

Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
Programa de Pós-graduação em Arquitetura  
Área de Concentração: Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade  
Orientador: Prof. Dr. Francisco Aviani

## **Superfícies Dinâmicas Funcionais:**

O potencial de tecnologias responsivas para a construção  
de fachadas

Thales Barnuevo

Brasília

2017

THALES BARNUEVO

# Superfícies Dinâmicas Funcionais:

## O potencial de tecnologias responsivas para a construção de fachadas adaptativas

Projeto de Dissertação apresentado ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Área de concentração: TAS  
Data da Dissertação: 17/08/2017

Resultado: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Francisco Aviani  
Universidade de Brasília \_\_\_\_\_

Prof. Dra. Cláudia Naves David Amorim  
Universidade de Brasília \_\_\_\_\_

Profa. Dra. Christus Menezes da Nóbrega  
Universidade de Brasília \_\_\_\_\_

Brasília  
2017

“ontem choveu no futuro”

*Manoel de Barros*

## Agradecimentos

A querida Gugu por estar presente num tempo sem ponteiro

A Adriana o maior de todos

Aos professores Neander Furtado, Raquel Blumenschein, João Pantoja, Christus Menezes, Andrea e Marcelo Judice, Claire Lunardi, Ana Maynardes e Claudia Amorim, pelo index sem fim

A meu orientador Francisco Aviani pelo tempo sem pressa

Ao CNPq pelo suporte financeiro para realização desta pesquisa

Aos servidores do PPG-Fau e da UnB em geral por zelar para que seja possível

Aos colegas Renan Balzani, Leonardo Barreto, Lucas de Sordi, Lenadro Cruz, Igor Lacroix, Beatriz Abreu, Anderson Gomes, Maíza Lannes, Juan Guillen, pelo entusiasmo e curiosidade

Aos amigos da casa nova, Pedro, Marília, Ivan, Elza, Gabriela, Thiago, Tatiana, Serginho, Guilherme, Marcelo, Rubens, Beatriz, Cacau, Nicola, Caetano, Ari, António, Alice, Marília. E aos da casa nómade, Ana, Marcelo, Leandro, Rafael, Cae, Marino, Gerrit, Bernardo, Fausto, Preta, Iomar, Xanxa, Priscila, Pino, Camilo, Carla, Juan, Kolo, Mirko, Fati, Isa, Mari e tantos mais que se sabem queridos

Ao Zé por toda disponibilidade

## Resumo

A arquitetura está em constante mudança, adaptando-se às manifestações culturais e tecnológicas de cada tempo. Neste processo evolutivo de projetar e construir, Superfícies Dinâmicas Funcionais – SDF surgem como uma emergente e inovadora tipologia de fachada concebida para se adaptar, de forma dinâmica e funcional, às constantes e variadas demandas do ambiente. Esta pesquisa inicia investigando as motivações que levam ao surgimento das SDF, analisando a capacidade adaptativa da produção de arquitetura, antes e depois da Revolução Industrial, identificando os agentes que transformaram a fachada, da sua função de modulador climático para a concepção de superfície com função de delimitação espacial e barreira física entre o ambiente interno e externo. Posteriormente estuda-se as tecnologias responsivas de padrão cinético e de materiais compósitos inteligentes, analisando os princípios constituintes e os mecanismos de funcionamento destes sistemas no controle do clima e no aproveitamento de energias físicas naturais presentes no ambiente, contribuindo para otimizar o desempenho adaptativo e operacional do edifício. Finalmente apresenta-se uma amostra de SDF em edificações, destacando-se a tecnologia responsiva, dinâmica funcional e composição de materiais presente em cada sistema, estabelecendo um referencial comparativo entre a tecnologias responsiva aplicada e desempenho adaptativo conquistado. Desta maneira, este trabalho visa contribuir no estudo das tecnologias responsivas como estratégia para a criação de projetos de arquitetura adaptados ao ambiente do lugar de forma integrada e harmoniosa.

**Palavras-chave:** Superfície dinâmica funcional, Fachada cinética, Materiais compósitos inteligentes, Adaptativo, Responsivo

## **Abstract**

Architecture is constantly changing, adapting itself to the cultural and technological manifestations of each period. In this evolutionary process of designing and constructing, Functional Dynamic Surfaces - FDS appear as an emerging and innovative façade typology designed to dynamically and functionally adapt to the constant and varied demands of the environment. This research begins with a research of the motivations that lead to the use of FDS, analyzing the adaptive capacity of architectural production, before and after the industrial revolution, and identifying the agents that transformed the façade from its function as a climatic modulator to becoming a surface design serving as spatial delimitation and physical barrier between the internal and external environment. Furthermore, we study the responsive technologies of kinetic patterns and intelligent composite materials, analyzing the constituent principles and the functional mechanisms of these systems concerning climate control and the use of natural physical energies, which contribute to optimize the adaptive and operational performance of the building. Finally, the study contains a sample of FDS in buildings, highlighting the responsive technology, functional dynamics as well as the material composition of each system, thus establishing a comparative reference between the applied responsive technology and the adaptive performance achieved. In this way, this paper aims to contribute to the study of responsive technologies as a strategy for the creation of architectural projects adapted to the specific environment in an integrated and harmonious way.

**Keywords:** Functional dynamics surface, Kinetic façade, Adaptive, Responsive, Intelligent composite material

## Sumário

Introdução.....	11
<b>CAPITULO 1 - Superfície Dinâmica Funcional .....</b>	<b>18</b>
1.1. Fachada e dimensão de limite .....	21
1.2. Materiais padronizados e desempenho adaptativo .....	28
1.3. Materiais e Sistemas de materiais Inteligentes.....	32
1.4. Superfície adaptativa-responsiva .....	38
1.5. Resumo do Capítulo.....	39
1.6. Resultados do Capítulo .....	41
<b>CAPITULO 2 – Sistemas Mecânicas as Superfícies Responsivas.....</b>	<b>43</b>
2.1. Fachadas Cortina e Mecanização da Arquitetura .....	43
2.2. Fachada de Controle Mecânico .....	45
2.3. Fachada Cinética .....	49
2.4. Fachada por Materiais Compósitos .....	58
2.5. Resumo do Capítulo .....	62
2.6. Resultado do Capítulo .....	64
<b>CAPITULO 3 - Superfícies Dinâmicas Funcionais Cinéticas.....</b>	<b>66</b>
3.1. Cibernética .....	67
3.2. Arquitetura Cinética.....	69
3.2.1. Superfícies cinéticas midiáticas .....	70
3.2.2. Estruturas Cinéticas .....	72
3.3. Superfícies Dinâmicas Cinéticas .....	73
3.3.1. Padrões Cinéticos.....	76
3.3.2 Componentes eletrônicos e mecânicos.....	82
3.4. Resumo do Capítulo .....	89
3.5. Resultados do Capítulo .....	90
<b>CAPITULO 4 - Superfícies Dinâmicas Funcionais por Materiais Compósitos Inteligentes .....</b>	<b>91</b>
4.1. Engenharia e Ciência dos Materiais.....	92
4.2. Material Compósito.....	94
4.3. Vantagens e Limitações dos Materiais Compósitos.....	95
4.4. Compósitos Inteligentes .....	99
4.5. Características dos Compósitos Inteligentes.....	101
4.6. Compositos inteligentes que alteram propriedades.....	103

4.6.1. Materiais inteligentes cromáticos .....	103
4.6.2. Materiais Inteligentes que Mudam de Estado – PCM (Phase Change Materials).....	104
4.6.3. Materiais com Suspensão de Partículas.....	106
4.7. Compósitos inteligentes que Convertem Energia.....	107
4.8. Materiais Semicondutores .....	108
4.9. Outros Materiais .....	110
4.10. Resumo do Capítulo.....	112
4.11. Resultado do Capítulo .....	113
<b>CAPITULO 5 – Amostra Superfícies Dinâmicas Funcionais Cinéticas e por Materiais Compósitos .....</b>	<b>115</b>
5.1. Amostra de Superfícies Dinâmicas Funcionais de Padrão Cinético.....	115
5.2. Amostra de Superfícies por Materiais Compósitos .....	123
6. Conclusões .....	133
7. Referências Bibliográficas .....	136



## Lista de Figuras

Fig. 1. Cápsula espacial como ideal de conforto ambiental interno.....	23
Fig. 2 Edf. CapitaGreen. Sistema híbrido de adaptação climática.....	25
Fig. 3 Brise-soleil móvel .....	27
<i>Fig. 4. Estratégias de Fachada: Exclusiva e Seletiva .....</i>	<i>28</i>
Fig. 5 Carbon Tower, Arquiteto Peter Testa .....	32
Fig. 6 Material Auto generativo .....	36
Fig. 7 Esquema de funcionamento da Parede Neutralizante.....	48
Fig. 8 Buckminster Fuller - Pavilhão EEUU, Expo 67 .....	51
Fig. 9 Jean Nouvell - Instituto do Mundo Árabe, 1980 .....	53
Fig. 10 Aedas Arquitetura - Al Bahar Towers, 2012 .....	56
Fig. 11 Desenho Esquemático da Parede Polivalente - Mike Davies, 1980 .....	58
Fig. 12 Material Compósito na Indústria Aérea .....	60
Fig. 13 Material Compósito - Estação Rodoviária da Luz, São Pulo, 1961.....	61
Fig. 14 Material Compósito - Residência. Itacimirim, BA.....	61
Fig. 15 Material Compósito Estrutural. Hotel Fasano, Rio. 2007. ....	62
Fig. 16 Robô Tartaruga de Grey, 1940.....	69
Fig. 17 Movimento da fachada por ilusão de ótica .....	70
Fig. 18 Superfície Cinética midiática - Painel artístico .....	71
Fig. 19 Superfície midiática - Painel mídia .....	71
Fig. 20 Estrutura Cinética. Villa Girasolle, 1935.....	72
Fig. 21. Estrutura Cinética Pneumática .....	73
Fig. 22. Padrão Cinético por Rotação.....	77
Fig. 23. Padrão Cinético por Rotação - Edf. LIGO .....	78
Fig. 24. Padrão Cinético por Translação e Retração .....	79
Fig. 25. Padrão Cinético por Translação e Retração .....	80
Fig. 26. Padrão Cinético por Translação e Retração .....	80
Fig. 27. Padrão Cinético por Expansão e Retração - Por material flexível.....	81
Fig. 28 Padrão cinético por Expansão e Contração .....	82
Fig. 29. Fases (matriz e reforço) e tipos de orientação do reforço em compósitos.....	94
Fig. 30. Método fabricação por Pultrusão .....	97
<i>Fig. 31. Método de fabricação por Infusão a Vácuo.....</i>	<i>97</i>
Fig. 32. Método de fabricação por Moldagem por Transferência de Resina-RTM.....	98
Fig. 33. Método de fabricação por Deposição Filamentar .....	98
Fig. 34. Método de fabricação por Co-curing Process.....	98
Fig. 35. Dover Sun House, 1948 - Eng. Maria Telkes.....	105
Fig. 36. Materiais que Mudam de Estado - PCM .....	106
Fig. 37. Materiais por Suspensão de Partículas .....	107
Fig. 38. Materiais que Convertem Energia.....	110
Fig. 39. Materiais com Memória de Forma .....	112

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Fachadas Cinéticas Climático Responsivas .....	57
Tabela 2. Sensores e Utilidade de Medida .....	84
Tabela 3. Materiais Intreínsecos e Extrínsecos .....	100
Tabela 4. SDF Amostra Comparativa .....	131

## Introdução

Esta pesquisa aborda as *Superfícies Dinâmicas Funcionais* – SDF, como tipologia de envelopamento predial caracterizada pela capacidade de interagir, dinâmica e funcionalmente, com as variáveis e mudanças climáticas do meio ambiente. Cientes que Superfícies Dinâmicas podem abranger diferentes propósitos de ação interativa, a exemplo das superfícies midiáticas; cunhamos o termo SDF para descrever o sistema de envelopamento composto por materiais e sistemas de materiais que utilizam tecnologias responsivas com propósito de adaptação climática, seja controlando ou tirando proveito de fontes de energia natural. Especificamente investiga-se as tecnologias responsivas de padrão cinético e de materiais compósitos inteligentes, ou seja, de materiais ou sistemas de materiais que possuem a capacidade de *sentir* e *agir* funcionalmente em resposta a estímulos energéticos presentes no meio ambiente. Para esta pesquisa, adotamos a definição do termo *responsivo* como aquelas tecnologias com capacidade de alterar repetidamente e reversivelmente funções, características ou comportamentos ao longo do tempo, em resposta aos requisitos de desempenho e condições do entorno variável, visando a melhoria do desempenho geral do edifício (LOONEN et. al, 2013).

Abordar a criação de uma envoltória com capacidade responsiva configura uma mudança na prática convencional de projeto, especialmente na relação do arquiteto com os “processos” que envolvem a criação de uma SDF. Isto porque convencionalmente a escolha do material para envoltória é feita a partir da produção em massa de materiais com características monofuncionais, que podem ser aplicados em qualquer condição climática, a exemplo dos painéis de alumínio composto (ACM) ou vidro. Por outro lado, SDF's são concebidas para responder funcionalmente a estímulos climáticos específicos do lugar, em outras palavras, não podem ser concebidas de forma genérica. Decisões de projeto para uma SDF dependem de escolhas de materiais ou sistemas de materiais customizados em função dos parâmetros climáticos específicos do lugar. Inverter a prática de projeto da convencional escolha do material a partir de um catálogo com especificações técnicas, para conceber a envoltória a partir do *que*

*queremos que o material faça*, sugere, de certa maneira, a prática de projeto inspirado num *futuro vernacular*, no sentido que faz do arquiteto criador de materiais ou sistemas de materiais, reaproximando-o a uma condição de artesanato digital.

A transição da capacidade adaptativa e desempenho dos materiais antes e depois da mecanização dos processos de manufatura, transformaram a concepção de fachada de uma condição *adaptativa* anterior ao século 19, para a condição *exclusiva* depois da Revolução Industrial. Na arquitetura pré-industrial a qualidade da obra construída era atestada na efetiva estruturação do material disponível no local, resultado do conhecimento empírico ou intuitivo do arquiteto-artesão com as propriedades e desempenho do material (ADDINGTON & SCHODEK, 2005) (GRUBER & GOSZTONYI, 2010). Com o mecanicismo industrial veio a ideia do progresso tecnológico. A ideia da máquina como emblema de uma nova época levaria a arquitetura a novos princípios de projeto, de caráter eminentemente técnico. Na prática, no entanto, a adoção deste modelo minimiza a função utilitária e adaptativa (STRAUB, 2013) da fachada ao clima, substituída por sistemas de condicionamento artificial. Desta forma, passando a construir edifícios estáticos condicionados dinamicamente (LOPÉZ et al., 2015).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a concepção de um edifício que não foi projetado para coexistir com o ambiente externo contribuiu para a sua insustentabilidade; apresentando fragilidade nas escolhas de projeto como, sistemas com elevado consumo energético, alto custo operacional e impacto ao meio ambiente (IEA – ECBCS, 2009).

Discussões contemporâneas indicam o impacto ambiental e climático do planeta como prioridade no desenvolvimento e implementação de soluções técnicas para a arquitetura e construção que otimizem o consumo de energia elétrica e a utilização de métodos construtivos e de fabricação de forma ecológica e sustentável. Na contemporaneidade, eficiência energética no ambiente construído é sinônimo de qualidade construtiva. Contudo, a prática tem se mostrado insuficiente para resolver este problema. A necessidade de aprimorar o conhecimento científico-tecnológico na busca por alternativas inovadoras deve servir como catalizador para impulsionar a implementação de ideias que vão de

encontro a este objetivo (SHARAIDIN, 2014). De encontro com este objetivo, este trabalho tem por intenção pesquisar o potencial das tecnologias responsivas para a construção de envoltórias climaticamente adaptativas.

## **Justificativa**

Este trabalho estabelece uma reflexão sobre a capacidade de adaptação das edificações ao ambiente/clima do lugar. Estuda-se os caminhos seguidos pela arquitetura com propósito à adaptação climática da obra construída através da análise do desempenho do material e dos métodos construtivos, estabelecendo um paralelo entre a produção de arquitetura antes e depois dos processos de manufatura advindos com a Revolução Industrial.

Atentos aos avanços científicos-tecnológicos e aos aprimoramentos nas técnicas de fabricação na “Era Digital”, investiga-se as tecnologias responsivas aplicadas a materiais ou sistemas de materiais, ou seja, dispositivos eletromecânicos e materiais com propriedades responsivas, aptos a interagir dinamicamente com o ambiente circunvizinho como estratégia na busca por soluções técnicas para envoltórias adaptativas. Alcançar estes objetivos implica o desenvolvimento de projeto de caráter interdisciplinar, além das tradicionais áreas da engenharia, somado a áreas de conhecimento científico como a engenharia de materiais, ciências dos sistemas da natureza e programação computadorizada.

Adaptabilidade climática na “Era Digital” requer a concepção de uma nova tipologia de envoltória, principalmente para edifícios em altura, com capacidade de gerenciar e mediar os agentes energéticos externos de maneira *seletiva*, ou seja, atuando como um filtro seletivo entre o ambiente interno e externo. Em contraposição as tradicionais envoltórias estáticas que apresentam características *exclusivas*, de barreira física e delimitação espacial, excluindo o ambiente interno do externo e, demandando a necessidade de elevada potência elétrica instalada para suprir artificialmente as condições “ideais” de conforto climático dentro do ambiente construído.

Não menos importante, a concepção de envoltórias dinâmicas com capacidade adaptativo-responsivo explora novas linguagens na produção para a arquitetura

contemporânea, interpolando a prática de projeto e métodos construtivos em função a novos contextos históricos, culturais e tecnológicos.

Diante do exposto, é justificada a importância da presente pesquisa fase a necessidade de incorporar, de forma prática e integrada, os avanços científicos e tecnológicos disponíveis na contemporaneidade à prática de arquitetura; associando conhecimento humano a criação de soluções técnicas em harmonia com o meio ambiente. Este trabalho tem o propósito de contribuir com as discussões em torno da aplicação de tecnologias emergentes aplicadas a envoltórias adaptativo-responsivas dentro do âmbito acadêmico.

## **Objetivo**

Investigar o potencial das tecnologias responsivas, especificamente de padrão cinético e de materiais compósitos inteligentes, para a criação de superfícies dinâmicas funcionais como estratégia de controle climático no ambiente construído.

