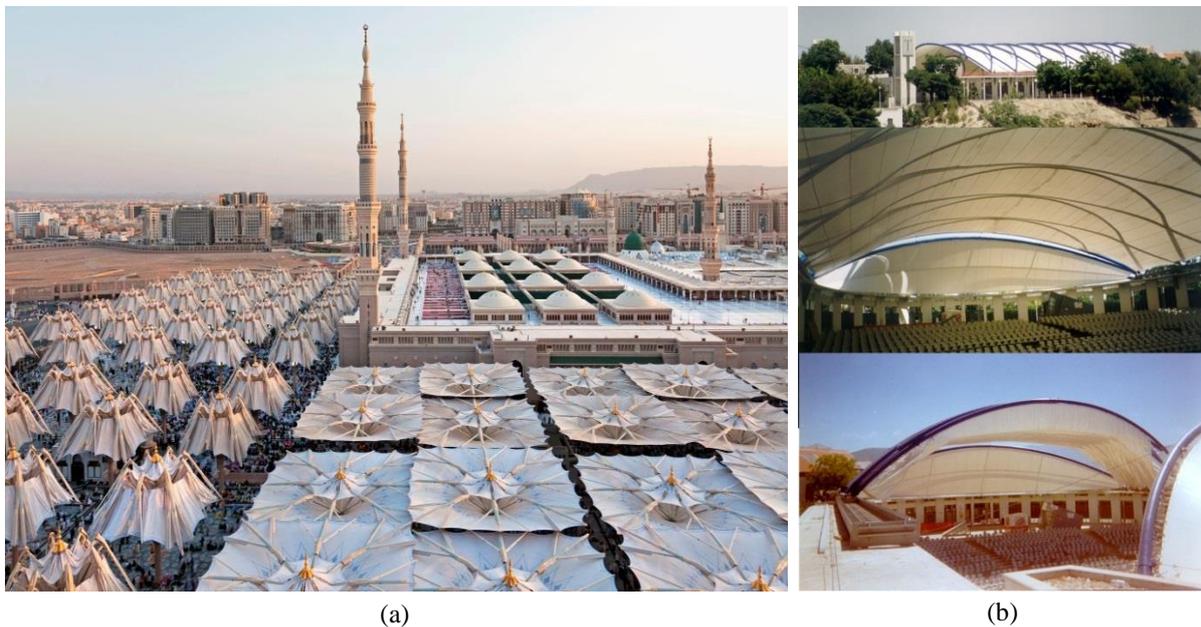


Figura 12: (a) *Umbrelas na Praça Prophet's Holy Mosque em Medina 2010*; (b) *Composição de fotos do auditório La Alameda 2006*.

O movimento das arquitecturas têxteis representam uma condicionante formal de projeto dessa tipologia construtiva e que deve ser sistematizada com outras condicionantes como a tipologia do material, as características técnicas, a forma e complexidade da superfície, as condições visuais da obra, as técnicas e detalhes construtivos (Obata *et al.* 2011).

Além da capacitação do movimento integrado nas estruturas de membrana, nos últimos anos houve um aumento do interesse de pesquisa no campo da estrutura ativa em flexão que, de forma semelhante à membrana, mescla o projeto de forma e estrutura. Além das vantagens de construção, este princípio de design permite a utilização de tensões de flexão, que pode melhorar o seu desempenho estrutural (Shling *et al.* 2015). Estudos recentes buscam a integração entre membranas estruturais e os elementos ativos em flexão. Um estudo integrando esses materiais foi desenvolvido por Sebastian Huth que trata de uma estrutura modular de elementos elásticos, ou seja, ativos em flexão, que podem assumir a forma desejada, introduzindo tensão nos cabos de fixação da membrana posicionada no interior da estrutura (Figura 13a). Assim como a concepção de uma torre de oito metros (Figura 13b) por uma equipe interdisciplinar de arquitetos, engenheiros estruturais e têxteis permitiu investigar meios de projetar, especificar e fazer testes na estrutura ativa em flexão como material para estruturas de membrana em escala arquitetônica. A torre foi desenvolvida e produzida no

período entre 2014 e 2015 e montada e exposta no pátio do Museu do Design dinamarquês. O conceito básico dessa estrutura é a criação de uma membrana reforçada por uma rede densa de sobreposição de flexão e compressão em hastes rígidas de GFRP (Tamke *et al.* 2015).



Figura 13: (a) Estrutura experimental 'Form Follows Tension'; (b) Torre experimental de integração entre membrana e estrutura ativa em flexão.

A torre explora também articulações têxteis realizadas em tecido de alta tenacidade, como alternativa mais suave em comparação às articulações de aço, proporcionando máxima força dentro dos elementos ativos em flexão.

Deste modo, a estrutura de membrana vem sendo estudada cada vez mais, como busca por um equilíbrio entre a sua suavidade e rigidez presentes no material, a fim de criar estruturas e arquiteturas flexíveis, através da sua integração com estruturas ativas em flexão.

2.2 ESTRUTURA ATIVA EM FLEXÃO

2.2.1 Contexto Histórico

Os primeiros vestígios de estruturas ativas em flexão podem ser vistos também nas tendas nômades, assim como, conforme (Oliver 2007) em vários métodos empíricos conhecidos de construção da arquitetura vernacular que fazem o uso dos materiais de construção de comportamento elástico. Para garantir a capacidade de suporte de carga de uma estrutura que inclui considerável equilíbrio à flexão, materiais com alta tensão de ruptura eram bastante utilizados. Exemplos disso são as madeiras macias como bambu e cana, que

possuindo tais características, apresentaram um uso extensivo como estruturas ativas em flexão nas construções vernaculares em todas as culturas do mundo.

O motivo para o uso destes materiais foi o seu potencial econômico e seu peso leve, tornando-se evidente quando se considera o fato de que tais estruturas foram encontradas predominantemente em áreas que somente madeiras macias eram disponíveis ou em culturas que ainda não tinham desenvolvido as habilidades para processar peças maiores com madeiras mais duras (Lienhard 2014).

		Technological differentiations							
		With tensile and bending material			With stiff material				
Structural variations	Simple structures	Suspended cable		Bent arch		Fork		Fixed pole	(A) With one element
		Dual hanging cable	Sling arch	Semi-bent arch	Pole with cables	Fork with oblique poles	Tripod	Jambis	(B) With 2-4 elements
	Complex structures	Fringe	Pendant	Semi-bent arch with 3 elements	Hammock	Dual fork with architrave	Dual tripod with contrast architrave	Spaced out palisades	(C) With several elements
		Fabric		Lattice		Fork with continuous beam		Close-set palisades	(C) With unlimited elements
Static systems		Tensile	Tensile-bending	Elastic	Tensile compressed	Heavy	Pushing	Self-carrying	
		(T)	Tb	(E)	Tc	(H)	P	(S)	

Figura 14: Quadro demonstrativo dos métodos empíricos de construção da arquitetura vernacular.

De acordo com a *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World* (2007) apud Lienhard (2014) afirma-se que nas primeiras construções, o princípio de tecelagem era estreitamente ligado ao mecanismo elástico de elementos em forma de cúpula, visto que a solidez estrutural era garantida pela presença da urdidura cruzada que elasticamente unia toda a tensão dos arcos em um único sistema resistente. No quadro da Figura 14, visualiza-se os mais comuns métodos empíricos de construção na arquitetura vernacular, onde é possível identificar os elementos ativos em flexão para alcançar formas curvas, partindo de elementos que são de sua natureza inicialmente planos.

Com o grande avanço quanto aos materiais de construção, marcado pela Revolução Industrial, houve a diminuição do uso da madeira para a criação das formas curvas nas

construções, apresentando o uso do ferro e da pedra para o mesmo fim que, ainda mais adiante, foi predominantemente assumido pelo uso do aço e betão armado na arquitetura do século XX. Como exemplos disso, Lienhard (2014) destaca as obras emblemáticas Rotunda (Figura 15a) em Nizhny Novgorod por Vladimir Shukhov em 1895 e a Igreja de pedra de Colônia Guell (Figura 15b) por Antoni Gaudi em 1898, nas quais utilizam o aço e a pedra para obter formas curvas complexas em sua concepção.

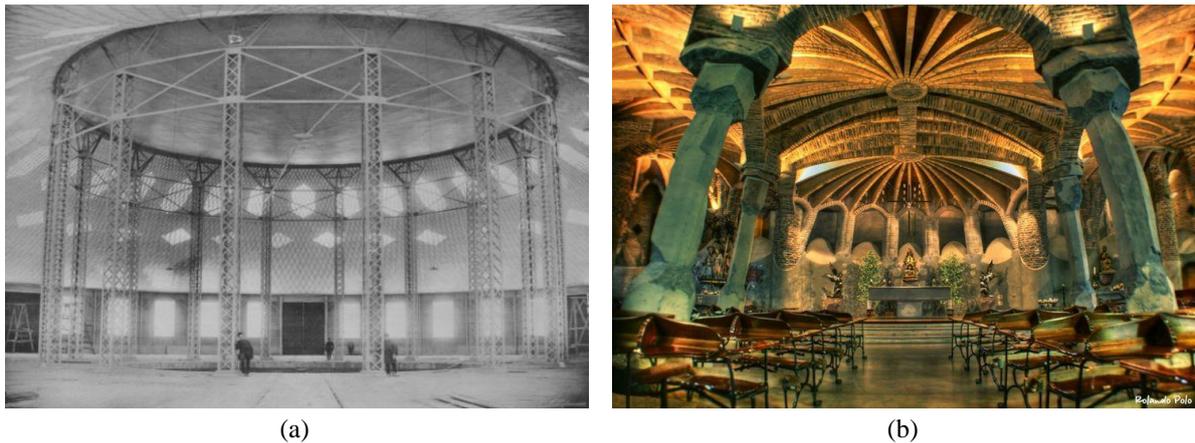


Figura 15: (a) Rotunda 1895; (b) Igreja de pedra de Colônia Guell 1898.

Para Lienhard (2014) com o aumento dos profissionais da área da construção civil, como mestres de obras, arquitetos e engenheiros estruturais utilizando simplificada teoria estática, limitou sistematicamente o conceito integrado da estrutura ativa em flexão em estruturas de edifícios. Um conjunto de geometrias bem definidas e tipologias estruturais foram a base para a maioria dos estilos arquitetônicos dos séculos XIX e XX, que mesmo apresentando certa complexidade tecnológica, limitavam-se na variedade geométrica e estrutural.

Somente a partir de 1950, através de pessoas como Buckminster Fuller e Frei Otto, e suas equipes interdisciplinares de arquitetos e engenheiros, os princípios de uma nova alternativa estrutural através de uma construção leve é que ressurgem no contexto da arquitetura e engenharia a concepção de formas complexas baseadas no comportamento elástico e adaptativo de materiais.

Em paralelo ao desenvolvimento de estruturas leves, surgem então novos materiais. O Polímero Reforçado com Fibras – mais conhecido como *Fiber Reinforced Polymers* (FRP) na literatura internacional – foi introduzido na mesma época, oferecendo uma relação única de alta resistência para baixa rigidez à flexão. Um exemplo de fácil compreensão no uso destes materiais está nas estruturas de tendas dos dias atuais, utilizando dos mesmos princípios das estruturas ativas em flexão encontradas nas tendas nômades.

Para Knippers *et al.* (2010) as primeiras construções arquitetônicas feitas com FRP foram a *House of the Future* pela Monsanto Chemical Company em 1954 (Figura 16a) e Futuro por Suuronen em 1968 (Figura 16b), utilizando especificamente polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP). Esses projetos usam alta tecnologia em sua aparência formal, dependendo de técnicas específicas de laminação manual para a produção de suas superfícies curvas, atingindo um nível intermediário de aplicação na arquitetura com o *Fly's Eye Domes* de Buckminster Fuller em 1975 (Figura 17).

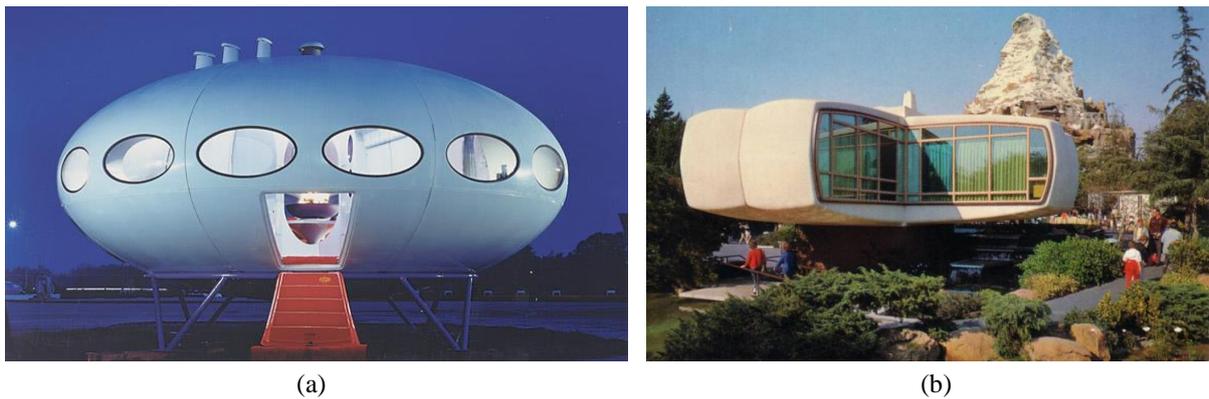


Figura 16: (a) Casa do Futuro 1954; (b) Futuro 1968.



Figura 17: Fly's Eye Domes 1975.

O mesmo interesse por estruturas leves ocasionou em grandes pesquisas que levaram ao interesse pela *gridshell*³. Entretanto, técnicas de simulação da época dos estudos para encontrar a forma não eram capazes de simular grandes deformações elásticas. Sendo assim, o método utilizado era o modelo de suspensão, onde os tornos de madeira inicialmente planos formando uma grade eram empurrados para a forma desejada, determinada pela suspensão modelo. Em 1960, Frei Otto iniciou uma intensa pesquisa sobre as *gridshells*, que depois de

³ Termo utilizado para estrutura que retira sua força a partir de sua dupla curvatura, formando uma espécie de casca gradeada.

algumas estruturas em protótipo, levaram a construção da primeira estrutura em *gridshell*, o Multihalle Mannheim (Figura 18a), na Alemanha, em 1974 (Happold e Liddell 1975). Apenas mais algumas estruturas dessas foram construídas, de modo a incorporar a abordagem das estruturas ativas em flexão baseadas na geometria. Outro exemplo foi o Pavilhão Japonês na Expo 2000 (Figura 19b) em Hannover, que utilizou de tubos de papelão no mesmo método de suspensão para a sua construção e como exemplo mais recente tem-se a Helsinki Zoo Tower em madeira (Figura 18c).

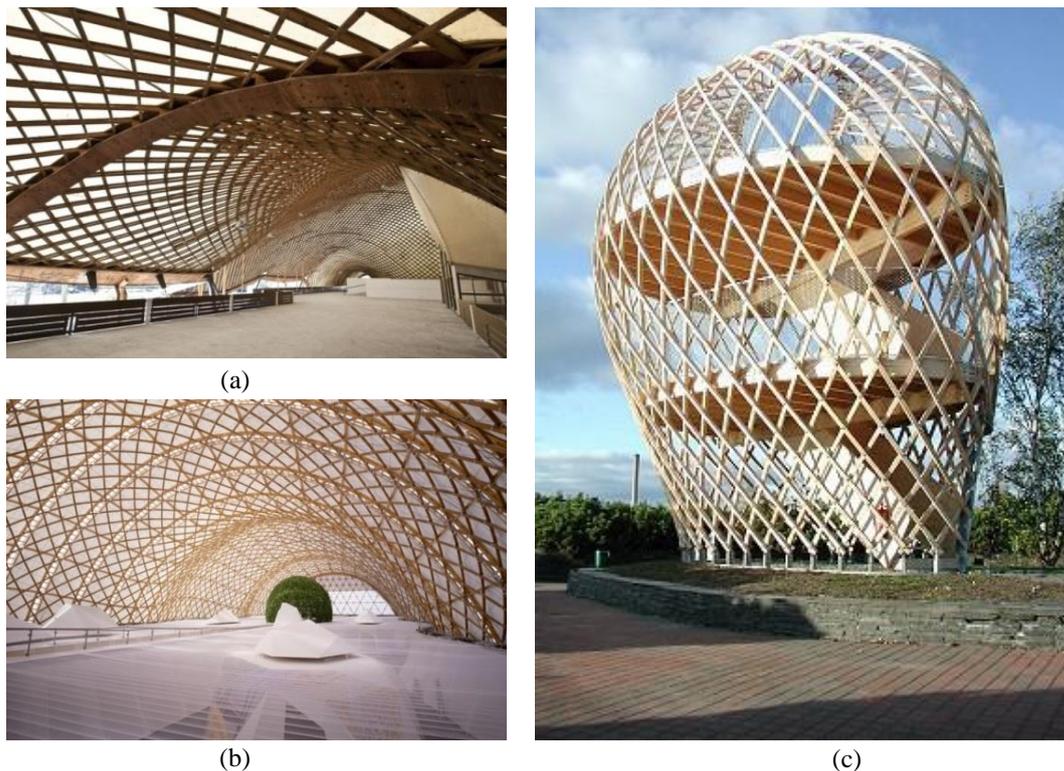


Figura 18: (a) Multihalle Mannheim 1974; (b) Pavilhão Japonês na Expo 2000; (c) Helsinki Zoo Tower 2002.

Hoje, Lienhard (2014) destaca que os recentes desenvolvimentos em técnicas de simulação permitem encontrar a forma e realizar a análise de estruturas que derivam sua geometria curva complexa unicamente através do processo de ereção em que são elasticamente deformados, o que ocasionou uma base de vários conhecimentos que incluem novos tipos de superfícies e *gridshells*, membranas estruturadas com elementos elasticamente curvados, ou seja, componentes ativos em flexão e estruturas cinéticas adaptativas e elásticas.

2.2.2 Caracterização

Denominadas como estruturas ativas em flexão pela autora – mais conhecidas na literatura internacional como *bending active structures* – são entendidas por um sistema de

deformação elástica por flexão. De acordo com Tamke *et al.* (2015) definem estruturas ativas em flexão como o uso intencional da deformação elástica, ou seja, da flexão como um processo de formação para os elementos estruturais lineares ou planos, tendo seu uso justificado para criar componentes curvos de formas arquitetônicas interessantes e versáteis.

Já para Puystiens (2015) essas estruturas podem ser descritas como vigas curvadas que baseiam sua geometria na flexão elástica de elementos inicialmente planos (Figura 19). Os elementos são formados por meio de uma deformação elástica controlada, a fim de obter a geometria desejada. Isso resulta em tensões residuais de flexão nos elementos flexionados, também chamado de pré-stress.

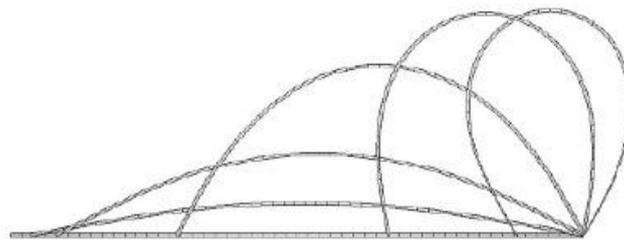


Figura 19: Exemplo de deformação elástica de uma viga.

Lienhard (2014) destaca que a principal motivação por trás do seu uso está na simplicidade de produção de elementos curvos, visto a falta de técnicas de fabricação alternativa para componentes curvos na construção de estruturas no passado. Hoje, devido a facilidade de transporte e ao processo de montagem, bem como do desempenho e a capacidade de adaptação da estrutura, o uso de estruturas ativas em flexão vem sendo cada vez maior. Outra característica das estruturas ativas por flexão destacada por este mesmo autor é o seu potencial de integração estrutural e heterogeneidade, deixando os limites das estruturas de construção estritamente categorizadas pela acumulação de diferentes estratégias de sustentação de carga.

No geral, as estruturas ativas em flexão podem ser entendidas como um tipo estrutural distinto. Porém, para Lienhard (2014) tomando o potencial de comportamento elástico de um material como ponto de partida, essas estruturas podem ser entendidas também como sendo uma abordagem, uma vez que a sua principal característica não é a de suporte de carga ou de definição geométrica, mas um processo de formação durante o qual são elasticamente flexionados. Desta forma, o autor faz uma classificação das estruturas ativas em flexão através de abordagens, baseadas no comportamento, na geometria e na integração entre as duas anteriores. Assim, na abordagem baseada no comportamento, a flexão é inicialmente utilizada intuitivamente à geometria do sistema e o comportamento estrutural é estudado

empiricamente; na abordagem baseada na geometria, realiza-se com base em análise geométrica ou métodos de forma experimental, onde ambas são utilizadas como um meio de controlar e aproximar à geometria real de flexão; e na abordagem integrada, a deformação elástica de flexão é estudada através de uma análise numérica, que permite o controle completo da geometria do material baseado em seu comportamento.

2.2.3 Contexto Atual

Atualmente, há um interesse crescente por designers e arquitetos nas vantagens do uso de FRP para estruturas ativas em flexão, principalmente a nível arquitetônico, além de outros tipos de aplicações, que sublinha uma aguçada busca pela liberdade de criação de formas curvas complexas, podendo tal interesse ser visto através das várias instalações experimentais que foram realizadas, como o projeto de design *Loop* (Figura 20), construído pela *Howeler and Yoon Architecture*⁴ em 2006, através de um modelo físico utilizando GFRP.

Visto esse potencial, arquitetos e engenheiros pesquisadores desenvolvem pequenos e médios protótipos de base conceitual, explorando as possibilidades de combinação entre elementos elasticamente curvados de FRP com membranas em nível de componentes de construção (Figura 21). Lienhard (2014) cita que a forma dos elementos dobrados pode ser controlada pela modelação da membrana e a pré-tensão no sistema pela contenção da membrana. A membrana estabiliza os elementos delgados de viga contra flambagem e reduz a deformação. À medida que a rigidez de uma membrana estrutural é muito maior que a rigidez do próprio elemento flexionado, pequenas seções transversais são viáveis, e segundo Gengnagel (2005) é o que torna a combinação dessa integração estrutural particularmente interessante para construções temporárias e móveis.



Figura 20: Projeto de design experimental *Loop* 2006

⁴ Estúdio de arquitetura e design reconhecido internacionalmente localizado em Boston, EUA.



Figura 21: (a) *Bat-Wing-Sail Research Project 2007*; (b) *Material Equilibria Installation 2012*.

Puystiens (2015) enfatiza que combinando elementos ativos em flexão com membrana têm-se grandes possibilidades para a criação de projetos inovadores e estruturas têxteis estruturalmente eficientes, apresentando um aumento importante na estabilidade estrutural sob carregamento. Além disso, os elementos ativos em flexão não só podem servir como uma estrutura de suporte, mas também como elemento estrutural de definição de forma. Por conseguinte, o número de suportes externos podem ser reduzidos em comparação com estruturas de membranas tradicionais. Na figura 22(a), é possível visualizar a mudança de forma e a capacidade de deformação de uma estrutura ativa em flexão de FRP integrada a uma membrana em um protótipo em escala menor. Este estudo, realizado por Puystiens *et al.* (2015) na *Vrije Universiteit* de Bruxelas, a flexão dos elementos é utilizada como um mecanismo de controle para evitar a perda de tensão durante a implantação, que teve como inspiração os movimentos na natureza, tais como movimentos de plantas.

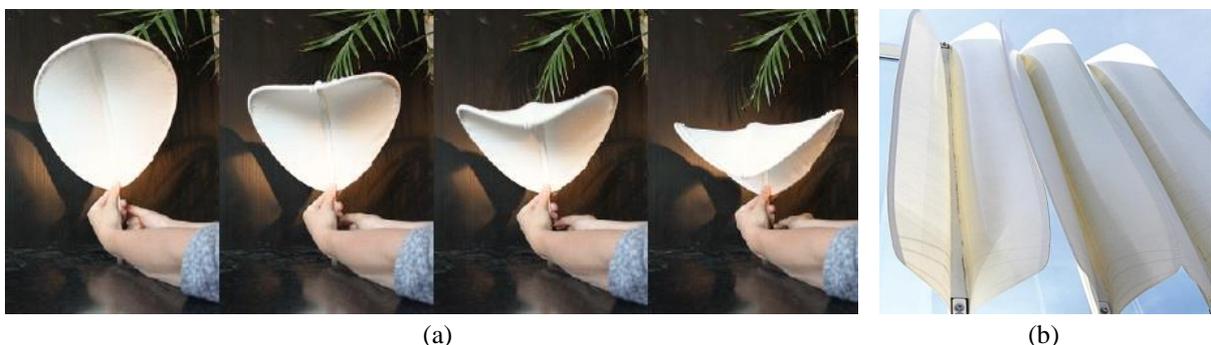


Figura 22: (a) *Protótipo de estrutura de membrana tensionada com elemento ativo em flexão 2015*; (b) *Flectofin estrutura elástica cinética*.

Na última década, o uso da natureza como fonte de inspiração para resolver problemas técnicos tornou-se cada vez mais reconhecido, o que conduz para o crescente aumento do

campo da biomimética. O *Flectofin* (Figura 22b) é outro exemplo de elemento arquitetônico criado usando soluções bio-inspiradas, na qual se baseia no mecanismo de uma planta da África do Sul conhecida como flor “*Bird of Paradise*” (estrelícia), onde sua haste central, ao ser submetida à flexão, faz com que as pétalas se abram, alterando sua forma.

Além disso, as vantagens das estruturas ativas em flexão encontram-se não somente na possibilidade de gerar diferentes formas, mas também na capacidade de adaptação, baseada na deformação elástica reversível, sendo os FRP’s materiais bastante propícios para este contexto, devido sua baixa rigidez à flexão, como já dito anteriormente.



Figura 23: Softhouse'at IBA Hamburgo 2013.

A união deste material em estruturas ativas em flexão com movimento e adaptação pode ser vista no sistema de sombreamento da fachada adaptativa da *Softhouse'at IBA* (Figura 23) em Hamburgo, construída em 2013, é um projeto de casas sustentáveis financiadas pelo governo alemão, que utiliza polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) nos parassóis flexíveis da fachada, que permitem ao usuário controlar a incidência de iluminação e ventilação na casa, ao mesmo tempo em que modificam sua aparência externa.



Figura 24: Pavilhão Temático da Expo 2012 na Coreia do Sul..

No contexto de movimento na arquitetura, mais conhecido pelo conceito da cinética, as estruturas ativas em flexão foram implantadas nesta construção - o Pavilhão Temático da Expo 2012 (Figura 24) na Coreia do Sul - correspondendo à fachada ativa com 108 lâminas individuais de GFRP que são deformadas através de uma deformação controlada, podendo adaptar a sua forma de acordo com as condições de luz e permite efeitos artísticos de iluminação. Esse movimento é criado através de um mecanismo, comunicado por sensores, que aplica forças de compressão nos limites superiores e inferiores de cada lâmina, criando uma deformação no plástico, permitindo a fachada abrir e fechar (Figura 25).



Figura 25: Imagens do processo de movimento da fachada através da flexão dos elementos.

2.3 ARQUITECTURA CINÉTICA

2.3.1 Contexto Histórico

O conceito de cinética na arquitetura está fortemente associado com as origens e com a evolução do modo de viver do Homem. Está diretamente relacionado ao tempo e à forma como a nível espacial e material esta lida com o movimento dos corpos, dos sentidos e das necessidades. De acordo com Kronenburg (2003), as antigas civilizações nômades não tendo uma habitação fixa e vivendo em constante deslocamento em busca de alimentos e condições de subsistência, desenvolveram abrigos passíveis de serem rapidamente montados e desmontados, além de facilmente transportáveis, denominados por tendas, tendo assim a mesma base de origem dos outros princípios estruturais adaptativos revisados anteriormente. Estes abrigos, mesmo apresentando variadas dimensões, formas e tipologias construtivas

devido ao clima e aos tipos de uso, possuem como denominador comum os conceitos originais de portabilidade, flexibilidade e movimento.

Com o sedentarismo das civilizações nômadas, devido a descoberta da agricultura e outros meios de subsistência fixos, acabaram por definir e ocupar o seu próprio território, ocasionando o surgimento de novas e variadas tipologias construtivas, diversas técnicas e materiais. A partir disso – e durante muito tempo - as novas formas de habitar foram pensadas com um caráter permanente e imóvel. Entretanto, a arquitectura vem explorado ao longo da história várias formas de lidar com o movimento. Moreira (2013) destaca o movimento dos ocupantes, os efeitos óticos causados pela mudança de luz ou da umidade, pelo desgaste dos materiais ou pela sensação de movimento criado por algumas formas e superfícies dinâmicas.

Kronenburg (2009) afirma que o movimento realizado por pequenos elementos de configuração das construções como portas, janelas e persianas, por exemplo, mantêm desde sempre o conceito da cinética presente no contexto da arquitectura, exemplos claros estes de sistemas de controle interno. Todavia, os primeiros passos para a nova era da incorporação tecnológica do movimento na arquitectura foi dado, segundo Moreira (2013) por Yona Friedman, arquiteto húngaro que acreditava numa arquitectura mais flexível, onde o habitante deveria ter um papel importante na personalização do seu próprio espaço lançando, em um manifesto intitulado *l'Architecture Mobile* em 1958, bases para o desenvolvimento de uma arquitectura que contém em si a possibilidade de se adaptar às diferentes necessidades dos seus utilizadores.

Com o surgimento de novas tecnologias potenciadas pelas recentes descobertas científicas, vários arquitetos inspiram-se como Cedric Price. Seu projeto do *Fun Palace*, juntamente com *Plug-in-City*, do grupo Archigram, em 1964, foram percursos de uma nova ideia de arquitectura, defendendo os princípios de um processo arquitetônico indeterminado, flexível e responsivo às mudanças e necessidades dos seus utilizadores no seu tempo (Fox *et al.* 2009), tornando os anos seguintes um período de abundante procura pela introdução das novas tecnologias nas estruturas arquitetônicas. Mas no entanto as técnicas construtivas ainda não acompanhavam esta visão revolucionária, ocasionando com que as ideias permanecem apenas no papel.

Somente em 1987, através da fachada de painéis cinéticos do Instituto Mundo Árabe (Figura 26) de Jean Nouvel em Paris, estreia um discurso à volta de sistemas móveis na arquitectura, em que o movimento controlado via manual, elétrico ou digital permite uma transformação e mediação do ambiente numa visão mais geral, desde o clima até o comportamento humano, cita Kolaveric (2003). De acordo com Shairadin (2014) esse edifício

também corresponde ao interesse de adotar fachadas cinéticas como maneira de melhorar o desempenho funcional de edifícios, mais especificamente quanto ao conforto lumínico.

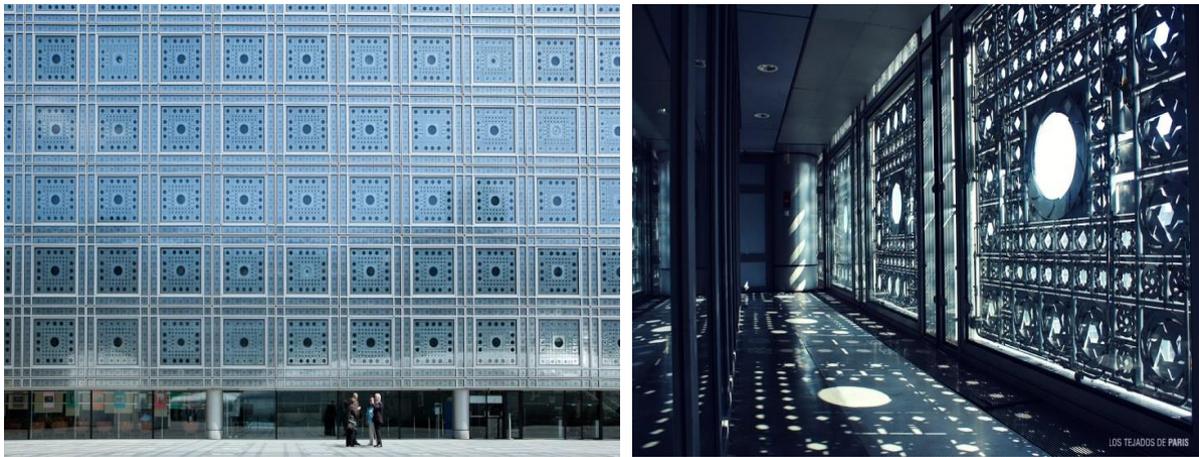


Figura 26: Instituto Mundo Arabe de 1987 em Paris.

Forte relação do conceito da cinética na arquitetura ocorre também ao longo da história da humanidade, tendo a Natureza como elemento inspirador para o desenvolvimento tecnológico. À medida que o Homem foi ganhando conhecimento da Natureza através do surgimento da biologia, descobre nos seres vivos sistemas complexos e intrincados, estando sua capacidade de sobrevivência relacionada com a sua aptidão de se adaptar e mudar a esse mesmo ambiente com a ajuda de sistemas especializados. Anteriormente a Charles Darwin e sua tese sobre a evolução e diversificação dos organismos com base na seleção natural e sexual, em que descreve que - os seres vivos, através de um processo evolutivo, estão presentes em meios heterogêneos e desenvolvem uma incrível variedade de formas complexas e funcionais de adaptação - havia uma ideia de a natureza ser fundamentalmente estática e sem evolução aparente dos seres vivos.

A mão humana é um exemplo de complexo e desenvolvido sistema cinético presente no Ser Humano, onde se constitui por uma estrutura óssea completamente articulada e suportada por diversos músculos, tendões e ligamentos que são capazes de manipular e criar objetos através de uma extrema integração entre firmeza e precisão (Figura 27).



Figura 27: Estrutura óssea articulada da mão humana.

É possível também encontrar nos seres vivos adaptações mais dinâmicas, como o caso do Girassol, que por ser uma planta heliotrópica, se comporta em função do movimento do sol, ou seja, roda em tempo real para acompanhar o sol e receber luz solar.

Numa tentativa de criar uma maior relação de simbiose com o Ser Humano, a arquitectura sempre procurou no conhecimento biológico novos métodos e ferramentas para a sua materialização (Moreira 2013). A busca por construções que possam desenvolver uma relação mais difundida com a natureza somente acontece com as mais recentes tecnologias, que integram novas técnicas, formas e materiais, e transferem alguns conceitos existentes no mundo biológico para o campo arquitetônico, conceitos esses como adaptação e inteligência.

Os recentes progressos tecnológicos, tendo principalmente o conhecimento da engenharia mecânica fundindo-se cada vez mais com o eletrônico, trazem mudanças significativas ao nível do conforto do Homem e ocasiona uma constante evolução e aperfeiçoamento do conceito da cinética na arquitectura e a sua relação como usuário e o meio ambiente, trazendo consigo novos conceitos e soluções arquitetônicas derivadas da Natureza, que evoluem com o passar do tempo e a relação do organismo vivo com a mesma.

2.3.2 Caracterização

A cinética na arquitectura é um desenvolvimento tecnológico como base de uma sociedade em constante mudança, que influencia na evolução da arquitectura contemporânea no sentido de uma maior flexibilidade e adaptação em resposta ao processo evolutivo do Homem e ao dinamismo do seu meio envolvente.

Segundo Fox (2003) este termo caracteriza-se por ter um conceito bastante amplo no contexto da arquitectura, pois pode abranger simultaneamente diversas áreas de conhecimento tais como a engenharia estrutural, na mecânica e eletrônica, baseando-se na concepção de edifícios em que as transformações mecanizadas das estruturas visam alterar a forma do edifício, de modo a corresponder às necessidades dos usuários no interior e adaptarem-se as condicionantes climáticas exteriores. Portanto, a arquitectura cinética pode ser definida como construções e/ou componentes construtivos com mobilidade, localização e/ou geometrias variáveis (Fox 2003).

Para Razaz (2010) este princípio arquitetônico é caracterizado pela concepção de espaços e elementos que podem fisicamente reconfigurar-se de modo a responder às novas necessidades, através do qual é formada uma arquitectura adaptável. Enquanto Sheridan (2000) cita que a real arquitectura cinética é constituída por uma série de elementos

interligados, como estrutura, conexões, atuadores, materiais e sistemas de controle, que constituem uma estrutura de transição dinâmica.

Para além destes conceitos gerais, Wada *et al.* (1991) descreve que dentro do conceito da cinética na arquitectura existem duas categoriais elementares: estruturas adaptáveis e estruturas sensoriais. As estruturas adaptativas incluem atuadores que permitem alterar o estado e/ou as características de uma maneira controlada. As estruturas sensoriais incluem sensores que monitoram e determinam o seu estado e/ou características. Escreve ainda, portanto, que estruturas adaptativas não incluem sensores, enquanto as estruturas sensoriais não contêm atuadores. Sendo assim, quando uma estrutura inclui ambos – atuadores e sensores – havendo uma interação entre os dois sistemas, é considerada uma estrutura ativa.

O movimento aplicado nas composições arquitetônicas está diretamente relacionado com as transformações geométricas dos seus elementos, podendo ocorrer de quatro formas: translação, rotação, escala e deformação (Figura 28), como destaca Moreira (2013) citando estes tipos conforme o sistema de classificação de Jules Moloney⁵.

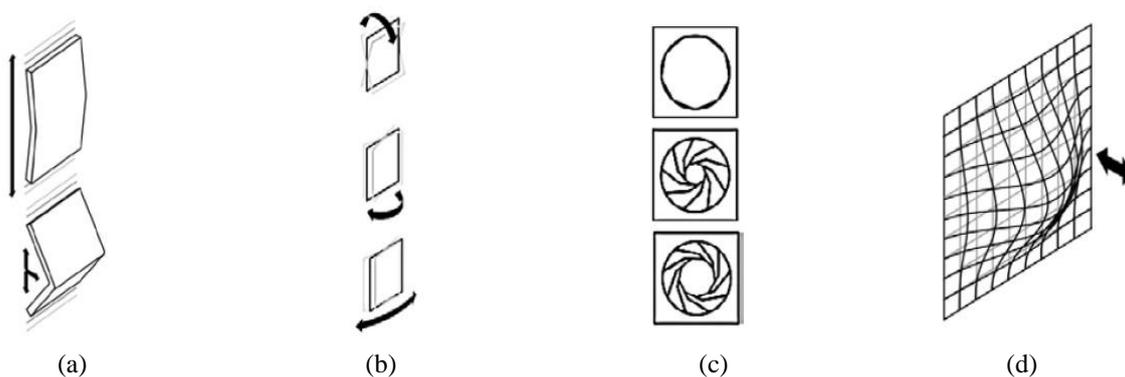


Figura 28: Tipos de movimento na arquitetura (a) Translação; (b) Rotação; (c) Escala; (d) Deformação.

O que possibilita tais movimentos nas estruturas são os meios cinéticos disponíveis, caracterizados por pneumáticos, mecânicos, magnéticos, químicos e naturais por Fox e Kemp (2009) em *Interactive Architecture*, destacando também que, independente do atuador de movimento, este pode surgir de maneiras distintas na arquitectura, classificando como categorias tipológicas cinéticas nomeadamente estruturas *transportáveis*, *independentes* e *integradas* (Figura 29).

De caráter efêmero, as estruturas transportáveis são passíveis de serem construídas e desconstruídas em locais diferentes temporariamente (Figura 30). As estruturas independentes são elementos cinéticos que possuem total independência funcional relativamente ao sistema

⁵ Professor de Arquitectura e Design Interdisciplinar na *Deakin University*, Austrália, onde pesquisa sobre arquitectura cinética.

cinético como um todo e as estruturas integradas caracterizam-se pela sua aplicação em sistemas cinéticos estruturalmente integrados num projeto arquitetônico de localização fixa.

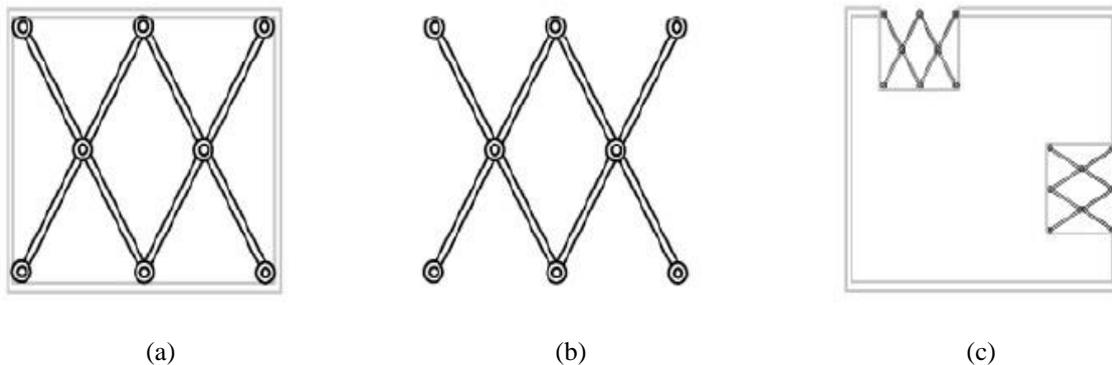


Figura 29: Tipologias Cinéticas (a) Estrutura transportável; (b) Estrutura independente; (c) Estrutura integrada.



Figura 30: Markies 1985-95 Holanda, projeto de habitação móvel do tipo transportável.

A capacidade de transformação e movimento que caracteriza a arquitetura cinética é baseada em sistemas que possuem diferentes tipos de controle, consoante as suas próprias funcionalidades. Marques (2010) destaca que normalmente esse controle é conseguido através de mecanismos manuais. Porém as evoluções tecnológicas deram origem ao desenvolvimento e implementação de sistemas computadorizados, através de mecanismos robóticos com sensores, possibilitando uma maior capacidade de resposta e adaptabilidade estrutural de maneira interativa e autônoma. Tendo em vista esse desenvolvimento ao nível dos sistemas, Fox (2000) divide os tipos de controle cinético em estruturas em seis categorias,

nomeadamente *Controle Interno*, *Controle Direto*, *Controle Indireto*, *Controle Indireto Responsivo*, *Controle Indireto Responsivo Ubíquo* e *Controle Indireto Responsivo Heurístico*.

Controle Interno

É a forma mais básica de gerar movimento e está relacionada aos tipos de estruturas desmontáveis e transportáveis, com capacidades cinéticas apenas relativas à sua própria construção e montagem, ou seja, a lógica do seu funcionamento está no próprio movimento mecânico (Figura 31).

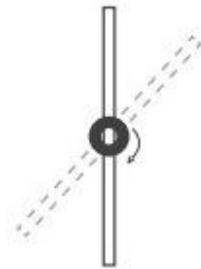


Figura 31: Esquema de funcionamento de controle interno.

Controle Direto

Neste tipo de sistema de controle, o movimento ou transformação estrutural é caracterizado por apresentar determinados mecanismos de ativação, alimentados diretamente por uma fonte de energia, quer seja manual, quer elétrica, ou outra qualquer (Figura 32).

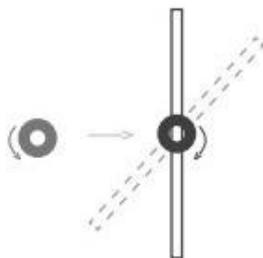


Figura 32: Sistema de funcionamento de controle direto.

Controle Indireto

Este sistema baseia-se na tecnologia aplicada à arquitectura, que permite que o controle das estruturas cinéticas seja feito de uma forma indireta, ou seja, o movimento ou transformação acontece por meio de um sensor. Após a detecção de um único estímulo externo, o sensor transmite uma mensagem ao dispositivo de controle, ativando e desativando sua fonte de energia, o que resulta na atuação ou pausa do movimento ou transformação estrutural (Figura 33).

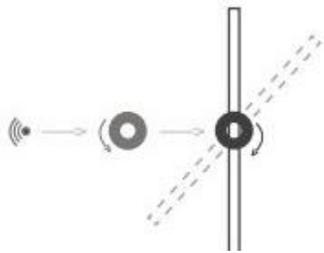


Figura 33: Sistema de funcionamento de controle indireto.

Controle Responsivo Indireto

Este sistema de controle apresenta o mesmo princípio do controle indireto, entretanto o dispositivo de controle neste caso pode ser ativado ou desativado, analisando e processando informações provenientes de diferentes sensores, que detectam estímulos externos distintos (Figura 34).

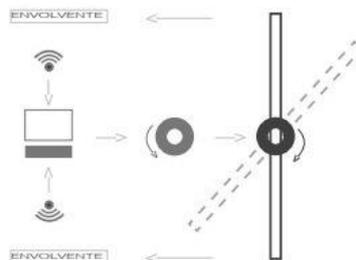


Figura 34: Sistema de funcionamento de controle responsivo indireto.

Controle Responsivo Indireto Ublíquo e Heurístico

O controle responsivo indireto pode ainda ser classificado como ubíquo, que corresponde ao resultado da combinação de vários sensores e servomotores passíveis de serem atuados de modo independente estando, no entanto, conectados em rede num único sistema de controle (Figura 35a); ou como heurístico, onde estas mesmas capacidades do ubíquo resultam da assimilação e processamento de toda a informação proveniente do seu funcionamento, de modo a adaptar o respectivo sistema ao seu meio envolvente e otimizar as suas respostas em função dos diversos estímulos sensoriais (Figura 35b).

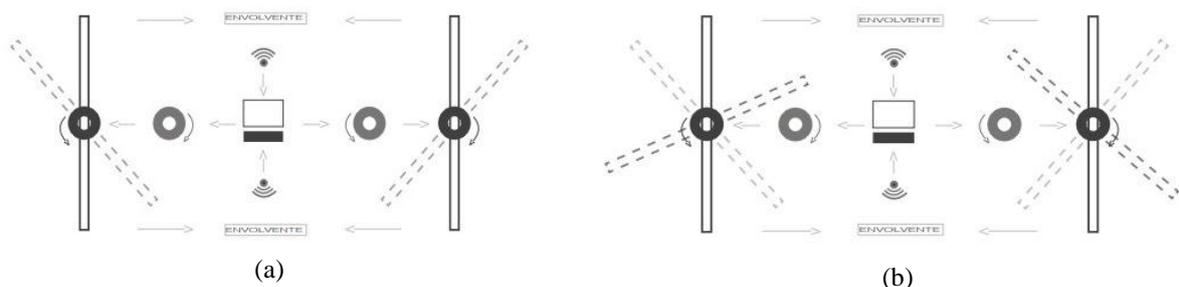


Figura 35: Sistema de funcionamento de (a) controle responsivo indireto ubíquo; (b) controle responsivo indireto heurístico.

A necessidade de integrar dispositivos computacionais nos componentes arquitetônicos, que podem ser visto no desenvolvimento através da classificação dos sistemas cinéticos acima, concentra a responsabilidade de novas tecnologias no desenho arquitetônico para estratégias sustentáveis em edifícios, o que é totalmente justificável pela realidade de moderação ambiental. Assim, o espaço construído passa a ser pensando não somente como estático e passivo, mas como uma entidade dinâmica que se ajusta as necessidades do utilizador e responde perante todas as transformações e adaptações dos seus fatores condicionantes, visando em principal o conforto dos usuários e a diminuição do impacto ambiental causado pela indústria da construção.

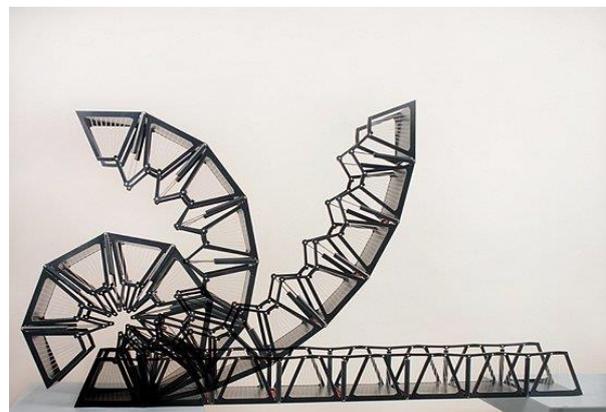
2.3.3 Contexto Atual

Em todas as áreas do conhecimento, o desenvolvimento tecnológico é cada vez mais perceptível e a arquitetura não é uma exceção. Compreendendo o conceito de cinética neste ramo e tendo visto o seu desenvolvimento na história baseado em conceitos advindos da vida nômade dos antepassados como movimento e da biologia através dos organismos vivos como adaptação, é possível encontrar um quadro atual da arquitetura que, além de incorporar tais conceitos, integra outras áreas de estudo como mecânica e eletrônica e seus potenciais conhecimentos tecnológicos emergentes.

Essa integração de conceitos e áreas leva para um novo panorama, que para além do movimento, visa à interatividade da arquitetura com o usuário e a envolvente. As teorias sobre arquitetura móvel e adaptável às diferentes necessidades da sociedade inspiraram não só os arquitetos da época – década de 50 e 60 – mas os profissionais procedentes. Entretanto, somente a partir da década de 90 é que essas ideias se tornaram tecnologicamente e economicamente mais acessíveis (Moreira 2013).



(a)



(b)

Figura 36: (a) *Quadracci Pavilion 2001*; (b) *Rolling Bridge 2004*.

Atualmente, um dos arquitetos que se tornou referência pela aplicação de conhecimentos morfológicos sobre os seres vivos na concepção de estruturas é o espanhol Santiago Calatrava. Em 2001, seu projeto Quadracci Pavilion (Figura 36a), abrigando um museu nos Estados Unidos, baseia-se em um pássaro, tendo as metafóricas asas funcionando como sombreamento, abrindo e fechando de forma a regular a quantidade de luz necessária na sala de exposições, de maneira controlada digitalmente, que podem fechar automaticamente através de uma determinada velocidade máxima do vento.

Na mesma linha, seguindo a inspiração na natureza, em 2004 o projeto da *Rolling Bridge* (Figura 36b) em Londres, marca o emprego de um sistema familiar ao de um pangolim, para a concepção de uma ponte peatonal, que através de um mecanismo hidráulico silencioso permite que a ponte abra e feche, possibilitando o tráfego náutico. A integração dos princípios de interação da arquitetura juntamente com materiais flexíveis – como as membranas - está a trazer novas possibilidades à arquitetura e uma nova liberdade aos sistemas pneumáticos. Exemplo disto é o protótipo *Muscle* (Figura 37a), desenvolvido pelo grupo *Hyperbody*, na Holanda em 2003, que consiste em mangueiras que contraem através da pressão do ar e exercem forças, de modo que os movimentos sejam controlados por sensores que detectam o movimento e a proximidade de pessoas, permitindo reagir instantaneamente.

Os sistemas interativos e cinéticos podem alterar a configuração formal ou espacial da arquitetura, contribuindo assim para uma maior adaptabilidade e interação com o utilizador, de modo a eliminar quase por completo a barreira de comunicação entre este e a envolvente (Oosterhuis *et al.* 2008). O *Emergent Surface* projetado para investigação em 2008 segue o mesmo princípio de adaptabilidade e interatividade, patente no projeto da cobertura do edifício (Figura 37b) projetado pelo atelier Foster & Partners, que se baseia em um octógono com vários eixos de rotação, permitindo assim um melhor controle da iluminação (Moreira 2013).



(a)



(b)

Figura 37: (a) *Muscle* 2003; (b) *City of Justice* 2006.

É possível encontrar outros estudos e investigações a nível de interatividade entre a arquitetura, o Homem e o meio envolvente, tais com o uso da tecnologia na compreensão e na reprodução artificial dos fenômenos biológicos. Todavia, apesar de todos estes constantes desenvolvimentos, o conceito de arquitetura cinética ainda representa um potencial muito pouco explorado, mas apresenta uma base de informações que possibilitam aos arquitetos a criação e a exploração de geometrias complexas, além de servir como resolução de problemas mais intrincados como comportamento energético e conforto ambiental que se enfrenta atualmente, devido às altas variações climáticas.

No cenário mais atual da arquitetura cinética, há duas obras com grande destaque, em que ambas representam este conceito em suas fachadas responsivas. Uma delas é o Pavilhão Temático na Expo 2012 – já apresentado no estudo das estruturas ativas em flexão – na Coreia do Sul, representando uma das maiores soluções cinéticas no mundo. Também concluída em 2012, as torres *Al Bahar* (Figura 38) em Abu Dhabi são grandes obras que utilizam módulos cinéticos de design computacional para uma fachada ágil à exposição ao sol, mudando sua aparência em todos os ângulos de incidência durante os diferentes dias do ano. A escolha dessa fachada responsiva busca render um ambiente interior confortável, diminuindo a necessidade energética, devido às condições climáticas extremas do local de implantação do edifício.

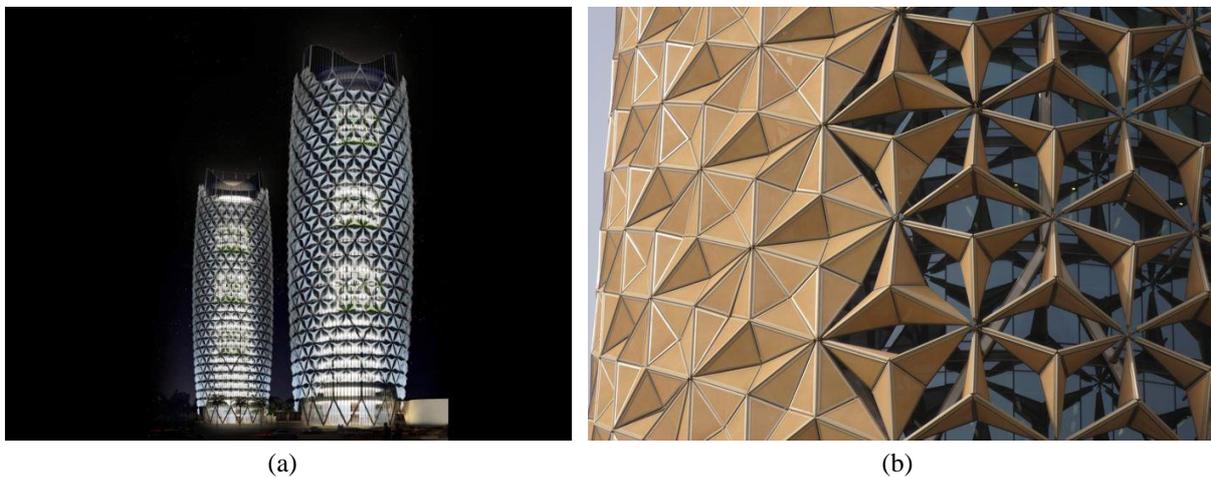


Figura 38: (a) Edifício Al Bahar 2012; (b) Módulos cinéticos da fachada responsiva do edifício Al Bahar.

A transformação e movimento em edifícios podem responder a muitas expectativas e exigências arquitetônicas, entretanto, segundo Asefi *et al.* (2011) se não estiver em conformidade com os critérios de projeto, pode ter impacto negativo na arquitetura e meio ambiente, pois o sistema deve funcionar de maneira eficiente e eficaz. Para isso, alguns critérios devem ser atentos durante a concepção, como facilidade de execução, reutilização e

redução de custos, beleza e funcionalidade, manutenção e reparo, parâmetros estes de grande importância na avaliação quanto a questão da sustentabilidade

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo teve como objetivo fornecer uma visão geral sobre o funcionamento e as formas de aplicação das estruturas em membrana, estruturas ativas em flexão e do conceito de cinética na arquitetura.

Uma vez que foi possível compreender teoricamente esses considerados princípios estruturais através da sua caracterização e da análise do seu contexto histórico e atual de aplicações na realidade da arquitetura, conclui-se que os conceitos de leveza e flexibilidade que basicamente representam as estruturas em membrana e as estruturas ativas em flexão, beneficiam a interpretação de uma linguagem estrutural única e uma abordagem para gerar novas formas estruturais. Ou seja, a eficiência dessas estruturas está associada à otimização da forma, do material e da distribuição das forças, cuja estabilidade está diretamente relacionada com o sistema suporte e o trabalho conjunto de todos os componentes estruturais em regime não-linear. Esses conceitos ainda remetem a um conceito geral de adaptabilidade, o que condiz com o estudo da cinética no contexto arquitetônico. O estudo dessa metodologia que aplica o movimento nos elementos construídos busca então destacar a capacidade dessas estruturas, além da possibilidade de atingir formas complexas e baixo peso, de mudar de forma e voltarem à sua forma inicial, sem alterar seu desempenho mecânico, originando uma estrutura inteligente que adapta-se a diferentes necessidades através da sua mudança formal.

Ressalta-se que essa capacidade adaptativa das estruturas em membrana e dos elementos ativos em flexão se baseia basicamente no comportamento elástico dos materiais e no comportamento não-linear dos elementos estruturais, o que torna essencial a compreensão da composição e as propriedades dos materiais que apresentam tais características. Torna-se, portanto, fundamental estudar as diferentes composições existentes de membranas para o uso arquitetônico e possíveis materiais que possam ser aplicados como elementos ativos em flexão – a ser explorado no próximo capítulo - uma vez que por mais que tais estruturas consideradas especiais apresentam a capacidade de adaptação que as diferem das estruturas arquitetônicas convencionais, quando submetidas ao movimento devem ser tomados muitos cuidados e materiais específicos devem ser adotados.

3 COMPONENTES E MATERIAIS

Os materiais e a arquitetura sempre apresentaram uma relação próxima. As escolhas de projeto, até ao século XIX, estiveram sempre dependentes do comportamento natural dos materiais, sendo suas características obtidas através de experimentação e observação, sendo essas descobertas empíricas fundamentais para os avanços neste campo. Hoje, com as novas ferramentas de análise e observação, é possível investigar novos materiais que também tenham a capacidade de mudar as suas características, mantendo uma boa relação com a envolvente.

Como forma de compreender melhor o comportamento dos sistemas estruturais adaptativos estudados no Capítulo 2 desta dissertação, este capítulo apresenta um aprofundamento dos materiais utilizados para os elementos estruturais e construtivos das estruturas em membrana e estruturas ativas em flexão, assim como os componentes fundamentais para que estas sejam capazes de ser movimentar e se adaptar, materializando-se, assim, a arquitetura cinética.

3.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Os elementos estruturais podem ser agrupados em elementos flexíveis, elementos rígidos e apoios. Os elementos flexíveis normalmente correspondem à membrana (elementos de superfície) e aos cabos, trabalhando apenas à tração. Os elementos rígidos trabalham em compressão ou flexo-compressão (mastros, vigas, arcos, anéis, pórticos, etc) ou a tração e compressão, das estruturas *tensegrity*⁶ e em treliças (Nunes 2008). Os apoios organizam os limites tridimensionais das superfícies das membranas, transferem as forças para a ancoragem e mantém o equilíbrio e influencia o nível de força que atua sobre as membranas.

3.1.1 Elementos Flexíveis

Elementos de superfície

⁶ O termo “tensegrity” é uma contração de “tensional integrity” e foi criado por Richard Buckminster Fuller para descrever o “princípio estrutural em que a forma da estrutura é garantida pela interação entre uma rede contínua de cabos tracionados e um conjunto de elementos comprimidos”.

Como elemento flexível das estruturas estudadas, a membrana estrutural – como já dito anteriormente - é composta por fibras que, dependendo do uso, pode ou não ter um revestimento. Tratando-se de arquitetura têxtil, existem diferentes opções de materiais, que são definidos com base nas características requeridas para o projeto e os objetivos finais da estrutura. Para Shaeffer (1996) as membranas presentes no contexto arquitetônico são realizadas utilizando basicamente quatro tipos de fibras: poliamida, poliéster, vidro e aramida. Entretanto, atualmente tem-se o destaque para o uso predominante da fibra de vidro e de poliéster.

Segundo Assis (2012) o poliéster para ser usado em membranas deve apresentar alta tenacidade, pois as características do fio tem impacto no comportamento do tecido e, conseqüentemente, da membrana. Uma característica destacável dessa fibra é o seu caráter hidrófobo⁷, o que significa que não propicia o desenvolvimento de alguns tipos de bactérias e fungos. Porém, para Blum *et al.* (2009) apud Assis (2012), mesmo o poliéster apresentando baixa capacidade de absorção de umidade, pode ocorrer o aparecimento de manchas amareladas ou marrons devido a infiltração de água entre o filamentos, caso o revestimento possuir porosidades ou não tenha penetrado corretamente no tecido, possibilitando problemas maiores como descamação do revestimento. Já a fibra de vidro apresenta como principais propriedades específicas o módulo de elasticidade reduzido, ou seja, boa capacidade de deformação, boa resistência mecânica e menor custo, porém baixas resistências à fadiga, à abrasão e à fluência, menor rigidez, e se degradam na presença de água, ácidos e solução alcalina, fato este que pode ser contornado com o uso de um adequado revestimento.

O revestimento é indispensável quando a membrana – material também considerado componente estrutural - é utilizado em contato com o exterior, pois é a primeira camada compositiva a resistir aos fatores externos. São geralmente polímeros, que conferem propriedades térmicas, acústicas e de impermeabilidade. Na arquitetura têxtil, os revestimentos mais utilizados são o policloreto de vinil (PVC), o politetrafluoretileno (PTFE) e o silicone.

O PVC é uma resina termoplástica disponível em uma variedade de cores, resiste às radiações UV, é capaz de adquirir com facilidade a forma pretendida e normalmente é utilizado juntamente com fibras de *nylon* ou poliéster. Já o PTFE e o silicone são indicados para o uso com fibras de vidro. O PTFE é quimicamente inerte, apresentando grande resistência a microrganismos e, conseqüentemente, baixa deterioração, resistência ao fogo,

⁷ Uma superfície com a presença de um material hidrófobo tem a capacidade de repelir qualquer líquido que entra em contato.

alta resistência à tração e comumente produzido na cor branca. O silicone apresenta características semelhantes ao PTFE, além de uma boa transmissão da luz.

É importante conhecer as características independentes de cada material integrante da membrana, porém algumas combinações entre tecido e revestimento resultam melhor. As composições mais comuns atualmente são as poliéster-PVC e fibra de vidro-PTFE, visto ser importante destacar também as características dessas combinações.

A membrana com tecido de fibra de vidro e cobertura com PTFE trata-se da membrana mais aplicada no caso de exigência de resistência estrutural elevada, bem como destinadas para grandes vãos ou grandes solicitações de carregamentos. De cor padrão branca, ou permitindo certo grau de translucidez devido ao vidro, apresenta maior resistência a detritos, uma maior durabilidade e comportamento não inflamável, porém possui pouca flexibilidade devido ao tecido base que pode romper, portanto não muito indicada às estruturas sujeitas a dobramentos ou mudanças bruscas de formas.

Na Europa, a grande maioria das arquiteturas têxteis utilizam membranas compostas por fibra de poliéster revestido a PVC. Essa combinação apresenta como principais características a sua flexibilidade e resistência, o que proporciona fácil instalação e grande potencial para estruturas que requerem movimento – coberturas retráteis são exemplos – além do seu menor custo unitário. Em desvantagem, podem apresentar menor durabilidade, menor resistência a esforços de tração e fraco desempenho ao fogo.

Quando a translucidez é um requisito fundamental no projeto, é possível utilizar o filme de etileno tetrafluoretileno (ETFE), basicamente formado por um filme plástico extrudido, com a mesma origem química do teflon, de superfície extremamente lisa. Pauletti (2003) escreve que mais transparente e mais leve que o vidro, o ETFE é principalmente usado em estruturas pneumáticas, é resistente às intempéries e cargas do vento. Em contrapartida é vulnerável a furos (Figura 39).



Figura 39: (a) Eden Park construído em membrana de ETFE; (b) Cubo aquático de Pequim em ETFE.

Algumas características adjacentes podem ser adquiridas na fabricação das membranas com o uso de aditivos. Esses aditivos são constituídos também de materiais poliméricos e pode-se citar o acrílico, o fluoreto de polivinilo (PVF) e o fluoreto de polivinilideno (PVDF). O PVF proporciona uma boa resistência, menor erosão ao envelhecimento e suporta os raios UV (Blum *et al.* 2004), enquanto o PVDF é o mais indicado para aumentar a vida útil da membrana, uma vez que é o mais eficiente para proteção contra amarelecimento e intempéries e resistência ao fogo (Assis 2012). Além das particularidades destacadas, ambos os aditivos podem adicionar à membrana de PVC a característica de autolimpeza.

Elementos para flexão ativa

Além da membrana têxtil propriamente dita considerada um elemento flexível das estruturas em membrana, essa dissertação estuda a estrutura ativa em flexão de modo a incorporá-la como elemento flexível adjacente à superfície da membrana. Como já citado no histórico das estruturas ativas em flexão, a madeira foi o primeiro material a ser utilizado para obter forma e rigidez através da flexão em estruturas. Bambu e a cana são exemplos de madeira macia comumente utilizadas e que apresentam perfil para a criação das estruturas ativas em flexão. Atualmente, ainda é possível encontrar uso de madeira na aplicação de estruturas ativas em flexão. O Bamboo Bar, construído no Vietnã em 2008, é um exemplo da aplicação do bambu na sua construção (Figura 40a). Marçal (2008) escreve que o bambu apresenta baixo custo, é bastante resistente a certos esforços e não tão resistentes para outros, por isso requer mão de obra especializada, mesmo sendo um material construtivo bastante simples. Além disto, apresenta baixo peso próprio, o que facilita o transporte e fácil manuseio, e pode resultar em diferentes e complexas formas arquitetônicas.



(a)



(b)

Figura 40: (a) Bamboo Bar; (b) Pavilhão pesquisa da Universidade de Stuttgart.

Outro exemplo da utilização da madeira não tão comum para as estruturas ativas em flexão é o aglomerado de madeira, que pode ser visto na estrutura temporária estática de um pavilhão pesquisa estudado e construído em 2010 pela Univerdade de Stuttgart (Figura 40b), utilizando especificamente o aglomerado de bétula (Figura 41).



Figura 41: Aglomerado de bétula.

Basicamente o aglomerado é um derivado da madeira, composto por finas lâminas unidas por adesivo, sendo uma lâmina posicionada sempre perpendicular à lâmina adjacente, o que confere maior rigidez e resistência em todas as direções do material, principalmente ao cisalhamento, ao fendilhamento e ao impacto em relação à madeira maciça, apresentando também grande durabilidade, mesmo para ambientes exteriores.

Assim como o aglomerado, outro material estudado pouco visto na incorporação das estruturas ativas em flexão é o painel sanduíche de alumínio e núcleo de polipropileno. Conhecido como *Hylite*, este material oferece uma capacidade de atingir vários efeitos de superfícies. É tridimensionalmente deformável, estável e rígido, possui baixo peso próprio, e ambos os materiais que o compõe podem ser reciclados e reutilizados.

O uso deste material pode ser visto no *Muscle ReConfigured* (Figura 42), criado pelo grupo de pesquisa *Hyperbody* na faculdade de arquitectura da TU Delft na Holanda em 2004, que corresponde a uma estrutura que se movimenta, deformando-se, através de sensores de toque e movimento. Mesmo que em pequena escala, é um exemplo de como utilizar um material para estrutura ativa em flexão de maneira cinética.

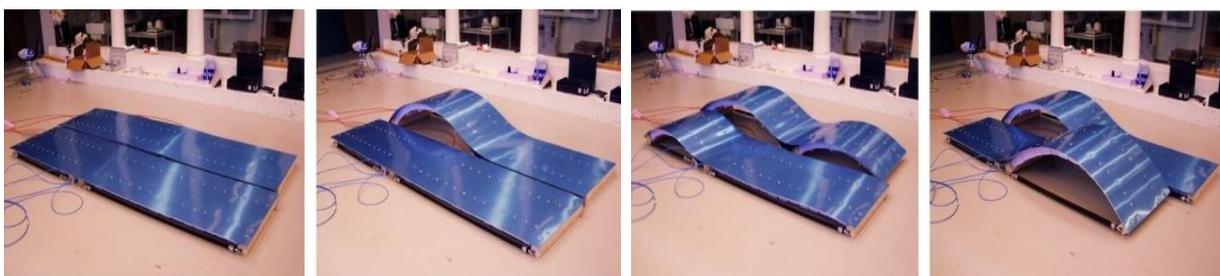


Figura 42: Hylite aplicado no *Muscle ReConfigured* 2004.

A chapa metálica, inicialmente plana, é capaz de reconfigurar-se através de mecanismos que provocam o movimento e, conseqüentemente, a mudança de sua forma, e novamente voltando a sua forma inicial plana.

Ao analisar o desenvolvimento desse princípio estrutural, é notável o grande uso de um material compósito com fibras (FRP), incorporado na concepção de projetos utilizando estruturas ativas em flexão. Grande parte dos protótipos de estudos e projetos que incorporam essas estruturas na sua concepção vem utilizando deste material.

Os materiais compósitos poliméricos ou polímeros reforçados com fibras são compostos basicamente por uma matriz polimérica e reforço de fibras de elevada resistência. Esses materiais podem ter comportamento anisotrópico⁸ ou ortotrópico⁹, dependendo do tipo e das direções das fibras, componente este que fornece resistência e rigidez ao compósito. Características como elevada resistência à tração, baixo peso específico, resistência à corrosão e elevada resistência à fadiga, por exemplo, despertaram o interesse deste material na indústria da arquitetura, engenharia e construção.



Figura 43: Exemplo de elemento arquitetônico de estrutura ativa em flexão feito em GFRP.

As principais fibras comercializadas são o vidro, o carbono e a aramida, sendo os respectivos compósitos reforçados denominados por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*). O comportamento final de um FRP é atualmente dependente dos materiais que o constituem, da disposição das fibras principais de reforço e da integração entre os referidos materiais. Para as estruturas ativas em flexão, as fibras mais usadas como reforço de FRP são a de vidro (GFRP) e carbono (CFRP).

As fibras que reforçam a matriz dos GFRP são de vidro – óxidos metálicos essencialmente compostos por sílica, inorgânicos e amorfos. As propriedades são semelhantes

⁸ Anisotropia é a característica que uma substância ou material possui em que certa propriedade física varia com a direção.

⁹ Ortotropia é a propriedade de uma determinado material apresentar características físicas diferentes consoante a orientação espacial.

entre os tipos de fibras, destacando-se especificamente na fibra de vidro o módulo de elasticidade reduzido, visto que a rigidez das fibras tem grande influência na rigidez do material compósito final. Tal propriedade pode ser considerada uma desvantagem, mas é considerável para a aplicação de estruturas ativas em flexão. Ventura (2009) afirma que as fibras de vidro são o reforço mais usado e de menor custo. Já o CFRP é composto por fibras de carbono, ou de grafite como pode também ser denominada, das quais se destacam pela excepcional razão entre resistência mecânica e peso e alta razão de módulo elástico e peso (Mallick 2007).

Fibra de Vidro	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência à tração e compressão - Baixo custo relativamente às outras fibras - Elevada resistência ao fogo - Boas propriedades de isolamento acústico, térmico e elétrico 	<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de elasticidade reduzido - Elevada massa específica - Sensibilidade à abrasão - Sensibilidade a temperaturas elevadas - Baixa resistência à fadiga

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da fibra de vidro. Fonte: Moreira 2009.

Fibra de Carbono	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência à tração - Elevado módulo de elasticidade longitudinal - Baixa massa específica - Elevada condutividade elétrica - Elevada estabilidade dimensional - Baixo coeficiente de dilatação térmica - Bom comportamento a elevadas temperaturas - Inércia química exceto em ambientes fortemente oxidantes - Boas características de amortecimento estrutural 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzida resistência ao impacto - Elevada condutividade térmica - Fratura frágil - Baixa deformação antes da fratura - Baixa resistência à compressão - Custo elevado

Tabela 2: Vantagens e desvantagens da fibra de carbono. Fonte: Moreira 2009.

Em relação as matrizes poliméricas, estas dividem-se essencialmente em dois grupos: as resinas termoendurecíveis e as termoplásticas. A principal diferença entre estes dois grupos é que os termoplásticos quando voltam a ser aquecidos podem adquirir outra forma, enquanto os termoendurecíveis uma vez aquecidos a sua forma não se altera. Elas têm a função de envolver e aglutinar as fibras para garantir adequada transferência de tensões entre as mesmas e protegê-las contra agressões ambientais e desgastes. No caso de GFRP e CFRP, as resinas

utilizadas são as termoendurecíveis, sendo as mais comuns as de base poliéster, epoxídicas, ésteres vinílicos e fenólicas. O uso destas matrizes resultam propriedades mecânicas vantajosas à temperatura ambiente, baixo peso, bem como processos fáceis de fabrico e custo reduzido. Exemplos de elementos em GFRP e CFRP são os perfis, tubos ou barras pultrudidos reforçados com fibras.

Visto as características do FRP, é fácil perceber seu potencial para seu uso integrado à membrana, de modo a configurarem outra opção de elementos flexíveis de superfície.

Cabos

Estes elementos são instalados ao longo da superfície não só como reforço da membrana, mas também para transferir as tensões até aos bordos rígidos, além da sua capacidade de deformação e acompanhamento da forma. Comumente, estes elementos são compostos por cabos de aço (Ferreira 2010). O cabo é o elemento do sistema suporte mais leve e flexível, sem rigidez à flexão e compressão, devido a sua configuração – comprimento predominante em relação à sua seção transversal – mas quando tracionado apresenta um forma estável.

A predominância do aço nas aplicações usuais decorre das suas características mecânicas favoráveis, tais como a sua trabalhabilidade, altas resistências à tração, à fadiga e à abrasão, aliadas à ductilidade e à flexibilidade, que redundam em pequenas seções transversais e, conseqüentemente, pequena densidade linear. Por outro lado, os cabos de aço apresentam relações lineares numa porção pequena da sua capacidade portante, o que frequentemente obriga a considerar relações tensão-deformação não lineares, sob pena de cair-se em sobre dimensionamento (Leonard 1988).

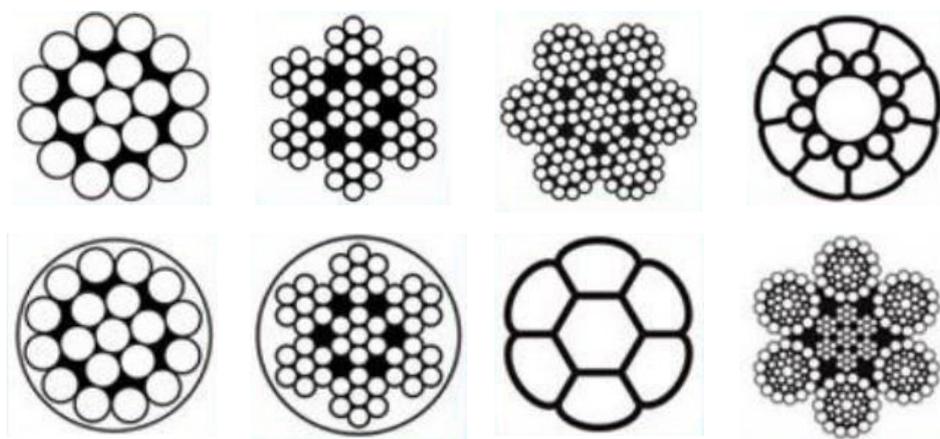


Figura 44: Seções de cabos de aço inoxidável.

A Figura 44 apresenta seções de cabos inoxidáveis existentes no mercado atualmente. Segundo Ferreira (2010), um cabo é formado por uma corda ou por uma associação paralela de cordas ou cordões, sendo que cordões são constituídos por arames de aço e cordas são formadas pela associação de cordões. As características técnicas de um cabo – como carga mínima de ruptura, peso próprio e diâmetro – variam mediante as dimensões da sua seção, o seu arranjo e os materiais utilizados.

3.1.2 Elementos Rígidos

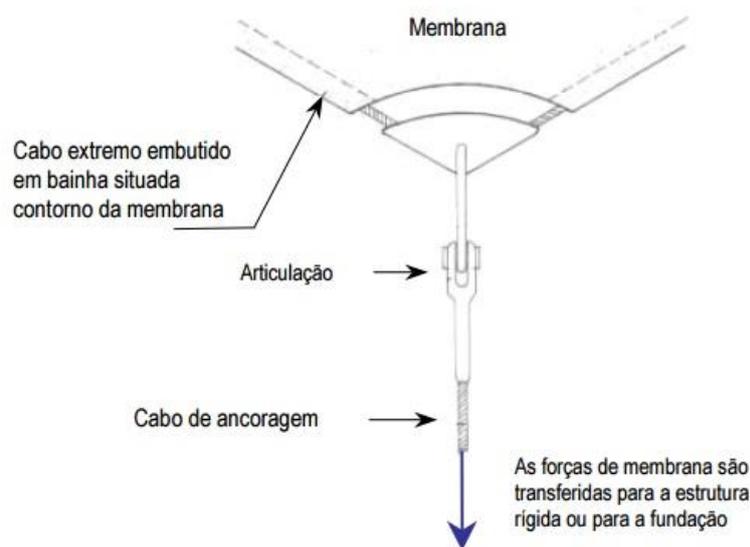


Figura 45: Elementos de uma estrutura em membrana.

Inicialmente, a Figura 45 demonstra a relação entre os elementos flexíveis e os elementos rígidos de uma estrutura convencional em membranas. Através de uma ancoragem, as forças suportadas pelo elemento de superfície são transferidas para os elementos rígidos, onde estes traduzem a tensão para que a membrana alcance seu pré-tracionamento. Também conhecidas como conexões, elas representam o ponto crítico dessas estruturas, pois permitem além da ligação, o fluxo das cargas e um meio de tensionar os elementos e, conseqüentemente, seu desempenho resulta do trabalho conjunto entre arquitetos e engenheiros (Nunes 2008).

Os elementos rígidos, também conhecidos como mastros, vigas, arcos, anéis, pórticos, etc. são normalmente compostos por perfis tubulares de aço, que podem conformar diferentes tipos de configuração estrutural, de modo a viabilizarem estruturas com dimensões e peso reduzido, bem como arranjos de grande eficiência e simplicidade, otimizando as forças dos

sistemas (Figura 46). Nas estruturas mais usuais em membrana, onde tem-se o uso dos mastros, estes são submetidos apenas à compressão axial, portanto quanto mais afastado o material estiver do centro de gravidade da seção da barra, mais difícil será girar a seção e o mastro flambar¹⁰, ou seja, perder a estabilidade.