Especificamente nosso objetivo é:

- Analisar o desempenho climático adaptativo da obra construída, antes e depois da mecanização dos processos de manufatura advindos com a Revolução Industrial, identificando as principais motivações para o surgimento das Superfícies Dinâmicas Funcionais.
- Investigar os princípios constituintes e fundamentos operacionais presentes nas tecnologias responsivas de padrão cinético e de materiais compósitos inteligentes.
- Levantar referências de superfícies dinâmicas funcionais construídas que utilizam tecnologia responsiva de padrão cinético e de materiais compósitos inteligentes, analisando o princípio tecnológico, materialidade, padrão operacional e desempenho funcional.

## **Procedimentos Metodológicos**

Nesta pesquisa adotamos como metodologia o estudo das principais teorias que abordam as tecnologias responsivas como estratégia para a construção de envoltórias interativas de adaptação climática.

Iniciamos analisando a relação da materialidade no desempenho adaptativo da fachada, fazendo-se uma relação da prática de projeto com método construtivo na produção de arquitetura antes e depois da Revolução Industrial. Com base no pensamento de Bernard Rudofsky, Michelle Addington, Daniel Schodek, Neri Oxman, analisa-se como a arquitetura vernacular, através da estruturação do material, desenvolveu o conhecimento para adaptar a obra construída as condições climáticas do lugar; em comparação com a produção em massa de materiais padronizados, advindos com a mecanização dos processos de manufatura, onde a utilidade adaptativa e funcional do material tornam-se de uso genérico, reduzindo o papel da fachada de mediador climático. Fase a esta análise, investiga-se as motivações que levam ao surgimento das Superfícies Dinâmicas Funcionais, expondo-se os fundamentos para a construção de uma definição para o termo.

Após esta análise, destaca-se, ao longo do curso historiográfico, as experiências mais emblemáticas para a implantação de fachadas dinâmicas ativas de controle climático. Seguidamente, descreve-se os princípios constituintes e de funcionamento operacional das tecnologias responsivas de padrão cinético e dos materiais compósitos inteligentes.

Nossa metodologia encerra apresentado uma amostra de edifícios que utilizam tecnologias responsivas implantadas em superfícies dinâmicas com função de adaptação e controle climático, analisando o princípio tecnológico, materialidade, padrão operacional e desempenho funcional.

## **Estrutura da dissertação**

Os objetivos deste trabalho estão estruturados em cinco capítulos:

O *primeiro capítulo* tem por objetivo, construir uma definição para o termo Superfícies Dinâmicas Funcionais como uma fachada adaptativa capaz de interagir com o ambiente circunvizinho, contribuindo efetivamente com o desempenho energético do edifício. Iniciamos analisando a definição tradicional do termo fachada, descrito como um plano vertical estático, que cumpre como função proteger o espaço interno da hostilidade do ambiente externo. Proteção neste contexto constitui uma delimitação de espaço físico. Neste sentido, analisamos a dimensão de limite a partir da visão macroscópica da fachada e microscópica do material. Não obstante a escolha do material de fachada cumpra um papel importante na linguagem estética e visual ao edifício; esta escolha constitui, também, a especificação de um conjunto de propriedades físicas inerentes ao material e que constituem algum tipo de desempenho dinâmico na escala atômica ou microscópica. Assim, discorreremos sobre a função do material no desempenho da fachada. Convencionalmente, a escolha de materiais padronizados com características monofuncionais para fachadas, são feitas a partir de suas qualidades estéticas e visuais, e não da sua propriedade adaptativa e funcional o que minimiza a função da fachada como mediadora no consumo energético e controle climático. De forma contrária, materiais inteligentes e sistemas de materiais e componentes cinéticos se fundamentam na capacidade de interatividade multifuncional que, desenvolvidos de forma efetiva e aplicados de forma eficiente podem contribuir para reduzir o consumo de energia do edifício.

No *capítulo dois* fazemos um levantamento histórico das experiências mais emblemáticas de *Fachadas Dinâmicas*. Esta tipologia de fachada nasce com o movimento moderno, inspirada pelo maquinismo da Era Industrial. Neste sentido, investigamos as principais motivações que levaram ao seu aparecimento. Por um lado, analisamos como a introdução de um novo método de envelopamento denominado *fachada-cortina* estabelece uma relação direta com a utilização de tecnologias ativas de condicionamento aplicadas em sistemas de climatização artificial para criar as condições ideais de conforto no ambiente interno construído, dando lugar ao surgimento do Estilo Internacional, baseado na mecanização da arquitetura, suscitou no aumento do consumo energético e contribuindo para o aquecimento do sistema climático global. Por



fim, apresentamos as estratégias para controle climático aplicado a fachadas, através do uso de tecnologias com padrões cinéticos e de novas materialidades para a criação de superfícies dinâmicas com capacidade de se adaptar e de responder funcionalmente a estímulos energéticos dos ambientes interno e externo.

Após o levantamento do referencial teórico e histórico, o *terceiro capítulo* é dedicado especificamente ao estudo das *Superfícies* que utilizam tecnologias *Cinéticas*. Dada a extensão do assunto, este capítulo traz a fundamentação necessária para a compreensão de um sistema cinético responsivo para fachadas. É feita uma introdução geral sobre a ciência da cibernética, como princípio básico para o funcionamento operacional de uma superfície cinética. Após isto, nosso objetivo é apresentar os princípios essenciais para o entendimento do mecanismo operacional de uma superfície dinâmica funcional com tecnologia cinética, organizados em: (1) padrões cinéticos, (2) componentes eletrônicos e mecânicos e, (3) dispositivos de entrada e controle cinético.

Após dissertar sobre as tecnologias cinéticas, o *quarto capítulo* trata dos materiais inteligentes com foco nos *Materiais Compósitos* e *Materiais Compósitos Inteligentes*. Este é um assunto bastante abrangente com domínio predominante da engenharia dos materiais. Nosso objetivo para este capítulo visa introduzir os materiais compósitos apresentando o potencial desta tecnologia na criação de superfícies dinâmicas funcionais. Uma introdução sobre a engenharia e ciência dos materiais é feita; seguido dos fundamentos necessários para identificar e conhecer um material compósito, analisando a materialidade, os processos de construção e técnicas de fabricação. Após esta fase, abordaremos os *materiais compósitos inteligentes* como um material com mecanismos responsivos embebidos na estrutura do material.

O *quinto e último capítulo* é composto por uma amostra de superfícies dinâmicas funcionais de padrão cinético e por materiais compósitos alimentados por dados primários, servindo de comparativo entre os diversos sistemas implementados, função responsiva e material utilizado.

## CAPITULO 1 - Superfície Dinâmica Funcional

*Este capítulo introduz os principais conceitos teóricos para a construção de uma definição do termo Superfície Dinâmica Funcional – SDF. Como tipologia construtiva, SDF evolui do conceito tradicional de Fachada, entendida como um plano vertical estático, formada pela composição de materiais padronizados com propriedades homogêneas e forte apelo visual e estético. A arquitetura, favorecida pelos avanços tecnológicos da Era Digital e desenvolvimento de novos e inovadores materiais, vê a oportunidade de reformular a função das fachadas almejando conceber superfícies dinâmicas com desempenho funcional otimizando com objetivo a reduzir o consumo energético da edificação. Diante deste contexto, a noção de fachada como elemento de proteção e delimitação de espaço físico é revista, ampliando a dimensão de limite de uma escala macro para “dentro” do campo microscópico das propriedades do material. Esta nova dimensão de escala reedita a relação da arquitetura com o material, reaproximando o arquiteto a qualidade de “artesão” no desenvolvimento de novas materialidades e no desenvolvimento de sistemas não convencionais para superfícies de envelopamento.*

O termo *fachada*, como representação instrumental de projeto, remonta ao século XV, com o Renascimento, quando se dá origem a “ciência de representar objetos numa superfície plana”<sup>1</sup> a partir da geometria projetiva, baseada no método gráfico do ponto de fuga. Tecnicamente, consiste na representação de objetos em três dimensões num plano bidimensional, constando de medidas em verdadeira grandeza.

No período conhecido como Revolução Científica, no século 17, novas descobertas de cunho matemático subsidiaram o aprimoramento nos métodos de representação gráfica. Assim, numa retroalimentação tecnocientífica, chega a contemporaneidade como desenho técnico auxiliado por avançadas ferramentas gráficas digitais, que, em conjunto com outras áreas de conhecimento científico apresentam uma oportunidade sem precedentes para a criação de superfícies de envelopamento, “que não apenas suportem, mas

---

<sup>1</sup> PERSPECTIVA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Perspectiva&oldid=48451299>>. Acesso em: 3 abr. 2017.

“sobrelevem” significativamente o espaço arquitetônico” (ATTMANN, 2012:96), contribuindo na efetiva capacidade adaptativa da envoltória ao clima local.

Na contemporaneidade, o projeto de arquitetura tem-se tornado um processo cada vez mais complexo diante das exigências de abordar com eficiência o requisito sustentabilidade no âmbito energético, económico e social do ambiente construído. Neste sentido a envoltória, por se tratar do maior elemento construtivo da arquitetura e responsável pela linguagem estética e mediação entre os ambientes interno e externo do edifício, cumpre importante função no controle do consumo energético, na sensação de conforto no interior do ambiente construído e na interatividade entre o usuário e o ambiente circunvizinho; podendo desempenhar significativa contribuição na redução de custos operacionais, determinando a escolha dos equipamentos de condicionamento artificial e a potência a ser instalada, e o conforto ambiental e psicológico do usuário.

Nas últimas décadas, a demanda por envoltórias com alto desempenho funcional e energético tem promovido a busca por profissionais especializados em novas e inovadoras técnicas de envelopamento e de materiais e sistemas de materiais para envelopamento<sup>2</sup>. A necessidade de aprimorar o conhecimento de novas tecnologias e materiais para fachada pode ser conferido no número de cursos de especialização e pós graduação ofertados por instituições de ensino superior destinados à construção e projeto de fachadas<sup>3</sup>; assim, como no número de organizações e institutos<sup>4</sup> que atuam na promoção e difusão de conhecimento e informação sobre emergentes tecnologias para fachadas; e por parte da indústria

---

<sup>2</sup> A exemplo de: Werner Sobek, Arup Facade Engineering, Buro Happold, Thornton Tomasetti, Ramboll Facade Engineering, a2n Facade Consultancy, Meinhardt Facade Technology, AR-C, WSP Group Facade Engineering, Surface Design, T/E/S/S, HS&A Facade, Koltay Facad, QMD Consultoria e Projetos em Esquadrias.

<sup>3</sup> A exemplo de: University of Bath Facade Environmental, Reino Unido; Delft Universite of Technology, Holanda – International Facade Master; University of Applied Sciences, Alemanha – Master Facade Design and Construction; Centre for Window and Cladding, Reino Unido – Master in Facade Engineering; Universidad Politecnica de Madrid, Espanha – Master de Arquitectura em Fachadas Ligeras; ITU, Turkia – Master em Desenho e Construção de Fachadas; TEBE Politecnico di Torino, Italia; University of Southampton Advanced FACade Technologies; University of Southern California Facade Tectonics.

<sup>4</sup> A exemplo de: CIBSE – Society of facade and Engineering, European Facade Network, Facade World, Building Enclosure Council

da construção, investindo em pesquisa e no desenvolvimento de novos materiais e tecnologias. Naturalmente, este interesse por estratégias inovadoras para fachadas produz uma vasta quantidade de artigos de produção científica<sup>5</sup>, publicações de livros, revistas etc. abordando os mais variados assuntos relacionados ao tema como: tipologias técnico-construtivas; função e desempenho; patologia, prevenção e conservação; materiais e componentes; ferramentas gráficas de modelagem e simulação; ferramentas de fabricação, entre outros assuntos.

No entanto, quando se trata de encontrar uma definição para o termo fachada, é comum deparar-nos com definições ambíguas na descrição do “espaço” que existe entre o ambiente interno e externo da arquitetura. “Envelope ou envoltória” é o termo genérico usado para descrever o encapsulamento total do edifício; “alçado” é tradicionalmente usado em referência ao plano principal da edificação, geralmente o frontal; “empena” é comumente utilizado para descrever as paredes cegas de um edifício, geralmente encosto para outro edifício; “fachada cortina ou fachadas envidraçadas” é uma tipologia construtiva que aparece no século 20 e se distingue por ser um sistema que trabalha de forma independente a estrutura do edifício; “fachadas ventiladas ou fachadas de “pele” dupla” trata de uma tipologia constituída de dois planos paralelos separados por uma cavidade entre os planos e que serve como proteção mecânica contra ganhos de carga térmica e de duto de ventilação; “fachadas dinâmicas ou fachadas inteligentes”, estão associadas a sistemas com capacidade de se adaptar e interagir funcionalmente com o ambiente circunvizinho. Na contemporaneidade, fachadas dinâmicas é a tipologias de envoltória que vêm recebendo cada vez mais interesse por parte da comunidade acadêmica e da indústria da construção (HEUSLER, 2015). Contudo, na revisão da literatura a definição para fachadas dinâmicas apresenta-se de forma ambígua, sendo possível encontrar diversas terminologias para o termo como fachada: ativa, inteligente, interativa, cinética, responsiva, multifuncional, adaptativa.

---

<sup>5</sup> Em pesquisa realizada pela UNICAMP -Universidade de Campinas, aplicando como metodologia o Mapeamento Sistemático da Literatura – Systematic Mapping Study (SMS) revelou, que entre os anos de 2012 a 2014, houve um aumento de 350% no número de acessos a publicações com títulos relacionados a fachadas dinâmicas (Arantes & Labaki, 2016).

Para este trabalho, no sentido de evitar ambiguidades na adoção de uma definição para fachadas dinâmicas cunhamos o termo Superfície Dinâmica Funcional – SDF para descrever a tipológica de envelopamento caracterizada por apresentar requisitos adaptativos de resposta dinâmica a estímulos ambientais. A escolha do termo *funcional* foi adotada para estabelecer uma diferença com o termo *responsivo*. Partimos do princípio que todo material possui propriedades responsivas presentes na sua microestrutura ou composição atômica. Por exemplo, a madeira possui propriedades higroscópicas que altera sua característica física em função da umidade. Por outro lado, a capacidade *funcional* se refere a uma ação de resposta previsível, ou seja, estruturado para responder de acordo com o projetado.

Contudo, um estudo sobre SDF requer iniciar analisando a definição tradicional do termo fachada adotada pela arquitetura, como limite para a fundamentação e construção de uma definição para o termo Superfície Dinâmica Funcional.

### 1.1. Fachada e dimensão de limite

A *fachada* tem sido considerada, desde a Renascença<sup>6</sup>, como um plano de composição vertical (NEUMEYER, apud MOLONEY, 2011). De acordo com Moloney (2011) a interpretação tradicional do termo fachada adotada pela arquitetura é descrita como “um plano vertical estático, podendo ter partes móveis”, que cumpre a função de separar e proteger o ambiente interno da hostilidade do ambiente externo (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Partindo deste contexto utiliza-se para este trabalho, a descrição tradicional do termo fachada como limite, permitindo distingui-las das *fachadas dinâmicas*.

Antes de tudo, é oportuno destacar que as fachadas dinâmicas são classificadas pela função que exercem, de forma geral, podendo ser divididas em dois grupos principais: *fachadas dinâmicas climaticamente adaptativas* e *fachadas dinâmicas midiáticas*. A diferença está na função que a tecnologia desempenha. Fachadas dinâmicas climaticamente adaptativas explora as possibilidades do uso de tecnologias responsivas com a função de adaptar a fachada as mudanças do

---

<sup>6</sup> Desde o descobrimento da geometria projetiva ou perspectiva

ambiente. Em contraste, fachadas dinâmicas midiáticas utilizam a tecnologia para a criação de superfícies informatizadas ou trabalhos de arte em escala urbana (MOLONEY, 2011). Dentro do escopo deste trabalho, fachadas dinâmicas midiáticas, embora reconhecendo-se a importância do estudo desta tipologia na composição da paisagem urbana e interatividade dessas com os usuários da cidade; não será objeto de investigação, sendo tratada de forma superficial no Capítulo 3.

É propósito deste trabalho investigar tecnologias responsivas aplicadas a superfícies de fachadas dinâmicas, com objetivo à criação de sistemas de fachada que atuem como “membrana” seletiva entre os ambientes interno e externo, controlando e modulando as energias presentes no ambiente. Em outras palavras, trata-se do estudo de tecnologias responsivas para a construção de um sistema de fachada integrado de estrutura, proteção e interatividade com o meio ambiente (TRČKA, et al., 2013), contribuindo para a otimização das condições de conforto ambiental, custos operacionais e consumo de energia externa no edifício.

Neste sentido, a função tradicional atribuída a fachada, de separar e de proteger o ambiente interno da hostilidade do ambiente externo, implica considerar a fachada como uma superfície que delimita um espaço físico, onde o ambiente interno se caracteriza por ser um ambiente estável, podendo ser otimizado mecanicamente para alcançar as condições “ideais” de conforto, especialmente nos aspectos térmico e lumínico<sup>7</sup> (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). De acordo com a ASHRAE Standard 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), o termo *conforto térmico* pode ser definido como: “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Segundo Lamberts (2011) esta definição situa-se no campo do subjetivo, dependendo de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Contudo, a imagem que melhor ilustra a concepção de um ambiente interno “ideal” é o da cápsula espacial (Figura 1), conforme descreve Addington & Schodek:

O ambiente externo é considerado hostil e somente a separação e criação de um sistema de controle ambiental artificial interno poderá

---

<sup>7</sup> Conforto no ambiente construído inclui também conforto acústico e visual

manter o “ideal” de proteção e conforto de um container para o homem (ADDINGTON & SCHODEK, 2005:54).



*Fig. 1. Cápsula espacial como ideal de conforto ambiental interno*  
*Fonte: <http://spacefeelings.com>*

Apesar disso, pressupor a fachada como plano de delimitação espacial implica, antes de tudo, considerar a fachada como uma barreira física e, neste sentido, ser constituída por algum tipo de materialidade. Ou seja, não obstante as funções atribuídas à fachada, esta é, antes de mais nada, uma superfície material. É portanto, na efetiva escolha do material que o desempenho adaptativo da fachada ao ambiente contribuirá, positiva ou negativamente, no desempenho do edifício.

Embora a escolha do material de fachada seja feita a partir das suas propriedades físicas e visuais, as mesmas que, sem lugar a questionamentos, cumprem uma finalidade importante e determinante na linguagem estética do edifício. Esta escolha corresponde, também, à especificação de um determinado desempenho constituído nas propriedades físicas que compõem o material. De acordo com Toshinori Takagi (apud AHMAD, 1990:68) “todo material possui funções primitivas por causa das propriedades inerentes emanadas da sua estrutura atômica e eletrônica”. Este desempenho, os quais, na maioria das vezes, não são perceptíveis pelo olhar humano numa escala macro, não entanto são possíveis de percepção por meio de outros sentidos, como, de forma direta o sentido do tato ou de forma indireta por meio da sensação térmica. Assim, o

desempenho funcional de um material está diretamente relacionado a composição das suas propriedades físicas presentes na sua microestrutura, as mesmas que, para serem visualizadas e/ou manipuladas precisamos “adentrar no campo” microscópico da matéria. Neste sentido, Alfred Nordmann (apud KLOOSTER, 2009:68) observa que “a complexidade no comportamento físico de um objeto muda na escala microscópica”; de acordo com Nordmann “a primeira vista, as leis da natureza operando no mundo macro se mostram ineficientes nessa escala” (apud KLOOSTER, 2009:68).