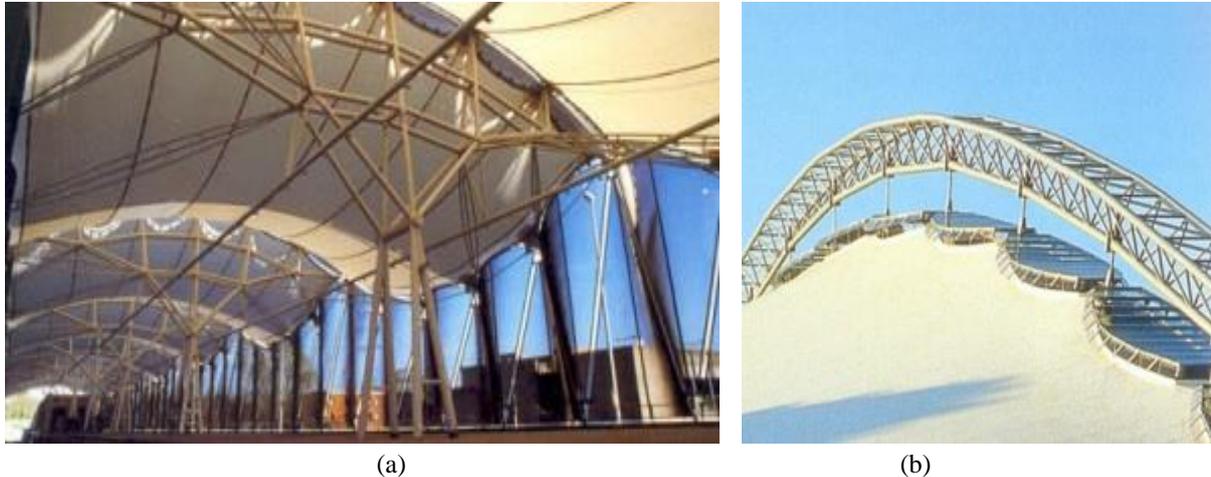


Figura 46: (a) Exemplo de mastros em tensoestrutura; (b) Estrutura em treliça de apoio à membrana.

Vale ressaltar que os tipos de elementos rígidos podem mudar em casos em que a estrutura de membrana esteja sujeita a mobilidade. Nesses casos, é possível identificar uso predominante de estruturas metálicas – entre aço e alumínio – que através de diferentes tipos de mecanismos integrados à estrutura em que a membrana se apoia, fornece a capacidade de movimento, constituindo estruturas dobráveis, retráteis, pneumáticas, conversíveis, entre outras (Figura 47). E em casos em que somente a membrana esteja apta ao movimento, ou seja, em membrana apoiada em estrutura fixa, tem-se predominância no uso de cabos de aço.



Figura 47: (a) Estrutura conversível em membrana do Pavilhão da Venezuela Expo 2000; (b) Estrutura metálica para mobilidade estrutural tipo Umbrella.

¹⁰ Flambagem é a perda de estabilidade, por deslocamento lateral do pilar, bem antes que seja atingida a tensão de ruptura à compressão do material.

3.1.3 Apoios

As bases dos mastros, também denominados apoios, são fixadas numa base fundação (Figura 48a). Podem apresentar seção estática, mas normalmente são articuladas possibilitando a facilidade de ajuste e a liberdade de movimento (rotação) em duas direções (Figura 48b), transmitindo a flexibilidade necessária ao sistema. A capacidade rotacional dos mastros é obtida com a colocação de conexão esférica, cujo desempenho pode aumentar com o acréscimo de um material flexível entre a base do mastro e o apoio.

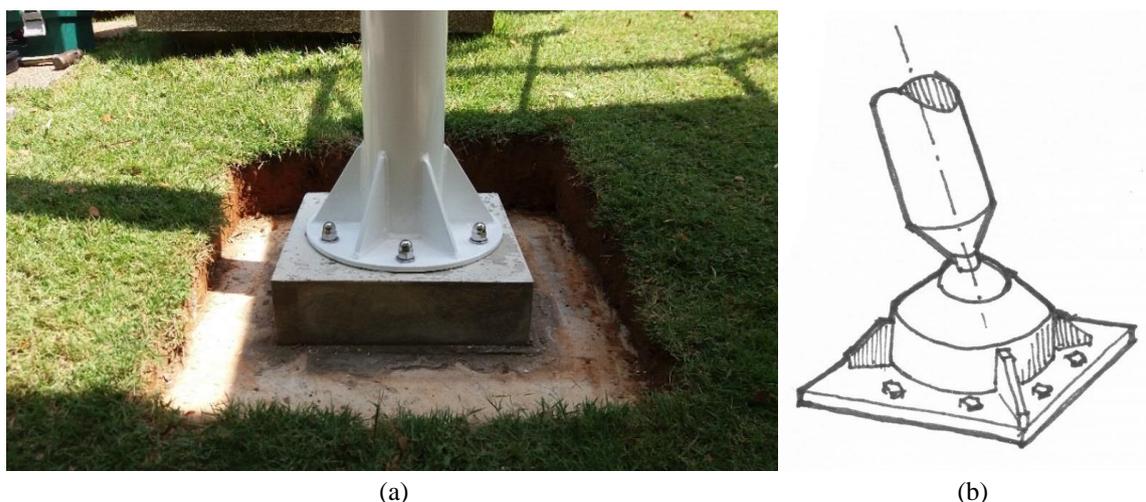


Figura 48:(a) Apoio fixo numa base de fundação; (b) Articulação entre apoio fixo e base do mastro.

3.1.4 Acabamentos e remates

Em algumas situações e aplicações, devido às dimensões das superfícies e para facilitar o posicionamento e montagem da membrana no local, é necessário que o tecido seja dividido em módulos, posteriormente conectado através de uniões, que podem ser costuradas, soldadas ou unidas através do uso de grampos metálicos. As terminações dos tecidos são normalmente dobradas e soldadas, envolvendo e possibilitando a passagem dos elementos de borda, nos quais permitem o ajuste e o tensionamento das superfícies (Figuras 49 e 50).

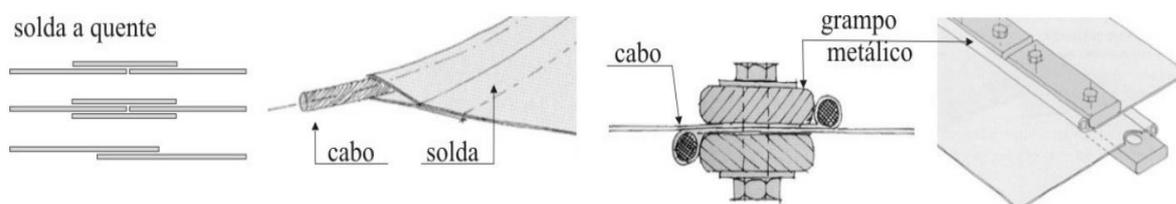


Figura 49: Modelos de ligações e acabamentos da membrana.

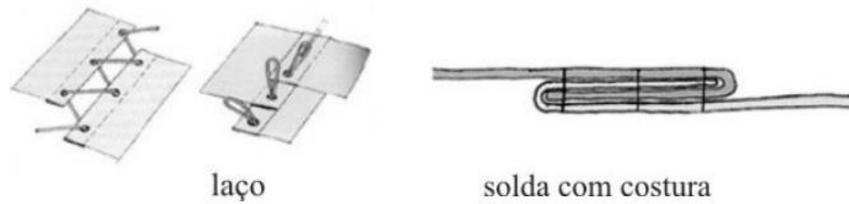


Figura 50: Modelos de ligações e acabamentos da membrana.

Além disto, o ajuste dos elementos de borda é realizado nas terminações ou quinas da membrana, que são os pontos de ligação dessas com as ligações do sistema suporte. Para tal, são utilizados elementos braçadeiras com soquetes.

3.2 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

3.2.1 Atuadores Cinéticos

Tendo em vista que para a incorporação da cinética na arquitetura são necessários mecanismos compostos por atuadores, integrados ou não com sensores, para que seja possível a realização do movimento desejado, torna-se importante destacar alguns dos atuadores mais habitualmente utilizados. Mas antes, é importante entender os sistemas de atuação, que dividem-se em pneumáticos, mecânicos, magnéticos, químicos e naturais (Fox *et al.* 2009). Porém, na arquitetura são mais vistos os sistemas pneumáticos e mecânicos.

Os sistemas pneumáticos são sistemas estabilizados integralmente ou parcialmente pela atuação de gases na membrana e apresentam como atuador uma bomba motorizada (ventilador) que cria a pressão necessária para a sustentação do sistema estrutural através de lâminas, engrenagens, parafusos ou pistões (Figura 51 e 52).

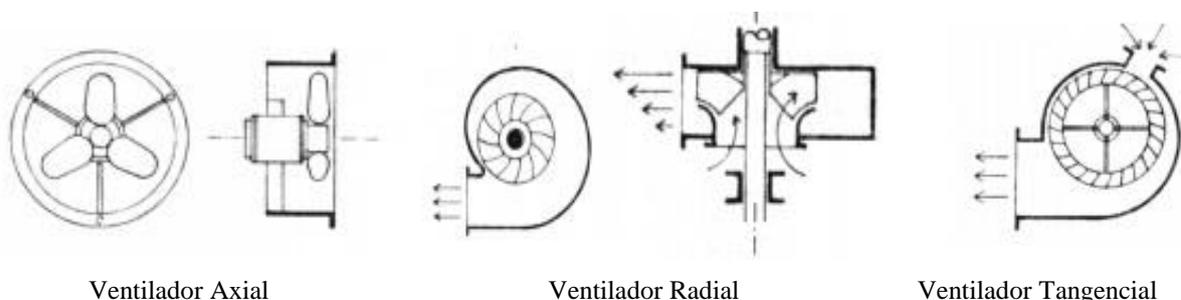


Figura 51: Tipos de mecanismos - ventiladores - em estruturas cinéticas pneumáticas.



Figura 52: Tipos de tubo para transferência do ar para a estrutura.

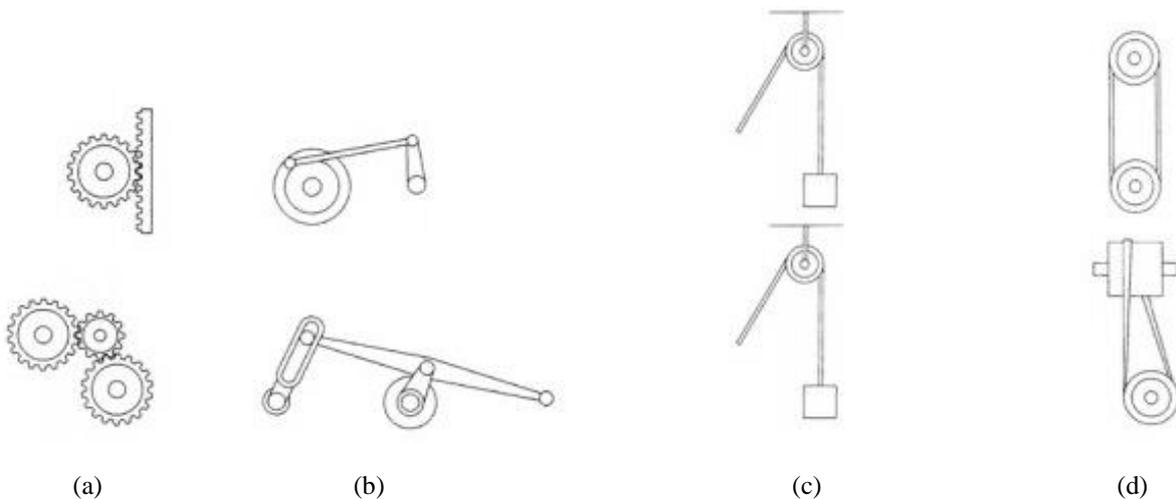


Figura 53: Tipologias comuns de atuadores mecânicos (a) simples; (b) articulados; (c) com cordas e (d) de banda.

O modo mecânico de funcionamento é o mais comum entre os sistemas de atuadores e consiste na transformação de forças de forma a realizar um trabalho. Basicamente são compostos por um elemento estabilizador que é fixo e elementos móveis que podem variar, gerando diferentes tipos de movimentos. Moreira (2013) exemplifica alguns meios mecânicos através de ligações de rodas e roldanas, conforme figura 53.

3.2.2 Sistemas Ativos de Controle

Os sistemas ativos de controle, segundo Fox (2000), são sistemas utilizados especificamente para interpretar circunstâncias funcionais e resultar em movimentos controlados por motores diretos, através de uma tecnologia de sensor como um mecanismo de controle computacional, alterando a forma, de modo a responder de maneira adaptativa as mudanças nas necessidades humanas. Assim, o autor descreve como computação embutida esta tecnologia de sensores, como um meio para controlar ativamente objetos cinéticos no ambiente construído em resposta a alterações.

Sensor é um termo empregado para designar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente, podendo esta ser luminosa, térmica ou cinética, relacionando informações sobre uma grandeza física que precisa ser mensurada como temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, entre outras. Todavia, um sistema de automação é composto não apenas por sensores, mas também por atuadores, onde em conjunto verificam e interferem no ambiente controlado. Dentre os tipos de sensores, têm-se como os mais comuns os sensores classificados como mecânicos, fotoelétricos, térmicos, capacitivos, indutivos ou ultrassônicos. Na arquitetura cinética podem-se destacar os sensores:

Sensor Fotoelétrico

São sensores que trabalham com a luz. Podem ser subclassificados como sensores foto-resistores, nos quais tem sua resistência elétrica dependente da quantidade de luz incidente; a fotocélula, que além de ser sensível pode ser usada para gerar energia elétrica a partir da luz solar; além do fotodiodo e fototransistor.

Sensor Térmico

São sensores que variam de acordo com a variação de temperatura do meio em que se encontram, podendo seu resistor ser NTC (*Negative Temperature Coefficient*) cuja resistência diminui ou PTC (*Positive Temperature Coefficient*) cuja resistência aumenta, de acordo com o aumento da temperatura.

Sensor Ultrassônico

Sensores capazes de detectar objetos a certa distância.

Os atuadores são dispositivos que modificam com uma variável controlada, ou seja, recebem um sinal proveniente do controlador (sensor) e agem sobre o sistema controlado, sendo uma variável correspondente a fenômenos físicos como temperatura, pressão, intensidade luminosa, entre outras. São exemplos de atuadores válvulas ou cilindros, que podem ser pneumáticos e hidráulicos.

Em alguns sistemas em que a saída de um sensor, após ser sensibilizado por uma energia externa aconteça em um nível de tensão muito baixo, torna-se necessária a sua amplificação, sendo, portanto necessário um amplificador no sistema que seja capaz de elevar o nível do sinal para sua efetiva utilização.

3.3 NOVOS MATERIAIS

Devido aos avanços na nanotecnologia, biotecnologia e eletrônica, que investigam as propriedades dos materiais e desenvolvem métodos para alterá-los e produzir comportamentos dinâmicos capazes de dotar a materialidade de um funcionamento interativo que consiga ler e adaptar-se a diferentes condições envolventes (Sousa 2005), possibilitam atualmente aos arquitetos e engenheiros uma maior liberdade no uso dos materiais, conseguindo pensar além das suas características específicas.

O dióxido de titânio é um componente que fornece a capacidade autossuficiente de limpeza a um material, ou seja, são autolaváveis unicamente pela ação da chuva (Figura 54). De acordo com Ritter (2007) isso acontece devido suas características antiaderentes, que eliminam odores e a poluição aérea da sua superfície através da decomposição das moléculas por oxigenação, transformando-as em dióxido de carbono e água por ação da exposição solar.

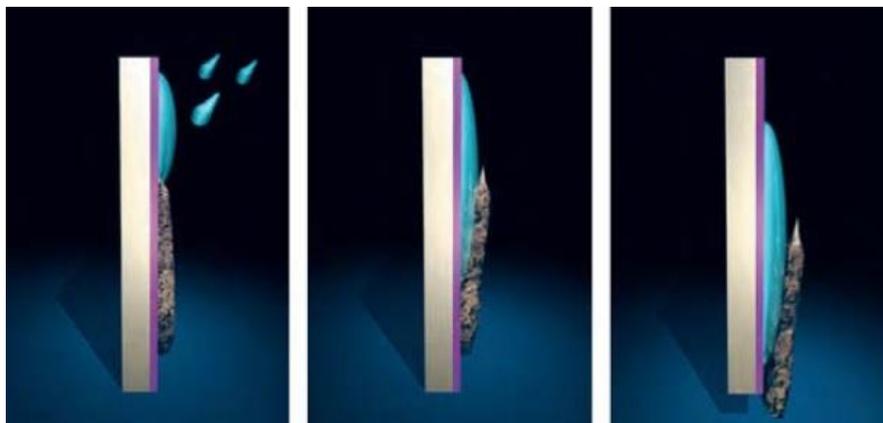


Figura 54: Ilustração do efeito de auto-limpeza.

Os materiais de mudança de fase, conhecidos na literatura internacional como *Phase Change Materials* (PCM) possuem a capacidade de mudar o seu estado físico dentro de um determinado intervalo de temperatura, absorvendo energia durante o processo de aquecimento e libertando-a durante o processo de resfriamento. Deste modo, um efeito de conforto térmico pode ser alcançado com este tipo de material aplicado em materiais têxteis (Sanchez *et al.* 2010).

Nas últimas décadas têm-se desenvolvido materiais com possibilidades de mudança de cor ou aparência em resposta a influências externas, como é o caso dos polímeros crômicos. Dependendo do estímulo em que estão sujeitos, podem ser classificados como termocromáticos (sensíveis à temperatura), fotocromático (sensíveis à luz), eletrocromáticos (sensíveis à eletricidade), piezocromáticos (sensíveis à pressão), ionocromáticos (sensíveis à concentração de íons) e biocromáticos (sensíveis a reações bioquímicas). Para Moreira (2013) essa tecnologia pode ser uma opção bastante sustentável, pois podem ser utilizadas como proteções solares, uma vez que os plásticos eletrocromáticos, por exemplo, podem tornar-se

mais escuros quando ativados e os fotocromáticos escurecem como reação autônoma à luz solar.

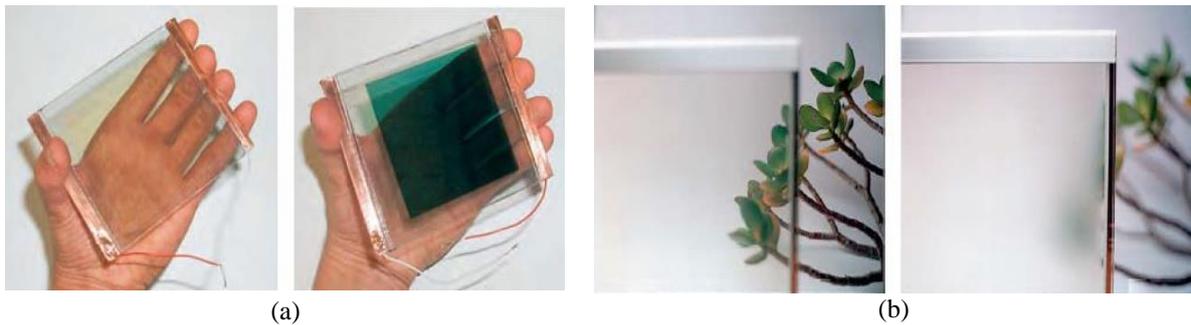


Figura 55: (a) Efeito eletrocromático para alteração de cor em um material; (b) Efeito eletro-óptico para alteração de transparência.

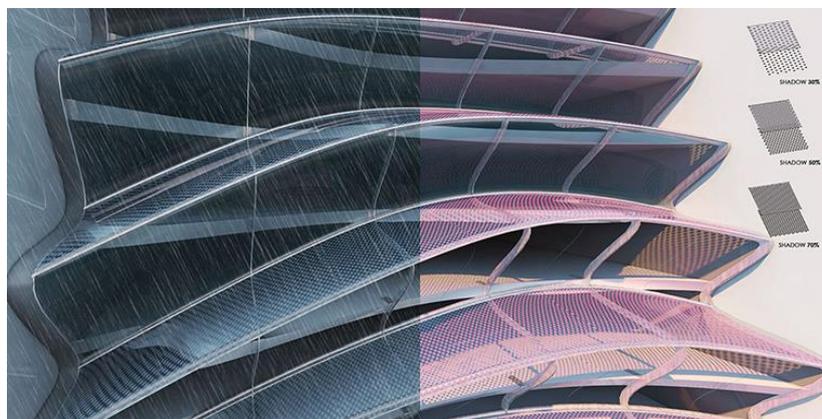


Figura 56: Estudo de fachada com aplicação de pigmentos fotossensíveis que varia de cor de acordo com estímulos externos.

Um projeto denominado *Chromatic Skins*¹¹ traz o potencial da mudança de cor dos materiais para sua aplicação na arquitetura, como agentes de sombreamento passivos dentro de sistemas de fachadas, de modo a responder a estímulos e comunicar informações sobre as mudanças de calor e luz em diferentes momentos e locais em todo o mundo.

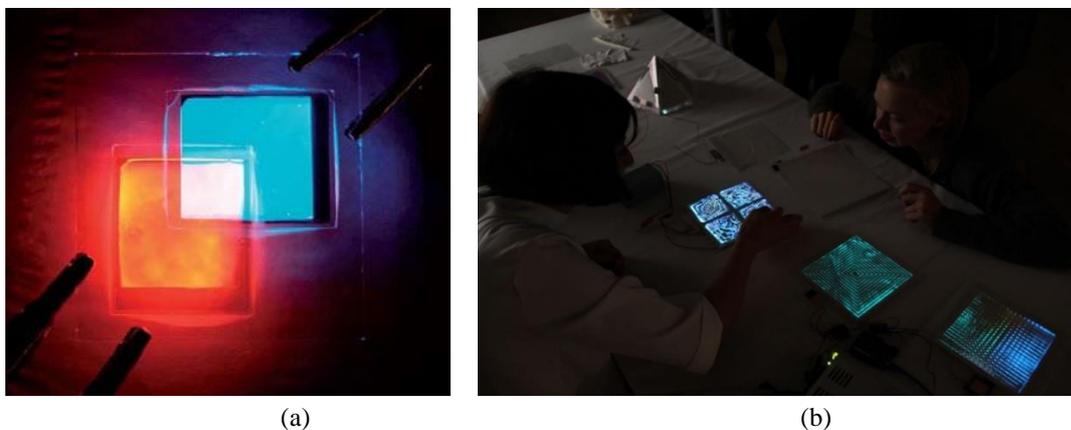


Figura 57: (a) e (b) Capacidade eletroluminescente dos polímeros.

¹¹ Projeto de pesquisa desenvolvido no Instituto de Arquitectura Avançada da Catalunya em 2014.

Na mesma linha de pensamento em relação à capacitação do material a uma mudança estética, os materiais luminescentes (Figura 57) são aqueles que quando estimulados têm a capacidade de produzir luz (Lakowicz 2006). Estes podem ser subclassificados em otoluminescentes (que conduzem luz), eletroluminescentes (estímulo por eletricidade), quimiluminescentes (estímulo por reação química), triboluminescentes (estímulo por reação mecânica) e fotoluminescentes (estímulo pela luz).



Figura 58: SmartWrap Building, USA 2003.

O *SmartWrap Building* (Figura 58) de 2003, nos Estados Unidos é um pavilhão que substitui a parede convencional por um composto de escala mínima capaz de ser erguido em uma fração de tempo da construção convencional e com maior facilidade. Ele utiliza de polímeros inovadores, que através da transferência de tecnologias de outras indústrias, fornece abrigo, controle de temperatura, iluminação e exibe informações digitalmente nas suas superfícies.

Outra característica passível de ser incorporada é a capacidade fotovoltaica, ou seja, de gerar eletricidade quando expostas à luz solar. Com a aplicação de células solares orgânicas em superfícies, tem-se o aproveitamento da luz solar para a produção de energia elétrica de um modo eficiente. Devido a espessura reduzida e propriedades flexíveis, além de diversidade entre cores e transparências, torna seu uso possível em membranas estruturais, uma vez que possuem total adaptação à superfície em que venham a ser aplicadas.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este capítulo foi possível compreender que, para a concepção de estruturas ativas em flexão, materiais naturais como a madeira ou ainda o metal são passíveis de serem utilizados. Entretanto, é destacável que as fibras são um material com grande potencial de aplicação - não somente para alcançar tal princípio estrutural, mas em todo o contexto atual da construção civil - uma vez que integradas numa matriz, formam um material composto, resultando numa boa relação entre resistência e peso, e dependendo da sua forma, pode ainda apresentar bom desempenho elástico, sem perder, de forma significativa, todas as suas propriedades mecânicas. Assim sendo, é importante ter o conhecimento das características intrínsecas de cada material que compõe um composto, para saber qual o mais adequado para cada aplicação desejada.

No mesmo cenário, as membranas normalmente formadas por um tecido e um revestimento, que representam respectivamente uma fibra e uma matriz, apresentam diferentes composições e que devem ser definidas de acordo com a necessidade da forma ou desempenho final. Além disso, novos materiais possíveis de serem acrescentados na composição das membranas possibilitam o material obter diferentes capacidades e aparências, resultando em um material capaz de ser aplicado em diversas situações, de modo a representar não somente uma solução estrutural eficiente, como também de proporcionar variedade arquitetônica.

4 PROPOSIÇÃO DO MÓDULO

Após a realização do estudo dos princípios estruturais adaptativos – membrana, estrutura ativa em flexão e arquitetura cinética – é visível a atual busca pelo uso desses três conceitos estruturais no contexto da arquitetura e a potencialidade de obter-se uma estrutura leve, flexível e adaptável. Tendo em conta as características intrínsecas de leveza, flexibilidade e resistência, encontradas nas membranas e em elementos ativos em flexão em estruturas, a adoção da integração com os princípios da arquitetura cinética torna-se extremamente relevante, como pode ser visto em algumas construções ou investigações atuais.

Deste modo, tendo como objetivo a integração dos princípios estruturais adaptativos estudados para a aplicação na arquitetura e a análise do seu comportamento a nível estrutural e funcional, esta dissertação propõe o desenvolvimento conceitual de uma estrutura arquitetônica inteligente – correspondente a um módulo – com os seguintes objetivos:

- Utilização de materiais estruturais para resistir às ações exteriores, mas que também possibilitem alcançar diferentes formas com baixo peso próprio;
- O módulo poderá ser incorporado em novas construções ou em reabilitações de edifícios existentes. Neste contexto, esse módulo estrutural poderá assim, ser aplicado em fachadas ou coberturas, onde os materiais leves e flexíveis que correspondem aos princípios estruturais estudados, integrados ao movimento gerado através da aplicação do conceito da cinética, resultem numa solução que apresente uma resposta independente, de modo a se adaptar as necessidades ambientais e dos utilizadores, melhorando o desempenho funcional dos edifícios.

4.1 O CONCEITO

O conceito para a estrutura baseia-se nas folhas das árvores ou plantas, elemento que capta a luz solar, onde realiza a fotossíntese e onde se dão as trocas gasosas (respiração e transpiração). As folhas apresentam uma diversidade de formas, cores e dimensões, e em determinadas épocas do ano são capazes de sofrer alterações e mudar sua forma, sua cor e seu tamanho. Deste modo, essa capacidade de se modificar através das variações sazonais traz inicialmente o conceito de mudança para a concepção da estrutura. Nas folhas, podem-se

encontrar os princípios estruturais adaptativos atrás mencionados, bem como os outros aspectos funcionais para a sobrevivência da planta, que podem ser comparados por analogia com os aspectos funcionais desejados nas construções.

No desenvolvimento inicial do processo criativo do módulo, optou-se por uma configuração espacial/formal simples e estruturalmente equilibrada. Partindo dessa base conceitual, o desenho do módulo estrutural apresenta uma forma tridimensional triangular e faz uma releitura do comportamento dos elementos anatómicos de uma folha, conforme desenho esquemático da Figura 59.

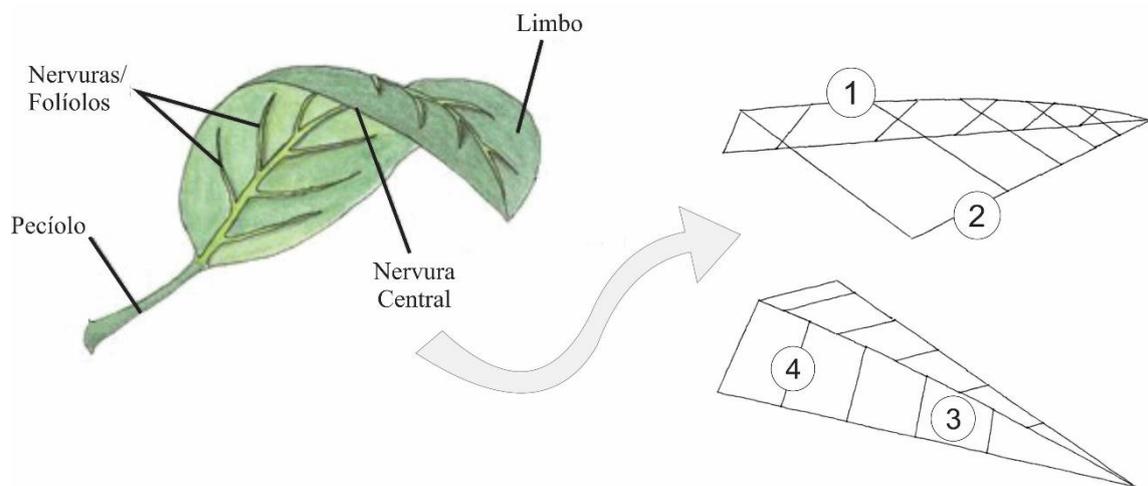


Figura 59: Esquema conceitual da concepção da estrutura baseada na anatomia de uma folha: (1) elemento central ativo em flexão; (2) elemento de bordo ativo em flexão; (3) membrana arquitetônica; e (4) escoras.

Basicamente, o módulo apresenta o elemento central (1) ativo em flexão que corresponde à continuidade do pecíolo da folha, representando a nervura central. Assim como as folhas, podem obter uma forma inicial quase plana e sofrer grandes deformações, normalmente ocasionadas pelos eventos climáticos (vento e chuva), voltando à sua posição inicial sem perder resistência (comportamento elástico não-linear). O mesmo é proposto para a estrutura que contorna o limbo (2), ou seja, a utilização de elementos ativos em flexão. Nas folhas, esse perímetro não apresenta em elemento estrutural, visto que o próprio limbo apresenta uma composição resistente para suportar as forças pela qual são submetidas. Essa capacidade das folhas de se deformarem em ocasiões de vento e chuva, devido sua anatomia flexível, traz então o conceito de adaptabilidade para a estrutura.

A flexibilidade do pecíolo e, conseqüentemente, da nervura central da folha dá-se pela sua composição anatômica que por vezes tem a mesma estrutura que o caule, caracterizada pela sua organização anisotrópica, o que facilita na flexão elástica do elemento, como pode

ser visto nas figuras abaixo, onde se exemplificam o comportamento flexível da nervura central.

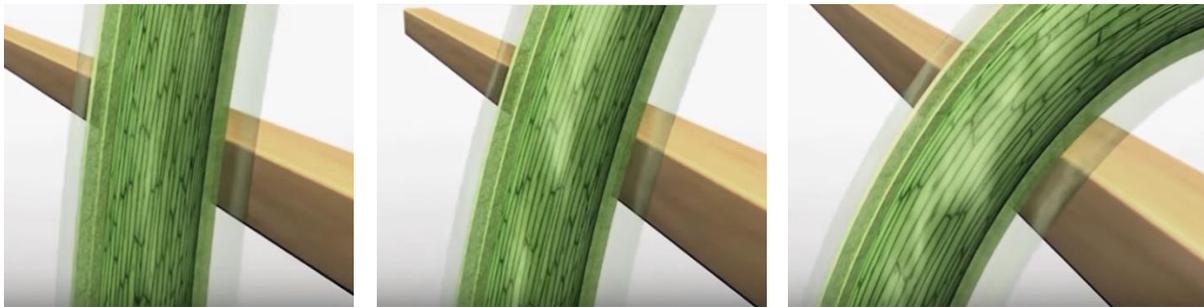


Figura 60: Imagens ilustrativas do comportamento flexível do pecíolo e nervura central.

Já o limbo (3) da folha é representado na estrutura através do uso de membrana arquitetônica, material este laminar, leve e fino, que apresenta flexibilidade e resistência. A estrutura do limbo varia em função do meio. Geralmente delicado, é nesse elemento - correspondente a grande parte da superfície da folha - que verifica-se a existência de epiderme que reveste totalmente a lâmina que o compõe. Esse elemento é analogamente introduzido no módulo através das membranas tracionadas.

Os elementos presentes na superfície (4), nos quais representam as nervuras das folhas, ou também conhecidos como folíolos, têm a função de conduzir a seiva através do seu interior formado por conjuntos de vasos condutores, servindo também de esqueleto da folha, de modo a proporcionar certa rigidez e resistência ao limbo. Logo, os mesmos conceitos são aplicados no módulo desenvolvido com a função de escorar e manter a superfície da membrana tracionada tanto na forma inicial como após o movimento realizado. Portanto, este elemento deve apresentar um comportamento suficientemente rígido, não alterando sua forma durante todo o processo de adaptação da estrutura.

De um modo geral, a ideia da folha para a estrutura do módulo remete para conceitos gerais de mudança, movimento, flexibilidade e adaptação, trazendo uma releitura da forma e do comportamento mecânico de um elemento encontrado na natureza para a realidade da arquitetura e engenharia. Adicionalmente, as folhas podem também trazer outras inspirações para a incorporação na estrutura, não somente a nível espacial e mecânico, como também ao nível funcional. Conceitos como autolimpeza, como pode ser visto na capacidade de repelir a água de algumas folhas, ou até mesmo a mudança de cor durante o ano, podem ser características importantes encontradas nas folhas e que podem ser aplicados na estrutura, mais especificamente na membrana, através de polímeros inovadores que são capazes de reproduzir tais capacidades, ver Figura 61.



Figura 61: (a) Gotas d'água repelidas na superfície de uma folha; (b) Diferentes cores para um mesmo tipo de folha ocasionado pelas mudanças climáticas.

4.2 DEFINIÇÃO DA FORMA E MOVIMENTO

4.2.1 Modelos Físicos

Posteriormente ao desenvolvimento do conceito inicial que determina essencialmente a sua forma espacial e define teoricamente a sua possível atuação, viu-se necessário a concepção de modelos físicos para a análise empírica da estrutura. Foram realizados três modelos físicos para melhor compreender a estrutura e o comportamento integrando os conceitos estruturais. Definiu-se, portanto, que a estrutura seria desenvolvida baseada em uma geometria triangular de dois lados iguais, a apresentar dez metros de altura e cinco metros de base, com uma diferença de altura entre os dois pontos da linha central de um metro, conforme Figura 62.

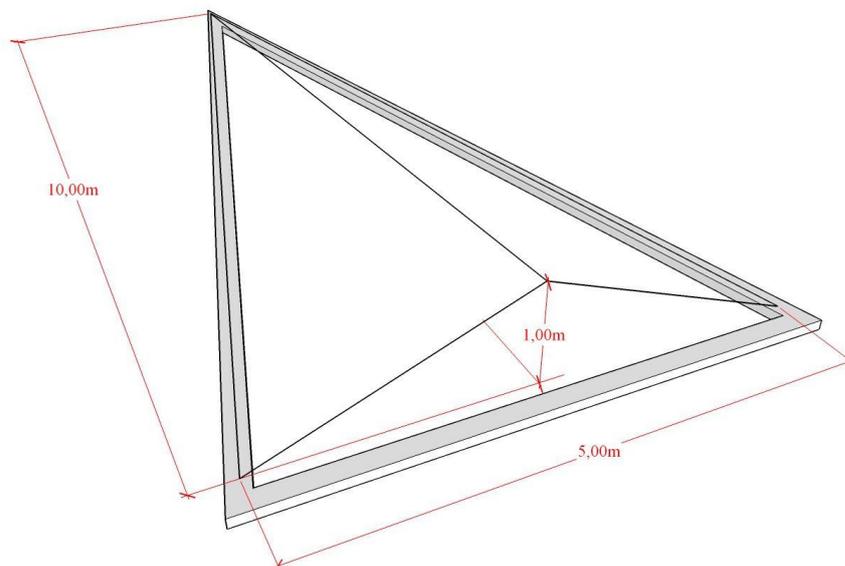


Figura 62: Definição das dimensões base da estrutura para o desenvolvimento da mesma.

Essa concepção formal do modelo é composta pelos elementos ativos em flexão integrando a membrana arquitetônica, concebendo uma estrutura leve e flexível. Entretanto, para ser possível o equilíbrio estrutural e a aplicação de mecanismos que possibilite o movimento e a transformação da estrutura, foi necessário a incorporação de uma base rígida, ocasionando três pontos de apoio (os vértices do triângulo da base).

Definida a forma geral da estrutura e suas respectivas dimensões, foram desenvolvidos dois modelos físicos iniciais à escala 1:30. O primeiro correspondeu a forma exata como demonstrada acima, posicionando as escoras – que correspondem as nervuras da folha – num ângulo inferior a 90° , relacionando aos lados maiores do triângulo e espaçadas de um em um metro, por começar da base, totalizando sete escoras em cada superfície (conforme Figura 63a). Com base neste modelo, algumas conclusões foram destacadas, tais como a possibilidade de diminuição do número de escoras nas superfícies, a necessidade do aumento do ângulo entre as escoras e as laterais do triângulo, uma pequena curvatura inicial no elemento central da estrutura e a alteração do ângulo da base do triângulo, inicialmente em 90° , para 60° em relação ao eixo x (conforme Figura 63b), de modo a criar uma força contrária, colaborando no tracionamento das superfícies da membrana.

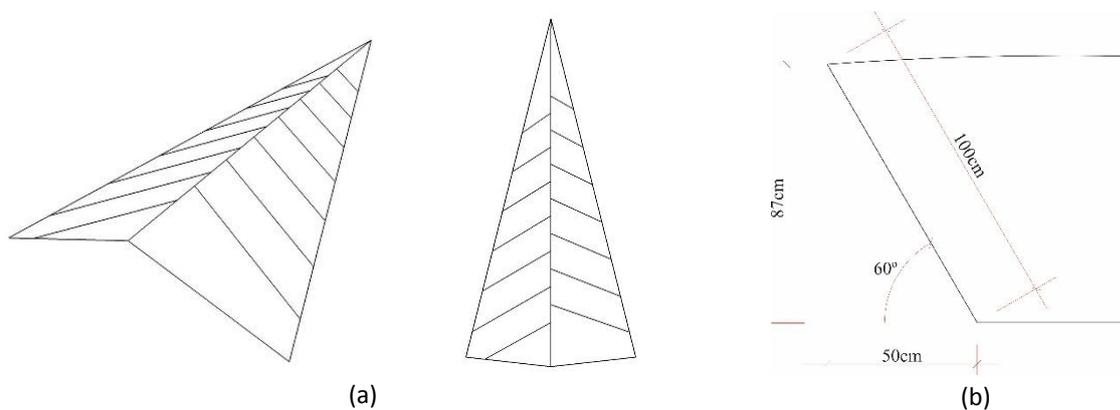


Figura 63: (a) Forma desenvolvida no modelo físico 1; (b) Base do triângulo com inclinação para força contrária.