Diante do exposto é possível pressupor que, numa escala microscópica, todo material desempenha algum tipo de comportamento dinâmico; conseqüentemente, todo material de fachada constitui-se numa superfície dinâmica. Não obstante a existência de comportamento dinâmico inerente nas propriedades atômicas e microscópicas do material. Isto não configura, necessariamente, que o material apresente comportamento funcional. Entende-se que, para que um material ou sistema de materiais possa ser considerado um sistema com *comportamento dinâmico funcional* é necessário que o sistema seja dotado da capacidade de responder de forma previsível a um estímulo energético presente no ambiente (interno ou externo). Em outras palavras, um sistema funcional deverá ser “induzido” a apresentar comportamento responsivo e direto sobre o estímulo ambiental para o qual foi “ordenado” a interagir, desempenhando uma função. Assim, são considerados materiais ou sistemas de materiais funcionais aqueles sistemas projetados e desenvolvidos para desempenhar uma ação interativa de adaptação e resposta de forma direta e previsível. Por exemplo, a implantação de um sistema dinâmico desenvolvido para responder funcionalmente no controle da radiação da luz solar, deverá, necessariamente, responder ao estímulo da luz solar e não pela função de controlar outro estímulo energético como CO<sup>2</sup> por exemplo. Isto não significa que um sistema de fachada não possa ser capacitado a responder por múltiplas funções ao mesmo tempo; entretanto, num sistema responsivo multifuncional cada uma das funções responde diretamente a um estímulo específico. Conforme será visto nos Capítulos 2 e 3.

Sem embargo, é importante destacar que o controle do clima é uma preocupação historicamente relevante na prática da arquitetura (GHADIALI, 1959). Nesta



pesquisa optou-se pelo estudo dos sistemas dinâmicos funcionais, os quais, na maioria dos casos, exigem da necessidade de energia externa para seu funcionamento. No entanto, anteriormente a introdução dos sistemas de climatização artificial, os edifícios eram projetados utilizando tecnologias energeticamente passivas na criação de fachadas estáticas com efetivo comportamento adaptativo ao clima local. Na contemporaneidade é impossível imaginar a construção de um edifício, principalmente de um edifício em altura, sem levar em consideração a instalação de equipamentos de climatização artificial. Contudo, é possível implantar estratégias com tecnologias passivas de controle térmico e luminoso trabalhando complementarmente aos sistemas de condicionamento artificial. Um exemplo é o edifício CapitaGreen, projeto do arquiteto Toyo Ito, construído em Singapura no ano de 2014 (Figura 2). Este projeto introduz um sistema de ventilação natural capturado o ar no topo do edifício, que ao passar por um filtro de água é refrigerado é distribuído nos pavimentos por meio de um duto vertical. Por outro lado, a fachada é composta por uma tipologia de fachada-cortina dupla de vidro, com aproximadamente de 55% de revestimento vegetal entre as camadas, contribuindo na redução da carga térmica incidente sobre o edifício, filtrando a luz natural no interior do ambiente e proporcionando conforto visual aos ocupantes do edifício.

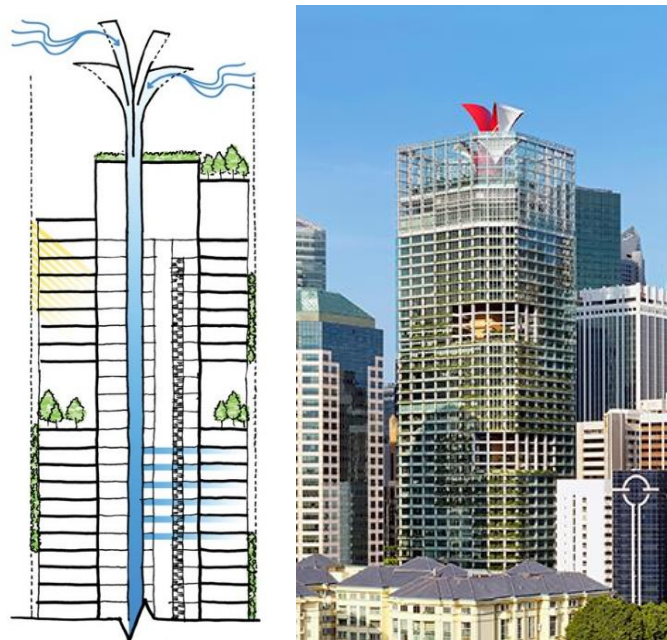


Fig. 2 Edf. CapitaGreen. Sistema híbrido de adaptação climática  
Fonte: <http://www.ctbuh.org/TallBuildings/VideoLibrary/tabid/486/language/en-US/Default.aspx#/videos/watch/2692>

Podemos considerar que estratégias para controle climático desenvolvidas com tecnologia passiva representam a arte e a ciência de projetar fazendo uso benéfico dos elementos da natureza (IEA – ECBCS Annex 44, 2009). No Brasil, as condições do clima tropical sugerem a necessidade do controle da radiação solar estimulando o desenvolvimento de anteparos para fachadas e otimização da condição ambiental no interior do ambiente construído (PINTO et al., 2015). O país tem cumprido papel de pioneirismo no desenvolvimento de técnicas passivas para proteção e controle climático em fachadas. Uma delas, no final do século 19, foi a utilização do azulejo como revestimento da fachada principal e da telha “meia cana” nas empenas laterais, acredita-se com propósito de proteção contra a umidade da chuva (KLÜPPEL, 2009). Outra invenção genuinamente brasileira que atesta a criação de elementos para o controle térmico foi o cobogó, no início do século 20, que consiste de um elemento pré-fabricado baseado numa retícula vazada sobre uma placa prismática de concreto que permite a passagem de ventilação, reduzindo a incidência de luz solar (PINTO et al., 2015). Ainda na primeira metade do século 20, surge o *brise soleil* ou quebra sol. O crédito inventivo deste elemento é outorgado a Le Corbusier, numa proposta não construída para a *Maison Locative*, na Argélia em 1933. Nessa, Le Corbusier propunha o uso de placas fixas de concreto dispostas horizontalmente na fachada de maior incidência solar (CUNHA, 2011) (BARBER, 2012). Contudo é no Brasil que o *brise soleil* é executado pela primeira vez na história no edifício da Associação Brasileira de Imprensa - ABI, no Rio de Janeiro, no ano de 1936, pelo escritório MMMRoberto. Contudo, o princípio de *brise soleil* utilizando para o edifício sede da ABI segue o mesmo princípio proposto por Le Corbusier na Argélia. Porém, é nas mãos de Oscar Niemeyer que o uso do *brise soleil* é utilizado de forma mais sofisticada no edifício da Obra do Berço, no Rio de Janeiro, em 1938. Oscar Niemeyer aperfeiçoa e inova com a criação do *brise soleil* móvel (BARBER, 2012), feito em alumínio, utilizado como um dispositivo desatacado da fachada principal do edifício. A criação do *brise soleil* móvel permite a operação independente do anteparo por trechos ou pavimentos, possibilitando diferentes orientações para o controle da luz solar (Figura 3).

Tanto o cobogó como o *brise soleil* se tornariam elementos amplamente assimilados imprimindo uma linguagem característica ao modernismo brasileiro.



Fig. 3 Brise-soleil móvel

Fonte: <http://www.colegiodearquitetos.com.br/dicionario/2009/02/o-que-e-brise/>

Entretanto, a preferência e proliferação mundial das fachadas-cortina, aplicadas de forma genérica, independentemente do contexto climático do local; excluíram a introdução de estratégias passivas de adaptação climática no edifício, que seriam substituídas por tecnologias predominantemente ativas de climatização artificial; desta maneira, minimizando a capacidade moduladora da fachada, configurando o caráter “exclusivo” de um elemento de delimitação espacial e barreira física que exclui o ambiente externo do interno. A capacidade de gerenciar e modular os agentes energéticos do ambiente numa fachada que atue de forma “seletiva” pode ser alcançada através da aplicação de sistemas adaptativos ou responsivos que apresentem desempenho dinâmico, ajustando suas propriedades de maneira reversível para se adaptar às condições e variações ambientais (FAVOINO, JIN, & OVEREND, 2014). Assim, o desempenho adaptativo de uma superfície dinâmica requer a efetiva estruturação do material ou sistema responsivo, desenvolvido em relação as variáveis ambientais do lugar de forma a garantir o efetivo desempenho do sistema como modulador ambiental conforme ilustrado na Figura 4.

Desta maneira, ao considerar o material ou sistema de materiais de fachada como um sistema de propriedades ativas, estamos, de certa forma, reconsiderando o paradigma hegemônico pós década de oitenta, da escolha do material como um artefato exclusivamente visual (ADDIGNTON, 2005),

invertendo a relação do arquiteto com o material, “da simples aparência visual para um campo de ações e transformações com desempenho funcional” (MAZÉ, apud KLOOSTER, 2007:63). Conceber as fachadas a partir do que se deseja que o material ou sistema de materiais “faça”, em vez de como queremos que o material se “mostre” configura uma nova abordagem na prática de projeto para a arquitetura do século 21.

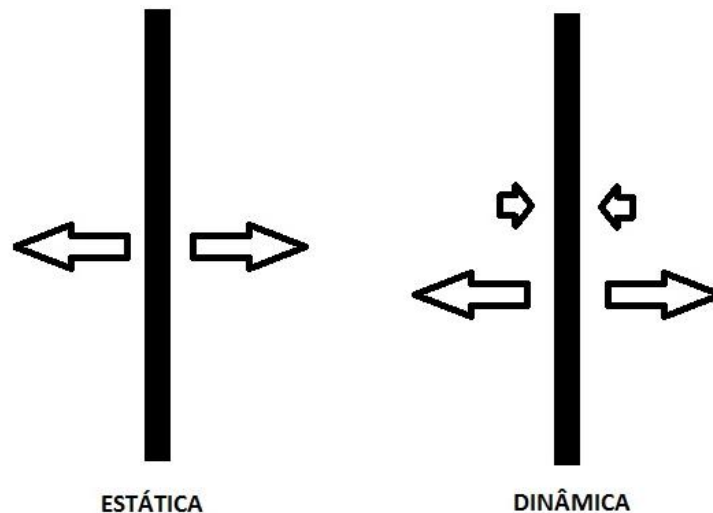


Fig. 4. Estratégias de Fachada: Exclusiva e Seletiva  
Fonte: Elaboração própria.

## 1.2. Materiais padronizados e desempenho adaptativo

Na prática contemporânea de projeto, o apelo na escolha do material a partir das suas propriedades físicas e visuais remonta, em parte, ao período em que as técnicas de manufatura passaram da produção artesanal para a produção mecanizada. Com o advento da Revolução Industrial a produção em massa de materiais trouxe consigo uma transformação radical na prática de projeto e no método de construir (OXMAN, 2010). Esta mudança atinge, principalmente, a relação do arquiteto com o material (ADDINGTON & SCHODEK, 2005)

Antes da Revolução Industrial “o artesão-arquiteto possuía, além da habilidade construtiva necessárias à execução do ofício, uma relação natural e intrínseca da forma a ser construída com o material a ser utilizado” (OXMAN, 2010:28).

Esta relação, própria da arquitetura vernacular<sup>8</sup>, caracterizava-se no conhecimento empírico ou intuitivo das propriedades e desempenho do material (ADDINGTON & SCHODEK, 2005), adquirido ao longo do processo evolutivo de construir<sup>9</sup>; conforme descreve Rudofky (1964) sobre a tradição vernacular de construir:

Uma arte comunitária produzida não por alguns intelectuais ou especialistas, mas pela atividade espontânea e contínua de um povo inteiro, depositados numa herança comum e obedecendo as lições de uma experiência comunal (1964:prefácio).

Segundo Gruber & Gosztanyi (2010:507) a qualidade construtiva da arquitetura anterior ao século 19 “estava representada na efetiva estruturação do material disponível no local”, resultando numa obra de arquitetura concebida a partir do desempenho adaptativo do material e de métodos construtivos adaptados ao clima local<sup>10</sup>. Ainda, de acordo com Bernard Rudofsky (1964):

Nós (arquitetos contemporâneos) temos muito o que aprender disso que foi a arquitetura antes de se tornar uma arte de especialistas. Em particular, com os construtores autodidatas, que sabem -no tempo e no espaço- adaptar com talento admirável, suas construções ao ambiente. Ao invés de se empenhar, como nós, em dominar a natureza, eles aproveitam ao extremo os caprichos do clima, os obstáculos da topografia (RUDOSFKY, 1964: prefácio).

Com o advento da Revolução Industrial abrem-se as portas à fabricação mecanizada. Projetos de arquitetura para habitação passam a ser produzidos de

---

<sup>8</sup> O termo "vernacular" deriva do latim *vernaculus*, que significa doméstico, nativo, indígena. Denomina-se arquitetura vernacular a toda arquitetura em que se emprega materiais e recursos do próprio ambiente em que é construída. Desse modo, ela apresenta caráter local ou regional (ARQUITETURA VERNACULAR. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Arquitetura\\_vernacular&oldid=48988267](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Arquitetura_vernacular&oldid=48988267)>. Acesso em: 7 jun. 2017).

<sup>9</sup> Se refere à arquitetura das sociedades sem grande grau de especialização e orientadas pela tradição, onde impera a relação próxima entre forma e cultura e a longa persistência dessas formas. O conhecimento necessário à construção de moradias nesse contexto é comum a todos os membros do grupo (TEIXEIRA, 2017)

<sup>10</sup> Note-se que falamos de soluções construtivas de caráter climático-adaptativo; o que, por si, não constitui, necessariamente, um ambiente interno saudável do ponto de vista sanitário. Apesar de antigos escritos gregos fazerem referências a ecologia médica, como o tratado de Hipócrates sobre ares, águas e lugares; ou, o tratado de Vitruvius: Os dez livros da arquitetura, livro I, cap. IV – O lugar da Cidade, onde expõe os princípios climáticos para uma cidade saudável. Discussões sobre solo, clima e higiene só viriam a ser colocadas em prática a partir do século XIX, quando o estudo das cidades passa a ser considerado uma ciência urbana, em outras coisas buscando dar respostas as ocorrências de endemias e epidemias (ÁVILA-PIRES, 2000).

forma mecânica, concebidos modularmente em função do poder da indústria (JENCKS apud OXMAN, 2010). Valores construtivos historicamente semeados por antigos artesãos-arquitetos, constituídos na integração *arquitetura-material-clima*, são abandonados e substituídos por uma nova prática de projeto baseada nos princípios da produção em massa. Rapidez, repetição e modulação tornam-se sinónimo da arquitetura moderna (OXMAN, 2010). Para Oxman (2010:27) “Materialidade, na lógica da tradição modernista torna-se um agente secundário a concepção da forma”. A produção de arquitetura, especialmente depois da mecanização dos sistemas de climatização artificial, passa a ser concebida na lógica de “blocos de montar” –em alusão ao *Lego*<sup>11</sup>. Ou seja, a arquitetura passa a ser a criação de uma composição formal, construída a partir da escolha de materiais padronizados.

Materiais padronizados são fabricados industrialmente para suprir uma demanda de mercado. Nos dias de hoje, a lógica do capital global favorece a comercialização de materiais padronizados, os mesmos que podem ser aplicados de forma genérica, independente do contexto climático do local onde será aplicado. Como consequência, a arquitetura contemporânea se vê imersa na produção de um “padrão de estilo universal” ou Estilo Internacional. Apesar disso, a escolha de materiais padronizados, quando aplicados buscando adaptar-se ao contexto climático e ambiental do lugar, poderá apresentar comportamento adaptativo satisfatório, minimizando a dependência do uso de equipamentos mecânicos de climatização artificial.

Contudo, “materiais padronizados são produzidos a partir de uma quantidade relativamente limitada de elementos encontrados na natureza” (NABONI, 2016:720). Na contemporaneidade, avanços nas ciências da computação e o aprimoramento das técnicas de fabricação favorecem a criação de materiais customizados com propriedades variáveis e desempenho funcional otimizado maior aos encontrados na natureza.

---

<sup>11</sup> O sistema LEGO é um brinquedo cujo conceito se baseia em partes que se encaixam permitindo muitas combinações. Criado pelo dinamarquês Ole Kirk Kristiansen, é fabricado em escala industrial em plástico feito desde 1934, popularizando-se em todo o mundo. LEGO. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Lego&oldid=48930694>>. Acesso em: 31 mai. 2017.

Não obstante o processo de “criar” novos e inovadores materiais envolve o domínio de conhecimento das propriedades do material, da familiarização com tecnologias de ponta e avançadas técnicas de manipulação e fabricação. No entanto, discussões cada vez maiores sobre a possibilidade de criação de novos materiais para a arquitetura, sinaliza uma tendência de reaproximação do arquiteto a condição de “artesão digital” na confecção<sup>12</sup> de novas materialidades, conforme observado por Bernadette Bensaude (2001):

Em contraste aos materiais convencionais que possuem características padronizadas disponíveis para um mercado mundial, materiais inteligentes são desenvolvidos de acordo com uma demanda funcional como produto final. Em outras palavras, em vez de suprir produtos que vão ser finalizados pelos clientes, novos materiais são o produto final de uma cooperação entre clientes e fornecedor (*file to factory*) (BENSAUDE, 2001:12).

Para Neri Oxman, “a engenharia de materiais permite ao arquiteto migrar da cultura da especificação de materiais para o da criação de materiais” (2010:76). Um exemplo que sinaliza esta tendência é a proposta conceitual para o edifício Carbon Tower, proposta pelo arquiteto Peter Testa (Figura 5). A proposta de Testa abandona praticamente todos os princípios de hierarquia construtiva convencional, propondo um novo método através da transferência do equipamento de fabricação do material para a obra. Para isto, a proposta visa reduzir a variedade de materiais sendo escolhido o material compósito a base de fibra de carbono utilizando a técnica de fabrico pultrudado<sup>13</sup>. Na visão do arquiteto, o material seria extrudado de forma contínua, tornando-se ao mesmo tempo estrutura e vedação. Convencionalmente materiais compósitos, se comparado aos materiais tradicionais, precisam de menos etapas no processo de fabricação (ISAAC & ISHAI, 2005). Testa, ao propor extrudar o material no

---

<sup>12</sup> Não se espera, como também não se nega a possibilidade de arquitetos terem a capacidade de criar materiais funcionais, que, em si, é um trabalho que recai sobre profissionais da engenharia dos materiais. No entanto, a referência “criar” é aqui colocado em alusão a um novo modelo de prática de projeto envolvendo outras áreas de conhecimento científico transdisciplinar. Conforme destaca Bensaude (2001): a estruturação e composição de um novo material espelha-se na composição e arranjo de competências humanas.