Partindo dessas questões destacadas com a análise do primeiro modelo, um segundo foi desenvolvido (Figura 64a). Neste momento, foram colocadas quatro escoras em cada superfície da estrutura, posicionadas a 90° com o elemento central, aumentando assim o ângulo em relação aos lados maiores do triângulo e a curvatura do elemento central com uma flecha inicial de 20 cm. Essa curvatura inicial visa direcionar o elemento para a alteração da sua forma, uma vez que se este for inicialmente plano apresenta certa dificuldade para iniciar a mudança formal com as forças aplicadas para a geração do movimento. Através do segundo modelo, foi ainda possível definir outros pontos importantes a serem modificados para a

definição formal da estrutura final, tais como a necessidade de uma pequena curvatura inicial nos lados iguais do triângulo, também para direcionar o elemento a alteração da forma e o posicionamento das escoras a 90° em relação aos lados do triângulo (figura 64b). Essa pré-encurvadura definida com flecha de 10 cm pode ser determinado pela base rígida, apresentando assim um apoio curvado de mesma flecha.

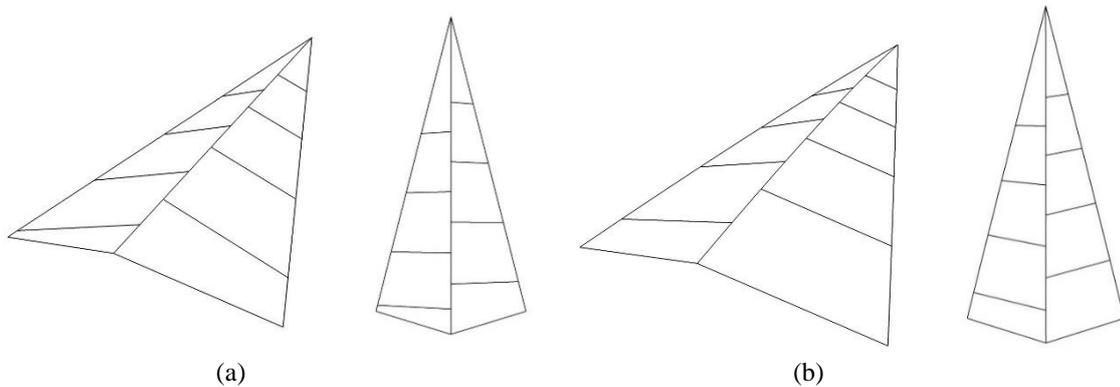


Figura 64: (a) Forma desenvolvida para modelo físico 2; (b) Forma desenvolvida para modelo físico final.

Utilizando material compósito em fibra de carbono e vidro (Figura 65a) e tecido com pouca elasticidade, o terceiro e último modelo foi desenvolvido, conforme a geometria da Figura 64(b), de modo a analisar o funcionamento do conjunto estrutural proposto e, principalmente, o comportamento do tecido consoante as transformações e movimentos a que a estrutura está sujeita. O movimento no modelo foi gerado por meio de cordões fixados nas ligações da base do triângulo (Figura 65b), de modo que estes simulem os mecanismos de aplicação de força para a realização da transformação da estrutura.



Figura 65: (a) Esqueleto do modelo em FRP com fibra de vidro e carbono; (b) Cordões para aplicação de força e simulação de movimento.

Com esse modelo foi possível concluir que a estrutura trabalha integradamente, com a membrana a permanecer tracionada durante o movimento, e que dependendo do módulo de

elasticidade do material utilizado para os elementos ativos em flexão, é possível obter-se uma grande transformação com pouco deslocamento e força aplicada nas ligações. Nas figuras seguintes apresentam-se perspectivas do modelo na sua forma inicial e após o movimento.

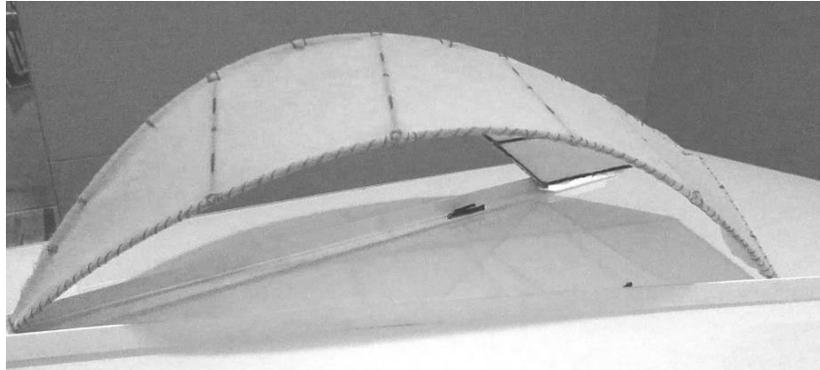
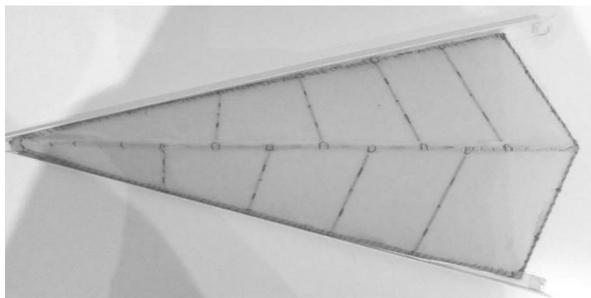


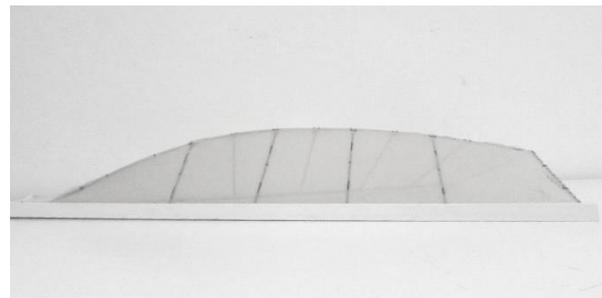
Figura 66: Perspectiva do modelo físico 3 (final) com a aplicação de força através do movimento, demonstrando a alteração da sua forma e a adaptação dos materiais.

Vista Superior

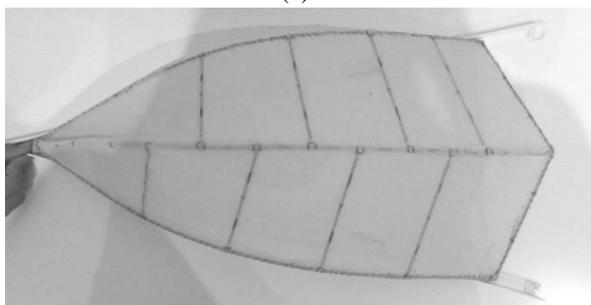
Vista Lateral



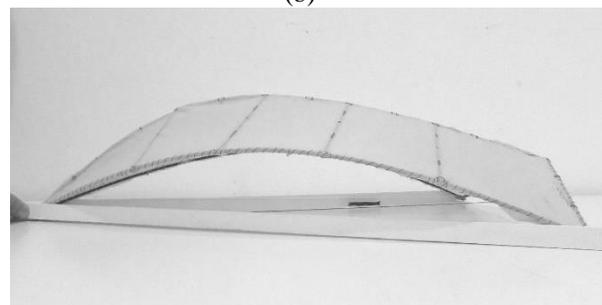
(a)



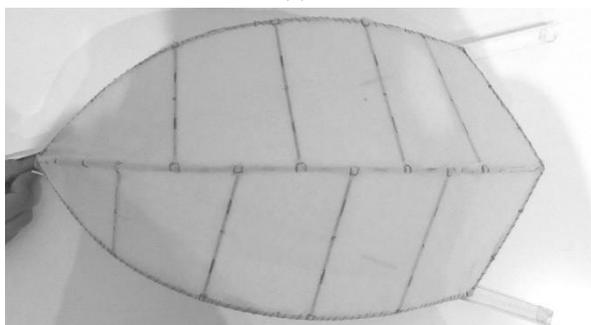
(b)



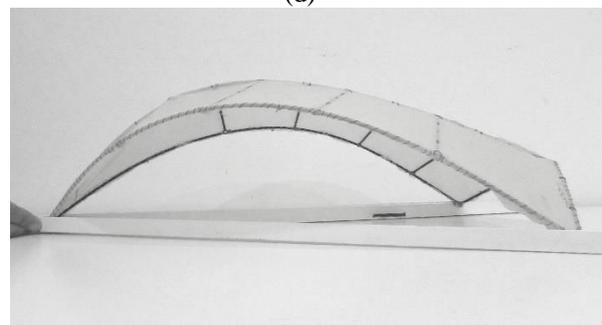
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 67: Visões gerais do modelo físico 3 (final). (a) Vista superior forma inicial; (b) Vista lateral forma inicial; (c) Vista superior alteração da forma nível 1; (d) Vista lateral alteração da forma nível 1; (e) Vista superior alteração da forma nível 2; (f) Vista lateral alteração da forma nível 2.

4.2.2 Especificação

Após a análise do terceiro modelo, chegou-se a estrutura final. Como pode ser visto na Figura 66, esta é composta pela base rígida de apoio, que possibilita a adaptação de mecanismos de movimento e uma forma levemente curva para a pré-encurvadura dos elementos ativos em flexão laterais; e pela estrutura leve superior, apresentando o elemento central ativo em flexão e as escoras rígidas para o tracionamento da membrana utilizada como fechamento da estrutura. As vistas superior e lateral com as dimensões gerais do módulo encontram-se em anexo (Anexo V).

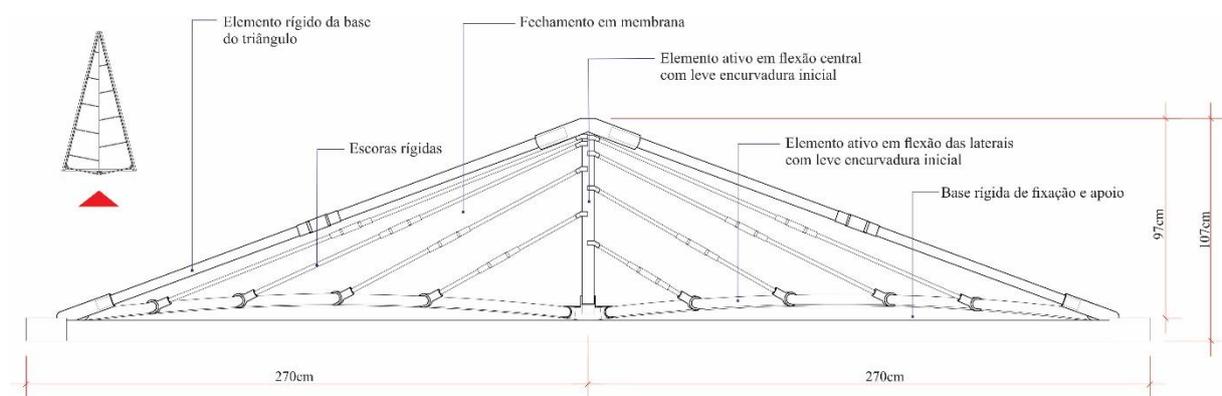


Figura 68: Vista da base do triângulo com especificações dos elementos.

Tendo visto a concepção global da estrutura, parte-se para o aprofundamento das suas alterações de forma e do mecanismo de geração de movimento. Basicamente, a estrutura leve superior, na sua forma inicial, apresenta três pontos fixos de apoio – correspondentes aos três vértices do triângulo – na base rígida.

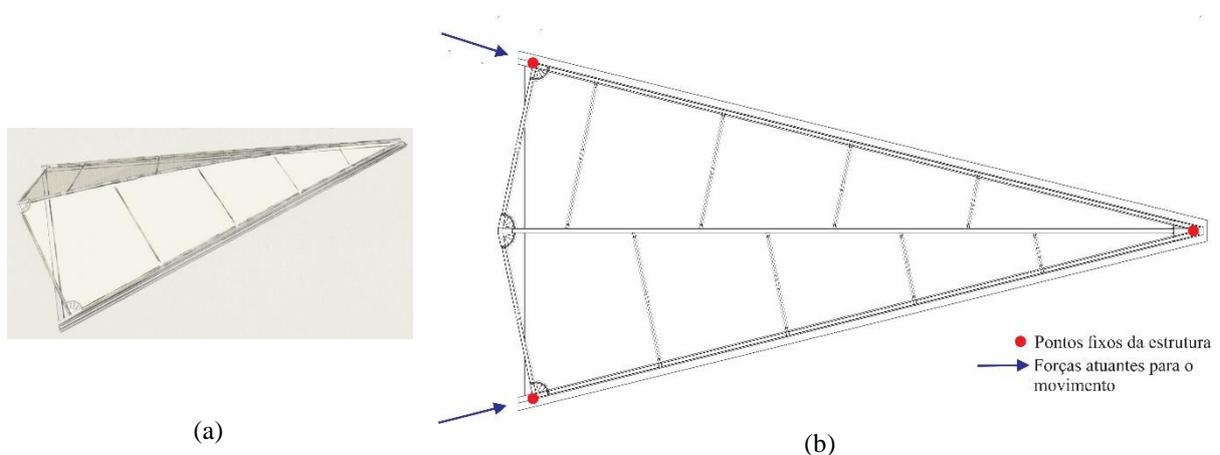


Figura 69: (a) Imagem tridimensional da estrutura – Forma inicial; (b) Pontos fixos da estrutura e forças atuantes para geração de movimento.

O ponto correspondente ao vértice entre os dois lados iguais do triângulo é fixo na base e tem caráter imóvel, enquanto que os outros dois pontos são fixos na base, porém são passíveis de deslocamento, caracterizando-se móveis. As forças atuantes, como exemplificadas na Figura 69b, nos pontos de apoio fixos e passíveis de deslocamento, relacionado com a distância do elemento e o ponto de apoio fixo e imóvel, tem-se o momento fletor da aresta, onde uma das componentes da força aplicada resulta entre os pontos uma flexão composta, a causar uma variação de altura em relação a sua forma inicial. Esse momento só ocorre devido ao comportamento flexível do elemento e devido a pré-curvatura inicial gerada pela base rígida de apoio levemente curvada, que direciona o sentido da flexão composta.

Como maneira de provocar as forças atuantes nos pontos fixos na base passíveis de deslocamento da estrutura, propõe-se um mecanismo de engrenagem de parafuso sem fim e um servomotor de duplo sentido nas suas bases de apoio (Figura 70). A rotação provocada pelo motor é transformada em um movimento retilíneo de menor velocidade e maior força, passível de deslocar a uma roda dentada (ou outro elemento), fixada ao encaixe rígido dos respectivos pontos de apoio, ao longo do eixo. Para o módulo em estudo, foi definido um comprimento máximo do parafuso, limitando portanto a dimensão do deslocamento da roda dentada. Assim sendo, o deslocamento é dividido em dois níveis de atuação, tendo o primeiro um comprimento de 30 cm e o segundo de 20 cm (Figura 71).

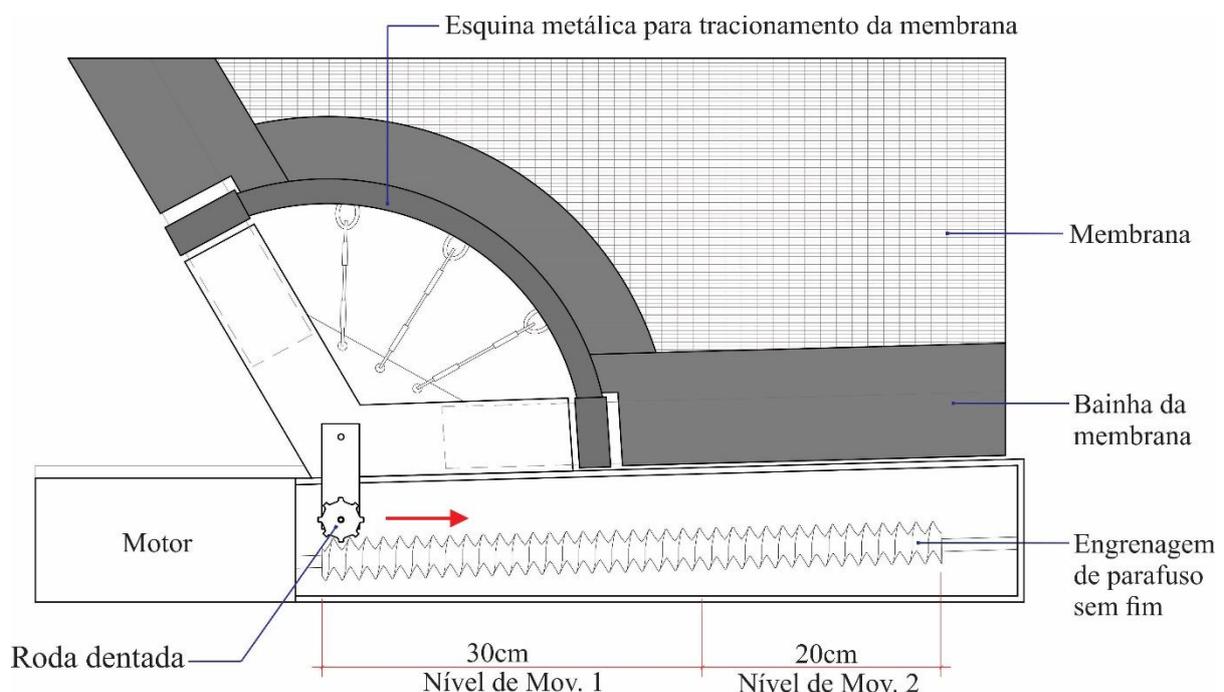


Figura 70: Detalhamento do mecanismo de engrenagem de parafuso sem fim para geração do movimento da estrutura.

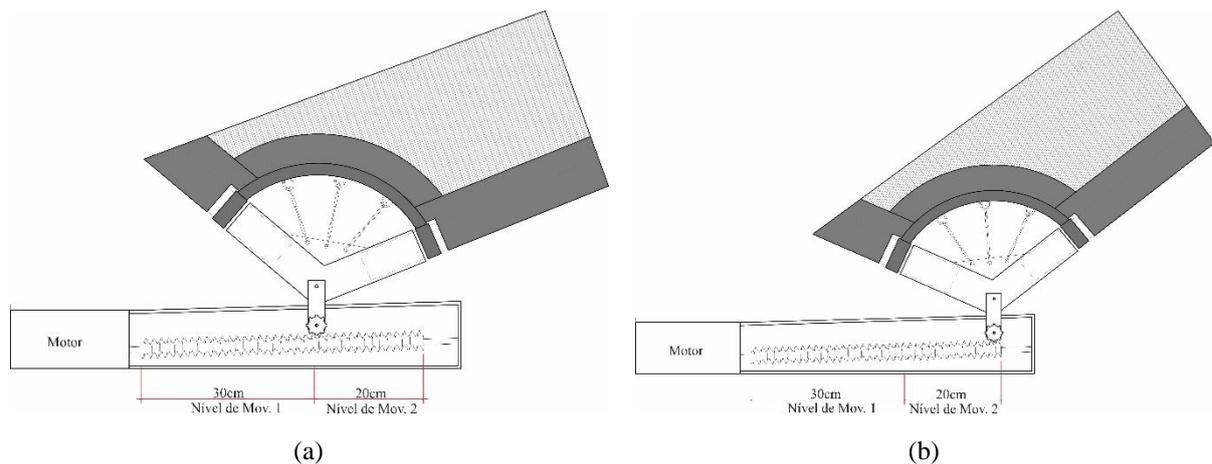


Figura 71: (a) Primeiro nível de deslocamento; (b) Segundo nível de deslocamento.

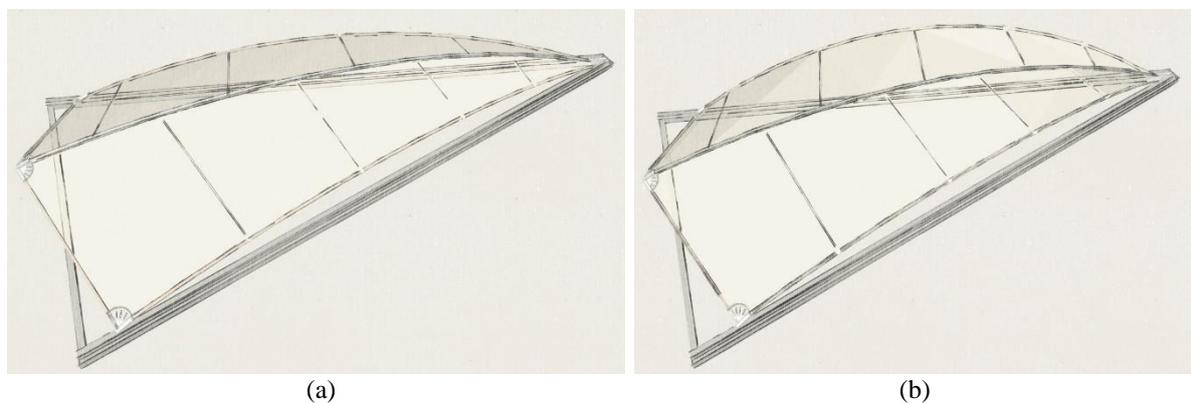


Figura 72: (a) Perspectiva simulando abertura com primeiro nível de deslocamento; (b) Perspectiva simulando abertura com segundo nível de deslocamento.

A partir do momento em que o deslocamento se inicia e o elemento de flexão ativa efetua sua flexão composta, os elementos ligados aos pontos fixos e móveis passam a mudar de angulação. Para que isso seja possível, o elemento de ligação entre a roda dentada e o encaixe da estrutura apresenta comportamento fixo e móvel, de modo que possibilita a estrutura a adaptar-se as diferentes formas desejadas. Ao alcançar o deslocamento máximo previsto para a estrutura – 50 (cinquenta) centímetros – o servomotor realiza uma rotação contrária, de maneira que a estrutura retorne a sua forma inicial. Vale a pena ressaltar que as dimensões definidas para o deslocamento podem ser alteradas dependendo do material escolhido para o elemento ativo em flexão e da dimensão de abertura desejada.

Outro ponto importante a ser destacado é que a base rígida de apoio, além das funções de equilibrar a estrutura leve superior e possibilitar a aplicação do mecanismo de movimento, foi pensada para também solucionar a recolha das águas pluviais, dependendo do uso e aplicação da estrutura global. Destaca-se, portanto, que este elemento da estrutura também é passível de adaptações, que pode ser melhor estudado para cada caso específico de aplicação. Na estrutura em estudo, optou-se por aplicar parte da estrutura rígida como caleira, conforme corte da estrutura exemplificado na Figura 73(a).

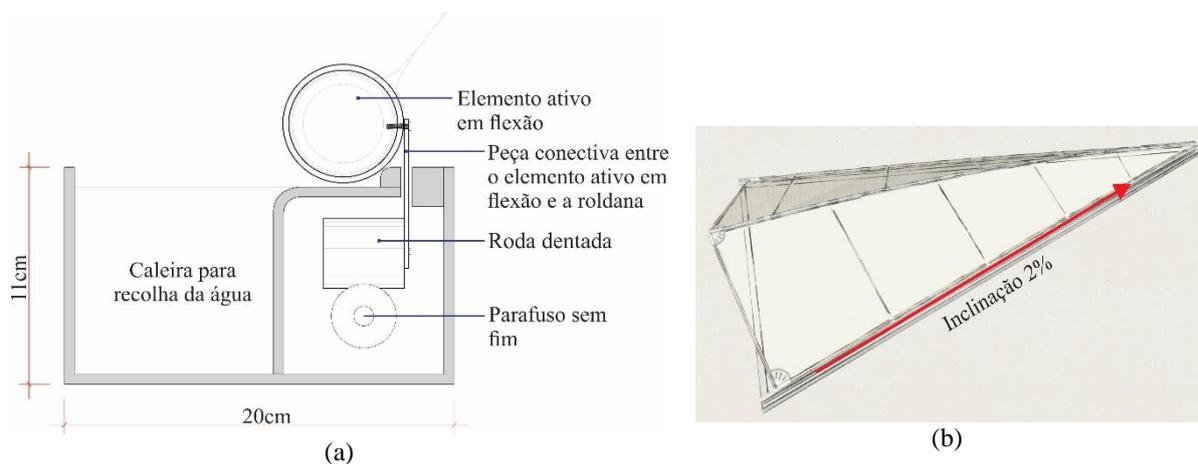


Figura 73: (a) Corte da estrutura base rígida; (b) Exemplificação da direção da inclinação de 2% da parte interna da caleira.

Como pode ser visto no corte, além de uma seção destinada para a recolha das águas pluviais, apresenta elementos que bloqueiam a entrada da água para a parte interna da estrutura leve superior, o que ocasiona a sua vedação em situações em que a estrutura é aplicada, por exemplo, em coberturas. Essa caleira deve apresentar na sua base interna horizontal uma inclinação de 2% (conforme Figura 73b) uma vez que a saída de água deve ocorrer pelo vértice entre os lados iguais do triângulo. De modo a elucidar outras possibilidades de formação da base rígida da estrutura, os desenhos da Figura 74 demonstram como pode ser caracterizada a estrutura em situações distintas a estudada. O primeiro desenho simula a aplicação da estrutura como cobertura e disposta de maneira circular; e o segundo representa uma forma simples de caixilharia para situações em que se pretende aplicar numa fachada (possibilidades de composições e aplicações melhor explicadas adiante).

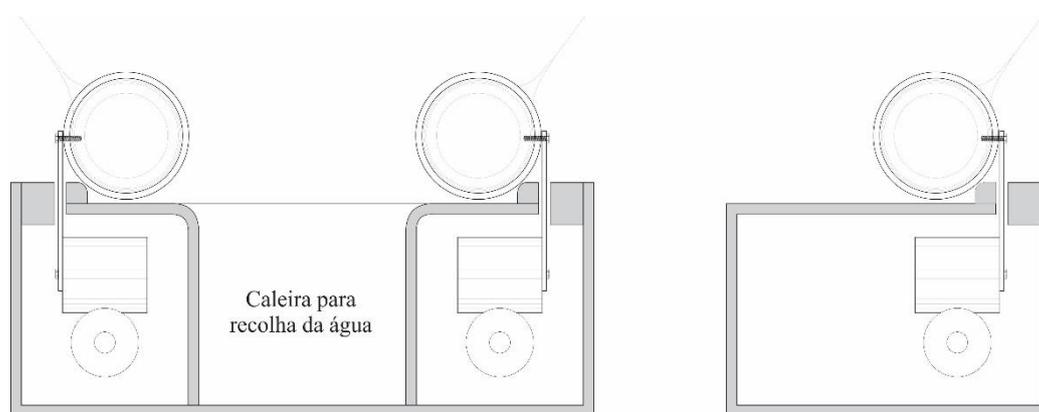


Figura 74: Cortes de diferentes formações da base rígida em outras situações e aplicações.

Após compreender a forma e o funcionamento da base rígida do módulo, partiu-se para o entendimento da estrutura leve superior. Como já foi dito anteriormente, os elementos que a constituem são: o elemento central e os laterais, ambos ativos em flexão; as arestas da

base do triângulo e as escoras, com caráter rígido; e, por fim, a membrana. Para que estes elementos principais da estrutura sejam integrados formando uma estrutura global, as ligações foram pensadas – conforme identificadas no desenho da Figura 75 - para responder as necessidades da estrutura, em todas as etapas de mudança de forma.

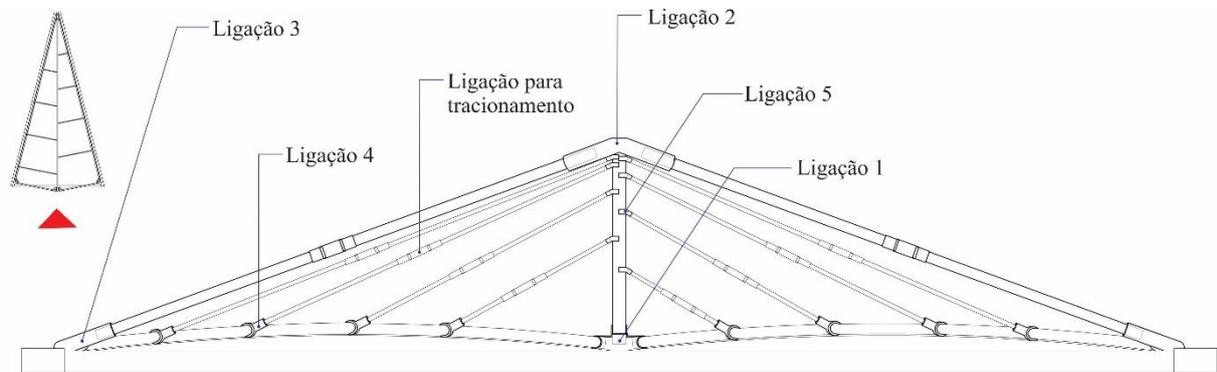


Figura 75: Vista da base do triângulo com identificação das ligações.

A ligação 1 (Figura 76) corresponde a peça conectiva entre os três elementos ativos em flexão da estrutura – o central e os laterais – e corresponde ao único ponto imóvel da estrutura. Assim sendo, essa ligação é fixada na base rígida e as extremidades dos elementos ativos em flexão fixados nos respectivos encaixes. Além disso, a ligação apresenta uma base para a fixação e acabamento da membrana, que através de uma peça metálica já previamente ligada ao tecido, é parafusada nessa base, como pode ser visto na Figura 77(b).

A partir da fixação da membrana nessa base, o tecido pode ser tensionado através dos esticadores fixados entre as outras extremidades da membrana e as chapas gousset, elemento este melhor detalhado a seguir.

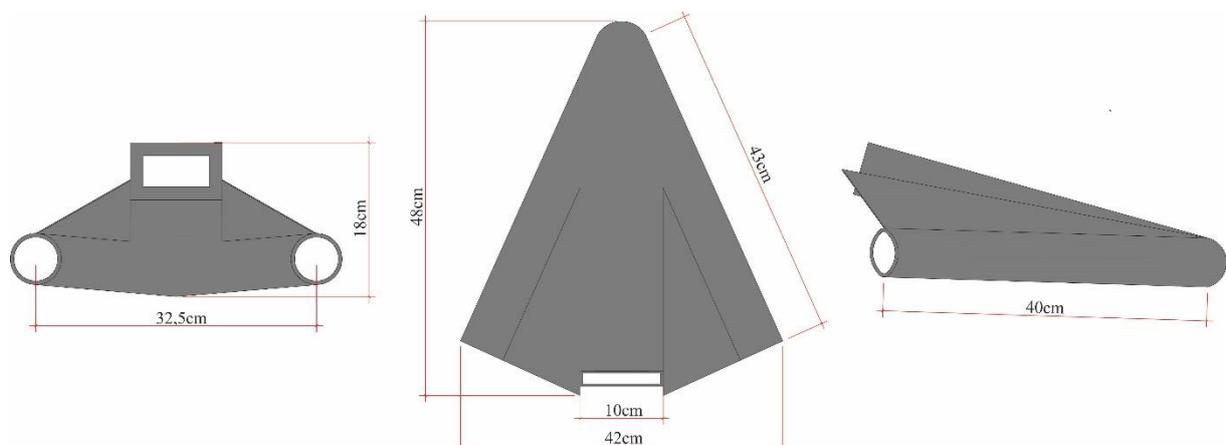


Figura 76: Vistas frontal, superior e lateral da ligação 1 com as dimensões gerais.

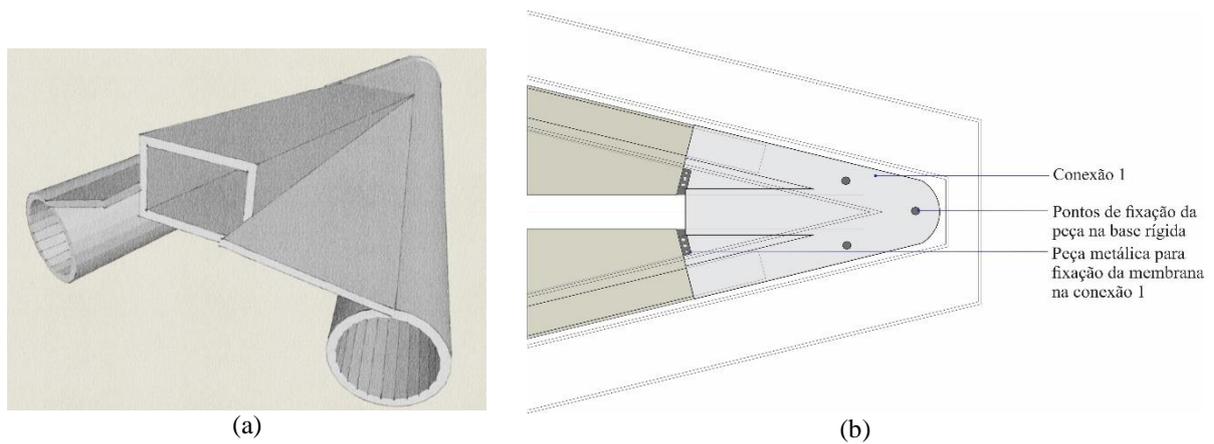


Figura 77: (a) Perspectiva da ligação 1; (b) Vista superior da ligação 1 com os pontos de fixação na base rígida e sua relação com a membrana.

A ligação 2 (Figura 78) também é uma peça que liga três elementos da estrutura. Em um formato aproximado de “T”, esta faz a ligação entre o elemento central ativo em flexão e as arestas rígidas da base do triângulo. Nas arestas, apresenta ainda chapas gousset com três furos, de modo a possibilitar o enganchamento dos denominados esticadores, elementos que possibilitam o tensionamento da membrana, como se demonstra na Figura 79(b).

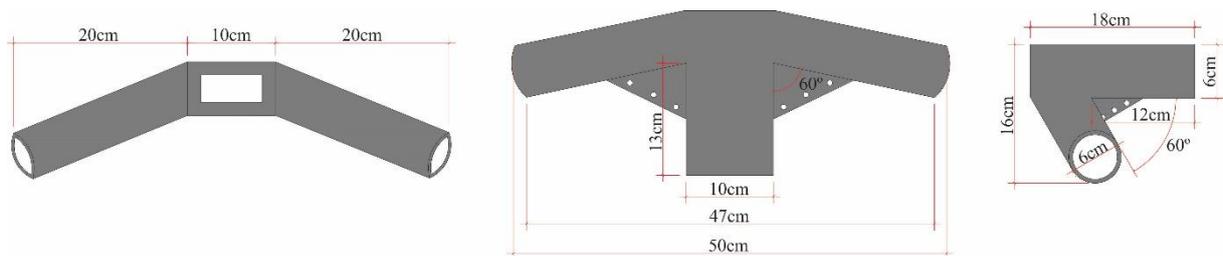


Figura 78: Vistas frontal, superior e lateral da ligação 2 com as dimensões gerais.

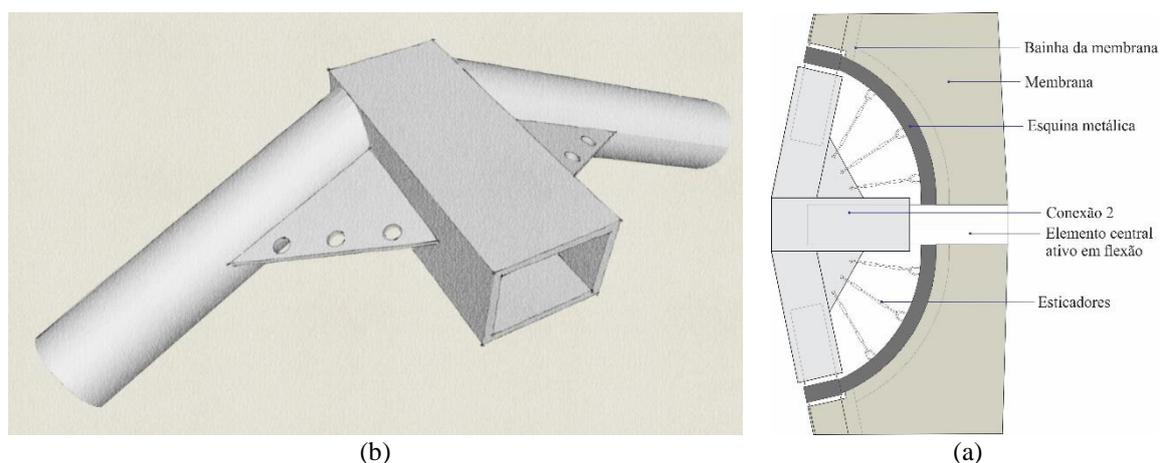


Figura 79: (a) Perspectiva da ligação 2; (b) Vista superior da ligação 2 e sua relação com os esticadores.

A peça de ligação entre as arestas rígidas da base do triângulo e os elementos ativos em flexão laterais está representada como ligação 3 (Figura 80) e tem uma forma em “L”. Essa ligação, assim como a ligação 2, também apresenta na esquina interna uma chapa

gousset com três furos para o enganchamento dos esticadores para tensionar a superfície da membrana (Figura 81b); e um formato curvo na parte externa da aresta, de maneira a adaptar-se as diferentes angulações a ser submetida. Como demonstrado anteriormente no detalhamento do mecanismo de movimento, essa ligação corresponde aos pontos fixos passíveis de deslocamento do módulo, sendo esta fixada através de uma peça conectiva com a roda dentada, de modo que possibilite o seu deslocamento ao ser rotacionado o parafuso sem fim.

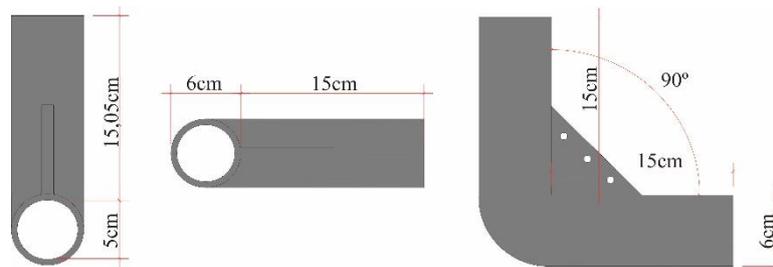


Figura 80: Vistas frontal, superior e lateral da ligação 3 com as dimensões gerais.