<sup>13</sup> O processo de pultrusão é um processo contínuo, no qual fibras reforçadas são impregnadas com resina duroplástica. As fibras de vidro que estão impregnadas na resina são acrescentadas à ferramenta que lhe dará a geometria do perfil desejado, e endurecem nele. Fonte. <http://fibrolux.com/pt/main/informacao/pultrusao/>

canteiro de obra reduz consideravelmente o transporte de materiais ao local, reduzindo a emissão de CO<sup>2</sup> na atmosfera e possibilitando a moldagem de peças maiores, reduzindo a necessidade de juntas. Materiais compósitos apresentam desempenho otimizado, são mais leves e minimizam a necessidade de manutenção. Parece claro que projetos de arquitetura que apresentem processos construtivos mais práticos e simplificados, reduzindo custos operacionais utilizando materiais e estruturas mais leves e com igual ou melhor resistência deverá atrair a indústria da construção.



*Fig. 5 Carbon Tower, Arquiteto Peter Testa  
Fonte: <http://bioms.info/studioone/speakers.html#>*

### **1.3. Materiais e Sistemas de materiais Inteligentes**

A criação de materiais com propriedades variáveis e desempenho funcional otimizado na arquitetura tem apresentado relativamente pouca inovação,



mantendo-se praticamente inalterada desde o período da Revolução Industrial (ADDINGTON & SCHODEK, 2005); (KLOOSTER, 2009); (HAMMAD & ABU-HIJLEH, 2010); (ATTMANN, 2012); especificamente quando comparado a profissões em permanente fluxo científico e tecnológico. Tradicionalmente, porém não exclusivamente, a pesquisa e desenvolvimento de materiais denominados “inteligentes” tem sido uma área de domínio da engenharia e ciência dos materiais, encontrando consumidores em áreas de produção como a indústria aero espacial, bélica, automobilística, naval, médica, esportiva, inclusive artística. Sem embargo, nas últimas décadas o acesso a tecnologias e ferramentas de modelagem e simulação digital está permitindo estreitar, rapidamente, a distância entre a arquitetura e engenharia dos materiais (PARK & BECHTHOLD, s/data) que, de forma interdisciplinar trabalham na criação de materiais inteligentes voltados para a indústria da construção.

Avanços científicos e tecnológicos têm possibilitado a incorporação de dispositivos eletrônicos em materiais e sistemas de materiais para fachadas, tornando-as capazes de se adaptar e responder as variáveis do meio ambiente (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). O desenvolvimento de tecnologias responsivas que incorporam mecanismos de sensores, controladores e atuadores embebidos ou acoplados na estrutura do material tem permitido a criação de sistemas com “inteligência” incorporada (AHMAD, 1990). Estes mecanismos permitem que a fachada tenha a capacidade de reconhecer, discriminar e responder funcionalmente aos estímulos e variações do ambiente, com objetivo de se adaptar ao ambiente local de forma efetiva e harmoniosa.

Apesar disso, é importante salientar que não existe um consenso teórico preciso que estabeleça os conceitos básicos para definir o termo ‘*smart*’, “*controlled*”, “*active*”, inteligente, adaptativa, responsiva, etc., permanecendo uma definição amorfa (AHMAD, 1990). De certa maneira, o uso do termo *material inteligente* tem sido utilizado neste trabalho de forma deliberada.

Segundo Toshinori Takagi, (apud AHMAD, 1990) material inteligente pode ser definido como “materiais que respondem de forma mais otimizada as mudanças do ambiente, manifestando suas funções de acordo com estas mudanças”. Na interpretação de Masuo Aizawa, o conceito de material inteligente consiste na “capacidade de instalar um software para coordenar cada unidade de função,

como sensores, processadores e atuadores” (apud AHMAD, 1990:69). Addington e Schodek (2005:9) descrevem os materiais inteligentes de forma mais abrangente, como “aqueles objetos que sentem eventos ambientais, processam essa informação sensorial e depois atuam sobre o meio ambiente”. Ainda, Iqbal Ahmad (1990) entende por material inteligente:

Um sistema ou material construído com mecanismos de sensores, processadores e controladores capazes de sentir estímulos, processar a informação e responder a ações programadas, revertendo à posição de origem quando o estímulo foi removido (AHMAD, 1990:68).

Para Mataric (2014) uma das características distintivas da inteligência é a capacidade de aprendizagem, o que significa a habilidade do material ou sistema adquirir novos conhecimentos para melhorar o seu próprio desempenho. Em outras palavras, a introdução de inteligência artificial na estrutura do material permite a interação entre os sistemas da computação (ex.: hardware e software) e componentes físicos (ex.: máquinas e dispositivos), possibilitando a criação de sistemas ciber-físicos e inovadoras soluções para a arquitetura (HEUSLER, 2015). Osman Attmann (2012) observa que:

A conotação e objetivos tradicionais da arquitetura estão sendo redefinidos por componentes dinâmicos cada vez mais interativos, incorporando informação e comunicação, tornando o ambiente construído um sistema de ação e reação às necessidades dos usuários e condições do meio ambiente (ATTMANN, 2012)

Embora a introdução de dispositivos eletromecânicos inteligentes embebidos na estrutura do material ou acoplados num sistema de materiais possibilite a criação de mecanismos auto-reguladores capazes de sentir, apreender e de se realimentar sistemicamente. Isto não significa, de acordo com Kiyoshi Takahashi, (apud AHMAD, 1990) que seja possível denominar um material como sendo inteligente. Para Takahashi somente será possível denominar um material como inteligente quando:

For possível criar materiais a nível atômico. Nesta etapa, como acontece nas células vivas, a integração entre eletrônica, mecânica e componentes energéticos tornará difícil a diferenciação entre sistemas de materiais e dispositivos (TAKAHASHI, apud AHMAD, 1990:69)

De certa maneira, o pensamento de Takahashi remonta ao século 17, quando René Descartes teorizou que um organismo nada mais é que uma máquina, mostrando não existir diferença entre a vida orgânica e a matéria inanimada

(MAYR, 2004). O que, nos anos cinquenta da Era Moderna daria lugar ao pensamento cibernético, entendido como uma ciência que pesquisava as dinâmicas do mundo com o intuito de criar métodos eficientes para agir sobre este mesmo mundo físico de uma forma lógica, objetiva e sistêmica (NÓBREGA, 2006). Na proposição da cibernética, máquinas e seres vivos funcionam sobre os mesmos parâmetros. No mundo vivo, o processo adaptativo depende da capacidade do organismo apreender. Este aprendizado, que na biologia é definido como processo evolutivo, é onde um organismo desenvolve melhor a capacidade de viver no seu habitat (DOBZHANSKY apud LÓPEZ, 2015). Para Takahashi (apud AHMAD, 1990:68) materiais inteligentes são aqueles que possuem características próximas dos organismos vivos, descrevendo esta classe de material como: “controle genético em ciência dos materiais”.

Materiais inteligentes que apresentem comportamento próximo dos organismos vivos são, até o presente, considerados materiais do futuro. Na contemporaneidade é possível testemunhar o surgimento de novos e inovadores materiais que apontam para esta direção. A exemplo dos materiais *auto regenerativos*, que são uma classe de material capaz de se auto regenerar. A inserção de agentes reparadores inseridos na matriz do material possibilita a reparação de um dano, impedindo-o de se propagar e preservando a vida útil do material. Estes agentes reparadores se apresentam na forma de substâncias líquidas (catalizadores, resinas, etc.) inseridos na matriz através do método de micro cápsulas; por sistema vascular, “artérias” contendo o agente reparador; e, pelo método intrínseco, quando o agente reparador é misturado a matriz do material (HART, 2017). O agente reparador ao ser atingido por uma fissura libera o líquido reparador reparando o dano (Figura 6).

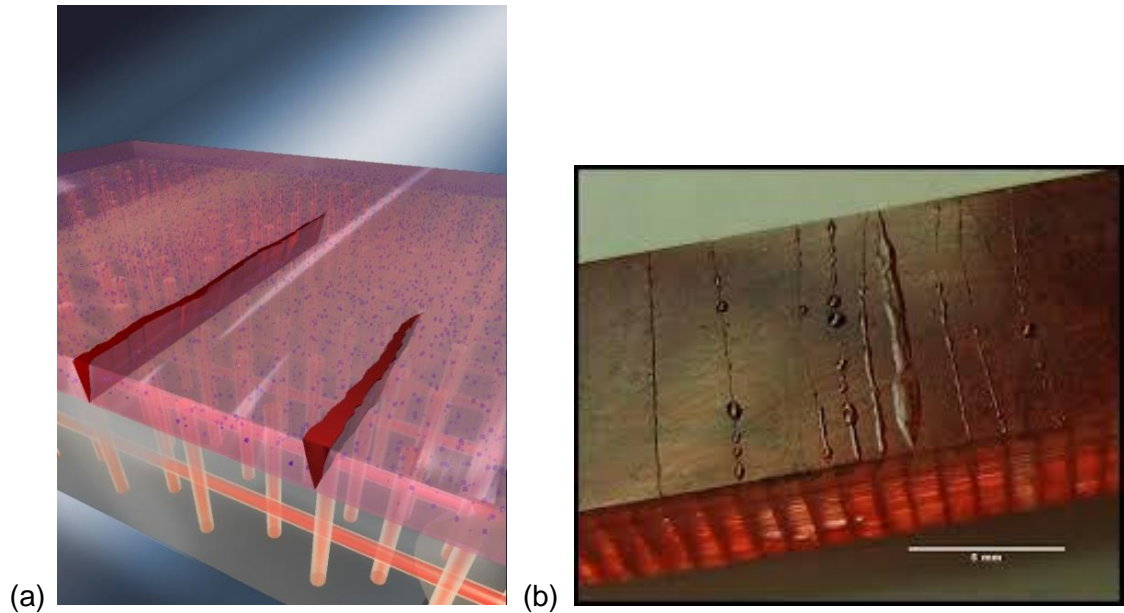


Fig. 6 Material Auto generativo

Na imagem (a) apresenta um desenho esquemático do sistema vascular. (b) Protótipo de material compósito regenerativo com sistema vascular.

Fonte: <http://autonomic.beckman.illinois.edu>. Acesso em: 25 jul. 2017.

É importante destacar, que as definições para o termo *inteligente* acima descritas são dirigidas a duas classes de materiais: materiais inteligentes e sistemas de materiais inteligentes. Material inteligente, é tratado como uma substância material, caracterizado pela alteração da estrutura molecular da matéria (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Sistemas de materiais inteligentes referem-se a materiais “criados” a partir da composição de dois ou mais materiais, geralmente estruturados em camadas, que podem conter dispositivos eletromecânicos na composição ou acoplados a sua estrutura (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Neste contexto, todas as funções de detecção, controle e atuação estariam integradas em um único material funcional (REICHERT, MENGES, & CORREA, 2015), isto é, o material como uma máquina.

Contudo para que um material ou sistema de material possa ser definido como *inteligente*, é necessário, segundo Addington e Schodek (2005), apresentar as seguintes características:

- Imediatismo: Ser capaz de responder em tempo real
- Transitivo: Responder a mais de um estado de ambiental
- Auto-responsivo: Possuir “inteligência” interna
- Direto: Responder de forma localizada à função estimulada
- Seletivo: Responder previsivelmente

Embora espera-se que um sistema responsivo para fachada responda por uma função programada. A característica *seletiva*, como resposta previsível apresentada por Addignton e Schodek (2005), mostra-se contrária ao conceito de inteligência defendida como a capacidade de um sistema apreender (sobre si mesmo e sobre seu ambiente). Esta contradição, se por um lado reforça o caráter amorfo para definir o termo materiais inteligentes; por outro lado, determina um limite entre sistemas responsivos inteligentes e sistemas responsivos automatizados.

Considerando os avanços tecnológicos do início do século 21 no desenvolvimento de sensores, efetadores e fabricação de dispositivos mecânicos cada vez mais sofisticados, que tentam se inspirar e modelar o funcionamento biológico; o acesso a computadores mais rápidos e acessíveis financeiramente, permitindo que os sistemas possam agir de forma mais eficiente e rápida no mundo real; o aprimoramento da comunicação sem fio, possibilitando que sistemas possam se comunicar com outros computadores no ambiente de forma a ser melhor informados. É possível prever, futuramente, a criação de fachadas constituídas por sistemas responsivos inteligentes, capazes de apreender e se auto gerenciar otimizando seu desempenho funcional. Apesar da denominação “inteligente”, SDF que utilizam tecnologia responsiva, até o presente ano de 2017, não apresentam capacidade de aprendizado, tratando-se de sistemas responsivos automatizados, que atuam a semelhança de um robô; ou seja, uma estrutura informatizada que efetua um trabalho servil (MATARIC, 2014). Neste contexto é possível classificar o sistema responsivo pelo nível de automação: programada para atuar em tempos pré-determinados ou programada para atuar em tempo real. Contudo, todo sistema responsivo automatizado se caracteriza pela condição de se adaptar ao ambiente. É na simbiose *adaptação e resposta* que se fundamenta a “fisiologia do mecanismo” de funcionamento de (WEINER, 1948) de uma superfície dinâmica funcional.

## 1.4. Superfície adaptativa-responsiva

Semanticamente adaptabilidade é a capacidade de ajustar alguma coisa ou comportamento a uma nova condição. O termo “adaptativo” de acordo com o dicionário de ciências sociais<sup>14</sup> é definido como: processos por meio dos quais um organismo vivo se adapta ao seu ambiente físico e orgânico.

Ferguson (apud LONNEN et. al., 2013) define adaptabilidade como “a habilidade de um sistema enviar um comando funcional, considerando múltiplos critérios de escolha a partir das variáveis do ambiente”. Isto significa, a capacidade de sistema “sentir” e deliberar uma ação de resposta para a atuação de um mecanismo com objetivo de se adaptar a uma condição otimizada. De acordo com Bem Wada (apud AHMAD, 1990:70) adaptativo são “sistemas cujas características estruturais e geométricas podem ser alteradas automaticamente para atender a requisitos (funcionais) em resposta a estímulos externos”. Assim, o conceito de adaptabilidade pode ser entendido como sistemas da comunicação que geram sistemas de atuação (HENRIQUES, 2015), configurando-se na interação entre o ambiente e seu mecanismo.

Por outro lado, a definição do termo responsivo pode ser descrito segundo Loonen et. al. (2013) como:

A capacidade de um sistema mudar repetidamente e reversivelmente algumas de suas funções, características ou comportamento ao longo do tempo, em resposta a requisitos de desempenho e condições do contorno variável, com o objetivo de melhorar o desempenho geral do edifício (LOONEN et. al., 2013:485).

É portanto, através do processo de adaptação que um sistema se conecta ao mundo exterior, tanto para a recepção de impressões quanto para o desempenho de ações (WEINER, 1948). Assim, para que uma SDF seja capaz de se adaptar a uma condição ambiental é necessário, primeiramente, que o sistema “sinta” o estímulo, para depois processar esta informação sensorial e ordenar uma ação de resposta. Entre o receptor do estímulo (sensor) e o executor da ação (atuador), existe um “grupo” de elementos intermediários, cuja função é recombinar a informação imputada de forma a produzir um determinado

---

<sup>14</sup> Dicionário de Ciências Sociais 2da Ed. Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1987.

tipo de resposta ao executor (MATARIC, 2014). A função de recombinação a informação coincide com o conceito cibernético de retroalimentação sistêmica (feedback) que trata do retorno dos efeitos sobre as causas; dos resultados finais sobre as condições iniciais; das saídas de informação sobre as entradas de dados (NÓBREGA, 2006).

Análogo a uma membrana para a biologia, o funcionamento adaptativo-responsivo de uma SDF funciona nos mesmos princípios que a pele do corpo humano. A pele humana, além de encapsular e proteger os órgãos vitais do corpo (envoltória), está em constante intercâmbio dinâmico com seu meio, captando estímulos externos e traduzindo informações para o interior da célula, fazendo que responda em forma de secreção, absorção e contração. A interfase entre a captação sensorial do estímulo e a resposta funcional da ação é realizada pelo tecido nervoso, que gera e conduz impulsos eletroquímicos por meio de processos celulares (WARWICK & WILLIAMS, 1979) (KAPIT, 2004). SDF's estão inspiradas nos processos adaptativos dos sistemas vivos, utilizando o conceito da cibernética para executar seu mecanismo funcional de adaptação e resposta.

Entretanto deve-se ressaltar que uma arquitetura responsiva é qualquer arquitetura que possui capacidade de responder às necessidades dos usuários. Ela não precisa ser inteligente, a menos que as respostas sejam resultado de um processo inteligente (KIRKEGAARD & PARIGI, 2012). Por exemplo, uma parede de adobe é uma estrutura responsiva que responde a temperatura do ambiente exterior mantendo o ar frio dentro do interior da casa, enquanto lá fora está quente. Neste sentido responde a uma propriedade do material e não, fruto de um processo inteligente.

## **1.5. Resumo do Capítulo**

Superfícies Dinâmicas Funcionais - SDF apresenta-se como uma nova tipologia de fachada climaticamente adaptativa caracterizada por modular, de forma *seletiva*, as energias físicas presentes no meio ambiente. Esta tipologia surge em contraposição as fachadas estáticas que desempenham função *exclusiva* de

delimitação espacial e barreira física com o ambiente externo, demandando a concepção de um ambiente interno artificialmente climatizado.

Contudo o estudo de uma SDF requer, antes de mais nada, adotar a fachada como a constituição de uma superfície material, percebendo a interferência na escolha do material no desempenho climático-adaptativo da fachada e, conseqüentemente, no conforto interno do ambiente construído. Assim, estuda-se, ao longo da história, como os processos de fabricação interferem na função adaptativa e utilitária do material. Inicialmente, a partir de um modelo de fabricação artesanal com características de desempenho adaptativo ao clima local, dando lugar à produção em massa de materiais com propriedades homogêneas, que podem ser instalados genericamente em qualquer contexto climático. O termo “futuro vernacular” cunhado neste trabalho, favorecido dos avanços científicos e tecnológicos do século 21 procura recuperar a função utilitária e adaptativa do material através da utilização de tecnologia responsiva. Neste sentido, analisa-se as discussões contemporâneas sobre a inserção do arquiteto na criação de novas materialidades, customizando o desempenho funcional e adaptativo do material condicionado a uma realidade climática específica, não genérica.