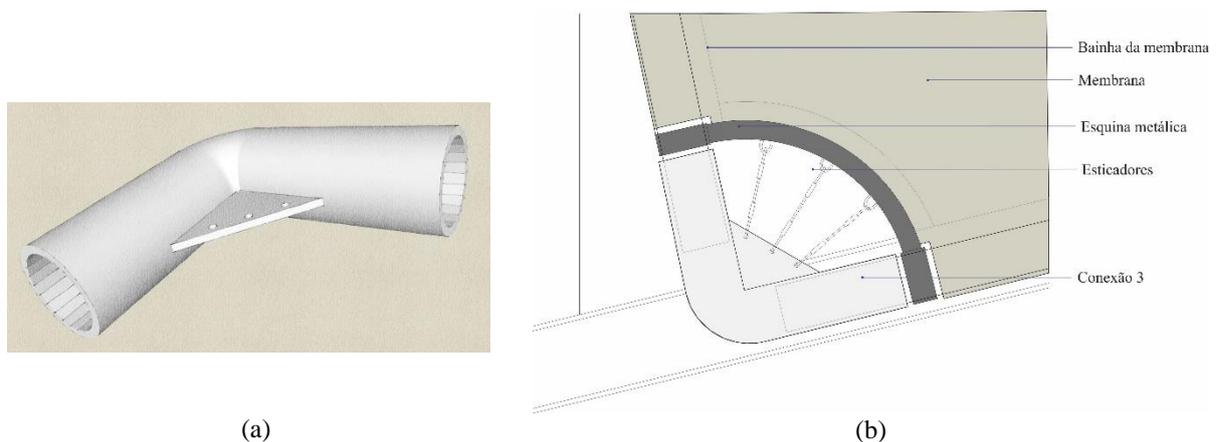


Figura 81: (a) Perspectiva da ligação 3; (b) Vista superior da ligação 3 e sua relação com os esticadores.

As três ligações apresentadas anteriormente definem as ligações entre os principais elementos da estrutura leve superior e sua relação com a base rígida. Para que as superfícies em membrana permaneçam tracionadas tanto na forma inicial, como nas mudanças posteriores a que serão sujeitas, os elementos rígidos nas superfícies são fundamentais para o escoramento da estrutura. Denominadas por escoras para o estudo do módulo, estes elementos são fixados nos elementos ativos em flexão laterais e central. A ligação 4 (Figura 82) corresponde, portanto, à peça de ligação entre a escora e os elementos laterais, de modo a conectá-las de maneira perpendicular em relação a superfície. A parte da peça ligada ao elemento ativo em flexão lateral deve ter caráter móvel na sua seção transversal, uma vez que essa mobilidade possibilita a mudança de ângulo quando alterada a forma do elemento. Para tal, apresenta um diâmetro interno um pouco maior que o diâmetro do elemento lateral

(Figura 83a). Já a seção longitudinal deve apresentar caráter imóvel, ocasionado pela colocação de parafusos nas laterais a criar ‘barreiras’ para impedir o deslocamento da peça (Figura 83b).

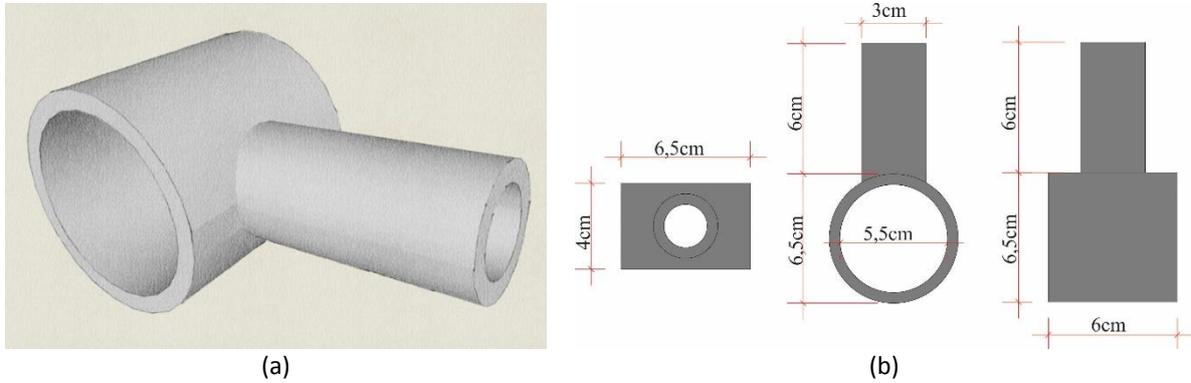


Figura 82: (a) Vistas frontal, superior e lateral da ligação 4 com as dimensões gerais; (b) Perspectiva da ligação 4.

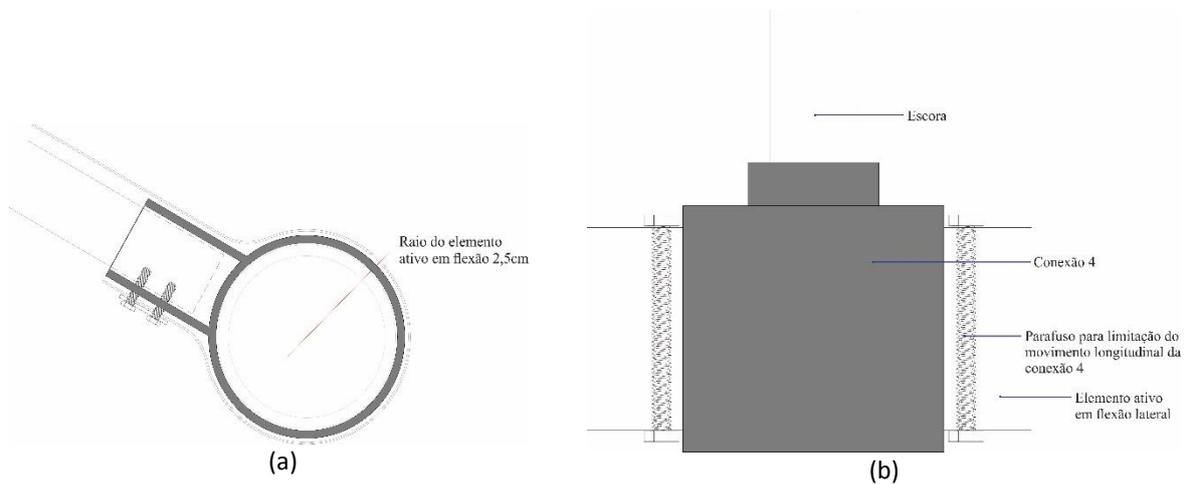


Figura 83: (a) Perspectiva da ligação 4; (b) Detalhe da barreira para a fixação da peça no elemento ativo em flexão lateral.

A ligação da escora com o elemento ativo em flexão central acontece por meio da ligação 5 (Figura 84a). Essa peça é uma interligação de duas partes individuais que, através de um conector, possibilita o alcance de diferentes ângulos de abertura (Figura 84b). Essa concepção móvel procede-se devido a mudança de angulação da escora quando a estrutura global é submetida ao movimento.

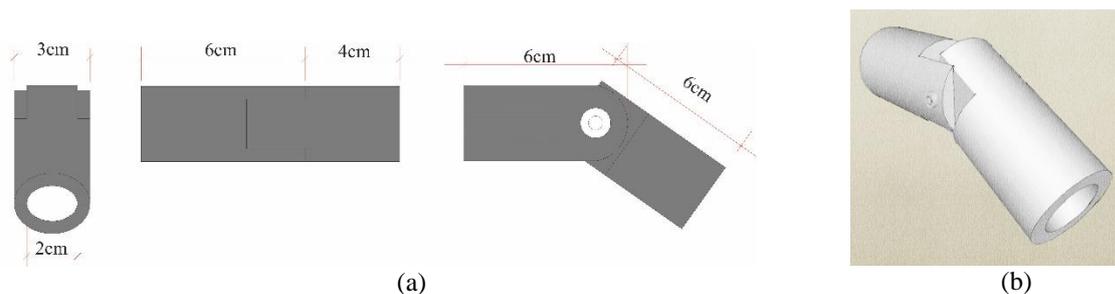


Figura 84: (a) Vistas frontal, superior e lateral da conexão 5 com as dimensões gerais; (b) Perspectiva da conexão 5.

A Figura 85a faz a simulação de uma das escoras presentes no centro de um das superfícies, parte em que há uma variação maior do ângulo entre a escora e o elemento central. É possível perceber que, considerando a flexão composta do elemento ativo em flexão lateral gerado com o movimento da estrutura, as escoras variam de ângulo em relação a ambos os elementos (central e lateral), o que justifica a concepção móvel das ligações 4 e 5.

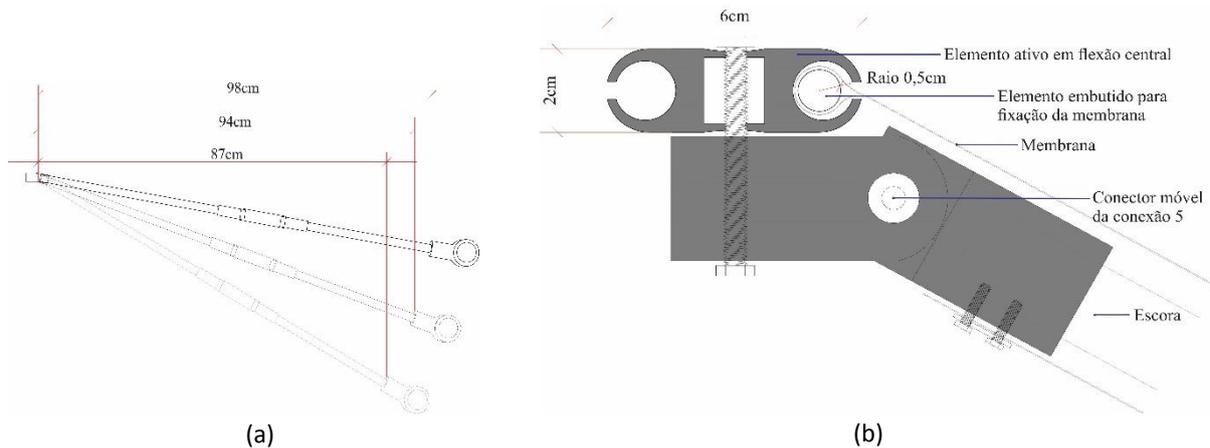


Figura 85: (a) Mudança de angulação da escora em relação aos elementos ativos em flexão através do movimento; (b) Ligação da ligação 5 com o elemento ativo em flexão central.

Uma das partes da ligação 5 deve ser fixada na face inferior do elemento ativo em flexão central e na outra parte é fixada a escora, conforme Figura 85b. A seção do elemento central apresenta duas cavidades circulares laterais, de modo que a membrana seja inserida juntamente com uma barra circular de um centímetro de diâmetro embutida na bainha e posicionando a membrana na superfície da estrutura. Como forma de deixar as escoras contíguas a superfície da membrana, as nervuras devem ser realizadas na face inferior da membrana e as escoras inseridas nas mesmas, conforme esquema da Figura 86.

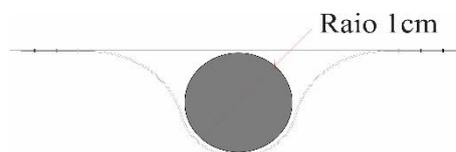


Figura 86: Detalhe da nervura com a escora embutida.

Entretanto, essas nervuras não devem percorrer todo o comprimento da escora, uma vez que propõe-se que no centro de cada escora seja aplicado um mecanismo de espaçamento, de modo a favorecer o tracionamento posterior da membrana. Na Figura 87 é demonstrado a projeção das nervuras, fixadas pela parte interna, em relação à superfície em membrana e a escora.

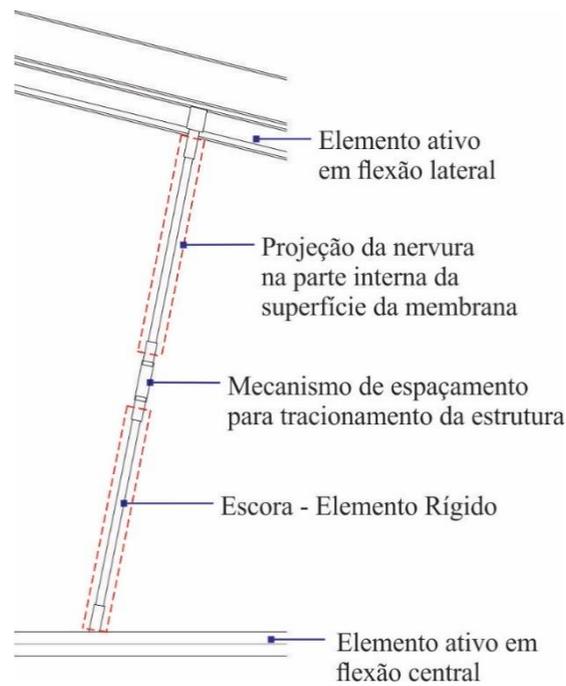


Figura 87: Projeção da nervura.

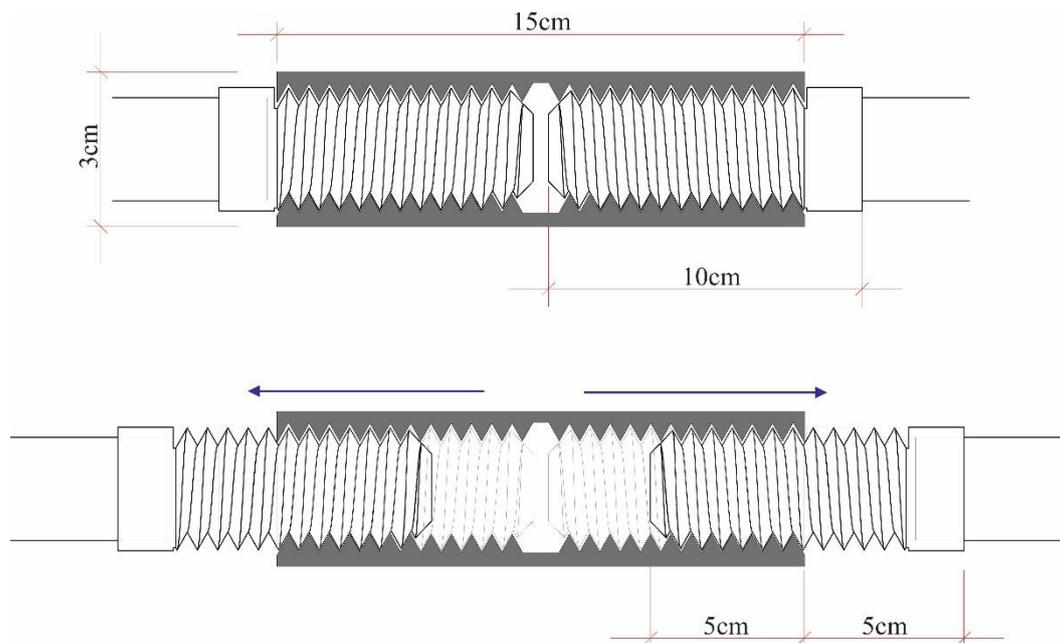


Figura 88: Mecanismo parafuso com rosca de espaçamento para o tracionamento das membranas.

Assim sendo, a escora deve ser composta por duas partes que ligam às suas extremidades e um esticador/espaçador central – uma peça com rosca – para fazer ativar a compressão da escora. Inicialmente unidas, resultam numa escora de dimensões menores que, posteriormente à aplicação da membrana e montagem geral da estrutura, possibilita o tracionamento das membranas (Figura 88). Para facilitar a rotação da rosca, esta deve apresentar orifícios circulares paralelos na região central de modo que possibilite a inserção de um elemento rígido para aplicação de força.

4.3 OS MATERIAIS

Uma vez que a estrutura em estudo fundamenta-se na integração de princípios estruturais adaptativos, onde dois deles são conceitos aplicados em concepções estruturais que baseiam-se basicamente no comportamento dos materiais, a escolha destes deve orientar-se por parâmetros como flexibilidade, resistência e baixo peso próprio, resultando em uma estrutura global que apresente como característica principal a sua reversibilidade formal. Essa reversibilidade representa a capacidade de mudança formal da estrutura causada por um mecanismo de movimento que, ao aplicar forças pontuais, é capaz de alterar e regressar a sua forma inicial (Figura 89). Trata-se, portanto, de uma estrutura com comportamento elástico não-linear.

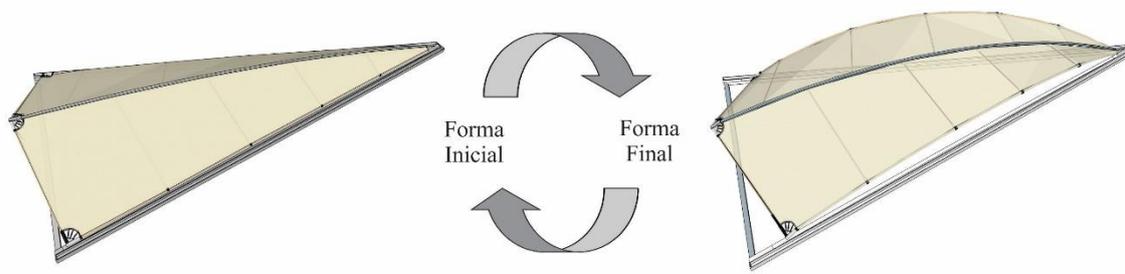


Figura 89: Ciclo de mudança da forma da estrutura.

Partindo desses parâmetros para a definição dos materiais, o uso dos compósitos reforçados com fibras apresentam uma alternativa construtiva de grande eficiência quando pretende-se ter uma boa relação entre propriedades mecânicas e baixo peso. Além disso, uma vez que o módulo representa uma solução estrutural adaptativa visando o conforto ambiente natural, diminuindo o consumo energético dos edifícios, os materiais que apresentem como características intrínsecas a durabilidade, a redução do custo global de acordo com o ciclo de vida, o baixo consumo de energia para fabricação e baixo peso para o transporte e montagem devem ser priorizados.

Dado este contexto, a iniciar pela base rígida, optou-se por utilizar perfis extrudidos de CFRP, uma vez que as fibras de carbono são as que possuem módulo de elasticidade mais elevado, com valores comparáveis ou até superiores aos do aço, consideradas as fibras de alto desempenho mais empregadas nos sistemas FRP apresentando a rigidez necessária para aplicações estruturais. Para aplicações que exigem materiais com altos níveis de deformabilidade, é preferível a aplicação de FRP com baixos módulos de elasticidade. Combinando o baixo módulo de elasticidade das fibras de vidro com o elevado módulo de elasticidade das fibras de carbono, pode-se obter certa flexibilidade e melhor distribuição de

rigidez que permitira aumentar a capacidade de carga dos elementos. Assim, para os elementos ativos em flexão laterais propõe-se o uso de tubos de seção circular de 5 cm de diâmetro exterior, com 0,5 cm de espessura, em FRP reforçado por fibras de vidro e de carbono, de modo que a primeira apresente a flexibilidade necessária e a segunda a resistência em todas as etapas formais da estrutura, i.e. todas as configurações geométricas. Visto que o momento de inércia de barras circulares de mesmo diâmetro e mesmo material, variando apenas na sua seção – maciça e tubular – não apresenta relevante diferença, a escolha da seção tubular dá-se pela possibilidade de apresentar semelhantes capacidades mecânicas mas com menor peso específico, visto a seção interna vazia.

Para o elemento central, a escolha do uso do alumínio é deve-se a complexa secção, visto que a mesma já existe no mercado neste material (Figura 90). Além disso, o alumínio é um dos metais que apresenta uma das melhores relações resistência-peso, sem falar de sua durabilidade, devido à sua resistência a corrosão, ocasionando baixa manutenção e, principalmente, sua maleabilidade, o que representa certa flexibilidade ao material que, dependendo da relação secção-comprimento do elemento, possibilita realizar para a flexo-compressão sem a perda das capacidades mecânicas, justificando, assim, a sua aplicação como elemento central ativo em flexão. Já para a fixação da membrana ao elemento central, optou-se pelo uso de uma barra maciça de GFRP com 1 cm de diâmetro, uma vez que o uso da fibra de vidro na composição permite adaptar-se ao movimento da seção em alumínio em que está inserido, visto o baixo módulo de elasticidade e, ao mesmo tempo, preenche a extremidade da membrana como elemento de bordo, deixando-a fixa neste elemento e permitindo o seu tensionamento, conforme visto na Figura 90.

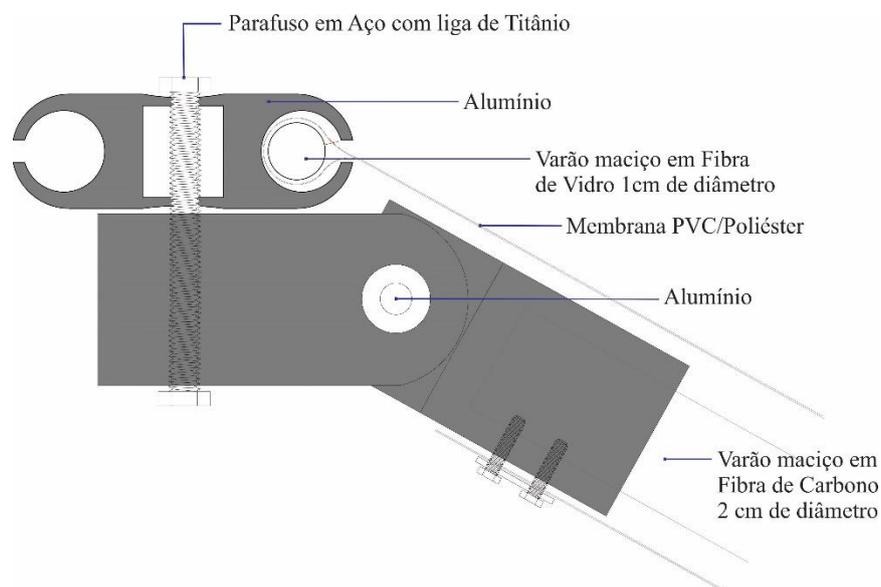


Figura 90: Seção do elemento central em alumínio e sua relação com os outros elementos, apontando os materiais adotados.

Ao contrário da necessidade de admitir certa flexibilidade da barra da extremidade da membrana, as escoras precisam apresentar um comportamento rígido, de modo a não alterar sua forma em todas as etapas de mudança formal da estrutura. Por isso, propõe-se o uso de barras de CFRP de 2 cm de diâmetro.

Como pontos de ligação entre os elementos destacados acima, as ligações devem possuir características rígidas, apresentando elevada resistência mecânica para suportar as cargas a que a estrutura estiver sujeita. Portanto, o material proposto para as ligações é também o alumínio, sendo em conta os elementos secundários utilizados. Para os parafusos e para os esticadores preconiza-se um aço com liga de titânio. Para as chapas goussets fixadas à membrana optou-se pelo alumínio.

A definição da membrana a ser utilizada também é um ponto muito importante para a estrutura do módulo. Como foi visto no Capítulo 3, as membranas podem apresentar diferentes composições face às necessidades de serviço, sendo destacadas como as mais usuais para a concepção estrutural as membranas de PVC/Poliéster, PTFE/Fibra de vidro ou mesmo o filme de ETFE. Normalmente, para a concepção de estruturas em que se tem a necessidade de movimento, ou seja, apresente bom comportamento reversível – como dobrar e desdobrar - as membranas compostas de PVC/Poliéster são adotadas. Entretanto, no caso da estrutura estudada que apresenta alteração da sua forma através dos elementos ativos em flexão, o comportamento da membrana em relação à estrutura global deve manter-se sempre tracionada para resistir às forças externas. Neste contexto, a estrutura estudada permite a adoção de todas as composições de membrana, de modo que a definição do tipo de membrana a ser utilizada é dependente das necessidades quanto às questões estruturais, funcionais ou estéticas. Em situações em que a estrutura seja aplicada com a necessidade de elevada resistência mecânica, as membranas de PVC/Poliéster ou PTFE/Fibra de vidro são as mais eficientes, tendo a primeira a vantagem de apresentar diferentes colorações, o que possibilita uma maior variedade estética e, conseqüentemente, de diferentes aplicações no contexto arquitetônico. Já quando a necessidade é a resistência e a leve transparência, a segunda deve ser escolhida. O ETFE é basicamente aplicado em situações em que se pretende ter total transparência do elemento membrana. Porém é uma das opções que apresenta maior fragilidade, uma vez que consiste apenas da matriz polimérica formando um filme, não apresentando o elemento de reforço no seu interior.

4.4 APLICAÇÕES

A concepção do módulo, constitui a intenção não somente da integração dos princípios estruturais adaptativos estudados, mas também de criar uma estrutura – como já dito anteriormente – passível de ser aplicada em edifícios novos ou existentes, ou em outras situações cabíveis, de modo que a sua mudança de forma e adaptabilidade sejam capazes de resultar numa solução arquitetônica energeticamente eficiente. Como principais possibilidades de aplicação, destaca-se o seu uso em coberturas ou fachadas.

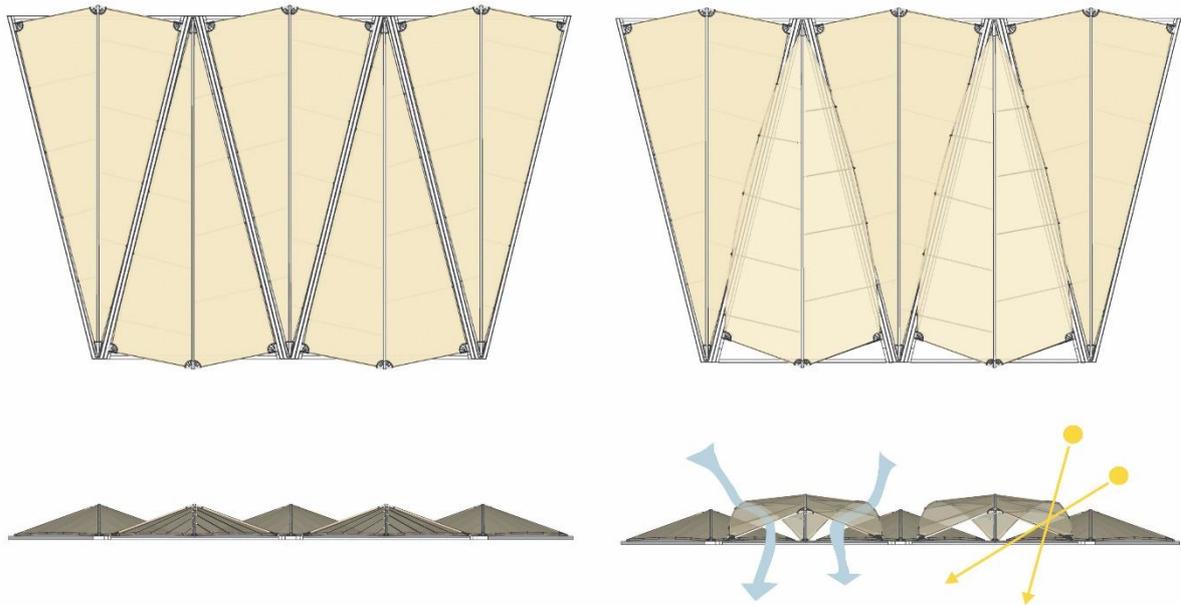


Figura 91: Vista superior e frontal de uma composição de 5 módulos intercalados, ilustrando a ventilação e iluminação natural possibilitada pela estrutura após a sua mudança de forma.

De modo a exemplificar esse contexto, a Figura 91 mostra a composição de cinco módulos estruturais posicionados de maneira intercalada, simulando a sua aplicação numa cobertura. Inicialmente apresenta a composição com todos os módulos na sua forma inicial, totalmente fechados e, posteriormente, três permanecendo na forma inicial e dois após o movimento e a alteração da sua forma. Nesta simulação é possível perceber que a abertura causada pela flexo-compressão dos elementos laterais permite a ventilação e a iluminação natural direta, caracterizando-a adaptativa face às necessidades e possibilitando a diminuição do uso de luz e ventilação artificial para o conforto dos utilizadores.

A composição utilizando os módulos estruturais intercalados pode estar disposta em caso de fachadas, com os triângulos na forma horizontal ou vertical (Figura 92), estando a escolha a depender do posicionamento do edifício e da sua posterior análise bioclimática. Outra forma de dispor os módulos é a circular, o que acarreta uma composição bastante interessante para aplicação em coberturas (Figura 93).

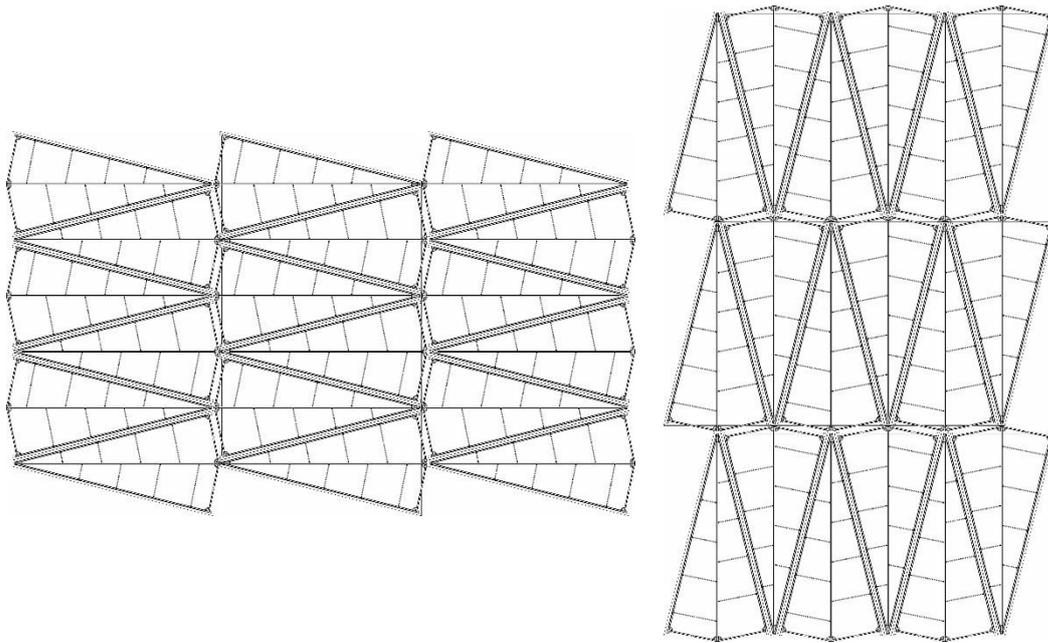


Figura 92: Composição dos módulos intercalados horizontal e verticalmente para fachadas.

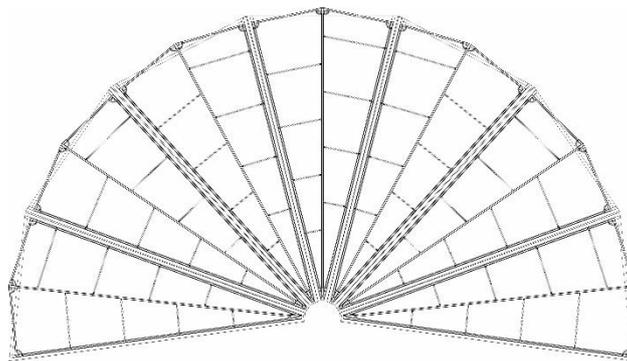


Figura 93: Composição circular dos módulos.

É importante acentuar uma questão para a aplicação do módulo. Para essas composições apresentadas acima, deve-se ter o cuidado com o movimento da estrutura e sua mudança formal. Ao mudar de forma, a estrutura em uma visão superior acaba por alterar sua largura, de modo a criar “barrigas” nos elementos laterais (pode ser visto na Figura 87), o que impossibilita o movimento e a abertura de dois módulos ao mesmo tempo em situações em que estejam posicionados em uma distância inferior a 50 cm (dimensão relacionada com as dimensões admitidas para a estrutura em estudo). Como solução para isso, tem-se a flexibilidade de alteração da base rígida, de modo que possibilite ligações entre os módulos superiores a 50 cm.

A Figura 94 ilustra uma composição de seguimento circular dos módulos, de modo que uma seção fixa é inserida entre eles, resultando num espaçamento entre as estruturas aplicadas, viabilizando o movimento e a transformação formal de todos os módulos.

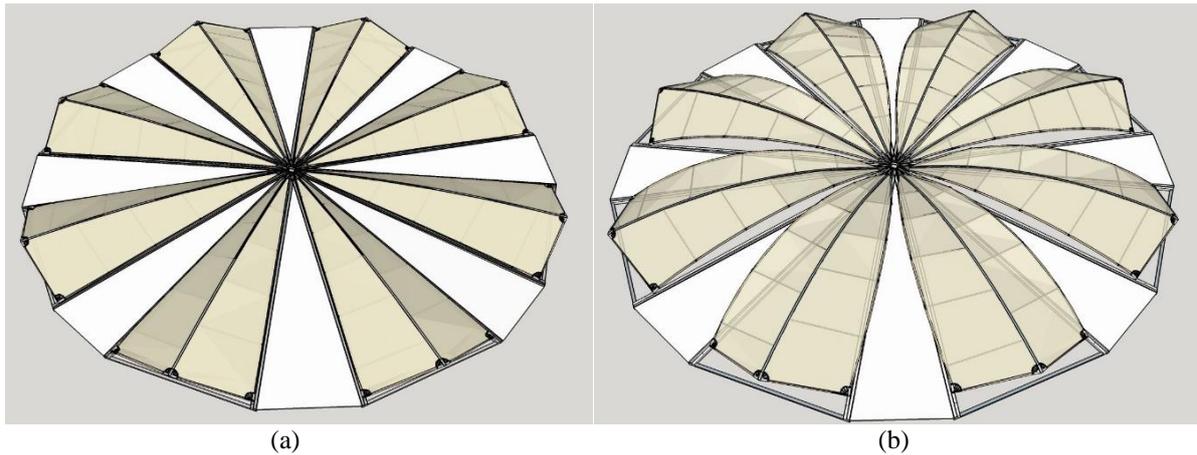


Figura 94: (a) Disposição circular dos módulos na forma inicial com espaçamento; (b) Disposição circular dos módulos após o movimento e a alteração formal.

Ressalta-se também que o movimento proposto para a estrutura pode ser realizado apenas num dos lados do triângulo e não obrigatoriamente nos dois pontos fixos e móveis juntamente, o que pode ser uma opção de funcionamento em situações em que os módulos estejam em proximidade ou apenas como forma de acompanhar as variações do sol e do vento. Adicionalmente, o módulo estrutural pode variar de dimensões e angulações para alcançar diferentes composições arquitetônicas, como é o caso da diminuição ou aumento da escala da estrutura (Figura 95a) ou apresentar uma base em triângulo retângulo, de modo a compor um quadrado (Figura 95b).

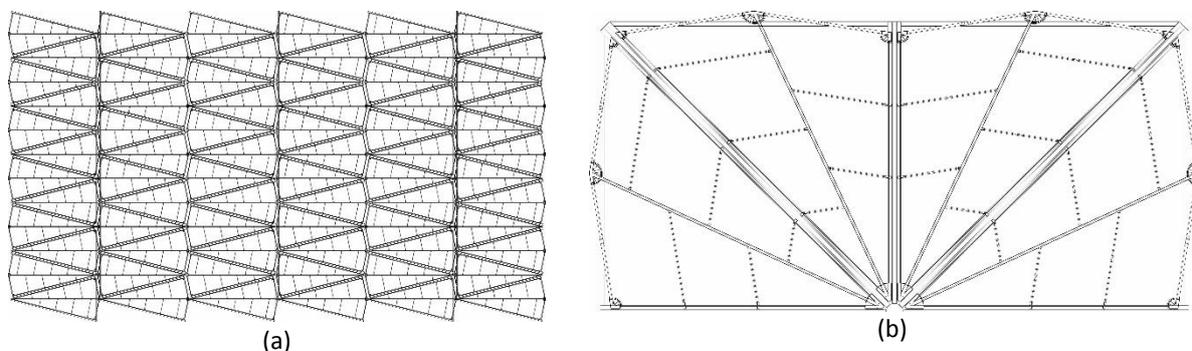


Figura 95: (a) Composição com alteração da escala da estrutura; (b) Composição com alteração das angulações da estrutura.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Posteriormente ao desenvolvimento da estrutura e a escrita deste capítulo, foi possível compreender que a integração dos princípios estruturais estudados apresenta muitas limitações, sendo necessário um longo percurso na fase de criação, o que caracteriza a etapa de encontrar a forma uma fase de grande dificuldade, principalmente devido ao uso de

membrana arquitetônica para a concepção do módulo. Uma vez que a membrana precisa estar tensionada para ser resistente, a sua interligação com elementos ativos em flexão e, ainda mais, com a aplicação de movimento através da aplicação do conceito de cinética, resulta numa infinidade de restrições que devem ser seguidas. Para isso, modelos físicos são de fundamental importância na fase de desenvolvimento, visto que estes capacitam empiricamente a visão geral do comportamento da estrutura.

Entretanto, conseguiu-se chegar numa estrutura capaz de responder a todas as restrições sujeitas para a integração dos princípios estruturais estudados, sendo esta competente para diferentes situações de aplicação no contexto arquitetônico e representando uma nova abordagem estrutural adaptativa.

5 APLICAÇÃO: PAÇO DOS DUQUES DE BRAGANÇA

De modo a colocar em prática o módulo estrutural proposto integrando os princípios estruturais adaptativos estudados, apresentando conceitos como adaptabilidade, movimento e flexibilidade, viu-se necessário trazer um caso de aplicação de considerável relevância, de modo que a proposição beneficie uma problemática real. Assim, propõe-se a aplicação da estrutura numa situação existente, na concepção de uma cobertura para o pátio central do edifício do Paço dos Duques de Bragança. Ao intervir arquitetonicamente num edifício de valor patrimonial, deve ser realizado um estudo geral do edifício, abrangendo o levantamento histórico e suas análises estética, funcional e construtiva, além de aspectos pontuais que destaquem informações necessárias para a realização de um projeto de intervenção.

O Paço dos Duques de Bragança é um dos edifícios mais importantes localizados em Portugal, principalmente quanto à história do país. O edifício está inserido em um ambiente urbano, na Rua Conde Dom Henrique, rua esta ligada à Rua Santa Maria considerada pela história eixo medieval que unia os dois núcleos urbanos da cidade, o Mosteiro (Vila Baixa) e o Castelo (Vila Alta).

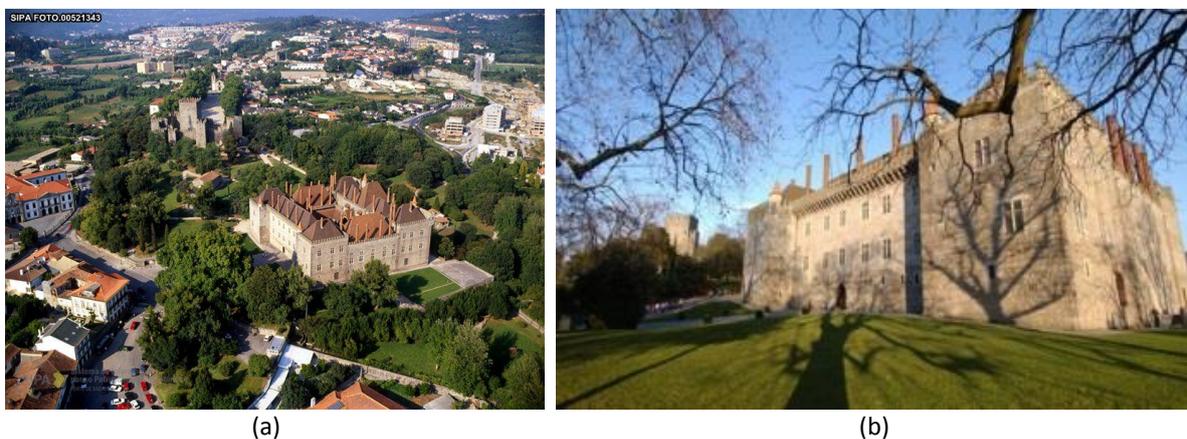


Figura 96: (a) Fotografia geral da implantação do edifício próximo ao Castelo de Guimarães; (b) Paço dos Duques de Bragança.