Tratar de tecnologias responsivas; ou seja, de sistemas que tem a capacidade de sentir, processar e agir diante de um estímulo do ambiente com objetivo de desempenhar uma função adaptativa e programada, implica investigar os materiais ou sistemas de materiais definidos como “inteligentes”. Trata-se de duas classes de materiais responsivos estruturados de forma diversa. Material inteligente é tratado como um material caracterizado pela alteração das propriedades moleculares ou arranjo na micro estrutura da matéria. Por outro lado, sistemas de materiais inteligentes referem-se a materiais “criados” a partir da composição de dois ou mais materiais, geralmente estruturados em camadas, que podem conter dispositivos eletromecânicos na sua composição ou acoplados a sua estrutura.

Entretanto, o termo “material inteligente” apresenta definição ambígua. O principal atributo para definir um material como sendo inteligente é a habilidade



do sistema apreender. Contudo, SDF que utilizam de sistemas responsivos, até os dias de hoje, não possuem capacidade de aprendizado. Por tanto trata-se de sistemas responsivos automatizados que atuam de forma previsível.

## 1.6. Resultados do Capítulo

Com o advento da Revolução Industrial, a produção em massa de materiais padronizados e a climatização artificial no ambiente construído trouxeram mudanças radicais para a arquitetura, transformando o desempenho da fachada, de uma normativa climaticamente adaptativa e predominante na arquitetura anterior ao século 19, para a concepção de fachada exclusiva, concebida como elemento de delimitação espacial e barreira física com o ambiente externo.

Contudo, depois da década de 80, discussões entorno da crise energética e o surgimento de novas tecnologias da Era Digital abrem caminho para novas proposições de fachada, formuladas a imagem de uma “membrana” seletiva, moderando e interagindo climática e energeticamente com o ambiente circunvizinho, com objetivo de produzir edificações com desempenho otimizado ambiental e energeticamente, reduzindo custos de operação e criando novas linguagens para a arquitetura.

A busca por uma produção de arquitetura melhor adaptada ao clima do lugar, sugere o desenvolvimento de materiais utilitários e funcionais, customizados a uma realidade climática específica. Neste trabalho cunhamos o termo “Futuro Vernacular” para representar uma prática de arquitetura alternativa, onde o arquiteto passa a ser um artesão digital na concepção e desenvolvimento de materiais adaptativos.

Neste intuito, tecnologias responsivas apresentam-se como estratégia promissora à concepção de fachadas dinâmicas e funcionais. O termo responsivo está fundamentado na teoria da cibernética que consiste na retroalimentação de um sistema (*feedback*); ou seja, na capacidade de um sistema *sentir-processar-agir* e se auto gerenciar. Aplicado a fachadas, implica

na concepção de superfícies com capacidade de sentir um estímulo ambiental, processar a informação e agir no controle e/ou proveito do agente climático.

Na contemporaneidade existem duas classes de fachadas responsivas: uma, constituída por sistemas de materiais inteligentes e, outra, por materiais inteligentes propriamente dito. Sistemas de materiais inteligentes são aqueles que utilizam dispositivos eletromecânicos (sensores, atuadores, controladores) acoplados a um componente. Por outro lado, materiais inteligentes são aqueles que apresentam comportamento responsivo atribuído as características presentes nas propriedades do material, em outras palavras, estes materiais não requerem da necessidade de introduzir dispositivos eletrônicos para responder a um estímulo.

Entretanto, o emprego do termo material “inteligente” utilizado na literatura apresenta-se indefinido. De forma geral, denomina-se material inteligente aqueles materiais com capacidade de resposta direta e previsível. Contudo, para que um material seja inteligente, precisa estar dotado da capacidade de apreender. Nesta investigação, sistemas de fachada responsivos não utilizam materiais com capacidade de aprendizado. Desta maneira, trata-se de sistemas automatizados, ou seja, sistemas que apresentaram as mesmas variáveis de resposta dinâmica.

## CAPITULO 2 – Sistemas Mecânicas as Superfícies Responsivas

*A Revolução Industrial inaugura um novo capítulo na produção da arquitetura na “era da máquina”. A indústria da construção expande os seus limites de mercado, produzindo em massa materiais padronizados que podem ser aplicados em qualquer contexto climático. Novas materialidades como o aço e o aperfeiçoamento na fabricação do vidro possibilitam o surgimento de uma nova tipologia de fachada: fachada cortina, tornando a fachada um elemento construtivo independente da estrutura do edifício. A exaltação do mundo moderno pela tecnologia leva a arquitetura a uma experiência tecnocrática e a mecanicista, onde as máquinas passam a proporcionar as condições “ideais” de conforto no ambiente interno construído, conseqüentemente minimizando o papel da fachada como moderador energético e regulador térmico. A aceitação e proliferação da fachada cortina como tipologia de envelopamento, a escolha de materiais padronizados aplicados independente do contexto climático, e a mecanização da arquitetura isolando o ambiente interno a imagem de uma capsula espacial, contribui para o aumento no consumo energético e agravamento do sistema climático global. A evolução científico-tecnológica e uma nova agenda ecológica da arquitetura, motiva arquitetos e pesquisadores na busca por novas proposições para a fachada com características dinâmicas e funcionais, com objetivo a reduzir o consumo de energia elétrica do edifício.*

### 2.1. Fachadas Cortina e Mecanização da Arquitetura

A denominada “Era do Aço”, no século 19 pode ser considerada um período relevante para o estudo de fachadas, especialmente para fachadas de edifícios em altura. A introdução do aço na construção civil permitiu a usinagem de perfis capazes de vencer grandes vãos, proporcionando estruturas mais leves, reduzindo custos e tempo de construção. Paralelamente a introdução do aço, veio a produção em larga escala do vidro<sup>15</sup>, trazendo ganhos qualitativos como

---

<sup>15</sup> *As novas possibilidades do vidro, cada vez mais testado e estudado abre um novo campo de possibilidades de uso para este material, se tornando o “centro das atenções” em muitos escritos do momento. O escritor visionário alemão Paul Karl Wikhelm Scheerbart (1863-1915) foi autor de novelas que podem ser descritas como de contra-ficção científica. O autor relata em certo modo a importância do vidro na arquitetura em *Glassrchitektur, 1914* (Arquitetura de cristal) Scheerbart narra o seguinte: “Pelo geral, vivemos em espaços fechados. Estes formam o meio no qual se desenvolve nossa cultura. Nossa cultura é, em grande medida, produto da nossa arquitetura. Se desejamos elevar nossa cultura a um nível superior, para o bem ou para o mal, estaremos obrigados a transformar nossa arquitetura, e isto só será possível se os espaços que habitamos lhes subtraímos seu caráter de lugar fechado. Isto é possível de alcançar com a introdução de uma arquitetura de cristal, que deixe que a luz do sol, a luz da lua e das estrelas não se filtre através de um*

melhoria no isolamento térmico e acústico, contribuíram para a proliferação e consolidação de um novo método de envelopamento, denominado de *Fachada-Cortina* ou “*pele de vidro*”<sup>16</sup>.

Esta nova tipologia de fachada -distintiva ao Estilo Internacional<sup>17</sup>- se caracteriza pela separação da superfície de envelopamento da estrutura do edifício, tornando a fachada um elemento independente. De acordo com Addington e Schodek (2005:3) a introdução deste método construtivo “suscitou numa transição na função que os materiais desempenhavam antes do século 19, passando, agora, a cumprir novas exigências de desempenho funcional”. Holger Strauß (2013:17) considera que a fachada-cortina deu “liberdade ao arquiteto para a escolha do material, o mesmo que não mais precisaria responder por funções utilitárias e adaptativas, tornando a fachada um elemento puramente formal e estético”. Na contemporaneidade, avanços em tecnologias *Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing - CAD/CAM* e o desenvolvimento de novas materialidades tem permitido aos arquitetos a possibilidade de criar fachadas com formas cada vez mais complexas. De certa maneira, esta passional busca por formas inusitadas, priorizando a expressão visual e estética tem vitimado o desempenho energético do edifício (OXMAN, 2010).

Por outro lado, aprimoramentos na eficiência de desempenho de equipamentos aquecimento, ventilação e ar-condicionado, levaram a fachada a perder sua função moderadora; aumentando o consumo de energia<sup>18</sup> elétrica para

---

*par de janelas, mas diretamente, através do maior número possível de paredes inteiramente de cristal policromado. O novo entorno que temos criado terá que trazer uma nova cultura”* (MUÑOZ, 2015).

<sup>16</sup> A denominação não técnica (coloquial) o que não significa que Fachadas Cortina sejam necessariamente de vidro, podendo ser utilizado outros materiais.

<sup>17</sup> O Estilo Internacional se caracteriza na criação da forma arquitetônica a partir da especificação de materiais padronizados e de propriedades homogêneas que podem ser aplicados em qualquer lugar, independente do contexto climático (ADDINGTON, 2005:3).

<sup>18</sup> Cidades são responsáveis pelo consumo de: 40% de toda a energia elétrica gerada no mundo, 16% da água doce, 25% das madeiras das florestas, 1/4 dos recursos não renováveis e por ser o maior emissor de gases tóxicos na atmosfera, sendo 70% de dióxido sulfúrico e 50% de CO<sub>2</sub>, além de produzir uma enorme quantidade de resíduos sólidos sem destino apropriado (BENYUS, 1997); (PNUMA-Programa do Meio Ambiente das Nações Unidas)

assegurar as condições “ideais” de conforto térmico no ambiente interno. Como consequência, edificações são responsáveis pela contribuição na emissão de um terço do total de gases de efeito estufa no planeta (SQUARZONI, 2014), afetando significativamente o aquecimento do sistema climático global. No entanto, se edifícios são vistos como parte do problema do problema climático (LOONEN, 2013), são, também, peça chave para minimizar este problema (KAMAL-CHAOUÏ; ROBERT, apud LÓPEZ et al., 2015). Atentos a este novo contexto, surgem nos anos oitenta as primeiras discussões sobre o papel ecológico da arquitetura, que vêm acompanhado do surgimento de avançadas ferramentas de auxílio digital (modelagem, análise e simulação) e de tecnologias de fabricação assistida por computador; permitindo aos arquitetos, pensar as envoltórias como superfícies dinâmicas com desempenho funcional, tendência recomendada pela Agência Internacional de Energia através do grupo de trabalho em conservação de energia em edificações (IEA-ECBCS, 2009), que sugere a aplicação e implementação de fachadas responsivas na arquitetura, como um passo necessário no consumo energético eficiente no ambiente construído.

## **2.2. Fachada de Controle Mecânico**

A introdução de fachadas funcionais com tecnologia de controle climático não é um conceito novo, tendo sido abordas desde os anos de 1920 (SHARAIDIN, 2014).

A discussão sobre tecnologias de controle climático em fachada está relacionada ao uso de mecanismos que determinam o desempenho de um sistema. Apesar dos sistemas mecânicos fazerem parte da engenharia mecânica desde a primeira metade do século 18, com a publicação dos dez volumes do *Theatrum Meachinarium* – A Teoria Geral das Máquinas, escrito pelo físico e matemático alemão Jacob Leupold. Na arquitetura, sistemas mecânicos apresenta interesse limitado, especialmente quando se referem a introdução de sistemas com movimento dinâmico em fachadas (MOLONEY, 2011).

Com o advento da Revolução Industrial veio a ideia do progresso tecnológico. O flerte com a tecnologia (NÓBREGA, 2006) se tornou símbolo e instrumento de

uma nova sociedade. Neste impulso tecnocrático a ideia da máquina como emblema de uma nova época, levaria a arquitetura dos anos trinta à novos princípios de projeto, de caráter eminentemente técnico, como forma de representar a essência da modernidade. “As novas tecnologias de construção em aço e vidro, e os inovadores sistemas de condicionamento artificial, deviam gerar uma arquitetura internacional” (CUECO, 2010).

Embebido no *Esprit Nouveau*<sup>19</sup> Le Corbusier manifestava seu interesse pela tecnologia fazendo uma analogia metafórica na sua sedução pelos automóveis como sinónimo da precisão que deveria estar presente na nova arquitetura. Numa conferência na cidade de Veneza, em 1934, intitulada “*La leçon de la gondole. L'art et les masses contemporaines*”<sup>20</sup>, o arquiteto franco-suíço demonstra a sua admiração, não somente pelo patrimônio arquitetônico da cidade, mas por um objeto em particular: a gôndola. Equiparando a gôndola a um automóvel em termos mecânicos, Le Corbusier dizia: “meu espanto inicial foi provocado não pelo romantismo da gôndola, mas sim pela estrutura impecável deste veículo, tão puramente racional. Uma beleza de origem inteiramente mecânica” (MOZZATO, 2015).

Em outra conferência, desta vez na cidade de Buenos Aires, em 1929, Le Corbusier profere sua fala com o título de “*Las técnicas son el fundamento del lirismo. Abren un nuevo siglo de arquitectura*”<sup>21</sup>. Nesta oportunidade Le Corbusier propõe os “*cinco pontos para uma nova arquitetura*”<sup>22</sup> correlacionada à aplicação de uma “técnica”, exata e precisa, alinhada ao espírito de perfeição

---

<sup>19</sup> “Existe um espírito novo: é um espírito de construção e de síntese guiado por uma concepção clara (racional)” Programa do *L'Esprit Nouveau*, 1920.

<sup>20</sup> “A lição da gôndola. A arte e as massas contemporâneas”

<sup>21</sup> “As técnicas são a base mesma do lirismo arquitetônico: abrem um novo ciclo da arquitetura”

<sup>22</sup> **Planta Livre:** através de uma estrutura independente permite a livre locação das paredes, já que estas não mais precisam exercer a função estrutural; **Fachada Livre:** resulta igualmente da independência da estrutura. Assim, a fachada pode ser projetada sem impedimentos; **Pilotis:** sistema de pilares que levam o prédio do chão, permitindo o trânsito por debaixo do mesmo; **Terraço Jardim:** “recupera” o solo ocupado pelo prédio; **Janelas em sequencia:** possibilitadas pela fachada livre, permitem uma relação visual direta com a paisagem. (CINCO PONTOS DA NOVA ARQUITETURA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2014. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Cinco\\_pontos\\_da\\_Nova\\_Arquitetura&oldid=38426876](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Cinco_pontos_da_Nova_Arquitetura&oldid=38426876)>. Acesso em: 17 mar. 2014.)

da máquina e da ciência. Além dos cinco pontos para uma nova arquitetura Le Corbusier apresenta os novos conceitos para controle térmico para uma edificação, denominado de *el mur neutralisant* (a parede neutralizante) e a *respiration exacte* (respiração exata) (Figura 7) (CUECO, 2010). Como justificativa à Parede Neutralizante, Le Corbusier manifestava que “cada país constrói suas casas em função do seu clima. Nesta época de interpenetração general, de técnicas científicas internacionais, eu proponho uma casa para todos os países e para todos os climas: A Casa com Respiração Exata” (MOZZATO, 2015).

O sistema de climatização denominado de Respiração Exata consistia numa das primeiras e mais ambiciosas estratégias de climatização artificial em uma edificação moderna, formado por um sistema completo de condicionamento mecânico de aquecimento, ventilação e ar condicionado (CUECO, 2010). A combinação simultânea do funcionamento de dois sistemas seria decisivo para sustentar o conceito da “Casa com Respiração Exata”: a introdução da *parede neutralizante*, proposto por Le Corbusier e Pierre Jeanneret<sup>23</sup> e o sistema de *aeração pontual* estudado e patenteado por Gustav Lyon (CUECO, 2010). Le Corbusier explica de maneira lógica o funcionamento deste sistema:

Instalo uma fábrica de ar exato” com todo o instrumental de filtros, secadores, humidificadores, ozonificadores e ventiladores que convertem o ar a exatos 18° para “nutrir o pulmão humano”. Análogo a um “sistema venoso” o ar circula, igual ao sangue pelas veias e artérias, no interior do edifício insuflando ar refrigerado e retirando o ar quente que é levado a uma central de tratamento para ser filtrado e resfriado a temperatura e umidade otimizada, circulando pelo edifício através dos aeradores pontuais distribuindo o ar uniformemente por todo o ambiente interno do edifício (MOZZATO, 2015).

De acordo com esta estratégia, o edifício seria aquecido e resfriado com ar temperado, insuflado por meio de uma cavidade formada no vão por uma *fenêtre en longueur*<sup>24</sup> de vidro duplo que envolveria toda a fachada (MOZZATO, 2015).

---

<sup>23</sup> Pierre Jeanneret (1896 - 1967) foi um arquiteto e designer suíço, primo e colaborador de Le Corbusier. (PIERRE JEANNERET. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Pierre\\_Jeanneret&oldid=48702179](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Pierre_Jeanneret&oldid=48702179)>. Acesso em: 1 mai. 2017).

<sup>24</sup> Le Corbusier propõe quatro técnicas para fechamento de um espaço: *le pan de pierre* (parede de alvenaria), *le mur mixte* (parede mixta), *la fenêtre en longueur* (parede com longas janelas horizontais) y *le pan de verre* (parede-cortina). (MUÑOZ, 2015).

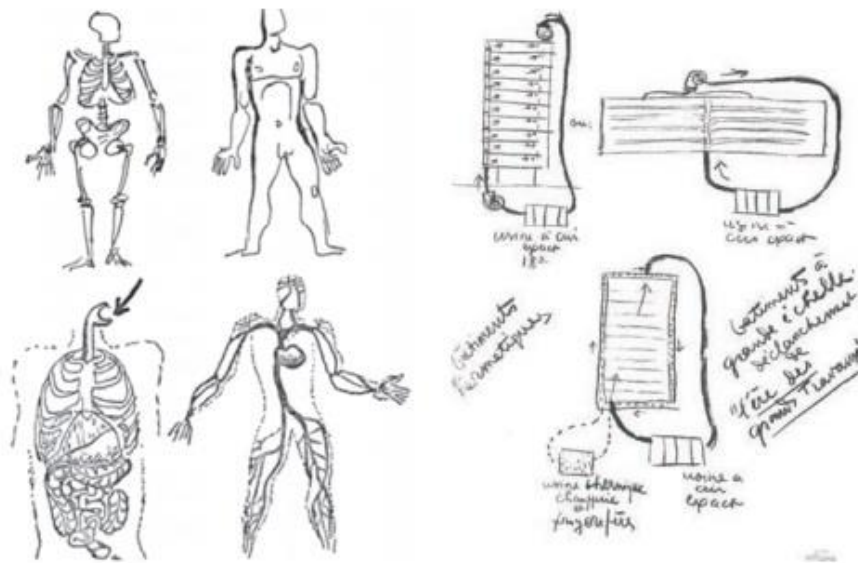


Fig. 7 Esquema de funcionamento da Parede Neutralizante  
 Ilustração de Le Corbusier mostrando o princípio de funcionamento da ventilação mecânica da Parede Neutralizante proposta para o Centrosoyuz de Moscou em 1928, inspirado no sistema circulatório do corpo humano.  
 Fonte: Fundação Le Corbusier.