O terreno de implantação apresenta uma considerável elevação e o edifício rodeia-se de um parque arborizado com a presença de caminhos peatonais, rampas e escadarias, em que também se encontram outros monumentos importantes da cidade, tais como o Castelo de Guimarães e a Igreja de São Miguel do Castelo, em cotas mais altas do terreno, e a Capela de Santa Cruz em uma cota mais baixa. Em frente a sua fachada principal, há um espaço pavimentado com um lajeado de granito, formando um grande pátio frontal.

5.1 ESTUDO DO EDIFÍCIO

5.1.1 Embasamento Histórico

Exemplar da arquitectura civil medieval de características ímpares no território português (Brito 2003), o Paço dos Duques de Bragança foi construído na cidade de Guimarães a pedido de Dom Afonso (1380-1461), oitavo Conde de Barcelos e futuro primeiro Duque de Bragança, filho bastardo do Rei D. João I e de D. Inês Pires Esteves, por volta de 1420, mesmo período de seu segundo casamento. A construção senhorial, não somente pelas dimensões nada usuais em Portugal, como também pela utilização de elementos construtivos estrangeiros e pela preocupação pelo conforto e luxo, pioneiras no país nessa época, denota certa influência europeia na sua concepção (Fonte 1993). Além disto, sua construção justificase pela tentativa de afirmação da posição social do Conde que, sendo filho bastardo do rei, tentava desta forma consolidar o seu poder.

Em 1461, após o falecimento de D. Afonso (sucedido por D. Fernando, seu filho e de D. Beatriz Pereira), permanece vivendo no Paço a viúva D. Constança de Noronha, tornando o Paço um local de acolhimento e de cuidado aos mais necessitados, durante toda a sua vida, que terminou no ano de 1480. A partir do início do século XVI o edifício entra em decadência, visto a mudança da família Bragança para o Sul de Portugal, onde construíram uma nova residência.

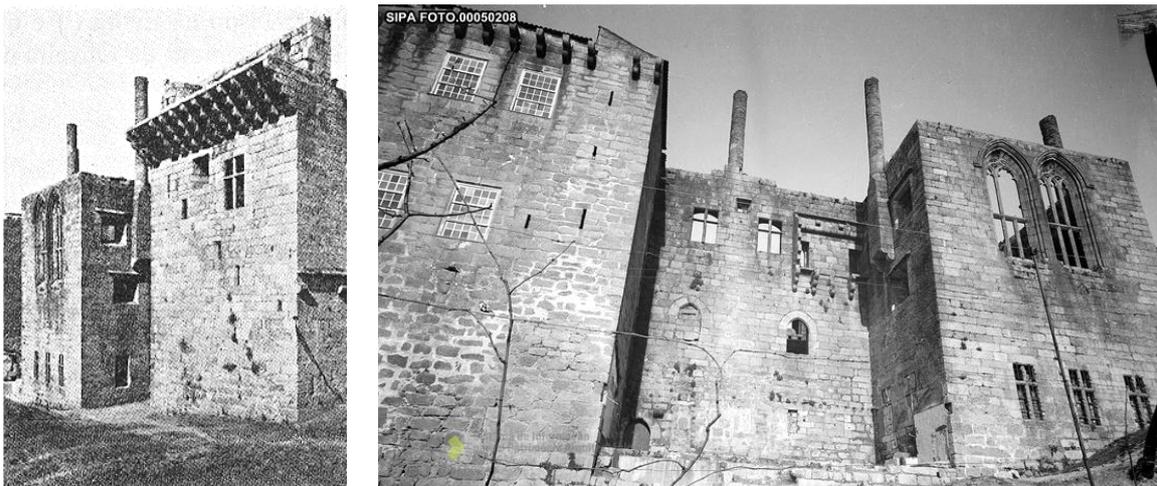


Figura 97: Período de abandono e degradação do edifício.

De acordo com Azevedo (1942), o declínio do Paço atingira o seu auge, aquando do momento em que os frades capuchos obtiveram o consentimento, por parte do Rei D. Afonso VI, para o uso das pedras das paredes interiores do edifício, para a construção do seu próprio

convento, o Convento da Piedade. Diante deste fato, a população da cidade de Guimarães insurgiu-se contra esta decisão, conseguindo que o Paço não fosse demolido. Contudo, o progressivo desinteresse pelo mesmo tornara-o numa ruína, do qual foram furtadas inúmeras pedras para várias populações vizinhas (Figura 98).



Figura 98: Vista geral do Paço dos Duques de Bragança e seu pátio central.

Somente em 1807, o Paço retorna a ter um novo uso, a ser este adaptado a Quartel Militar (Figura 99), alojando nele diversos regimentos e batalhões. Para isto, houve a necessidade de obras de adaptação, transformando uma antiga residência nobre num quartel, tendo como destaque a destruição do claustro que existia, a fim de beneficiar de um maior espaço aos militares.

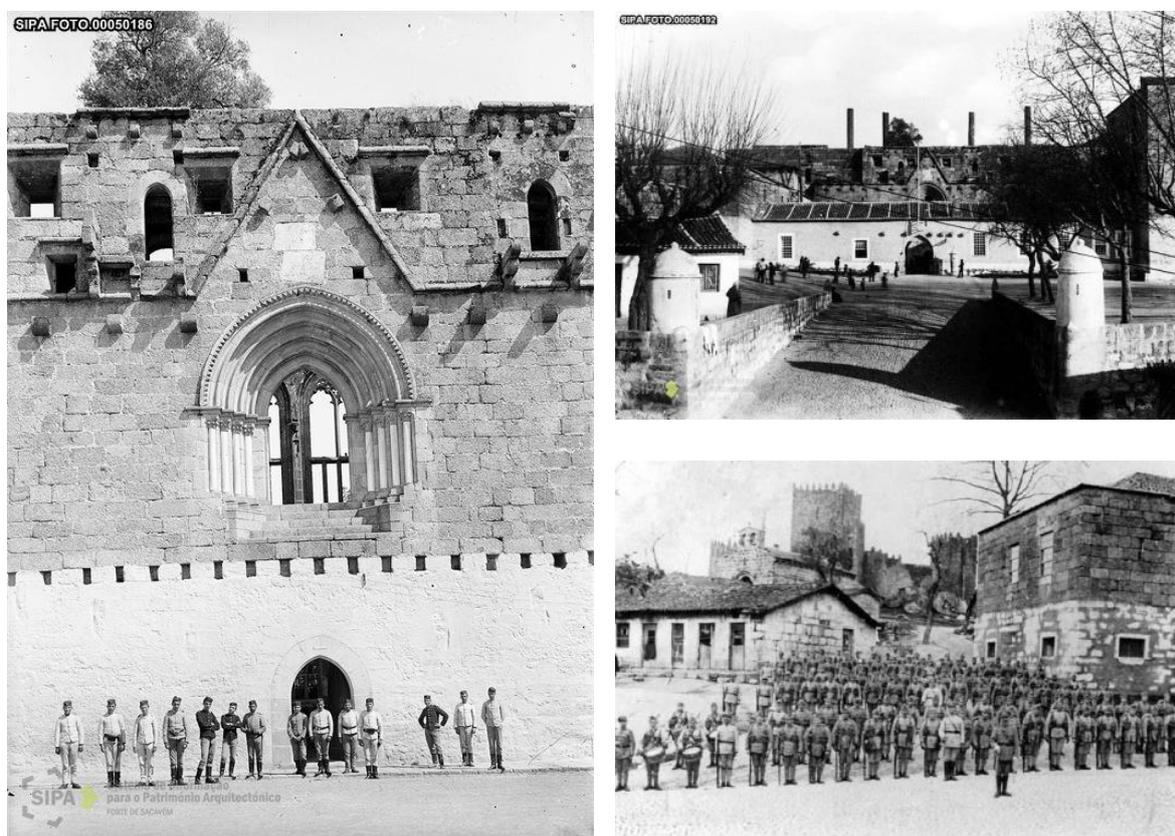


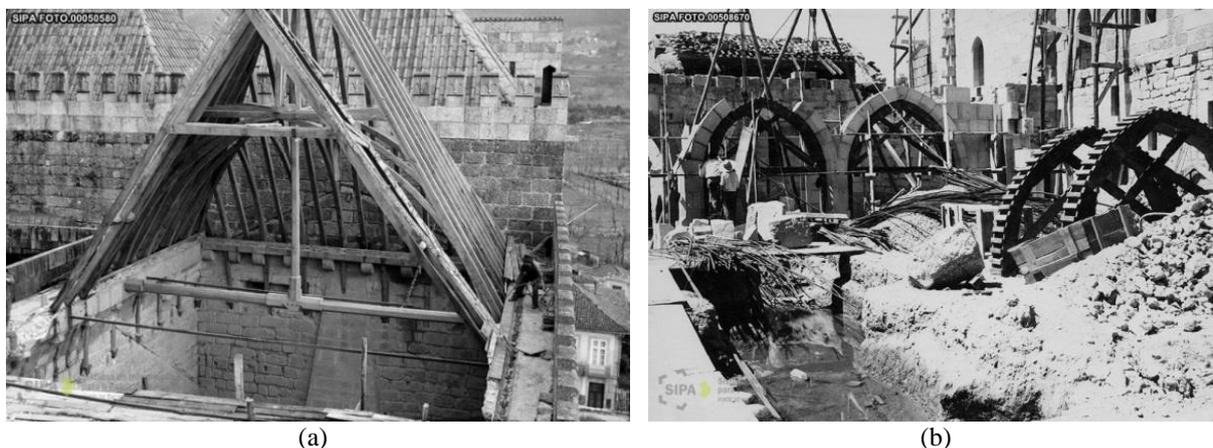
Figura 99: Período em que o edifício foi utilizado como quartel militar.

De acordo com Basto¹² (2013) e Meireles (2000), mesmo sendo considerado em 1880 pela Real Associação de Arquitetos Civis e Arqueólogos Portugueses como monumento histórico de 2ª classe, o edifício encontrava-se em um estado de tal deterioração, que se falava na probabilidade de o exército ter que o deixar.

Após o abandono das instalações do Paço pelas últimas tropas, que aconteceu em 1935, deu-se início da fase de restauro e reconstrução do edifício. Dirigido pela Direção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais (DGEMN), o restauro teve por base o projeto inicial realizado pelo arquiteto Rogério de Azevedo, com colaboração do arquiteto Baltazar de Castro, entre 1937 e 1960 (ver Figura 100 e Figura 101).



(a) (b)
Figura 100: (a) Reconstrução das chaminés; (b) Reconstrução das alvenarias.



(a) (b)
Figura 101: (a) Execução estrutura dos telhados; (b) Reconstrução do claustro e pátio interno.

Ramos *et al.* (2002) descreve dentre as tarefas realizadas na fase de restauração a demolição das construções feitas para a adaptação a quartel; a complementação da fachada principal e da voltada ao Castelo que continham apenas o primeiro andar, reconstruídas em alvenaria de pedra argamassada, utilizando blocos de granito da região; a aquisição e demolição circundante do Paço e do que se encontrava adossado à muralha contígua à fachada

¹² Disponível em <http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=1139> Acesso abril de 2016.

posterior; o recalçamento profundo dos alicerces das paredes exteriores do Paço; a consolidação das paredes e a elevação dos seus coroamentos aos lugares originais; o arranjo das cantarias das janelas e construções dos mainéis em falta; a execução e o encastramento de todos os pavimentos vigados de betão armado nos locais primitivos; o revestimento de todas as vigas e tetos de betão armado com madeira de castanho; construção do pátio interno, incluindo arcádia e galeria superior, segundo os elementos encontrados, além de adarves, varandins e merlões; a cobertura dos pavimentos de betão com tijoleira retangular; a execução das amarrações dos telhados com madeira de carvalho e sua cobertura com telha idêntica à que foi encontrada nas escavações de sondagem; construção de portas, portadas e caixilhos das janelas, incluindo a execução de vitrais em losango, armados em chumbo; e a execução das chaminés em falta correspondentes aos diversos fogões existentes. Documentos escritos antigos descrevem, em 1676, que o edifício original possuía mais de quinhentos portais, entre grandes e pequenos, e mais de setenta chaminés pelos meios das paredes, muitas com trompas de grande altura, além de escadas por dentro das paredes, por onde hoje se sobe a passear em vistosas varandas. Além disso, foram realizadas também as instalações dos serviços de cozinha; a execução das redes de saneamento, distribuição de água, eletricidade e para-raios; a montagem de quartos de banho e instalações sanitárias; a execução de uma rede de canalizações exteriores para escoamentos das águas pluviais dos jardins; o arranjo e ajardinamento dos terrenos envolventes do edifício; e a aquisição de mobiliário e decorações diversas. Nas figuras 101, 102 e 103 pode-se fazer o comparativo as plantas dos pavimentos antes e depois das obras de restauração.

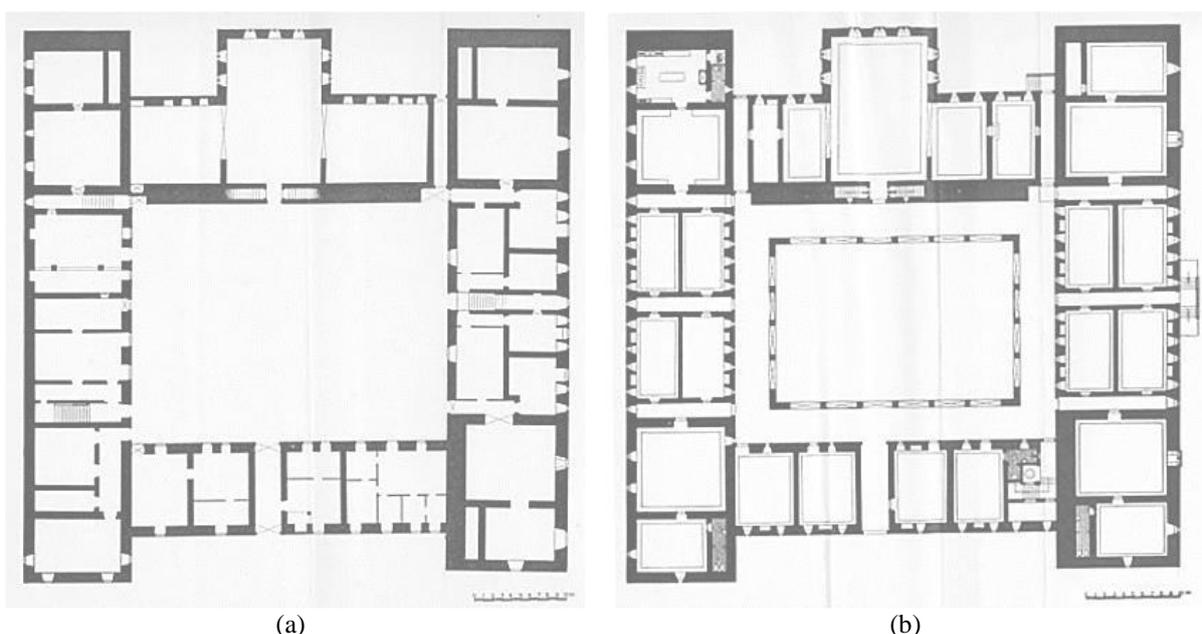


Figura 102: Planta térrea: (a) antes da restauração; (b) depois da restauração.

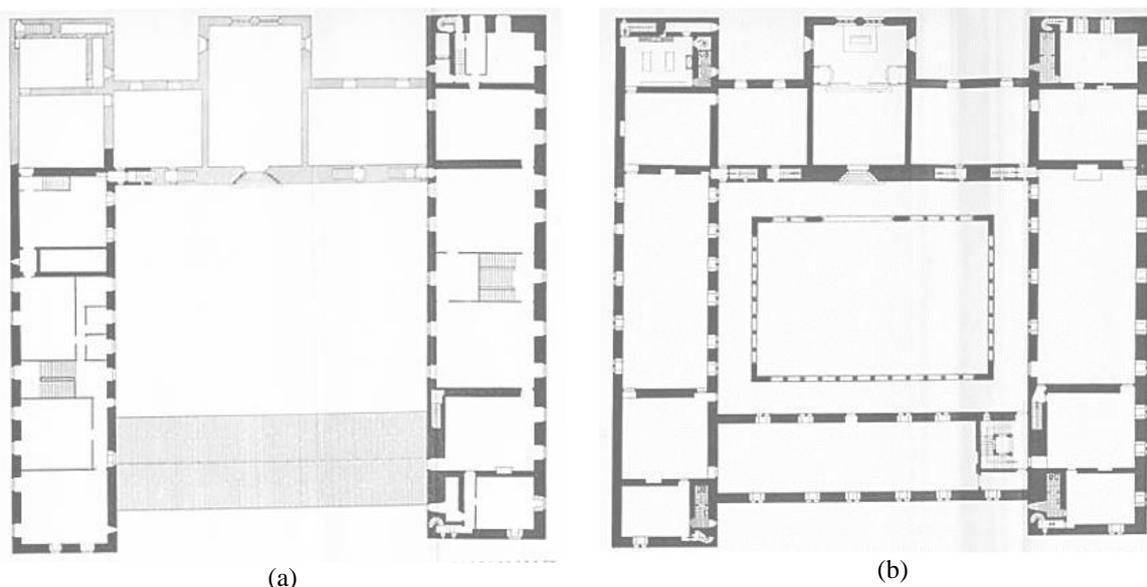


Figura 103: Planta primeiro pavimento: (a) Antes do restauro; (b) Depois do restauro.

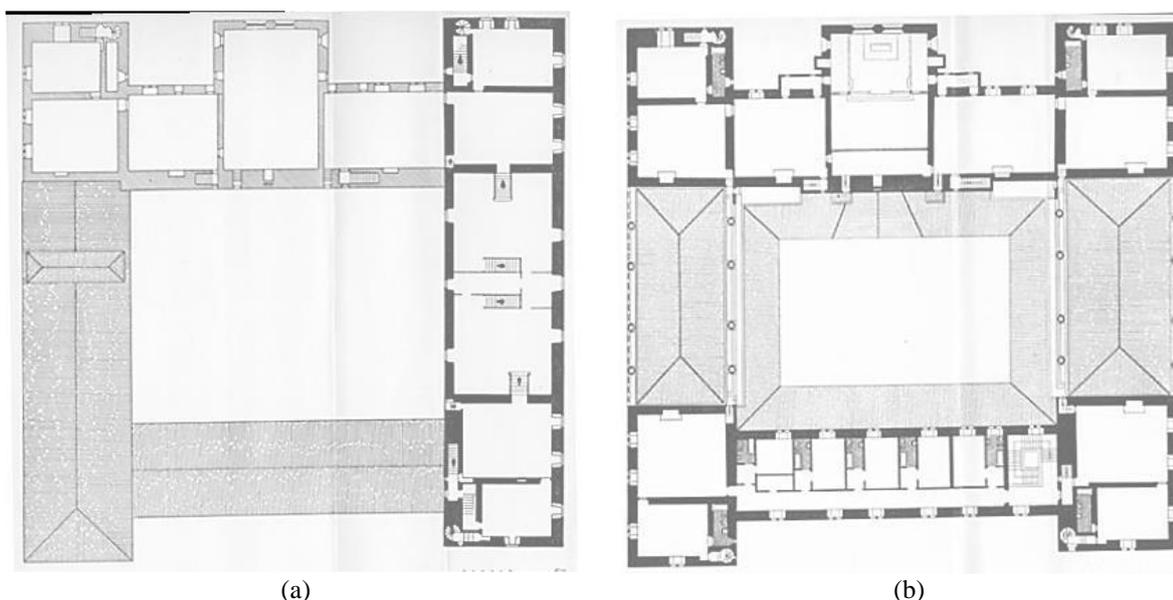


Figura 104: Planta segundo pavimento: (a) Antes do restauro; (b) Depois do restauro.

A decoração e o mobiliário buscaram concluir a concepção do restante monumento como solar nobre visitável, a reconstituir a possível vida no interior do Paço no fim da Idade Média, deduzidas através da planta do edifício e dos seus elementos interiores. Assim, foram criadas denominações para cada sala que seriam mantidas como critério museológico, além de estabelecer uma residência presidencial e de recepção de convidados de honra.

Com a finalização das obras de restauro, o Presidente da República inaugura o Paço em 24 de Junho de 1959, não sendo atribuída ao mesmo uma funcionalidade específica. De acordo com Fonte (1993), o Dr. Oliveira de Salazar quisera que se devolvesse a Guimarães a sede de capital política e diplomática e o Paço apresentava potencial para incorporar a Presidência após o seu restauro. Porém, dois meses passados depois a sua inauguração,

decidira-se que a Presidência da República ficaria reduzida a sete aposentos do segundo andar e o restante do edifício seria transformado em museu.

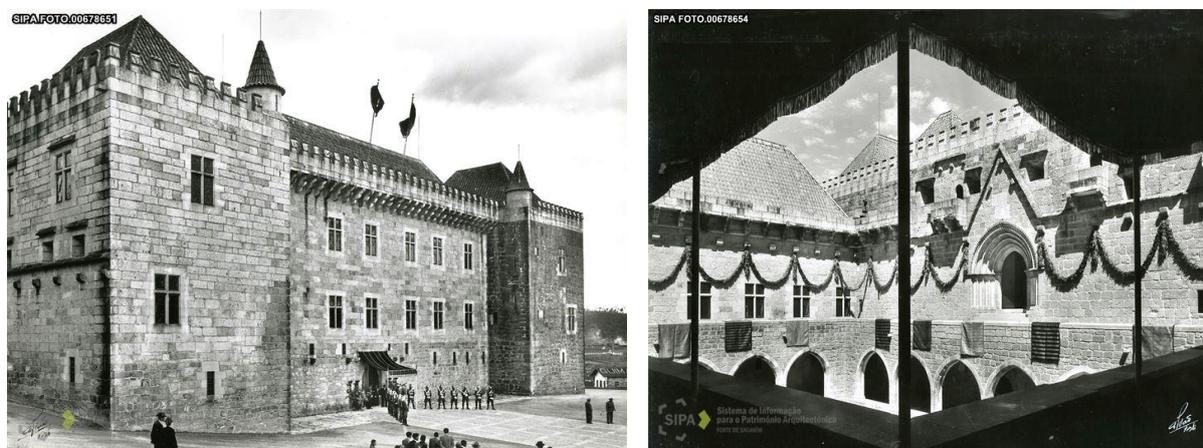


Figura 105: Inauguração do edifício após período de obras de restauro.

A autenticidade do Paço é algo bastante debatido entre vários autores, porque a informação documental, escrita e desenhada, disponível torna-se insuficiente e em algumas situações controversa, principalmente no que diz respeito à sua origem e se efetivamente corresponde a uma construção de raiz. Para muitos, a intervenção pela qual o edifício passou representa uma “adulteração” à estrutura primitiva do Paço. Por outro lado, o processo de restauro reconhece a importância de um conhecimento rigoroso do passado.

Ao que tudo indica, o Paço que existiu à mais de 500 anos, funcionalmente, segregava os serviços da vida nobre. No piso térreo encontravam-se cozinhas, adegas e cavalariças, enquanto o piso superior era caracterizado pelo salão, quartos e capela. A fachada hoje dita como principal, era apenas constituída por um piso e ostentava uma varanda que se voltava para a Vila Baixa. A varanda e a capela, situadas à mesma cota, encontravam-se ligadas por uma passagem aérea, características essas pertencentes ao edifício enquanto residência Ducal.

5.1.2 Análise Geral do Edifício

Num estilo arquitetônico borgonhês, de influências construtivas das habitações portuguesas de tipo senhorial e considerado hoje com um aspecto distante do aspecto original devido às obras realizadas, o atual Paço Gótico, como descreve Rogério de Azevedo citado por Fonte (1993), organiza-se segundo o seu traçado correspondente ao original de planta quadrilateral com, aproximadamente, sessenta metros de lado, onde sua volumetria remete pra construções de origem francesa, apresentando um desenho retangular como pátio central, com uma área aproximada de setecentos e oitenta metros quadrados juntamente com o claustro que

o circunda, integrando a capela ao centro da ala posterior e quatro torres em cada um dos seus quatro ângulos. Todavia, diferentemente da tradição francesa em que o claustro possui apenas três naves, o claustro reconstruído no Paço, em Guimarães, perfaz todo o perímetro interior.

Para além das características já destacadas, o edifício possui volumes escalonados, com diferentes coberturas em telhados de uma água nas galerias do pátio e de quatro águas nos restantes corpos, além de trinta e nove chaminés de seção oca com, aproximadamente, sete metros de altura e um diâmetro de oitenta e cinco centímetros, que representam forte influência na identidade do edifício.

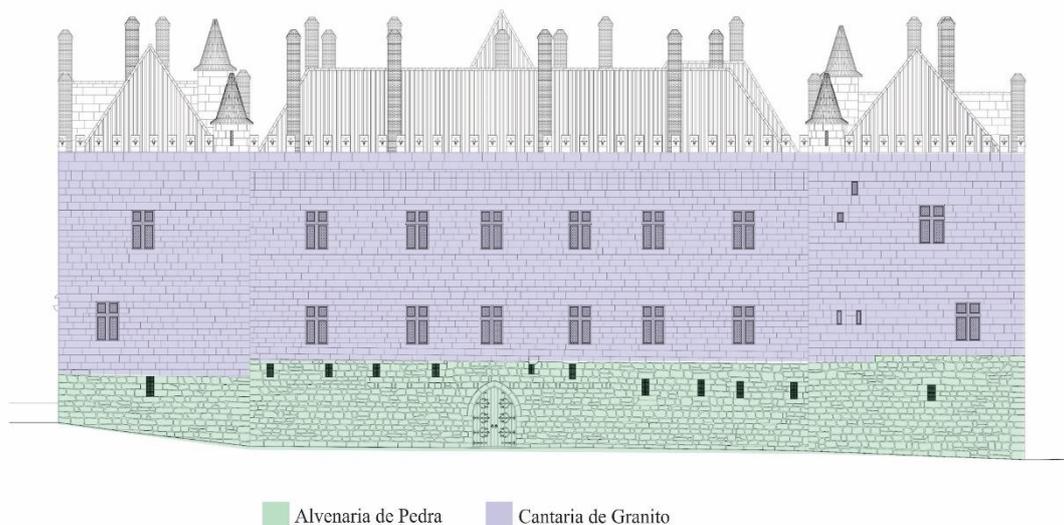


Figura 106: Diferenciação entre alvenaria da construção primitiva e a reconstrução.

Em relação aos materiais, é perceptível a existência de alvenaria de pedra com aparelho não regular ao nível térreo – vestígios da construção primitiva – e cantaria de granito aparelhada, nos outros dois pisos, que compõem as fachadas do Paço (Figura 106 e 107a).

A fachada Noroeste, ilustrada na figura acima e considerada a principal, apresenta um pano central recuado de maneira simétrica em composição com as torres, e por ela ocorre o acesso principal ao edifício. Quanto às fachadas laterais (Anexos I e II), posicionadas a Nordeste e Sudoeste, não há recuo de volumes, mantendo-se também simétricas e com o mesmo alinhamento definido pelas torres. Já a fachada hoje considerada posterior, voltada ao Sudeste (Anexo III), apresenta dois dos cinco panos recuados, sendo o pano central saliente, alinhando-se com as torres, resultante do avanço da capela, que segundo Basto¹³ (2013) enfatiza assim a sua importância, visto que outrora esta fachada era considerada a fachada principal, perceptível nos vários desenhos da época e também pela presença de dois grandes vãos góticos (Figura 107b) que iluminam o seu interior, que é uma exceção formal no

¹³ Disponível em < http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=1139 > Acesso em Abril de 2016.

edifício, uma vez que a maioria do restante dos vãos são de recorte retangular e/ou pequenas frestas.



Figura 107: (a) Diferenciação da alvenaria na fachada principal; (b) vãos góticos presentes na fachada posterior.

De modo a realizar a análise funcional do edifício (Figura 108), a disposição das inúmeras salas no piso térreo é utilizada como áreas de serviço e de apoio aos visitantes, e no piso superior todas as salas são destinadas ao Museu. Já nos últimos pisos, existentes apenas nas alas Noroeste e Sudeste, têm-se as áreas destinadas à residência oficial da Presidência da República e a Direção do Paço dos Duques, respectivamente. Além da Direção do edifício, a ala Sudeste tem uma área também pertencente à administração esporadicamente utiliza para pequenas exposições temporárias, e a Capela posicionada de maneira central, que apresenta um pé direito duplo com mezanino, integrando primeiro e segundo pavimento, podendo também ser visita como parte do Museu.

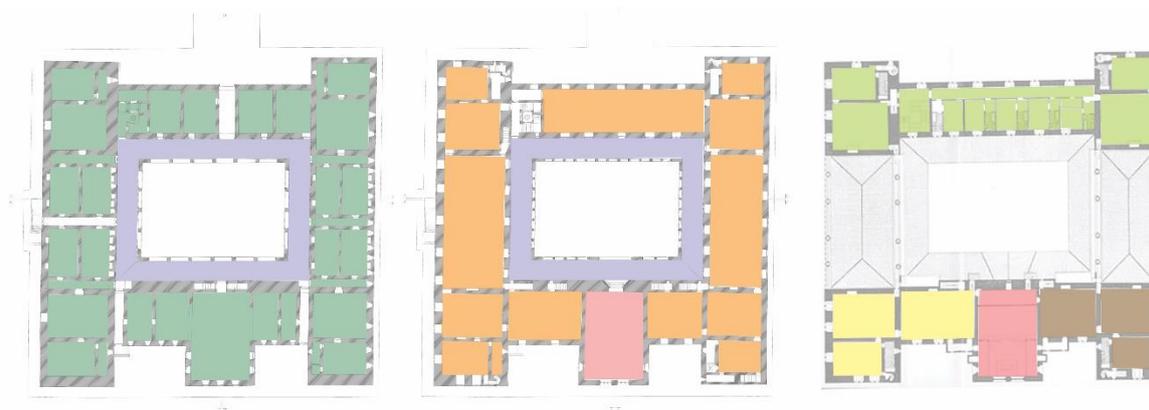
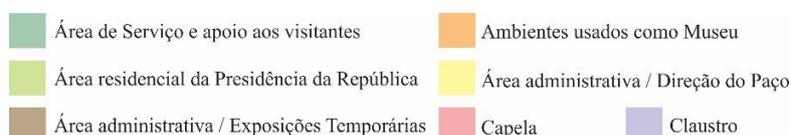


Figura 108: Esquema de funcionalidade atual do edifício.



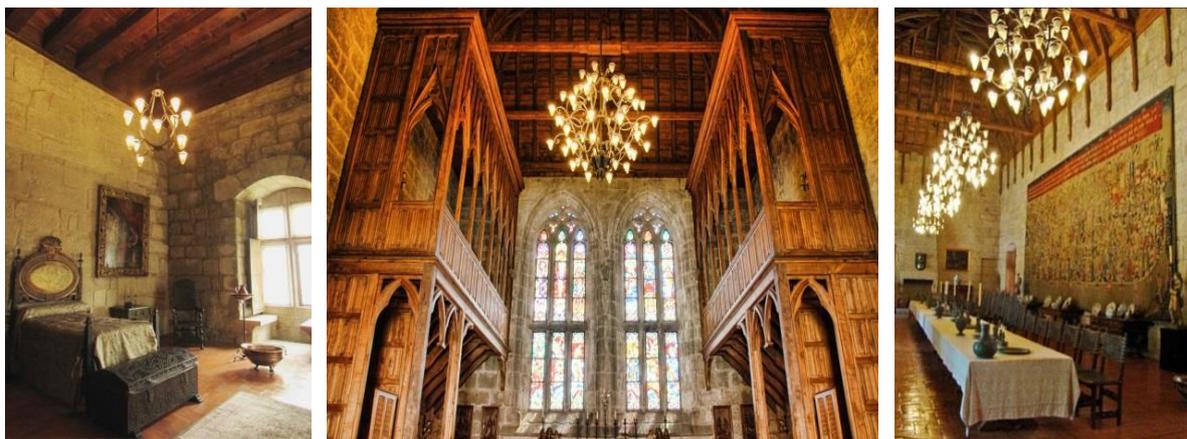


Figura 109: Ambientes internos decorados utilizados como Museu.

As salas destinadas a Museu possuem um recheio de peças e móveis datados dos séculos XVII e XVIII, numa tentativa de reconstituição do cotidiano desse edifício áureo da história de Portugal. Nos últimos anos, é considerado um dos monumentos/museus mais visitados em todo o país com uma média de, aproximadamente, 120 mil visitas por ano.

5.1.3 O Pátio Central

O pátio central do Paço, como dito anteriormente, apresenta uma área aproximada de quatrocentos e vinte e oito metros quadrados na parte interna, circunscrita pelo claustro de quatro naves e dois pisos, dividido em seis tramas nas alas Noroeste e Sudeste e em quatro tramas nas laterais Nordeste e Sudoeste com arcaria quebrada no piso térreo e em colunata no piso superior, sendo este coberto por um alpendre de madeira. Com papel fundamental no edifício, o claustro e o pátio tem acesso direto através da porta principal da ala/fachada Noroeste, somando uma área total de aproximadamente setecentos e oitenta metros quadrados. No piso superior do claustro, ressalta-se a presença de um destacável alpendre triangular, o que abriga o pórtico ogival da capela de arco quebrado com arquivoltas assentando sobre oito colunetas e capitéis decorativos (Figura 110).

Na fase de restauro do edifício em 1937, o arquiteto Rogério de Azevedo tentara introduzir uma escadaria (Figura 111a) no pátio central para acesso à Capela, de modo a representar o poder e a jurisdição, a exemplo do que sucedia com os grandes castelos e palácios de inspiração francesa (Fonte 1993). No entanto, a mesma fora demolida devido às polêmicas geradas em torno de sua implantação.

Por ser um espaço amplo e bastante propício para eventos, o Paço utiliza atualmente o pátio central para realizar eventos culturais esporádicos de música (Figura 111b) e dança, além de cerimônias e recepções (Figura 111c). Ressalta-se que, pelo pátio ser um ambiente

aberto, certos eventos necessitam da utilização de estruturas efêmeras para cobertura do espaço – como pode ser visto na Figura 111(c) - uma vez que é necessário devido às variações climáticas.

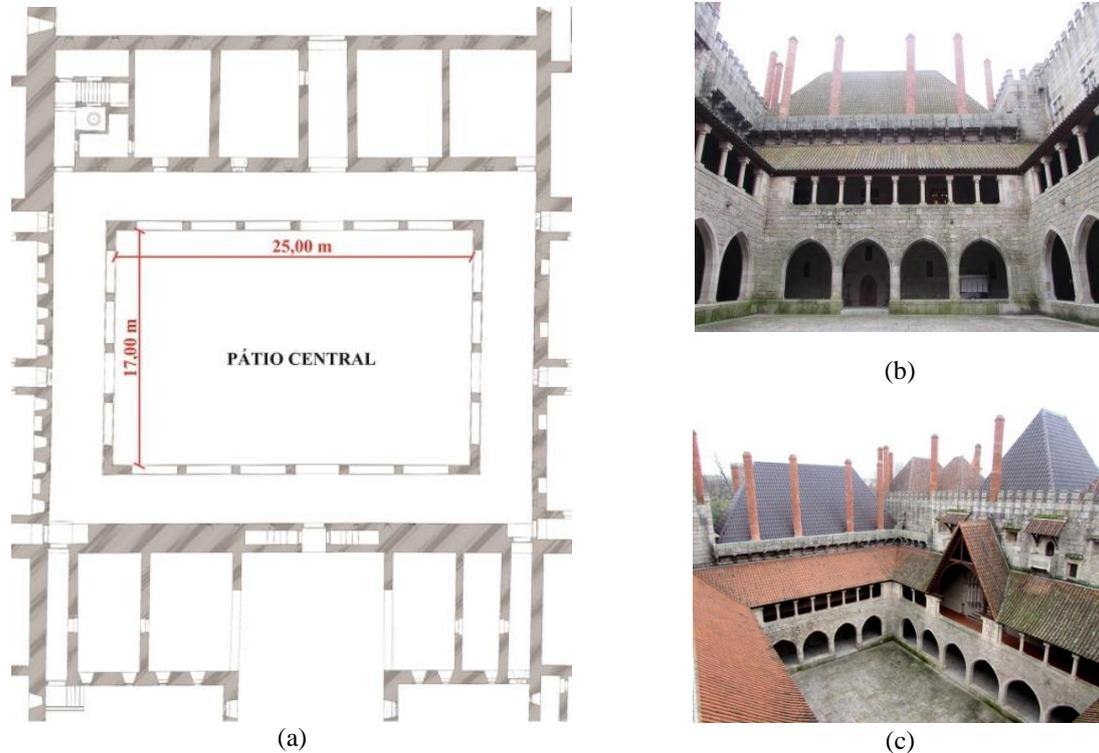


Figura 110: (a) Planta com as dimensões do pátio central; (b) Vista do pátio central para o claustro; (c) Vista geral do pátio central.

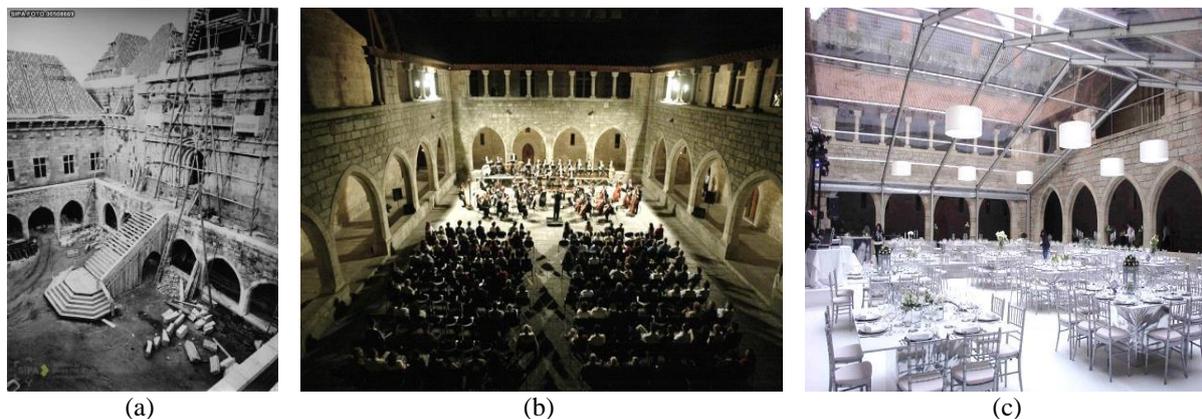


Figura 111: (a) Escadaria construída e demolida durante a restauração; (b) Evento musical; (c) Recepção/jantar utilizando estrutura efêmera como cobertura.