O projeto do edifício Centrosoyuz de Moscou<sup>25</sup>, 1928-36, seria um dos projetos mais importantes no atelier de Le Corbusier (MOZZATO, 2015). Neste projeto Le Corbusier enfatizaria, pela primeira vez, seu pensamento para uma arquitetura ligada diretamente a novas técnicas construtivas e de sistemas mecânicos de controle climático, como forma de demonstrar os princípios modernistas de uma arquitetura proposta com base nas conquistas da ciência moderna. Três princípios de ordem técnico e funcional orientam o projeto: circulação fluída, fachada-cortina e condicionamento artificial interno implementando o conceito da Parede Neutralizante (MUÑOZ, 2015). Neste projeto, não se trata mais de uma *fenêtre en longueur*, nem sequer de uma *le pan de verre*; mas de uma fachada-cortina de vidro totalmente hermética com capacidades isotérmicas semelhantes a uma parede de alvenaria, que impossibilitaria a entrada de insetos, poeira, ruído, ou de qualquer interferência externa e, dotando a *casa de uma respiração*

<sup>25</sup> O projeto destinado a União Central de Cooperativas de Consumidores, foi resultado de um concurso e consistia de uma série de oficinas para 2.500 empregados, clube de trabalhadores, vestiários, biblioteca, restauração e teatro-auditório, a imagem dos “condensadores sociais” soviéticos onde se juntava trabalho e ócio (CUECO, 2010).



*exata* ou seja, controlando exatamente o que é necessário para respirar (MUÑOZ, 2015).

O conceito da *parede neutralizante* consistia numa interfase de condicionamento climático (térmico) mecânico e constante, insuflando ar quente no inverno e ar frio no verão. Se bem é certo que o projeto para o edifício Centrosoyuz correspondia a um momento adequado para experimentar em escala real soluções climáticas de caráter mecânico (MOZZATO, 2015); também é verdade que tanto Le Corbusier como Pierre Jeanneret não tinham conhecimento profundo do aspecto técnico e pouco se conhecia sobre o comportamento do sistema, sua eficiência e os custos de operação. Uma confiança “cega” numa indústria ainda amadora na construção de um sistema pouco testado provocou o insucesso<sup>26</sup> do sistema de *parede neutralizante* e, de certa maneira, a desilusão de Le Corbusier por sistemas mecânicos de climatização<sup>27</sup> (BARBER, 2012).

### 2.3. Fachada Cinética

O primeiro exemplo que se tem registro de uma proposição de sistema climático responsivo para envoltórias, foi apresentado por Buckminster Fuller no Pavilhão dos Estados Unidos para a Expo '67 (Figura 8). Neste projeto, Fuller tentou demonstrar a aplicação de um sistema cinético auto-regulável para controle da condição ambiental do espaço interno da sua cúpula geodésica. O *Pavilhão* foi a primeira tentativa em grande escala onde Fuller abordava o edifício como uma

---

<sup>26</sup> A *parede neutralizante* também foi proposta para o projeto *La Cité de Refuge, Paris, 1929*, tendo o mesmo resultado.

<sup>27</sup> Le Corbusier, após a mal sucedida experiência “tecnocrata” redireciona sua preocupação com as questões climáticas as técnicas tradicionais passivas, inventando o *brise-soleil* ou *quebra sol*, é um elemento de sombreamento resultante de uma reinterpretação de elementos de proteção solar quem tem origem na arquitetura vernacular brasileira (PASSANTI apud BARBER, 2012). LC propõe o uso do *brise soleil* no projeto da *Maison Locative, na Argélia em 1933*, que não chegou a ser construído (CUNHA, 2011); (BARBER, 2012). O *brise soleil*, conforme proposto por LC é posto em prática no ano de 1936, pelo escritório carioca MMMRoberto para o projeto do edifício da Associação Brasileira de Imprensa (ABI) no Rio de Janeiro. Num intervalo curto de tempo, Oscar Niemeyer, no projeto para a *Obra do Berço, também no Rio de Janeiro*, propõe o uso do *brise soleil*, porém, de forma mais sofisticada: introduzindo o *brise-soleil móvel*, que permitia a operação independente do *brise* em cada pavimento, possibilitando diferentes orientações para o controle da luz solar (BARBER, 2012).

“válvula ambiental” regulando, transmitindo energia, iluminação, ar, umidade e provendo uma barreira física entre o espaço interior e o exterior (SHARAIDIN, 2014).

O projeto baseava-se num sistema de sombreamento responsivo composto por 42 componentes integrados com sensores e atuadores que controlavam termostaticamente as condições ambientais no interior da estrutura (MASSEY, apud SHARAIDIN, 2014). Fuller desenvolveu um protótipo cinético que consistia em um componente retrátil para sombreamento, produzido em plástico e vidro fotocromático<sup>28</sup>, sobreposto a uma película metalizada com características de “silício poroso” o que permitiria que o recinto “respire” (MASSEY, apud SHARAIDIN, 2014). O componente cinético responsivo era formado por um painel hexagonal embebido de sensores de luz, com função de sombrear o ambiente interno, protegendo-o da exposição direta do sol.

Relatos sobre o Pavilhão descrevem que o sistema de sombreamento era controlado por computador; no entanto, o sombreamento parece responder automaticamente ao estímulo do sol, antes mesmo que governado por um circuito de retroalimentação computacional (SHARAIDIN, 2014). Análises técnicos conduzidos por George Eber, durante a Expo 67, descreve que o sistema de sombreamento do Pavilhão “consistia de para-sois triangulares acionados mecanicamente por 600 motores. Quando os raios do sol incidem sobre um ângulo pré-determinado ativam cada um dos motores. Quando o motor entra em ação traciona um conjunto de três pares de cabos (seis cabos por conjunto), que por sua vez são enrolados em um tipo de “carretilha” fixa no centro do hexágono (MASSEY, apud SHARAIDIN, 2014).

---

<sup>28</sup> *As lentes fotocromáticas são lentes que escurecem em exposição a tipos específicos de luz, geralmente radiação ultravioleta (UV). Fonte: LENTE FOTOCROMÁTICA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2015. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Lente\\_fotocrom%C3%A1tica&oldid=43341784](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Lente_fotocrom%C3%A1tica&oldid=43341784)>. Acesso em: 9 set. 2015.*

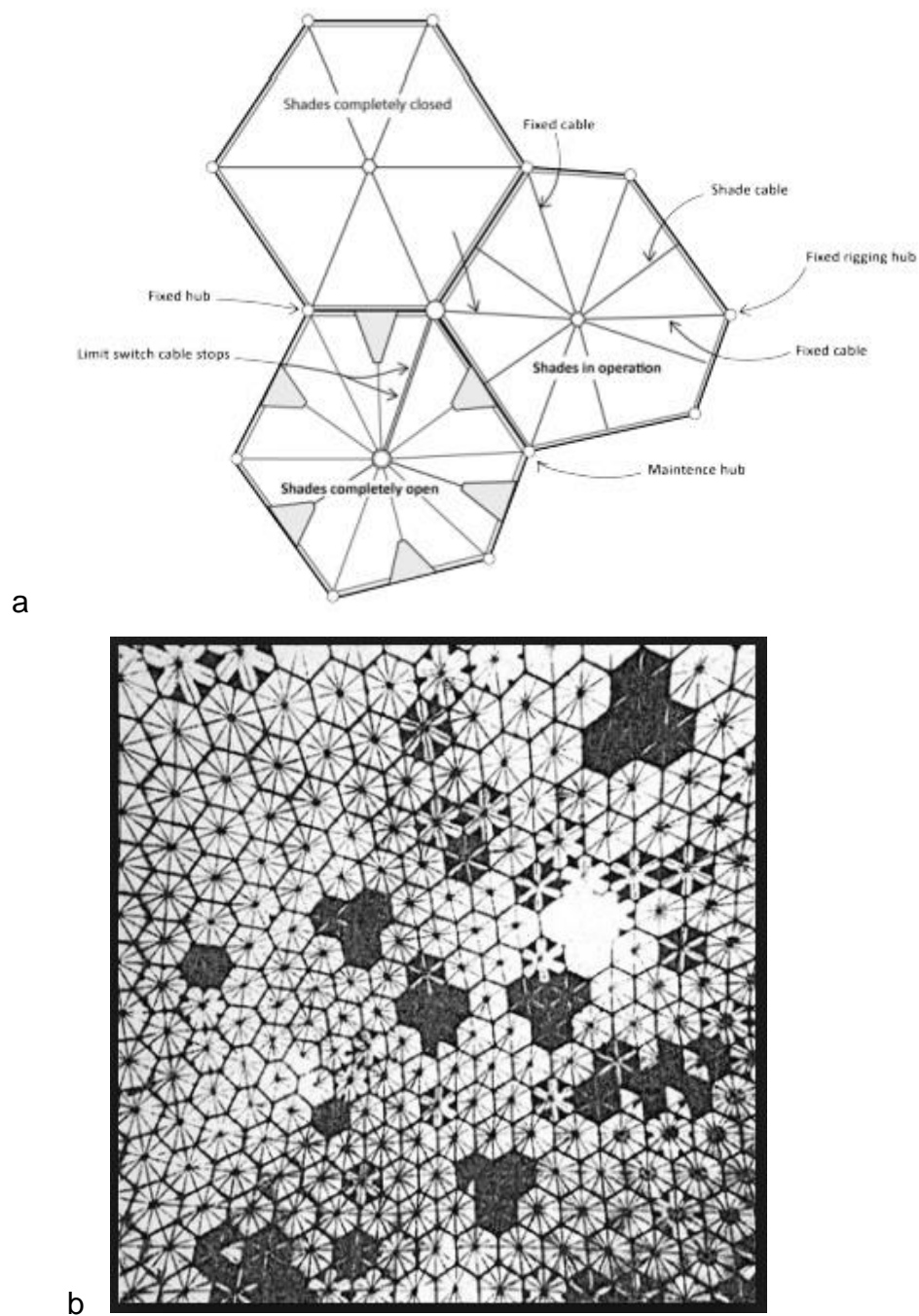
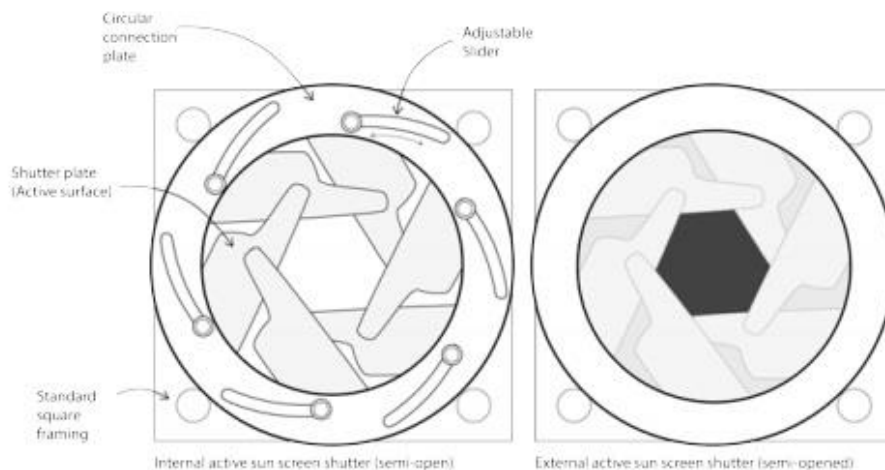


Fig. 8 Buckminster Fuller - Pavilhão EEUU, Expo 67  
 (a) Diagrama de funcionamento do fechamento hexagonal,  
 (b) fotografia da cúpula geodésica do Pavilhão dos Estados Unidos, 1967.  
 Fonte: Kamil Sharaidin, 2014; [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)

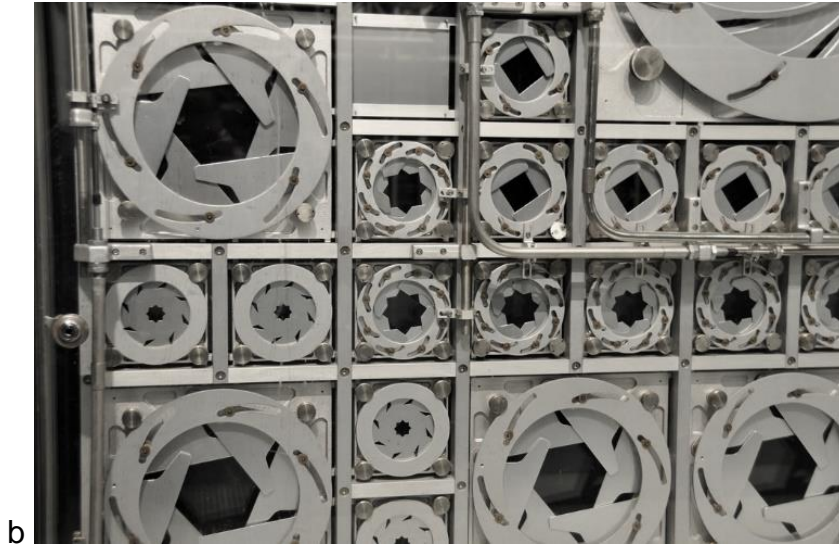
No entanto, a proposta visionária de Fuller estava à frente do que a tecnologia da época era capaz de proporcionar (SHARAIDIN, 2014), resultando no insucesso da aplicação do sistema responsivo de controle climático. Contudo, em uma década de avanços tecnológicos foi possível, pela primeira vez, ser implementado um sistema responsivo de fachada para controle da radiação

térmica e luminosa no ambiente interno construído. Tratava-se do edifício para o Instituto do Mundo Árabe de Paris, projeto do arquiteto Jean Nouvell.

Para este projeto Nouvell criou uma superfície responsiva para a fachada sul do edifício, onde incorpora características geométricas e operacionais similares às apresentadas por Fuller na Expo de 67. O sistema proposto por Nouvell consiste em um plano de fachada de 24x10 metros, formando uma malha reticulada de 240 painéis; onde cada retícula é constituída por um conjunto de 108 componentes cinéticos na forma de um diagrama de fechamento fotoelétrico, similar ao diafragma de uma câmera fotográfica, comando um total de 25,920 células (Figura 9). Neste sistema, cada célula fotoelétrica está conectada a sensores fotossensíveis que acionam um atuador, transformando a geometria do componente num movimento oscilatório de contração e expansão do diafragma, controlando os níveis de intensidade luminosa no interior do ambiente, criando as condições de fronteira ativa e de microclima modulador no ambiente interno (HENSEL, apud SHARAIDIN, 2014). De acordo com TRČKA, et al. (2013) a fachada do Instituto do Mundo Árabe é o exemplo mais emblemático de um “sistema de estrutura, proteção e conexão com o meio ambiente”.



a



*Fig. 9 Jean Nouvell - Instituto do Mundo Árabe, 1980*  
 (a) *Diagrama de funcionamento do diagrama fotovoltaico*  
 (b) *Detalhe de um trecho de um dos 240 painéis que compõem a fachada.*  
 Fonte: Kamil Sharaidin, 2014; <http://blog.kineticarchitecture.net>

No entanto, ainda os avanços tecnológicos, o nível de complexidade do mecanismo desenvolvido por Nouvell, em virtude dos constantes problemas mecânicos o sistema foi fruto de críticas, diante da ineficiência do sistema em responder de forma efetiva no controle das variações dos níveis de intensidade luminosa, obtendo-se por congelar a abertura do diafragma do sistema de fachada num único estado (MAZZOLENI, 2013; MOLONEY, 2011).

Sistemas cinéticos ajustáveis como o diagrama fotoelétrico proposto por Nouvell são, comumente usados como referência para alertar aos arquitetos sobre os cuidados e riscos na aplicação e escolha de componentes cinéticos responsivos para controle climático em fachadas, em virtude da quantidade considerável de mecanismos para a sua efetiva atuação (SHARADIN, 2014). O maior desafio no desenvolvimento de componentes ou materiais responsivos é a habilidade de manter o sistema funcionando dentro dos requisitos operacionais pré-estabelecidos. A relação de operabilidade do mecanismo demanda um estudo criterioso que deve considerar, entre outros requisitos, a vida útil do sistema (WEINER, 1948); ou seja, considerar o desgaste, consumo, economia, defasagem tecnológica e perda de desempenho.

Contudo, fachadas cinéticas para controle climático tem sido objeto cada vez maior de interesse e aplicação em edificações nas últimas duas décadas. A exemplo do edifício do Conselho de Investimento de Abu Dhabi – ADIC, conhecido como Torres Al Bahar, projeto do escritório AEDAS arquitetos<sup>29</sup>, inaugurado em 2012. Neste projeto foi adotado uma estrutura cinético responsiva com características geométricas e operacionais otimizadas em relação as propostas por Fuller na Expo 67 e por Nouvell no Instituto do Mundo Árabe.

Para o projeto das Torres Al Bahar foi implementado orientações leste e oeste das duas torres que formam o conjunto edificado, um sistema cinético com função de sombreamento para controle térmico-luminoso. Os componentes cinéticos estão constituídos de uma membrana de PTFE – Poli Tetra Fluor Etileno<sup>30</sup> com geometria hexagonal que remete a um muxarabi<sup>31</sup> dinâmico. O sistema cinético é composto por 1049 componentes cinéticos instalados em cada fachada, o que torna as Torres Al Bahar a maior fachada informatizada do mundo (SHARAIDIN, 2014). O sistema cinético está capacitado para responder de acordo com a orientação e trajetória do sol durante todo o ano. A ação de resposta do sistema é realizada através do movimento dobrável e desdobrável do muxarabie dinâmico, regulando a condição ambiental no interior do edifício. Os componentes cinéticos estão programados para alterar a sua geometria em

---

<sup>29</sup> Fruto de um concurso internacional realizado em 2007. [www.aedas.com](http://www.aedas.com). Fonte: *The Arup Journal* 2/2013. Disponível em: <http://publications.arup.com/>. Acesso em: 27/06/2017.

<sup>30</sup> PTFE é um plástico versátil. Oferece excelente combinação de propriedades químicas, elétricas, mecânicas, térmicas e antiaderentes. Possui inércia maior que qualquer outro material conhecido. Nenhum outro material conhecido adere a sua superfície, sendo necessário tratamento químico para a realização de colagem. Este material não sofre de fenômenos de envelhecimento nem mesmo em contato com o ar e outros produtos. Fonte Disponível em: [http://www.isolaplast.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=92&Itemid=144](http://www.isolaplast.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=92&Itemid=144). Acesso: 26/06/2017.