Neste contexto, surge a motivação para a incorporação de uma solução estrutural cinética para cobertura do pátio central do edifício, que se adapte a todos os condicionantes que o local apresenta e respeitando todos os elementos considerados importantes para a estética do conjunto arquitetônico, de modo a facilitar o aumento da demanda deste espaço para os usos existentes e também capacitá-lo para novos usos.

Destaca-se, inicialmente, o elemento de maior importância presente no pátio que é o alpendre triangular de duas águas na nave Sudeste, que sinaliza a localização da Capela do edifício. Este alpendre tem uma altura de aproximadamente nove metros em relação à base inferior do alpendre de uma água que circunda e cobre toda a galeria do segundo piso. Além disso, existem duas aberturas com balcões, uma de cada lado do alpendre triangular, com elementos de proteção na sobreverga, juntamente com outros pequenos vãos, acessados pelo terceiro piso do edifício, que se posicionam na mesma altura do alpendre triangular.

As naves Sudoeste e Nordeste apresentam apenas dois pisos, o térreo e o pavimento superior. Nessas naves, as vistas voltadas para o pátio apresentam acima do alpendre de uma água – cobertura essa de proteção ao piso superior do claustro - um balcão corrido de acesso às chaminés e ao telhado do segundo piso. Essas passarelas apresentam uma largura de sessenta e cinco centímetros e um guarda-corpo de aproximadamente um metro de altura. Esses elementos podem ser considerados, de certo modo, possíveis potencialidades para a implantação da cobertura, uma vez que se pode utilizar deste espaço, tanto na fase de montagem, como para a fixação de elementos estruturais necessários para a mesma. Por outro lado, nessas vistas está localizado um grande número de chaminés, consideradas elementos de grande importância para a identidade do edifício, o que impossibilita que a cobertura seja um elemento opaco.

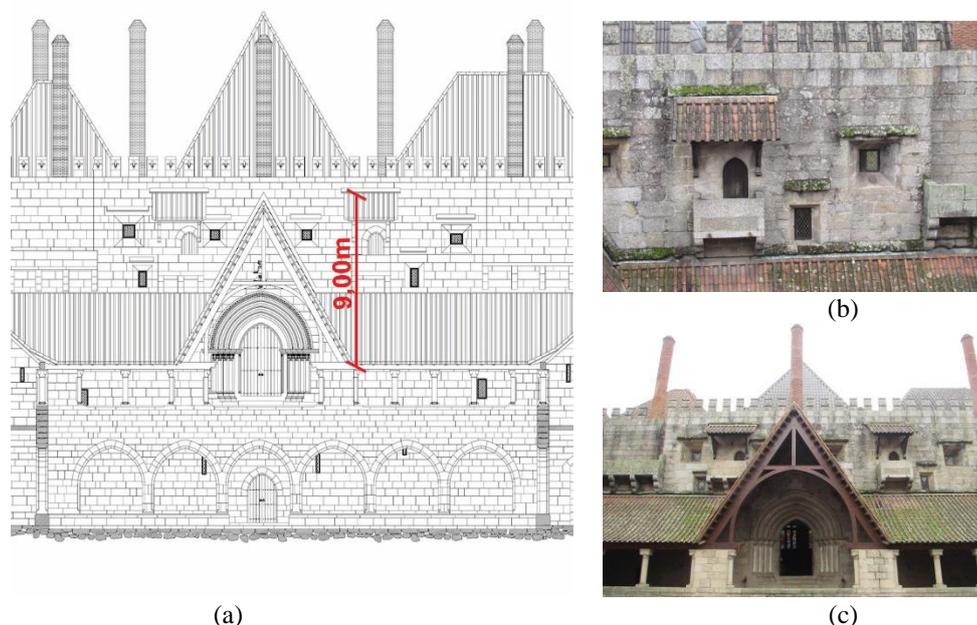


Figura 112: (a) Vista do elemento destaque do claustro com altura; (b) Pequenas aberturas na lateral; (c) Alpendre triangular.

Outro condicionante existente é a drenagem das águas pluviais. Os alpendres de uma água do piso superior do claustro não possuem caldeiras para a recolha da água da chuva. Já as coberturas de quatro águas do primeiro e segundo piso apresentam caldeiras nas suas bases,

direcionando alguns tubos de queda para o pátio central, que são recolhidas por quatro saídas de água presentes em cada canto do pavimento do pátio. De modo a solucionar este problema, torna-se extremamente necessário a aplicação de uma caleira em todo o perímetro da cobertura de uma água que cobre o claustro, com dimensões suficientes para a total recolha e bloqueio da água da chuva, com 4 (quatro) tubos de queda em cada canto, de maneira que a água seja direcionada às saídas.



Figura 113: (a) Balcão junto a cobertura do primeiro pavimento; (b) Drenagem da água pluvial nos telhados; (c) Queda da água pluvial para o alpendre de uma água do claustro.



Figura 114: (a) Saída da água pluvial para o alpendre de uma água do claustro; (b) Queda de água para o pátio central; (c) Drenagem da água nos quatro cantos do pavimento do pátio central.



Figura 115: Vista da nave noroeste e o pátio central.

A nave Noroeste apresenta no seu segundo piso vãos retangulares simétricos, sem nenhum elemento destaque. Estes vãos iniciam ao nível da base mais alta do alpendre da galeria do piso superior do claustro e terminam um pouco acima da altura do guarda-corpo dos balcões das naves Sudoeste e Nordeste.

5.1.4 Análise Bioclimática

Ao realizar uma análise das manifestações climáticas em relação ao edifício, é possível concluir que grande parte do edifício recebe incidência solar no decorrer do dia, apresentando nas fachadas Nordeste e Sudeste uma maior incidência do sol no período da manhã e as fachadas Sudoeste e Noroeste no período da tarde. Ressalta-se também que, em relação aos ventos, os dominantes são de Nordeste (20,6%), seguindo-se em importância o quadrante Sudoeste (8,6%) na cidade de Guimarães (Câmara Municipal de Guimarães, 2016).

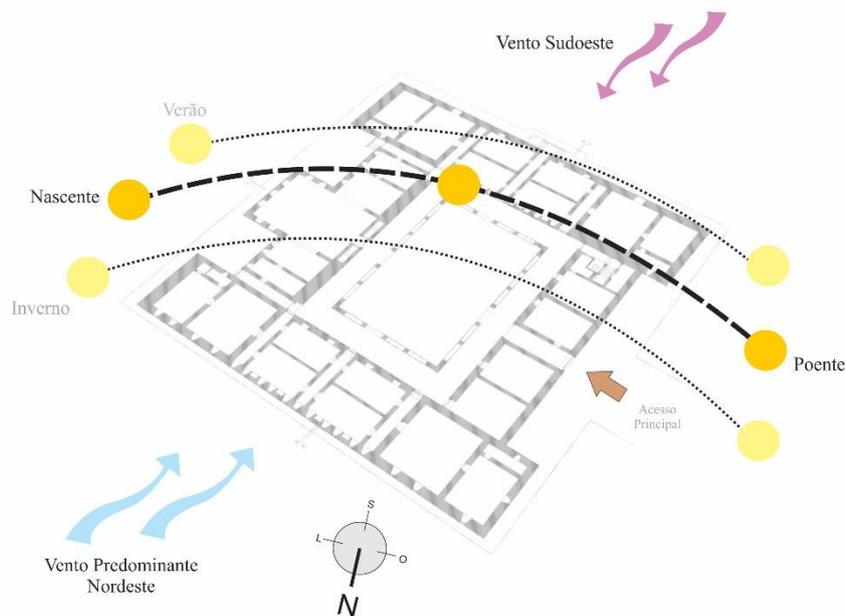
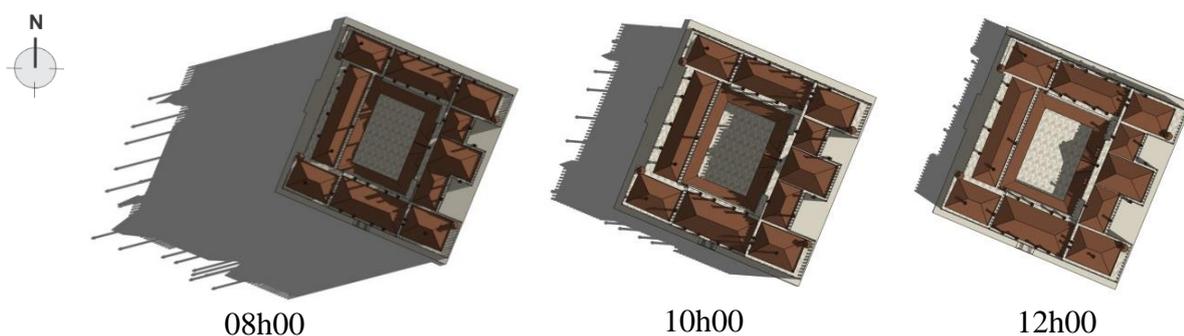


Figura 116: Análise bioclimática - incidência solar e ventos - esquemática.

De modo a compreender melhor a influência solar no pátio central, principalmente no verão – estação em que o sol tem maior impacto na vivência de um espaço quanto ao conforto do ambiente e visto as funções principais da estrutura de sombrear, ventilar e ser estanque a chuva – nas ilustrações da Figura 117 compreende-se que a incidência do sol neste espaço tem maior impacto no intervalo entre às 12h00 e 16h00, com a incidência quase que na totalidade às 14h00, enquanto o espaço é sombreado pelo edifício anteriormente às 10h00 e depois das 16h00, tendo uma melhor ambiência e conforto nestes horários.



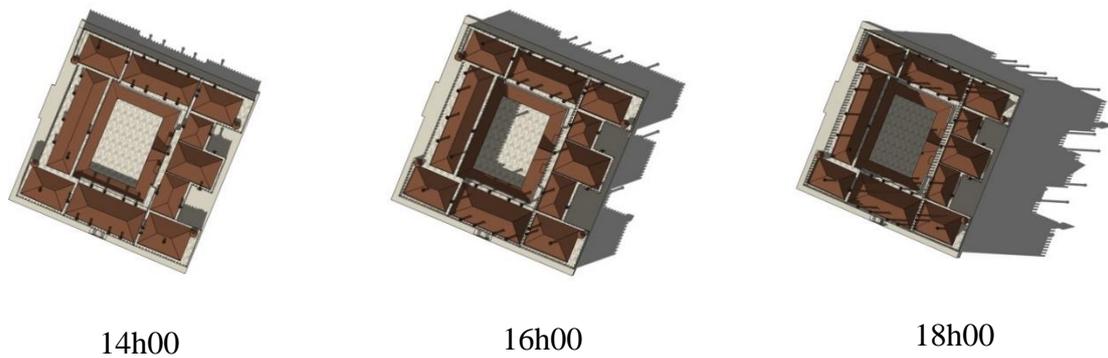


Figura 117: Estudo de sombreamento do edifício no solstício de verão.

Essa análise é de grande importância para a proposição da disposição da cobertura para o pátio central, uma vez que identifica as potencialidades para aplicação de métodos e/ou elementos que possibilitem a ventilação e iluminação natural do espaço, além de fornecer informações importantes para a escolha adequada dos materiais a serem utilizados.

5.2 O PROJETO

A incorporação do módulo para a composição de uma cobertura para o edifício Paço dos Duques de Bragança busca apresentar uma solução estrutural arquitetônica adaptativa passível de proteger o espaço do pátio central/interno do edifício das variações climáticas, possibilitando a utilização deste espaço à novos usos, em diferentes finalidades. Busca-se, portanto, a concepção de uma estrutura geral cinética, ou seja, que tenha a capacidade de alterar a sua forma, adaptando-se às necessidades dos utilizadores e ao ambiente. Como diretrizes para tal proposição, tem-se:

- A estrutura geral deve ter caráter independente, não apresentando nenhuma fixação e apoio na estrutura do edifício, seguindo conceitos de máxima conservação e respeito pelo sistema construtivo do monumento de alto valor patrimonial;
- Deve respeitar todos os elementos arquitetônicos existentes no pátio central, uma vez que estes são partes importantes para a identidade e caracterização do edifício. Destaca-se o alpendre triangular que realça a localização da Capela e as chaminés;
- Distinguibilidade entre o edifício e a intervenção, de modo a ser possível compreender os diferentes momentos de construção. Para isso, tem-se a utilização de novas técnicas e materiais, resultando numa estrutura contemporânea, remetendo a conceitos atuais em harmonia com o existente;

- Facilidade de montagem e desmontagem, trazendo também como princípio a reversibilidade da estrutura, sendo capaz de ser removida do contexto do edifício sem deixar vestígios permanentes da intervenção;
- Capacidade de adaptação ao meio em que está inserido e às necessidades dos utilizadores, através da incorporação do módulo desenvolvido, possibilitando o conforto térmico e lumínico do espaço através da alteração da forma e da estética dos materiais.

Seguindo essas diretrizes, a área delimitada para a aplicação da cobertura segue as dimensões da Figura 118, uma vez que essa área abrange não somente o pátio central, mas também a cobertura do claustro, de modo a possibilitar a concepção de uma cobertura que respeite a visão dos utilizadores quando localizados no pátio, de todos os elementos arquitetônicos de importância no edifício.

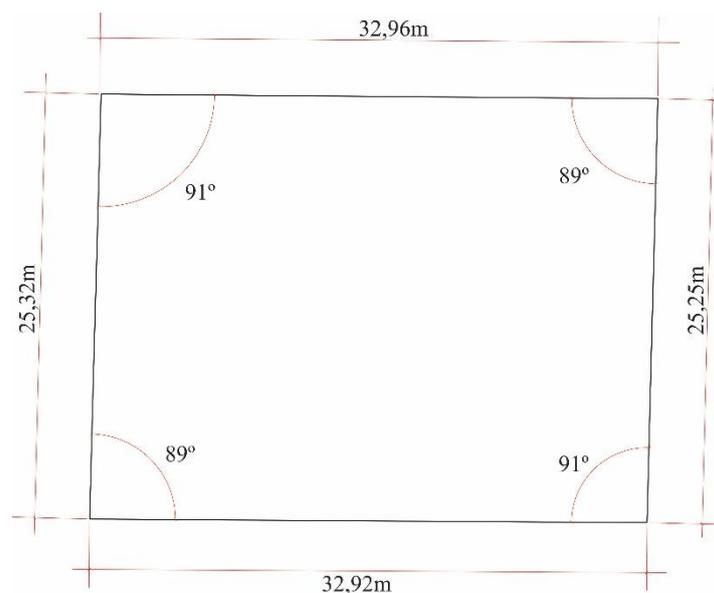


Figura 118: Área total para aplicação da cobertura.

5.2.1 O Conceito

Unindo o conceito para o desenvolvimento do módulo baseado nas folhas das árvores e plantas com alguns parâmetros destacados na delimitação das diretrizes, a criação da estrutura para cobertura do pátio partiu da ideia geral de origem e forma de uma palmeira, de modo a trazer algumas características dessa planta para a concepção do projeto (Figura 119). A palmeira é uma planta que atinge, em algumas espécies, elevadas alturas, apresentando suas folhas apenas na parte mais alta, formando um tufo na extremidade do caule.

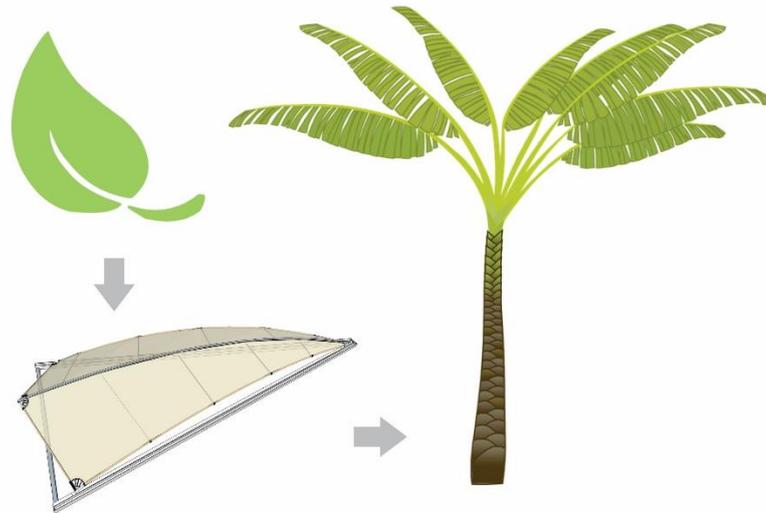


Figura 119: Esquema do conceito da estrutura para cobertura do pátio.

A ideia foi partir da mesma origem conceitual do módulo, ou seja, baseado na natureza. Assim sendo, viu-se relevante utilizar de uma árvore ou planta para conceitualizar o projeto para a cobertura, uma vez que vai incorporar vários módulos estudados que correspondem à folhas. Além das grandes alturas das palmeiras já citadas, outra característica é que as folhas, quando em conjunto compoem uma árvore ou planta, apresentam a função de sombrear os espaços sob elas, o que remete ao conforto do espaço buscado nessa proposição.

Outro ponto é que as árvores, apresentando apenas um apoio – que corresponde ao caule – podem ter uma copa de diâmetro consideravelmente grande, sem precisar de outras maneiras de suporte para resistir às ações externas a que está sujeita, trazendo, assim, o conceito de independência estrutural que corresponde à uma das diretrizes projetuais. Visto esse contexto, a proposta de cobertura configura-se por quatro estruturas que remetem a quatro palmeiras, conforme desenho exemplo na Figura 120.



Figura 120: Exemplo de estrutura incorporando o módulo baseada numa palmeira.

Numa composição quadrada/retangular, a estrutura é formada por 8 módulos de base triângulo retângulo. Basicamente, é composta pela coluna de apoio, as bases rígidas e a estrutura leve superior do módulo. A coluna é uma estrutura metálica treliçada móvel, apresentando uma forma mais orgânica para a sua base, com elementos curvos que remete à forma de um caule, resultando numa base junto ao piso de maior área.

5.2.2 A cobertura

Partindo do conceito baseado numa palmeira, como já visto anteriormente, para formar uma estrutura composta por módulos estruturais adaptativos a ser incorporada como cobertura do pátio central do Paço dos Duques, é proposto a implantação de quatro estruturas – duas quadradas e duas retangulares, conforme vista superior da Figura 121 (dimensões gerais da estrutura no anexo VI).

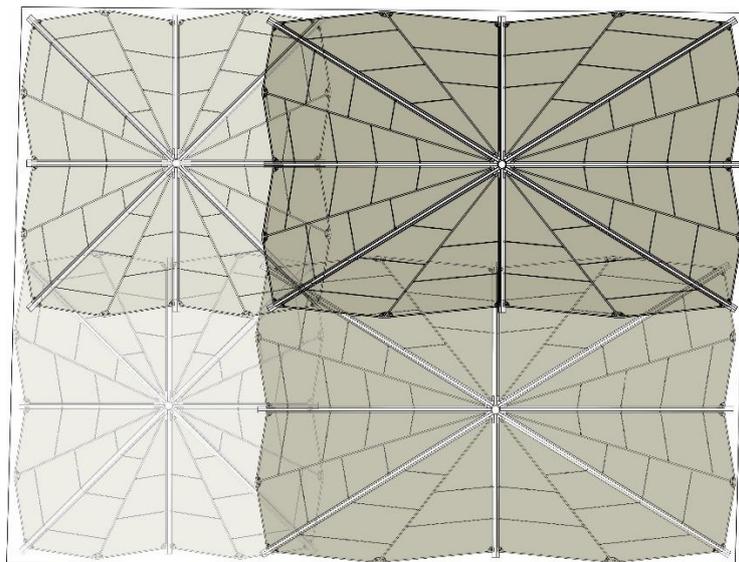


Figura 121: Vista superior das estruturas em relação ao espaço delimitado para a implantação da cobertura no edifício.

Cada estrutura apresenta uma altura de diferença de 50 cm entre cada, uma vez que são posicionadas de modo que se sobrepõem nas partes internas numa dimensão de um metro. A ordem da estrutura posicionada na parte mais alta está de acordo com as tonalidades da Figura 121, sendo a mais alta a de tom mais escuro e a posicionada na parte mais baixa a estrutura preenchida de tom mais claro. Além disso, cada um dos “braços” – denominado assim para a composição dessa estrutura – que representa a base rígida do módulo e também a calceira de recolha das águas pluviais, apresenta uma angulação específica, sendo assim possível respeitar todos os elementos arquitetônicos do espaço e ao mesmo tempo cobrir toda

a área delimitada para a implantação de uma cobertura. Nos cortes esquemáticos das Figuras 122 e 123, é possível ver as alturas das colunas de apoio da estrutura, estando a mais baixa a 15 m de altura e a mais alta a 16,50 m, além das diferentes angulações dos braços da estrutura, de modo que se molda ao edifício. As estruturas em proximidade com a nave Sudeste apresentam braços com angulações mais elevadas para acompanhar o alpendre triangular de destaque para a Capela e os braços das estruturas próximas da nave Noroeste estão inclinados até a parte superior das aberturas, enquanto que as extremidades das quatro estruturas que estão em proximidade com as naves Sudoeste e Nordeste apresentam os braços com angulação menor de maneira a estarem mais próximos do guardacorpo dos balcões, apresentando mínimo espaço entre a cobertura e o edifício.

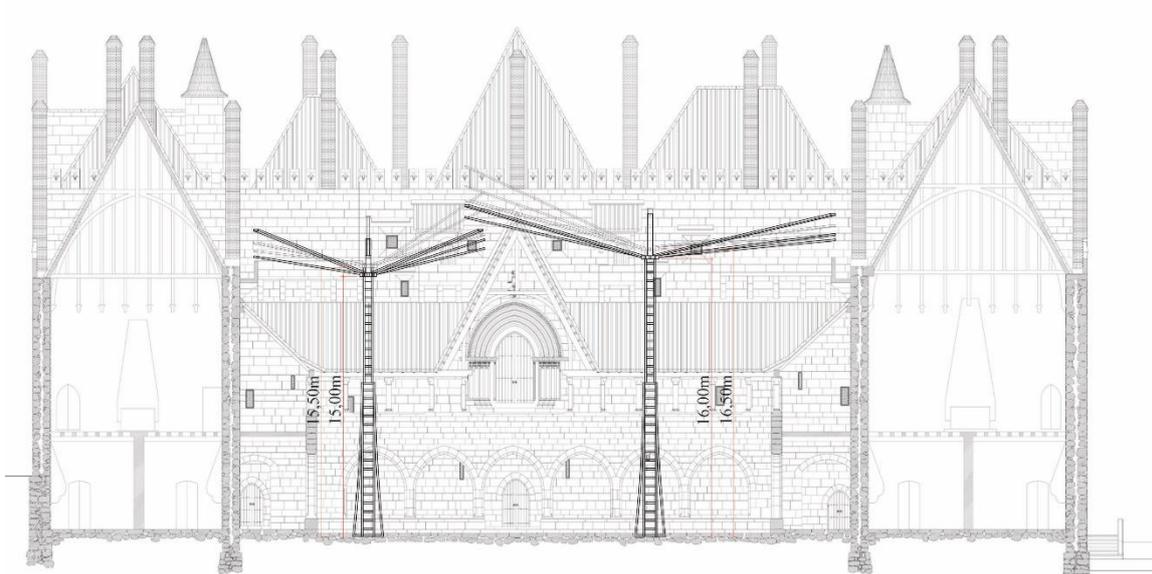


Figura 122: Corte esquemático 1.

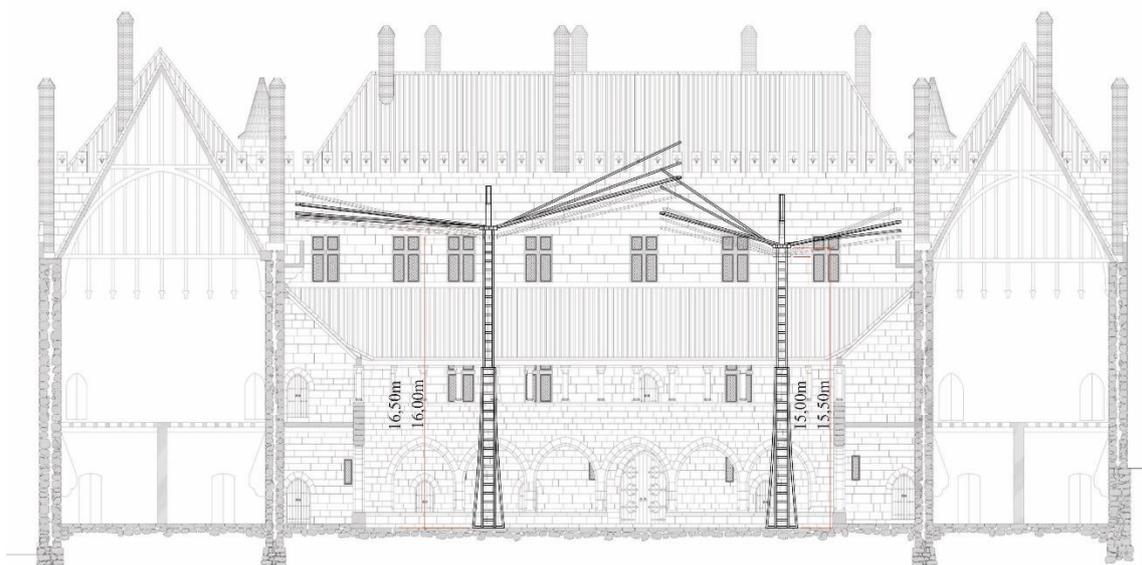


Figura 123: Corte esquemático 2.

A inclinação dos braços da estrutura, além da função de capacitar a estrutura moldar-se aos elementos arquitetônicos do edifício, direciona a água da chuva para o tubo de queda que fica localizado no centro da estrutura e na parte interna da coluna treliçada, com saída na parte inferior do tablado em madeira proposto para o espaço do pátio central. Como destacado na análise do pátio central do edifício, é necessário a implantação de caleiras na base do alpendre de uma água que cobre o claustro (destacado em vermelho na Figura 124a), uma vez que a água das coberturas do segundo pavimento do edifício tem saída para este e também devido as estruturas propostas para cobertura do espaço não estarem completamente fixadas no edifício, o que acarreta a estrutura não ser completamente estanque nas extremidades. Assim, essa caleira deve apresentar quatro tubos de queda nos cantos do pátio, também com saída na parte inferior do tablado de madeira (Figura 124b).

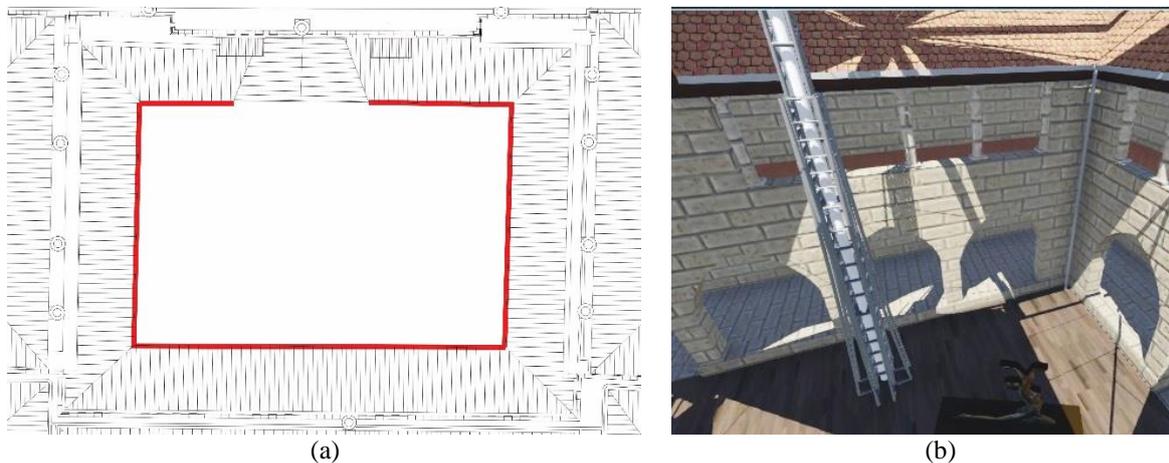


Figura 124: (a) *Projeção da implantação de caleira para recolha da água da chuva;* (b) *Ilustração da caleira com tubo de queda no canto do pátio e tubo de queda dentro da coluna treliçada da estrutura.*

Para facilitar a montagem das estruturas, a proposição das colunas e dos braços mecanizados, resultando numa estrutura móvel, possibilita que a estrutura rígida se posicione na altura destinada de maneira independente. Numa base circular com oito espaços onde os braços são fixados com um mecanismo de rotação, as bases rígidas inicialmente posicionadas na vertical tomam sua posição final quando já alcançadas sua altura final, começando a abertura em ordem da estrutura de menor altura até a de maior altura. A Figura 125a demonstra a evolução formal da estrutura rígida, iniciando pela mudança de altura da coluna e, por fim, a abertura dos braços de apoio.

Visto a diferença de angulação entre eles, vale ressaltar que as bases rígidas apresentam uma forma diferente das destacadas na especificação do módulo no Capítulo 4. Para que a estrutura leve superior do módulo seja fixada nos braços, as bases de apoio dos elementos ativos em flexão laterais devem também apresentar angulações diferentes em

relação ao eixo x , o que determina que cada braço apresenta secções distintas (exemplo na Figura 125b).

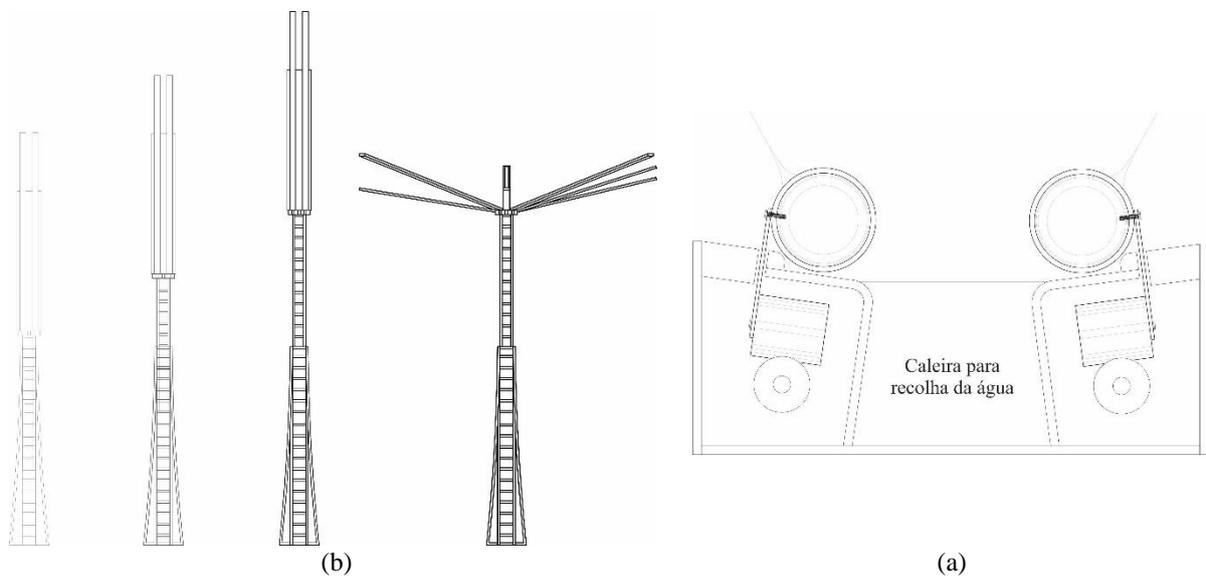


Figura 125: (a) Movimento da coluna de apoio das estruturas; (b) Secção exemplo de braço da estrutura com diferente angulação em relação ao eixo x .

Depois das estruturas rígidas estarem abertas, tem-se a aplicação dos travamentos entre os braços, para maior resistência da estrutura e, por fim, a aplicação das estruturas leves superiores, previamente montadas, uma vez que seu baixo peso possibilita a facilidade de manuseio e levantamento, fixando os três pontos de apoio do triângulo na base (Figura 126). Depois de montadas, cada módulo terá seu funcionamento independente através do mecanismo de motor sem fim – conforme detalhado no Capítulo 4 – capaz de alterar sua forma, através do movimento e da flexão ativa dos seus elementos, possibilitando aberturas para a ventilação natural do espaço.

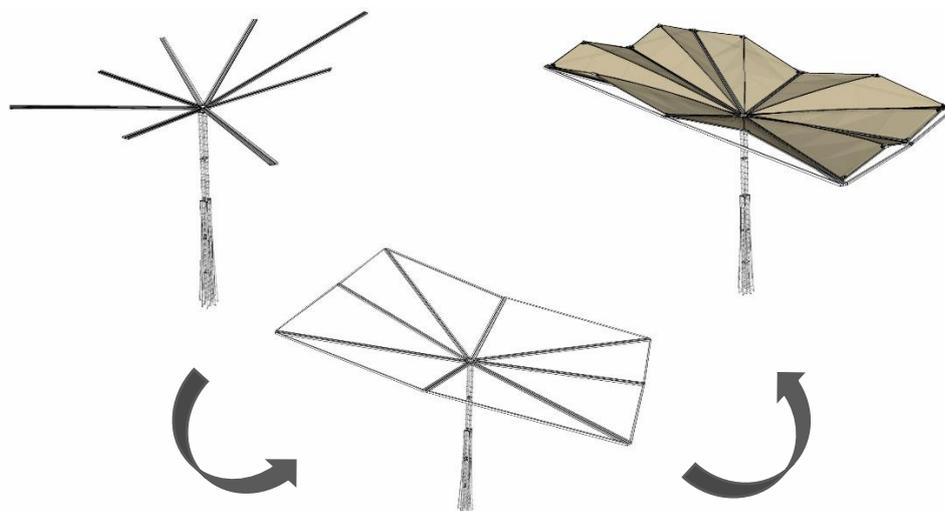


Figura 126: Ordem de montagem da estrutura.

Os módulos cinéticos, compostos por elementos ativos em flexão, juntamente com o uso de membrana arquitetônica para o seu fechamento, devem apresentar comportamentos distintos quanto aos aspectos funcionais e, principalmente, estéticos na estrutura para cobertura em que estão incorporados. Visto a importância do edifício para a cultura e história do país, a ideia é trazer para a cobertura - além de novos conceitos da arquitetura e engenharia - uma estrutura capaz de interagir com os utilizadores, de modo que a incorporação de materiais inovadores apresentem, além dos parâmetros funcionais, uma estética diferenciada, tornando-se um elemento destaque no edifício.

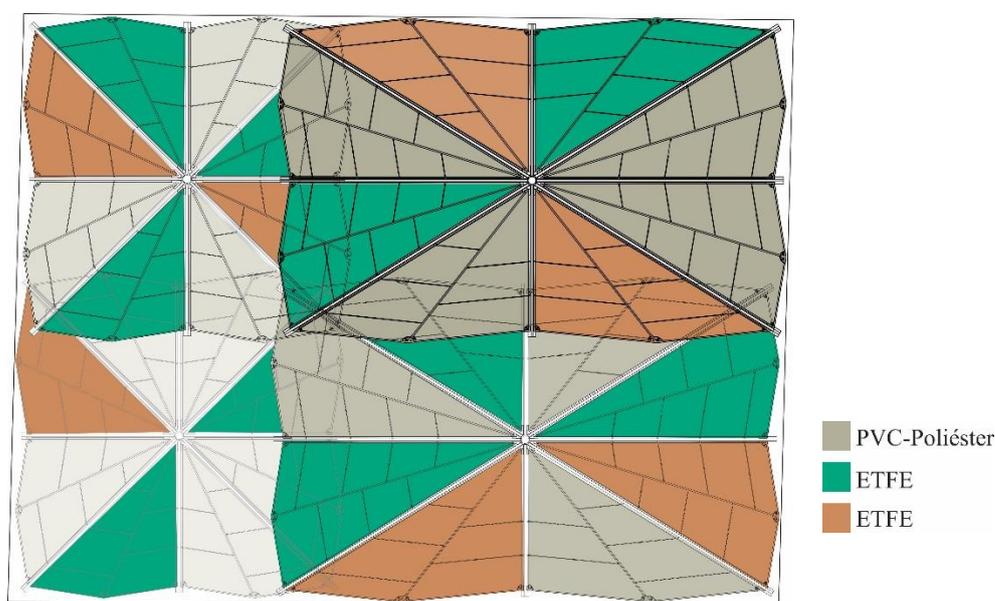


Figura 127: Vista superior da cobertura com identificação estética dos módulos.

Na Figura 127 tem-se a vista superior da cobertura, formada pelas quatro estruturas, onde é possível perceber a diferenciação entre os módulos em três cores diferentes. Essencialmente, os módulos que apresentam a cor nude, são compostos por membranas de PVC-Poliéster, semi-translúcida, com a aplicação de células solares orgânicas para dar capacidade fotovoltaica ao módulo, de modo que a energia gerada alimente a iluminação led presente nos braços rígidos da estrutura. Essa semi-translucidez permite a visão dos utilizadores para elementos arquitetônicos importantes do edifício como as chaminés e luz natural difusa no ambiente, mas ao mesmo tempo impede a entrada de raios solares diretos, obtendo melhor conforto no espaço. Quanto aos módulos verdes e laranjas, estes são compostos de filme ETFE, completamente transparentes, com a incorporação de polímeros termocromáticos que, ao receberem a luz direta do sol, provocando o ganho de energia térmica, alteram sua cor – para as definidas na figura em verde e laranja – alterando sua aparência e tornando-se mais opacos, de modo a bloquear a entrada dos raios solares diretos.

Estes mesmos módulos que apresentam a incorporação de polímeros termocromáticos, devem conter também na composição do filme ETFE nanomateriais luminescentes, no qual capacita o material emitir luz por um período de tempo após um ganho de energia térmica. Portanto, o ganho de energia térmica através dos raios solares capacita o módulo alterar sua cor instantaneamente durante o dia e permite emitir luz durante à noite. Em situações em que não há ganho de energia através do sol – em dias nublados por exemplo – o ganho de energia térmica pode ser realizado por energia elétrica, alimentada pelos módulos com capacidade fotovoltaica.



Figura 128: Perspectivas do pátio central do edifício com a estrutura para cobertura proposta: (a) sem incidência direta do sol; (b) com incidência direta do sol; (c) alteração da cor dos módulos em ETFE devido o ganho de energia térmica; (d) emissão de luz ao anoitecer dos módulos em ETFE com materiais luminescentes; e (e) a estrutura durante a noite.

As imagens compoem a Figura 128 correspondem a simulação do comportamento dos módulos incorporados na cobertura do pátio no decorrer do dia. A perspectiva (a) corresponde a estrutura no seu estado inicial sem o ganho de energia térmica, estando, portanto, os módulos em ETFE na sua aparência transparente. Com o início da incidência dos raios solares diretos (b), os módulos em ETFE passam a alterar para as cores determinadas (c), demonstrando sua capacidade luminescente ao anoitecer (d) e durante a noite (e). A escolha das cores foi baseada no conceito do módulo inspirado nas folhas das árvores e plantas, sendo o verde a representação de uma folha no período de primavera e verão com alto nível de clorofila e o laranja-marrom ocasionado nas folhas durante o outono, devido ao decréscimo da temperatura e a consequente redução da produção de clorofila.