<sup>31</sup> *Mashrabiya* ou *Muxarabie*, segundo vários autores, é um elemento de controle climático vinculado à cultura árabe. Construtivamente é um anteparo formado por uma treliçada de madeira usado com objetivo de filtrar a luz natural, permitindo a visão da rua desde o interior do ambiente e preservando a privacidade das atividades internas (KLÜPPEL, 2009). PINTO apud KLÜPPEL (2009:254) afirma que a palavra *muxarabi* significa: “[...] o sitio das bebidas, local onde se punham as bilhas a fim de refrescar a água”. A posição das bilhas ou reservatório de água nas fachadas protegidas pelo anteparo de *muxarabi* proporcionava o aumento da umidade relativa do ar, contribuindo para a melhoria da sensação térmica no interior do ambiente (KLÜPPEL, 2009).

três momentos cinéticos: totalmente fechado, meio aberto e totalmente aberto (SHARADIN, 2014) (Figura 10).

Os componentes cinéticos estão agrupados em setores, podendo ser controlado individualmente, operando por um sistema de rastreamento solar que controla a sequência de abertura e fechamento de acordo com a posição do sol. O sistema pode ser alterado para controlar os componentes individualmente, a partir de uma central de controle. A central de controle está ligada a um sensor anemômetro posicionado na cobertura do edifício, cumprindo função preventiva, emitindo a “ordem” para a abertura total dos componentes caso a velocidade do vento exceder o limite de operação previsto. Um dispositivo semelhante utilizando sensores de radiação solar é usado para acionar a abertura dos componentes em condições prolongadas de céu encoberto (ARUP, 2013).

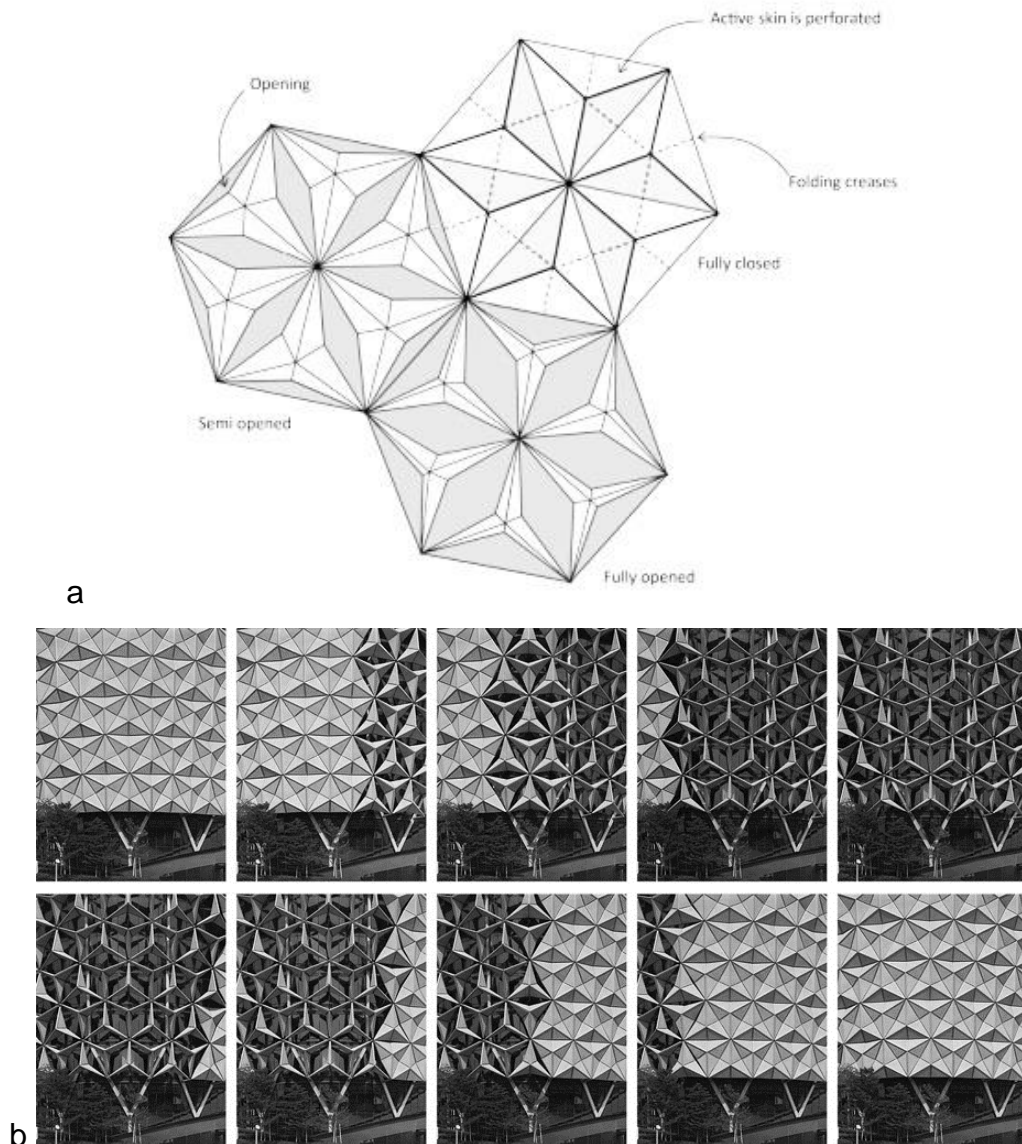
O mecanismo do atuador se enquadra no padrão de translação, utilizando como efetuator o pistão hidráulico que, ao expandir ou retrair produz geometrias de superfície aleatórias em resposta as condições climáticas locais (Figura 10b) (SHARADIN, 2014).

Apesar da utilização de avançada tecnologia à época (2012), a produção dos componentes cinéticos exigiu grande quantidade de dispositivos mecânicos para criar o padrão cinético desejado, resultando num componente (muxarabi) com peso total de 1,5 toneladas por unidade. De acordo com Arup Engenharia (2013), responsável pelo desenvolvimento técnico da superfície cinética, foram realizados análises e simulação computadorizada, seguida da confecção de protótipo em escala 1:1 para testes<sup>32</sup> de desempenho com objetivo a assegurar a eficiência mecânica e responsiva do sistema. Contudo, até o presente (2017)

---

<sup>32</sup> De acordo com Arup Engenharia, o principal desafio técnico foi desenvolver um dispositivo de sombreamento móvel não convencional que não só protegesse os edifícios da radiação solar e alta temperatura do ar externo, mas também que pudesse operar de forma confiável em um ambiente agressivo. Para isto, foram realizados uma série de testes de protótipo em escala de 1 a 1, totalmente funcional, incluindo testes de túnel de vento e testes acelerados em uma câmara climática. Foram simulados mais de 30,000 ciclos de abertura e fechamento em diferentes condições de temperatura, aplicando areia e água salgada nas juntas críticas, passo necessário para provar a vida útil dos atuadores, rolamentos e mecanismos. Fonte: The Arup Journal 2/2013. Disponível em: <http://publications.arup.com/>. Acesso em: 27/06/2017.

não existe informação com dados pós ocupação que confirme o desempenho do sistema para controle e redução de ganho térmico no edifício conforme projetado.





aprimoramento científico e tecnológico dedicado a concepção e fabricação de Superfícies Dinâmicas Funcionais de padrão cinético.

Embora a limitação na literatura de dados concretos de análise pós ocupação que validem o desempenho funcional dos sistemas cinéticos responsivos em operação em edificações mundo afora<sup>33</sup> (GOIA, PERINO, & SERRA, 2014). Nas últimas duas décadas tem sido possível testemunhar a utilização de tecnologias responsivas de padrão cinético em novas edificações; o que comprova a aceitação, cada vez maior, do uso de e desenvolvimento de mecanismos dinâmicos informatizados de modulação e controle do ambiente externo na arquitetura (ZELLNER, apud KOLAREVIC, 2000), conforme é possível verificar na Tabela 1.

Tabela 1. Fachadas Cinéticas Climático Responsivas

<b>Arquitetura</b>	<b>Ref.</b>	<b>País</b>	<b>Ano</b>
Embaixada dos Paises Nordicos em Berlin	06	Alemanha	1999
Forum Chriesbach - Eawag	08	Suiça	2006
Kiefer Technic	04	Austria	2007
Melbourne Institute of Technology	07	Austrália	2009
ThyssenKrupp escritório central	02	Alemanha	2010
KFW Westarkade	09	Alemanha	2010
Media-TIC	01	Espanha	2011
One Ocean	03	Coreia do Sul	2012
The Gardens by the Bay	05	Cingapura	2012
Syddansk Universitet	10	Dinamarca	2015

<sup>33</sup> No Brasil, ainda que esse seja pioneiro no desenvolvimento de anteparos passivos para controle da radiação e luz solar, a exemplo do cobogó e do brise soleil; não há registro de fachadas com tecnologias dinâmicas e responsivas aplicadas na arquitetura até o presente momento.

## 2.4. Fachada por Materiais Compósitos

Materiais compósitos podem ser considerados uma extensão lógica na trajetória dos materiais na arquitetura (ADDINGTON & SCHODEK, 2005).

Superfícies Dinâmicas Funcionais constituídas por materiais compósitos, seriam, de certa maneira, teorizadas pelo arquiteto Mike Davies, na década de oitenta<sup>34</sup> com a visionária proposta da “*polyvalent wall*” (*parede polivalente*). De acordo com Davies consistiria numa “membrana” que estaria em constante adaptação, alterando seu estado performático conforme as condições do entorno, formando um sistema altamente integrado. Na visão de Davies, a “*parede polivalente*” seria constituída por uma estrutura em sanduiche, composta por camadas funcionais, formando uma superfície multifuncional para fachada (Figura 11).

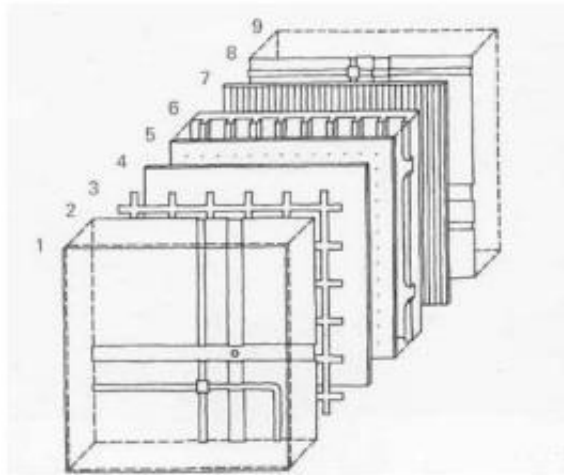


Fig. 11 Desenho Esquemático da Parede Polivalente - Mike Davies, 1980

Diagrama da Polyvalent Wall. Camadas conceituais:

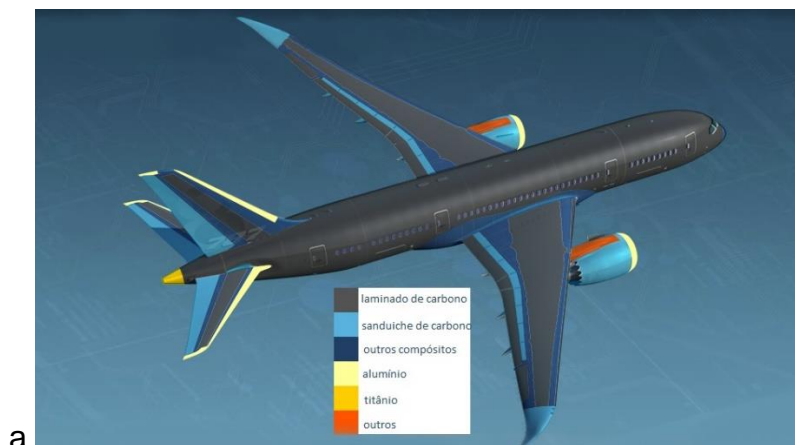
- (1) deposição de subtrato de sílica e camada climática;
- (2) sensor e lógica de controle externo;
- (3) malha fotoelétrica;
- (4) radiador térmico;
- (5) deposição eletroreflexiva;
- (6) camada de microporos para fluidos de gás;
- (7) deposição eletroreflexiva;
- (8) sensor e lógica de controle interno;
- (9) deposição de subtrato de sílica e camada interna.

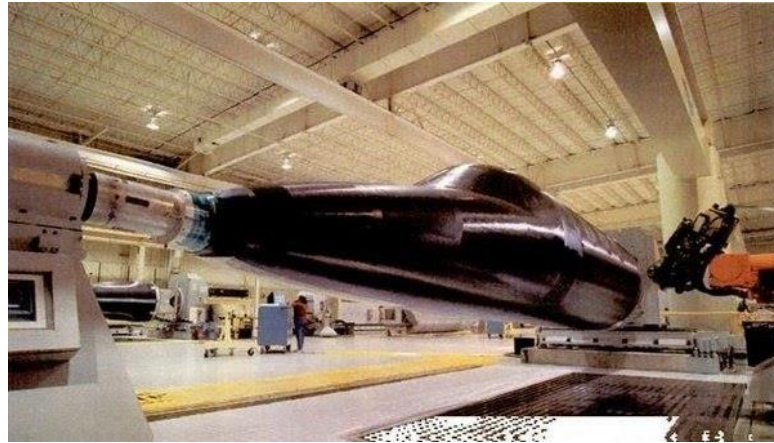
Fonte: (ATTMANN, 2012)

<sup>34</sup> Mike Davies, artigo publicado no RIBA Journal – Royal Institute of British Architecture, com o título “A wall for all seasons”.

Diferentemente das superfícies cinéticas que, de forma geral, se constituem numa segunda pele, ou seja um plano subjacente ao primeiro plano de vedação. Superfícies dinâmicas funcionais compostas por materiais compósitos formam a fachada propriamente dita.

Nas últimas duas décadas materiais compósitos têm ganhado destaque, e encontram-se em franca expansão. (ÅSTRÖM, apud ISAAC, 2005). Entre as áreas de consumidoras incluem as indústrias aeroespacial, marítima, de energia, infraestrutura, biomédica e esporte (artigos esportivos). A alta resistência e baixa densidade característica dos materiais compósitos os fazem altamente desejáveis na utilização de estruturas de aeronaves militares e civis. Materiais compósitos como carbono/epóxi e grafite/titânio, respondem por aproximadamente 50% do peso do Boeing 787 (Figura 12), incluindo a maioria da fuselagem e asas. Aparte a vantagens como durabilidade e redução de manutenção, materiais compósitos possibilitam inserção de sensores para monitoramento. O Airbus A380, maior aeronave civil do mundo, utiliza uma grande quantidade de materiais compósitos, incluindo laminação híbrida de vidro/epóxi/alumínio (GLARE) que combina as vantagens de metais e mitiga as desvantagens dos compósitos. As características de materiais compósitos com carbono/epóxi são altamente desejáveis também pela indústria da aviação militar, a exemplo do B-2 *bomber*. O avião Helios, utilizado pela NASA para pesquisas ambientais, fabricada com composição de fibras de carbono e Kevlar. A assas deste avião somam 75m e pesam somente 708Kg.





b

*Fig. 12 Material Compósito na Indústria Aérea  
 (a) Mapa de materiais no Boeing 787 “Dreamliner”. (b) Produção de aeronave utilizando material compósito de fibras de carbono através da técnica de fabricação por Deposição Automática das Fibras.  
 Fonte: comsol.com; quora.com.*

A arquitetura tem sido dominada pelos rigores da fabricação e produção em massa. Para Neri Oxman (2010):

As linhas de montagem (com o advento da Revolução Industrial) ditaram um mundo feito de peças, enquadrando a imaginação de arquitetos e construtores, e assumindo que as próprias peças são feitas de materiais únicos com propriedades homogêneas subsequentemente formadas em formas predefinidas (OXMAN, 2010).

Para Addignton & Schodek (2005), arquitetos tem tentado inserir materiais compósitos na prática de projeto, contudo, abordando o material de forma normativa, como um material convencional. No entanto, materiais compósitos representam uma ruptura radical em relação aos materiais convencionais utilizados na indústria da construção. Materiais compósitos são denominados “materiais especiais”, devido a apresentarem propriedades otimizadas e alto desempenho funcional para atender a demanda para o qual foi desenvolvido.

Com a Revolução Química no início do século 20 foi possível a sintetização de resinas, possibilitando a transformação do estado líquido para o sólido, abrindo caminho para a fabricação de materiais compósitos criados com finalidade específica. Ao longo deste processo, a arquitetura tem experimentado o uso de materiais compósitos convencionais em fachadas, estruturas e revestimentos. No Brasil, o exemplo mais emblemático no uso de compósitos a base de

polímeros é o Terminal Rodoviário da Luz, em São Paulo, inaugurado em 1961 e demolido em 2010 (Figura 13).



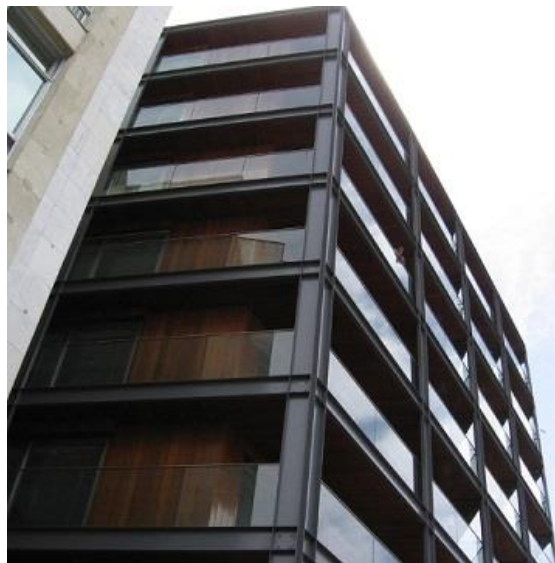
*Fig. 13 Material Compósito - Estação Rodoviária da Luz, São Pulo, 1961.  
Fonte: Vitruvius.com*

Neste projeto foi utilizado mais de 20mil m<sup>2</sup> de material compósito termoplástico rígido a base de polimetil-metacrilato colorido (acrílico colorido) para a envoltória. Em menor escala, o arquiteto e designer Gaetano Pesce utiliza de material compósito a base de resina flexível, moldada na forma de “escamas” para revestir a fachada da sua casa de praia no litoral da Bahia (Figura 14).