A Figura 129 ilustra visões gerais do edifício com a implantação da cobertura no pátio central, com a aparência inicial das membranas e com a posterior mudança estética dos módulos em ETFE.

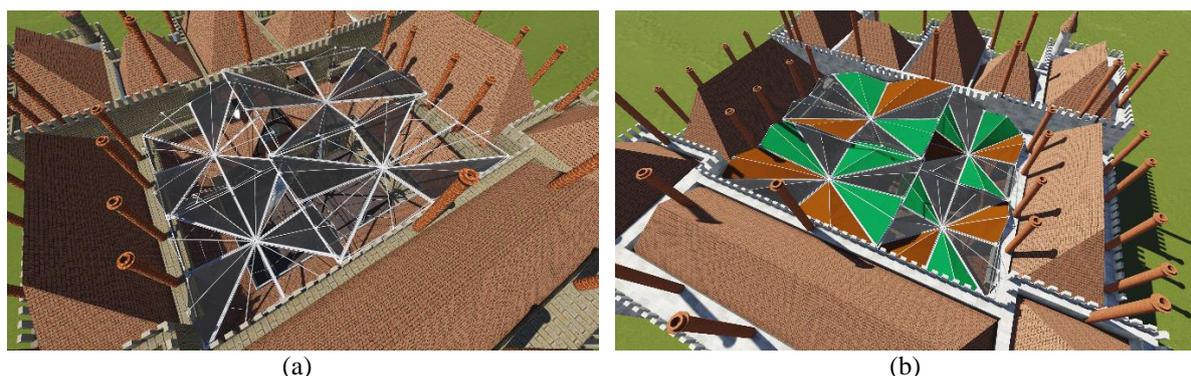


Figura 129: Perspectivas gerais do edifício com a cobertura no pátio central. (a) Estética inicial da estrutura; (b) Estética final da estrutura.

Outro aspecto a ser destacado na estética da estrutura é que devido a pequena flexão dos elementos ativos em flexão dos módulos, a estrutura na sua forma inicial completamente estanque, resulta numa estrutura contemporânea de linguagem geométrica. Entretanto, essa geometria pode ser quebrada após a alteração formal do módulos, que traz as linhas orgânicas através das flexões dos seus elementos, remetendo para sua base conceitual inspirada na natureza (Figura 130). As aberturas ainda apresentam seu desempenho funcional, uma vez que possibilitam a ventilação natural do espaço, pois abrem de acordo com a necessidade ou com o vento incidente. Essa linguagem geométrica da composição geral da cobertura, em conjuntura com a disposição intercalada dos módulos de materiais distintos possibilita ainda um “jogo” de sombras geométricas no espaço interno, ocasionado pela opacidade dos módulos em ETFE ao alterarem de cor, que se modifica durante todo o decorrer do dia (Figura 131).

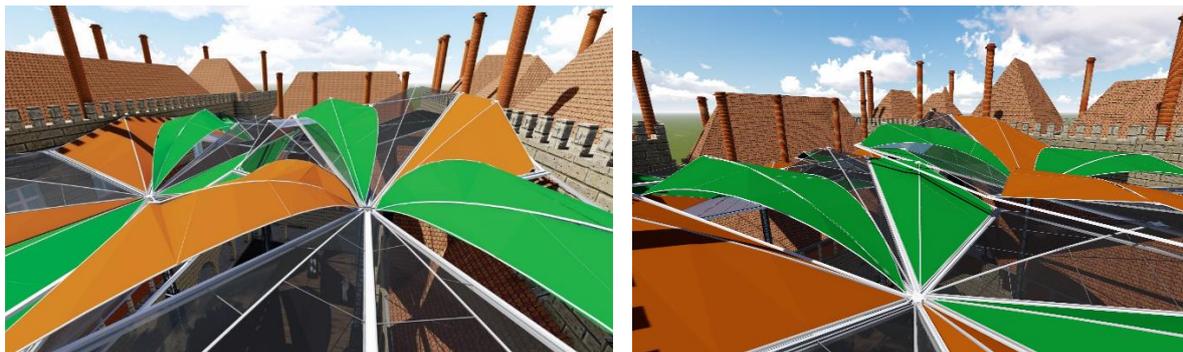


Figura 130: Visão da cobertura com alguns módulos com alteração da forma inicial.



Figura 131: Outras perspectivas do espaço interno do pátio com a aplicação da cobertura em relação ao edifício.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste caso de estudo é possível perceber que novas técnicas e materiais do contexto arquitetônico podem representar soluções bastante eficientes não somente para a realidade das novas construções, mas também como elemento adjacente à arquitetura existente. Atualmente, acredita-se que as referências teóricas não apenas se limitam ao domínio disciplinar da arquitetura, mas que contribuem para o seu enriquecimento e contextualização contemporânea, ou seja, uma nova perspectiva que possibilita estabelecer um diálogo de harmonia entre o antigo e o novo, permitindo o equilíbrio visual entre as distintas origens históricas. Entretanto, é necessário estabelecer um discurso específico em relação à realidade construída, tanto em relação aos edifícios monumentais como a todos os outros, mesmo os de construção mais corrente, com os quais a arquitetura contemporânea tem obrigatoriamente que lidar.

Percebe-se, também, que a aplicação do módulo desenvolvido neste trabalho é passível de criar diferentes composições estéticas, o que representa uma liberdade de criação para os profissionais de arquitetura, através da incorporação de novos materiais na composição da membrana, além de suas características funcionais vistas pela capacidade da

estrutura de alterar a sua forma através do movimento e adaptar-se às diferentes situações a que está sujeita.

6 CONCLUSÃO E FUTURAS INVESTIGAÇÕES

Após o estudo e o desenvolvimento da estrutura através da análise empírica de modelos físicos, pôde-se concluir com êxito os objetivos estabelecidos no início do trabalho. Assim, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área de estruturas especiais da arquitetura e engenharia civil, trazendo algo novo que é a integração de três princípios estruturais no contexto contemporâneo como solução de problemas funcionais em edifícios novos e existentes, havendo apenas algumas investigações neste cenário até hoje.

Conclui-se, primeiramente, que a concepção de estruturas integrando membrana arquitetônica com elementos ativos em flexão passíveis de alterações formais representam alta complexidade de projetar. Destaca-se de extrema importância o conhecimento das propriedades dos materiais que compõem estas estruturas, além do entendimento do comportamento e dos componentes que cada princípio estrutural abrange, de modo a encontrar a solução ideal de integração entre eles. Além disso, ressalta-se também a necessidade da multidisciplinaridade dos profissionais desde a fase de criação.

Tendo como inspiração conceitual um elemento da natureza, o módulo estrutural desenvolvido conseguiu remeter a anatomia das folhas de plantas e árvores através da capacidade elástica dos elementos ativos em flexão e do desempenho adaptável da membrana arquitetônica. Entretanto, para isso ser possível, elementos de ligação específicos tiveram que ser desenvolvidos, pensados não somente para realizar a conexão entre os elementos gerais da estrutura, mas também no seu comportamento durante toda a mudança formal causada pelo movimento e de maneira a manter tensionada a membrana em todas as etapas. Para isso, os modelos físicos em escala reduzida foram de total importância, pois com eles foi possível chegar numa forma em que a membrana permanece tensionada em todas as mudanças da estrutura, e também comprovar a viabilidade da criação de uma estrutura capaz de integrar o conceito de cinética com membranas arquitetônicas e elementos ativos em flexão.

Como resultado, alcançou-se o desenvolvimento de uma estrutura aberta a modificações quanto às suas dimensões e angulações, de modo a ser capaz de compor diferentes aplicações a nível arquitetônico. Ainda, através da incorporação de determinados materiais inovadores na membrana arquitetônica, é possível obter inúmeras potencialidades no desenvolvimento deste tipo de estrutura, otimizando ainda mais o desempenho funcional, além de uma variedade estética que dar maior liberdade de criação aos profissionais da área da construção. Essa flexibilidade permitiu a concepção de um caso de estudo para implantar

como cobertura do pátio central do edifício Paço dos Duques, podendo ser facilmente aplicada na conjuntura real, uma vez que a capacidade da adaptação de estruturas adaptativas apresentam-se uma solução bastante eficiente para intervenções em edifícios de alto valor patrimonial, de modo que facilitam a manutenção das características intrínsecas dos edifícios. Ainda, visto o alto valor cultural para a cidade e, conseqüentemente, para o país, a incorporação de novos materiais que constituem tais estruturas especiais visa destacar ainda mais o potencial do uso das mesmas no quadro da arquitetura.

Uma vez que essa dissertação teve como base um estudo conceitual para o desenvolvimento da estrutura, através de análises empíricas através de modelos físicos para verificar o possível comportamento, um estudo mais acentuado e que permita a análise experimental do modelo, de modo a ter informações específicas sobre o seu comportamento e desempenho, como simulações numéricas que possibilitem a análise estrutural e mecânica dos elementos da estrutura, tanto na fase inicial como após o movimento; a análise de diferentes mecanismos, incluindo a robótica e a eletrônica como forma de configuração de movimento; ensaios laboratoriais através de protótipos em escala reduzida para análise do comportamento da membrana e dos materiais que a compõe; e análise do comportamento em relação à resistência e à curvatura dos elementos ativos em flexão, são exemplos de estudos que se fazem bastante complementar à pesquisa realizada.

Este trabalho pode também servir de base para o desenvolvimento de novas estruturas que integrem os princípios estruturais adaptativos, de diferentes formas, de maneira a apresentar cada vez mais opções de estruturas arquitetônicas têxteis inteligentes e ativas em flexão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, B.; SMITH, I.F.C. (2008) *Active tensegrity: A control framework for an adaptive civil-engineering structure*, Computers and Structures 86. p. 1-2

ADDIS, William. (1994) *Design Revolutions in the History of Tension Structures*. Structural Engineering Review. Oxford, v.6, n.1.

ASEFI, M.; FORUNZANDEH, A. (2011) *Nature and Kinetic Architecture: The Development of a New Type of Transformable Structure for Temporary Applications*. Journal of Civil Engineering and Architecture, ISSN, 1934-7359, USA. Volume 5, No. 6. (serial 43) p 513-526

ASSIS, R. G. (2012) *Um estudo sobre arquitetura têxtil no Brasil: o segmento de mercado das estruturas tensionadas feitas com membrana poliéster/PVC*. Dissertação de Mestrado na Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

AZEVEDO, R. (1942) *O Paço dos Duques de Guimarães – Preâmbulo à Memória do Projeto de Restauro*, MARÂNUS, Porto.

BAROZZI, M.; VISCUSO, S.; ZANELLI, A. (2015) *Design novel covering system for Archaeological Areas*. Structural Membranes 2015: VII International Conference on Textile composites and inflatable Structures. Barcelona, Spain. p. 105-113

BIRDAIR. *Why Tensioned Membrane Structures?* Obtido em 20 de Abril de 2016, em <http://www.birdair.com/tensile-architecture>.

BRANDI, Cesare. (2004) *Teoria da restauração*. Tradução Beatriz Mugayar Kuhl. Cotia: Ateliê Editorial. São Paulo, Brasil.

BRITO, M. (2003) *Paço dos Duques de Bragança em Guimarães: metamorfose da imagem na Época Contemporânea*. Dissertação de Mestrado em Arte, Património e Restauro, Lisboa, Departamento de História, Instituto de História da Arte, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.

FERREIRA, P. (2010) *Análise e dimensionamento de uma estrutura de cobertura em membrana tensa*. Dissertação de mestrado, FEUP, Porto.

FOX, M.; KEMP. M. (2009) *Interactive Architecture*. New York: Princeton Architectural Press.

FOX, M. A. (2003) *Kinetic Architectural Systems Design in Transportable Environments 2*, de Robert Kronenburg. London: Spon Press. p. 163-186

FOX, M., YEH, B. (2000) *Intelligent Kinetic Systems in Architecture*. In P. Nixon *et al*, Managing Interactions in Smart Environments: First International Workshop. London: Springer.

FONTE, B. (1993) *Paço dos Duques de Bragança*. ELO, IPPAR – Instituto Português do Patrimônio Arquitetônico e Arqueológico.

FOSTER, Brian. (1994) *Cable and Membrane Roofs – A historical Survey*. Structural Engineering Review. Oxford, v.6, n.3-4, p.145-174.

HAPPOLD, E.; LIDDELL, W.I. (1975) *Timber lattice roof for the Mannheim Bundestgartensschau*. The Structural Engineer, Vol. 53. (No.3).

HUB, A.; REIN, A. (2015) *Details for anchoring and moving of small and medium sized retractable Membrane roof Structures exemplified with realized projects*. Structural Membranes 2015: VII Internacional Conference on Textile composites and inflatable Structures. Barcelona, Spain. p. 65-69

ICOMOS – Conselho Internacional de Monumentos e Sítios Históricos (1964) *Carta de Veneza*. II Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos dos Monumentos Históricos.

IVÁNYI, P. (2013) *A new conceptual design tool for cable-membrane structures*. Advances in Engineering Software, 57.

KNIPPERS, J. (2010) *Form-finding of Nature Inspires Kinematics for Pliable Structures*. International Symposium of Shell and Spatial Structures (IASS).

KRONENBURG, R. (2009) *Flexible: Architecture that responds to change*. London: Laurence King Publishing.

KRONENBURG, R. (2003) *Transportable environments: theory, context design and technology*. Spon Press. Londres, Inglaterra.

OLIVER, P. (Hg.) (2007) *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World, Vol. 3 Cultures and Habitats*. Cambridge: University Press.

KOVALERIC, B. (2003) *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. Taylor & Francis. Nova York, EUA.

LAKOWICZ, J. R. (2006) *Princípios de espectroscopia de fluorescência*. 3 ed. Baltimore, USA.

LIENHARD, J. (2014) *Bending-Active Structures: Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials*. Stuttgart University. p. 3-5, 8-15, 46-63

LLORENS, J. I. (2015) *Structural Membranes for Urban Spaces*. Structural Membranes 2015: VII Internacional Conference on Textile composites and inflatable Structures. Barcelona, Spain. P. 133-144

MALLICK, P. K. (2007) *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*. 3 ed. Department of Mechanical Engineering University of Michigan-Dearborn. Dearborn, Michigan.

MARÇAL, V. H. S. (2008) *Uso do Bambu na construção civil*. Universidade de Brasília, Brasília.

MARQUES, L. F. (2010) *Arquitetura Cinética: Desenvolvimento do protótipo de uma estrutura responsiva*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa. P. 2-15

MARQUES, D. F. C. (2015) *Análise Estrutural e Dimensionamento de Estruturas de Membrana*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

MAJOWIECKI, Massimo. (2005) *HS Steels in tension structures*. IUAV, University of Venice, Italy.

MEIRELES, M. (2000) *O Património Urbano de Guimarães no Contexto da Idade Contemporânea (Séc. XIX – XX), Permanências e Alterações*. Dissertação de Mestrado em Arqueologia Urbana, Volume I, Braga, Instituto de Ciências Sociais, Universidade do Minho.

MÉRIDA, K.; FANGUEIRO, R. (2012) *Arquitetura têxtil: liberdade de design, funcionalidade e sustentabilidade*. Artigo em Redige, Revista de design, inovação e gestão estratégica.

MOLLAERT, M.; HEBBELINK, S.; HAAASE, J. (2000) *The design of membrane and lightweight structures – from concept to execution*. PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM AT THE VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL. Brussels: VUB Brussels University Press, 2002.

MOREIRA, A. M.. (2009) *Materiais Compósitos*. Apostila, Materiais de Construção I, Escola Superior de Tecnologia de Tomar.

MOREIRA, R. A. S. (2013) *Novas Possibilidades na Arquitetura*. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

NUNES, E. F (2008) *Tensoestruturas – Elementos e cabos metálicos associados a membranas*. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, Brasil.

OBATA, S. H.; ALONSO, C. E. (2011) *Mobilidade das arquiteturas têxteis e tensoestruturas*. Artigo para revista Exacta, vol. 9, n. 1, p. 103-123. São Paulo, Brasil.

OLIVEIRA, M. B. e BARBATO, R. L. A. (2005) *Estudo das estruturas de membranas: uma abordagem integrada do Sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise*. São Carlos, Cadernos de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. V.7, n. 22, p.107-122

OLIVEIRA, M. B. (2001) *Estudo das estruturas de membranas: uma abordagem integrada do Sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise*. São Carlos, Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

OOSTERHUIS, K. (2011) *Towards a new kind of building*. Nai Publishers. Roterdão, Holanda.

OTTO, F. (1979) *Arquitectura adaptable*. Seminário organizado pelo Instituto de Estruturas Ligeiras, Barcelona: Editorial Gustavo Gili

PUYSTIENS, S.; CRAENENBROECK, M. V.; MOLLAERT, M.; HEMELRIJCK, D. V, LAET, L. (2015) *Implementation of Bending-Active Elements in Kinematic Form-Active Structures: Design of a representative case study*. Structural Membranes 2015: VII International Conference on Textile composites and inflatable Structures. Barcelona, Spain. p. 368-378

RAMOS, L. F.; LOURENÇO, P. B. (2002) *Investigação sobre as Anomalias das Chaminés do Paço dos Duques de Bragança (Relatório Final)*, Relatório, Guimarães, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

RAZAZ, Z. E. (2010) *Sustainable vision of kinetic architecture*. Artigo para o Journal of Building Appraisal, 5, 341-356.

RHODE-BARBARIGOS, L. (2012) *An Active Deployable Tensegrity Structure*. Thèse de doctorat n° 5457, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça.

RIOS, M. F. (2013) *Intervenção em preexistência: O projeto de Paulo Mendes da Rocha para transformação do educandário Santa Tereza em Museu de Arte Contemporânea*. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. p. 34-35

RITTER, A. (2007) *Smart Materials in Architecture*. Interior Architecture and Design. Berlin: Birkhauser.

SÁNCHEZ, P., SÁNCHEZ-FERNANDEZ, M. V., ROMERO, A., RODRÍGUEZ, J. F. & SÁNCHEZ-SILVA, L. (2010) *Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules*. *Thermochimica Acta*, 498.

SCHLING, E.; BARTHEL, R.; IHDE, A.; TUTSCH, J.; HUTH, S. (2015) *Bending-Activated Tensegrity*. Structural Membranes 2015: VII International Conference on Textile composites and inflatable Structures. Barcelona, Spain. p. 233-234

SHAIRADIN, K. (2014) *Kinetic Facades: Towards design Environmental Performance*. Spatial Information Architecture Laboratory (SIAL). School of Architecture and Design RMIT University. p. 1-10

SHAEFFER, R. E. (1996). *Tensioned Fabric Structures - A practical introduction*. American Society of Civil Engineers. EUA.

SOBEK, W.; TEUFFEL, P. (2001) *Adaptative Systems in Architecture and Structural Engineering*. Artigo no simpósio em estruturas e materiais inteligentes. Newport Beach, USA.

SOUSA, J. P. (2005) *Tectónica Digital: (Re)inventando a Materialidade*. Arquitectura e Vida, p. 32-36.

TAMKE, M.; DELEURAN, A.; GENGNAGEL, C.; SCHMECK, M.; CARVALHO, R.; FANGUEIRO, R.; MONTEIRO, F.; STRANGHONER, N.; UHLEMANN, J.; HOMM, T, THONSEM, M. R. (2015) *Designing CNC knit for hybrid membrane and bending active structures*. Structural Membranes 2015: VII Internacional Conference on Textile composites and inflatable Structures. Barcelona, Spain. p. 281-290

TEOBALDO, I. N. C. (2007) *Metodologias de intervenção em edificações antigas realizadas no Brasil e na Europa com possibilidade de utilização da estrutura metálica*. Artigo para Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação. Vol. 1, No 5. p. 226

VENTURA, A. M. F. M. (2009) *Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas*. C.Tecn. Mat., Lisboa, v. 21, n. 3-4.

WADA, B.K. e S. (1991) *Application of adaptive structure concepts to civil structures*. Intelligent structures-monitoring and control. Amsterdam, Elsevier.

REFERÊNCIAS DAS FIGURAS

Figura 1 - <<https://teoriacritical3ufu.wordpress.com/2010/12/17/pinacoteca-do-estado-de-sao-paulo/>> Acesso em 05 de Fevereiro de 2016.

Figura 2 - <http://www.cm-guimaraes.pt/frontoffice/pages/991?news_id=1703> Acesso em 23 de Dezembro de 2015.

Figura 3 - <<http://www.antique-prints.de/shop/catalog.php?cat=KAT52&product=P005737>> Acesso em 23 de Dezembro de 2015; Marques, 2010, p. 4.

Figura 4 - <<https://pt.pinterest.com/pin/10836855330873102/>> Acesso em 05 de Junho de 2016; Marques, 2015.

Figura 5 - Oliveira *et al.*, 2005. Adaptado pela autora.

Figura 6 - Oliveira *et al.*, 2005. Adaptado pela autora.

Figura 7 - Nunes, 2008.

Figura 8 - Obata *et al.*, 2011.

Figura 9 - <<https://structurae.info/ouvrages/allianz-arena>> Acesso em 12 de Abril de 2016; <<http://www.engenhariacivil.com/estadio-nacional-brasilia-estruturas-copa-mundo-2014>> Acesso em 12 de abril de 2016; <<https://teturaarqui.wordpress.com/2011/10/05/sony-center-berlin/>> Acesso em 12 de Abril de 2016.

Figura 10 - <<http://inhabitat.com/shanghais-stunning-sun-valley-pavilion-boasts-the-worlds-largest-membrane-roof/sba-expo-axis-shanghai2/>> Acesso em 11 de Abril de 2016; <<http://www.urdesign.it/index.php/2014/03/21/aarau-bus-station-by-vehovar-jauslin-architektur/>> Acesso em 11 de Abril de 2016.

Figura 11 - Barozzi *et al.*, 2015; Hub *et al.*, 2015.

Figura 12 -

<[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Umbrellas_for_the_Piazza_of_the_Prophet%E2%](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Umbrellas_for_the_Piazza_of_the_Prophet%E2%80%A2)

80%99s_Holy_Mosque,_Madinah,_SA.jpg> Acesso em 11 de Abril de 2016;
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cubierta_auditorio_Alameda_Ja%C3%A9n.jpg>
Acesso em 11 de Abril de 2016.

Figura 13 - Schling et al., 2015; Tamke et al., 2015.

Figura 14 - Oliver, 2007 apud Lienhard, 2014.

Figura 15 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Shukhov_Rotunda> Acesso em 11 de Abril de 2016; <<https://engvagnerlandi.files.wordpress.com/2012/11/cripta-da-colonia-guell.jpg>>
Acesso em 11 de Abril de 2016.

Figura 16 - <http://www.docomomo-us.org/register/fiche/monsanto_house_future> Acesso em 12 de Abril de 2016; <<http://www.futurohouse.net/>> Acesso em 12 de Abril de 2016.

Figura 17 - <<http://www.solidsmack.com/design/buckminster-fullers-fly-eye-dome-comes-life-miami/>> Acesso em 12 de Abril de 2016.

Figura 18 - <<http://www.wooddays.eu/it/wood-architecture/projekt/detail/multihalle-mannheim/>> Acesso em 12 de Abril de 2016; <<http://www.archdaily.com.br/br/01-185087/selecao-dos-principais-projetos-de-shigeru-ban/532b0a82c07a803b42000021>>
Acesso em 12 de Abril de 2016; <http://www.lusas.com/case/civil/wooden_tower.html>
Acesso em 12 de Abril de 2016.

Figura 19 - Puystiens, 2015.

Figura 20 - Lienhard, 2014.

Figura 21 - <<http://www.editorialespazio.com/en/noticias/detalle/97>> Acesso em 21 de Setembro de 2016; <<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=7636>> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 22 - Puystiens et al., 2015; <<http://www.baulinks.de/webplugin/2014/0173.php4>>
Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 23 - <<http://www.designboom.com/architecture/kva-matx-sustainable-soft-house-in-hamburg/>> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 24 e 25 - Moreira, 2013.

Figura 26 - <<http://marlosbakker.com.br/shop/gallery/wish-you-were-here-instituto-do-mundo-arabe/?lang=pt>>; <<http://www.lostejadosdeparis.com/instituto-mundo-arabe/>> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 27 - Marques, 2010.

Figura 28 - Moreira, 2013.

Figura 29 - Marques, 2010.

Figura 30 - <<http://www.stampha.com.br/site/vernoticia/6735/a-casa-movel-que-multiplica-o-seu-espaco>> Acesso em 26 de Junho de 2016.

Figura 31 até 35 - Moreira, 2013.

Figura 36 - <<https://www.flickr.com/photos/opalsson/3453178575>>;
<<https://alessioangiolini.files.wordpress.com/2013/10/07-rolling-bridge-007.jpg>> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 37 - <file:///C:/Users/User/Downloads/IA1.pdf>; <http://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/madrid/madrid_city_of_justice_f090808_3.jpg> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 38 - <http://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas/adic-responsive-facade-abu-dhabi-uae-research>; <https://pt.pinterest.com/pin/556687203919254912/> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 39 - <http://www.travmonkey.com/the-eden-project-cornwall/>; <http://www.portobello.com.br/blog/parque-aquatico-nacional-de-peguim/> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 40 - <http://vovworld.vn/en-us/Culture/Bamboo-in-Vietnamese-peoples-life/108477.vov> Acesso em 21 de Setembro de 2016; Lienhard, 2013.

Figura 41 - <http://www.quintadamadeira.com/placas-de-madeira/> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 42 - <http://www.bk.tudelft.nl/en/about-faculty/departments/architectural-engineering-and-technology/organisation/hyperbody/research/applied-research-projects/muscle-reconfigured/> Acesso em 09 de Junho de 2016.

Figura 43 - <http://www.str-ucture.com/en/what/research-and-development/reference/flectofinR/> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 44 - <https://www.s3i.co.uk/stainless-steel-wire-rope.php> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 45 - Vandenberg, 1996. Adaptado pela autora.

Figura 46 - Nunes, 2008, p. 29-30.

Figura 47 - <https://pt.pinterest.com/pin/294071050644234804/> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 48 - Marques, 2015.

Figura 49 e 50 - Nunes, 2008.

Figura 51 até 53 - Moreira, 2013.

Figura 54 e 55 - Marques, 2010.

Figura 56 - <http://materiability.com/chromatic-skins/> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 57 - Marques, 2010.

Figura 58 - <http://inhabitat.com/smart-wrap/> Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Figura 59 - Produzido pela autora.

Figura 60 - Produzido pela autora.

Figura 61 - <http://www.amtonline.com.br/2013/03/nanotecnologia.html#axzz4LH9xaFhM> Acesso em 26 de Setembro de 2016; <http://pt.tubgit.com/outono-folhas-seca/> Acesso em 26 de Outubro de 2016.

Figura 62 até 95 - AutoCAD e SketchUP produzido pela autora.

Figura 96 - Acervo SIPA;

<http://www.guimaraesturismo.com/pages/456?geo_article_id=67> Acesso em 25 de Setembro de 2016;

Figura 97 até 105 - Acervo SIPA.

Figura 106 -

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 15 de Maio de 2016. Adaptado pela autora.

Figura 107 - Acervo pessoal.

Figura 108 -

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 15 de Maio de 2016. Adaptado pela autora.

Figura 109 - Acervo pessoal.

Figura 110 -

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 15 de Maio de 2016. Adaptado pela autora; Acervo pessoal.

Figura 111 - Acervo SIPA; <<https://guiastecnicos.turismodeportugal.pt/pt/museus-monumentos/ver/Paco-dos-Duques-de-Braganca>> Acesso em 26 de Setembro de 2016; <http://www.cm-guimaraes.pt/pages/991?news_id=1223> Acesso em 26 de Setembro de 2016.

Figura 112 -

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 15 de Maio de 2016. Adaptado pela autora; Acervo pessoal.

Figura 113 até 115 – Acervo pessoal.

Figura 116 -

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 15 de Maio de 2016. Adaptado pela autora.

Figura 117 - SketchUP, produzido pela autora.

Figura 118 - AutoCAD produzido pela autora.

Figura 119 - Produzido pela autora.

Figura 120 - SketchUP produzido pela autora.

Figura 121 - AutoCAD produzido pela autora.

Figura 122 -

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 15 de Maio de 2016. Adaptado pela autora

Figura 123 -

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 15 de Maio de 2016. Adaptado pela autora

Figura 124 - AutoCAD, SketchUP e Lumion produzido pela autora.

Figura 125 - AutoCAD produzido pela autora.

Figura 126 - SketchUP produzido pela autora.

Figura 127 - AutoCAD produzido pela autora.

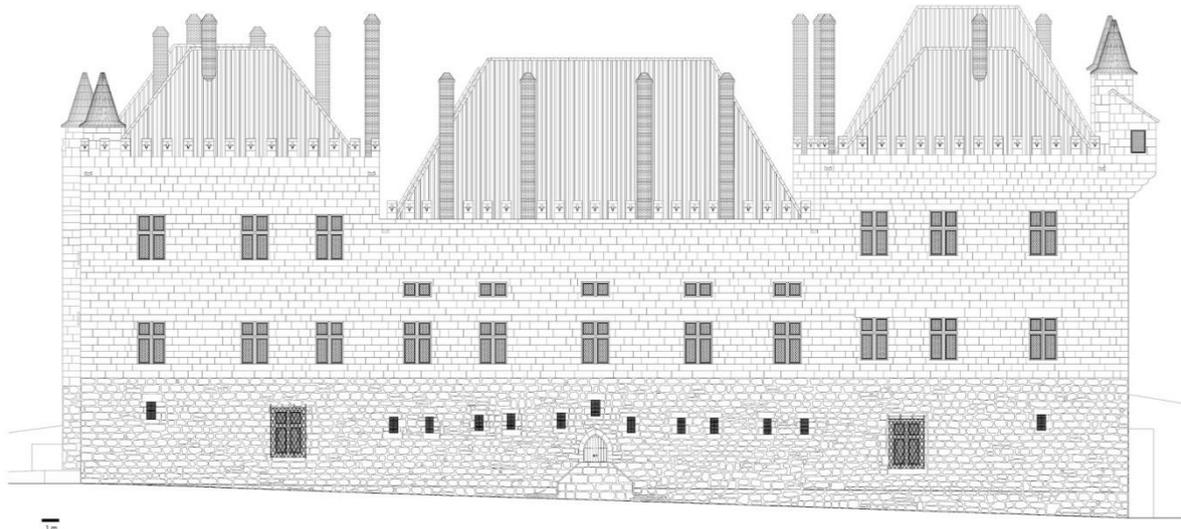
Figura 128 - SketchUP e Lumion produzido pela autora.

Figura 129 - SketchUP e Lumion produzido pela autora.

Figura 130 - SketchUP e Lumion produzido pela autora.

Figura 131 - SketchUP e Lumion produzido pela autora.

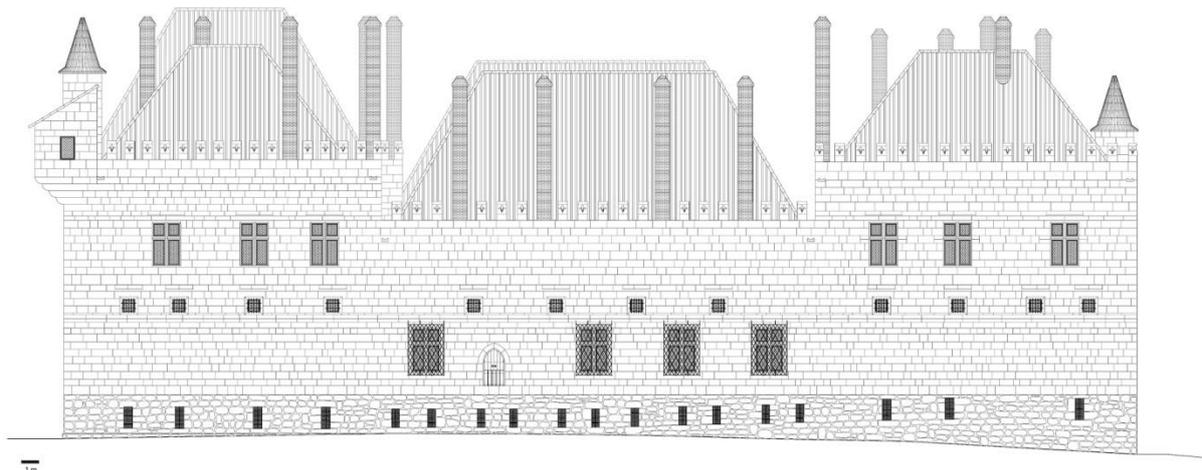
Anexo I – Fachada Sudoeste



Fonte:

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 1 de Setembro de 2016.

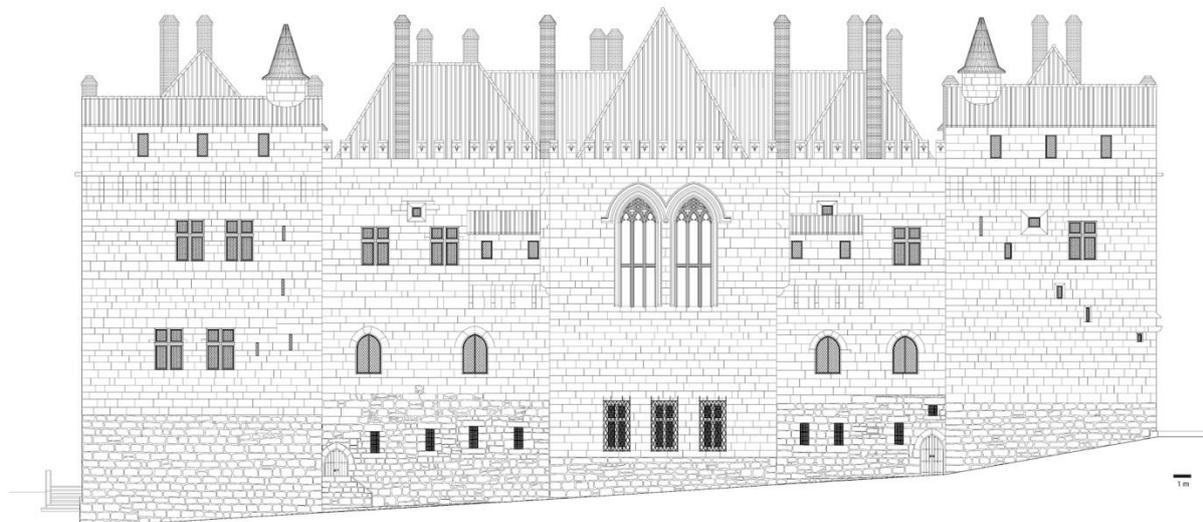
Anexo II – Fachada Nordeste



Fonte:

<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 1 de Setembro de 2016.

Anexo III – Fachada Sudeste



Fonte:

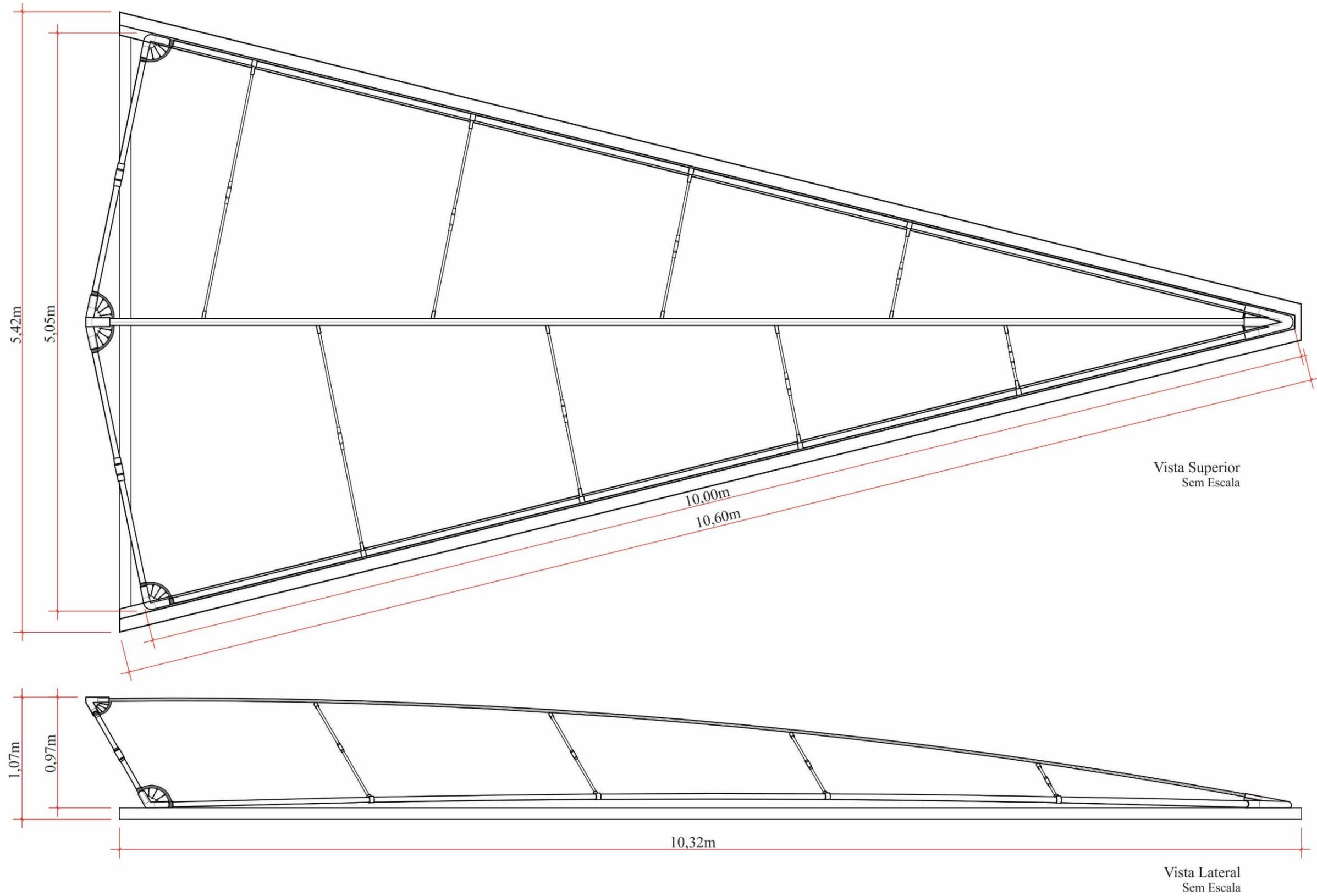
<<http://www.arquitectura.uminho.pt/ModuleLeft.aspx?mdl=~/Modules/Generic/GenericView.aspx&ItemID=120&Mid=770&lang=pt-PT&pageid=448&tabid=16>> Acesso em 1 de Setembro de 2016.

Anexo IV – Perspectiva realística do pátio central/interno do Paço dos Duques com estrutura proposta para cobertura.



Fonte: SketchUP e Lumion, produzido pela autora.

Anexo V



Anexo VI