*Fig. 14 Material Compósito - Residência. Itacimirim, BA.  
Fonte: Pinterest.com*

Estruturalmente a fabricação de perfis compósitos por pultrusão<sup>35</sup> a base de fibra de vidro vem sendo largamente usada em plataformas petrolíferas. Na última década, o seu interesse na construção civil vem ganhando destaque, substituindo o aço em razão as suas características anticorrosiva, abrasiva e dielétrica, entre outras. Um exemplo do uso de compósitos estruturais é o Hotel Fasano Rio, no Rio de Janeiro, 2007 (Figura 15).



*Fig. 15 Material Compósito Estrutural. Hotel Fasano, Rio. 2007.  
Fonte: cogumelo.com.br*

Materiais compósitos, apesar do seu interesse e expansão na construção civil, ainda são pouco utilizados tanto no Brasil como no exterior; sendo, na maioria dos casos, utilizados em edificações de pequena e média escala.

## **2.5. Resumo do Capítulo**

O ideal tecnológico e a máquina como emblema de uma nova época inauguram no século 19, um novo e marcante capítulo na história da arquitetura e do urbanismo. A introdução do aço estrutural e a produção em larga escala do vidro

---

<sup>35</sup> Pultrusão é um processo de fabrico em contínuo de perfis constituídos por fibras e resinas termoendurecidas. O processo de fabricação é semelhante ao de extrusão, onde plástico ou metal é empurrado através de uma matriz. A diferença é que na pultrusão, o material é "puxado" através de um molde aquecido. Fonte: Fibermax. Disponível em: [www.fibermax.ind.br](http://www.fibermax.ind.br). Acessado em: 17 de jul. 2017.

possibilitaram o erguimento dos “arranha céus”, imprimindo uma nova linguagem na paisagem das metrópoles e suscitando na criação de uma nova tipologia de fachada: as fachada-cortina, caracterizadas por ser um elemento construtivo independente da estrutura do edifício.

O impulso tecnocrático levou à padronização e mecanização da arquitetura. Fachadas viram diminuída sua função como mediadora climática, sendo substituídos por equipamentos mecânicos de aquecimento, ventilação e ar-condicionado. Ainda no início do século 20, Le Corbusier propusera um sistema de climatização denominado: Parede Neutralizante. Este sistema consistia numa fachada-cortina formada por uma dupla pele de vidro totalmente hermética, a cavidade entre os planos funcionaria como um duto de climatização artificial permanente. Inspirado no sistema vascular humano, a tecnologia proposta por Le Corbusier seria capaz de proporcionar as condições climáticas “ideais” e o controle ambiental necessário para o usuário. Contudo, a aposta cega numa tecnologia pouco experimentada e o pouco conhecimento sobre o sistema proposto e consequentes custos operacionais, levaram ao insucesso do sistema proposto. Somente na segunda metade do século 20 a arquitetura voltaria a experimentar novas proposições usando tecnologias ativas para fachadas; entretanto, com objetivo inverso ao proposto por Le Corbusier. Enquanto Le Corbusier propunha um sistema exclusivo de climatização artificial negando o ambiente externo, proposições empregando tecnologias dinâmicas intencionavam controlar fatores climáticos, interagindo com o ambiente externo.

Buckminster Fuller no ano de 1967 abriria o caminho para a experimentação e aprimoramentos tecnológicos em direção ao desenvolvimento de tecnologias cinéticas e responsivas para controle das variáveis e mudanças do ambiente. Na contemporaneidade é possível testemunhar exemplos de edificações que implantaram em fachadas tecnologias dinâmicas funcionais utilizando diferentes padrões cinéticos e materiais com intuito de otimizar o desempenho ambiental e energético do edifício.

A busca por soluções técnicas mais eficientes energética e ambientalmente tem encontrado amparo cada vez maior por parte da academia e da indústria da construção. Avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novas materialidades com propriedades responsivas abrem caminho para novas possibilidades na

concepção de fachadas adaptativas. Nesta diretriz, materiais compósitos inteligentes se apresentam como um material com grande potencial para a arquitetura, podendo ser considerado uma extensão lógica dos materiais convencionais.

## **2.6. Resultado do Capítulo**

O impulso tecnocrático nas primeiras décadas do século 20 introduziram os sistemas mecânicos de climatização artificial no ambiente construído. Passados quase cem anos, a produção de arquitetura contemporânea continua criando edifícios condicionados exclusivamente por equipamentos mecânicos. Ainda dos aprimoramentos tecnológicos destes equipamentos em relação ao desempenho energético. Edifícios condicionados exclusivamente por sistemas mecânicos consomem mais energia elétrica, apresentam maior custo operacional e criam ambientes mantidos com ar viciado.

A busca por estratégias para a criação de uma arquitetura que reduza o uso de equipamentos mecânicos de climatização encontra nas tecnologias responsivas dinâmicas uma alternativa para este modelo. Superfícies dinâmicas funcionais de padrão cinético, tem a capacidade de interagir com o ambiente externo modulando, por exemplo a carga térmica e luminosa na fachada do edifício, conseqüentemente adaptando melhor a edificação as variáveis e mudanças do ambiente.

Não entanto, tecnologias cinéticas aplicadas a fachadas podem apresentar risco de funcionamento provocado por desgaste mecânico ou problemas de programação de dados. As primeiras experiências na introdução de tecnologias cinéticas para controle climático não foram bem sucedidas. Nas últimas duas décadas tem sido possível testemunhar o surgimento de novos edifícios que optaram pelo uso de fachadas dinâmicas de padrão cinético. Entretanto não existem dados suficientes disponíveis na literatura descrevendo o desempenho mecânico e operacional da fachada cinética nestes edifícios. Entende-se que um projeto de fachada cinética deverá levar em consideração, além dos fatores



técnicos relacionados a construção da fachada em si, a vida útil do sistema e a defasagem tecnológica.

Por outro lado, os materiais compósitos surgem como uma alternativa promissora para a arquitetura. Nos últimos anos vem aumentando a quantidade de produtos fabricados a partir de compósitos; de certa maneira, tornando-se substitutos dos materiais convencionais. Contudo, acredita-se que um dos maiores potenciais dos materiais compósitos é a facilidade de customização de componentes para fachadas. Neste sentido, considera-se importante a familiarização do arquiteto com os materiais que compõem os compósitos, assim como os métodos de fabricação, de forma a explorar o potencial dos compósitos para soluções adaptativas climaticamente.

## CAPITULO 3 - Superfícies Dinâmicas Funcionais Cinéticas

*Superfícies Dinâmicas Funcionais de padrão cinético podem ser entendidos como a extensão dos sistemas automatizados de controle predial. De fato, trata-se de um sistema complementar e integrado a outros sistemas mecânicos do edifício que, em conjunto, operam sinergicamente para otimizar a eficiência e consumo energético dos sistemas mecânicos. SDF's com padrão cinético se caracterizam por ser um sistema subjacente a superfície de envelopamento, funcionando com um anteparo responsivo. Este capítulo apresenta os princípios de uma SDF com padrão cinético como objetivo de introduzir a lógica operacional e fundamentos de operação mecânica.*

Superfícies Dinâmicas Funcionais Cinéticas representam, na contemporaneidade, a tipologia de envoltória responsiva de maior aplicação na arquitetura. A sua aplicação, na maioria das vezes, cumpre função responsiva de sombreamento, com objetivo ao controle térmico-luminoso no ambiente interno.

SDF's cinéticas são resultado de um processo de investigação científico tecnológico que encontra respaldo no Manifesto Realista de Naum Gabo<sup>36</sup>, de 1920, considerado o início da arte cinética. O Manifesto Realista proclamava um novo elemento nas artes plásticas: “o ritmo cinético”, como uma forma essencial de nossa percepção do tempo real (MOLONEY, 2011).

A arte cinética, embebida pela perfeição estrutural do maquinismo industrial e no interesse tecnológico advindo da Revolução Industrial; introduz a dimensão de temporalidade na arte, libertando a escultura da sua condição estática (MENEZES, 2011) e abrindo as portas à criação de obras com movimento e interatividade com o ambiente e o espectador. A “Era do Servomotor<sup>37</sup>”,

---

<sup>36</sup> Naum Gabo (1890-1977) escultor russo que se destacou no movimento do construtivismo russo e na arte cinética.

<sup>37</sup> Servomotor é uma máquina, eletromecânica, que apresenta movimento proporcional a um comando, como dispositivos de malha fechada, ou seja: recebem um sinal de controle; que verifica a posição atual para controlar o seu movimento indo para a posição desejada com velocidade monitorada externamente sob feedback de um dispositivo controlador. Fonte: SERVOMOTOR. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre.

conforme denominada por Norbert Weiner (1948), não só iria influenciar o mundo das artes, como também a produção da arquitetura moderna.

As teorias propostas por Le Corbusier para a criação de uma nova arquitetura, inspirada no progresso tecnológico e a racionalidade científica da época, irá introduzir a máquina como princípio de projeto no controle da condição térmica no interior do edifício; a exemplo das Paredes Neutralizantes (Capítulo 2). Operacionalmente, tecnologias eletromecânicas de condicionamento climático artificial, com o proposto por Le Corbusier para os edifícios Centrosoyuz de Moscou e La Cité de Refuge de Paris e, de certa maneira, até pouco tempo utilizada na arquitetura, se caracterizam pela utilização de motores de comando contínuo, ou seja, controlados mecanicamente por intervenção humana. Henriques (2015) descreve uma SDF de padrão cinético como um sistema que gera sistemas. Notadamente Henriques toma como base a teoria da *cibernética*, que utiliza como conceito geral o princípio da retroalimentação sistêmica (*feedback*).

### 3.1. Cibernética

A cibernética tem origem na auto regulação de um sistema, quando um dispositivo intervém num processo para prover uma retroalimentação corretiva (MOLONEY, 2011). Um exemplo mecânico da cibernética é a *boia de nível* que mantém o nível d' água sempre no mesmo estado. A boia de nível foi inventada em Alexandria, aproximadamente 270 AC, e ilustra bem o princípio central de retroalimentação. Quando o nível da água baixa, a boia de nível abre uma válvula para entrada de água, provendo de uma retroalimentação ao sistema, que é fechando (a válvula) quando o nível máximo de água é alcançado (MOLONEY, 2011).

O termo cibernética deriva do grego *kybernetes*, que significa “o que regula o movimento”, “timoneiro”, “governador”. O conceito central da cibernética é o de retroalimentação sistêmica (*feedback*) acoplado na interação entre o mecanismo e seu ambiente (MENEZES, 2006; MATARIC, 2014). Instrumentalmente consiste num dispositivo capaz de atuar como um “cérebro”, ou seja com habilidade de “sentir”, “pensar” e “agir”. A definição moderna da cibernética é fruto do estudo da teoria do controle mecânico, um ramo da engenharia mecânica voltado para a concepção, construção e controle de máquinas (MATRIAC, 2014). Norbert Weiner, pesquisador do Massachusetts Institute of Technology aparece como pioneiro nesta área, interessado em aplicar os princípios da teoria do controle para entender melhor não só os sistemas artificiais, mas também os sistemas biológicos. No final dos anos trinta, os proponentes<sup>38</sup> da cibernética estudaram os sistemas biológicos desde o nível neuronal (das células nervosas) até o nível comportamental, para em seguida tentar implantar princípios similares em robôs simples, a exemplo dos robôs-tartaruga construídos por Grey Walter, durante a década de 1940 (Figura 16). Os robôs tartaruga de Grey eram constituídos de:

Célula fotoelétrica, sensor de colisão, bateria recarregável, três motores –um pra cada roda, três rodas, um circuito eletrônico analógico (processa sinais contínuos no tempo e em amplitude) com dois tubos de vácuo que servem de “cérebro” e conectam os dois sensores às rodas. A partir desses componentes simples Grey incrementou sua máquina com os seguintes comportamentos: procurar a luz, ir me direção a luz, afastar-se da luz, desviar para evitar obstáculos, recarregar a bateria (MATRIAC, 2014:28).

Desta maneira, a cibernética tinha como propósito o estudo dos processos de comunicação e controle nos sistemas biológicos e artificiais, combinando teorias e conceitos da biologia com os da engenharia, com o objetivo de encontrar propriedades e princípios comuns em animais e máquinas; o que, de certa maneira, significa denominar de máquinas biomiméticas, ou seja, máquinas que imitam os sistemas biológicos (MATARIC, 2014).

---

<sup>38</sup> O conceito adotado foi construído por um grupo interdisciplinar de cientistas. Entre os colaboradores com as pesquisas de Norbert Wiener estão psicólogos Prof. Klüver, o Dr. Kurt Lewin e o Dr. Ericsson; o sociólogo Dr. Scheirla; os antropólogos Dr. Bateson e Dra. Margaret Mead; o economista Dr. Morgenstern; o filósofo Dr. F.C.S. Northrup e os neurofisiologistas Dr. Bonin e Dr. Lloyd (WEINER, apud MENEZES, 2006:21)

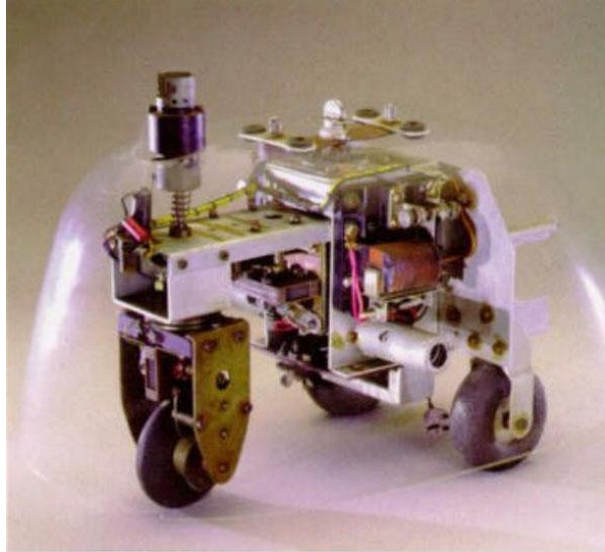


Fig. 16 Robô Tartaruga de Grey, 1940

Fonte: <http://web.csulb.edu/~wmartinz/rssc/content/w-grey-walter-and-his-turtle-robots.html>

Segundo Hayles (apud MOLONEY, 2011) a ideia central da cibernética é: em primeira ordem, o de homeostase, definida como a “habilidade de um organismo de se manter em estado de prontidão”. Em segunda ordem, se distingue pela adição do princípio de reflexibilidade, baseado na ideia de que o dispositivo de retroalimentação não é neural, mas motivado por “estímulos” que condicionam a retroalimentação do sistema. E, uma terceira ordem que estende o conceito de reflexibilidade para auto organização do sistema, ou capacidade de aprendizado do sistema.

### 3.2. Arquitetura Cinética

A cinética é conhecida como a arte do movimento. Entretanto existem casos em que obras de ilusão de ótica são consideradas obras cinéticas. A ilusão de movimento pode ser aplicada para algumas fachadas. De acordo com Moloney (2011) na prática e teoria da arquitetura o “movimento” em edificações tem sido tratado em termos de: transformação por meio da ocupação (Ex.: abertura de portas e janelas); sensação de movimento por efeito óptico em situações de mudança de luz ou presença de umidade; por textura de materiais ou efeitos da sua decadência; pela representação de movimento através da geometria da superfície, a exemplo do Edifício Dear Ginza (Figura17)



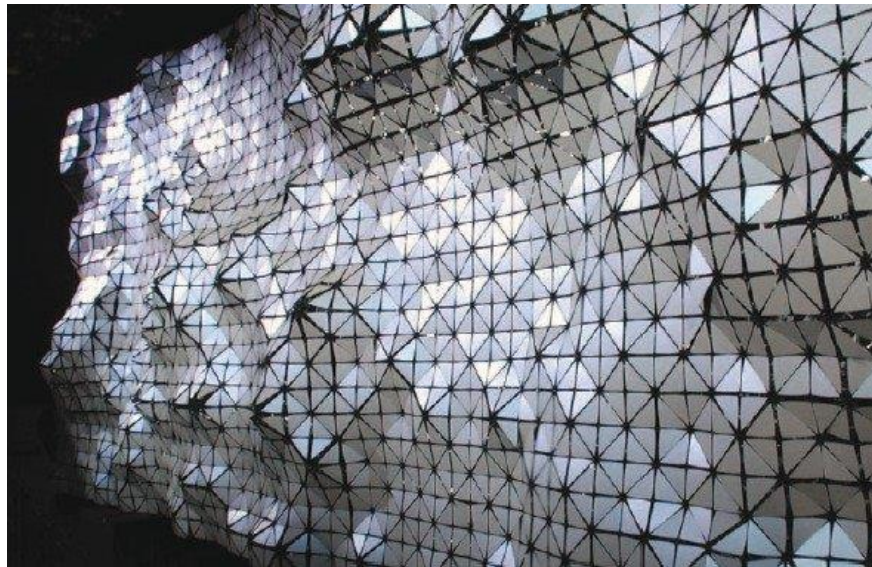
*Fig. 17 Movimento da fachada por ilusão de ótica  
Arquitetura de Amano Design Office, 2013.  
Fonte: [www.archdaily.com.br](http://www.archdaily.com.br)*

A aplicação da cinética na arquitetura é bastante abrangente. No intuito de organizar as diferentes abordagens da sua aplicação, dividimos em três categorias: (1) Superfícies Cinéticas Midiáticas, (2) Estruturas Cinéticas, e (3) Superfícies Dinâmicas Cinéticas, este último objeto de estudo do nosso trabalho.

### **3.2.1. Superfícies cinéticas midiáticas**

A sua aplicação, na maioria dos casos, tem por finalidade a instalação de painéis midiáticos informatizados ou trabalhos de arte cinético como esculturas em três dimensões (MOLONEY, 2011), a exemplo da icônica superfície Aegis Hyposurface (Figura 18), desenvolvida por dECOi architects inicialmente destinada a ser instalada num local específico, resultou na criação de um protótipo medindo dez metros de comprimento por três de altura, capaz de produzir formas abstratas ou figurativas com resolução e curvatura limitada a dimensão dos triângulos metálicos que formam a malha de superfície. Para esta superfície de arte cinético foi utilizando um sistema de pistões mecânicos informatizados extremamente sensíveis como efetadores para a criação da

forma desejada. Painéis informatizados, a exemplo da fachada Green-Pix (Figura 19), desenhada por Simone Giostra & Partners arquitetos para o complexo de entretenimento Xicui em Pequim, China; consiste de uma fachada-cortina de vidro acoplada de células fotovoltaicas que coletam energia solar durante o dia para iluminar midiaticamente a superfície a noite.



*Fig. 18 Superfície Cinética midiática - Painel artístico  
Aegis Hyposurface, 2001. Mark Goulthorpe e dECOi architecture.  
Fonte: [www.hyposurface.org](http://www.hyposurface.org)*

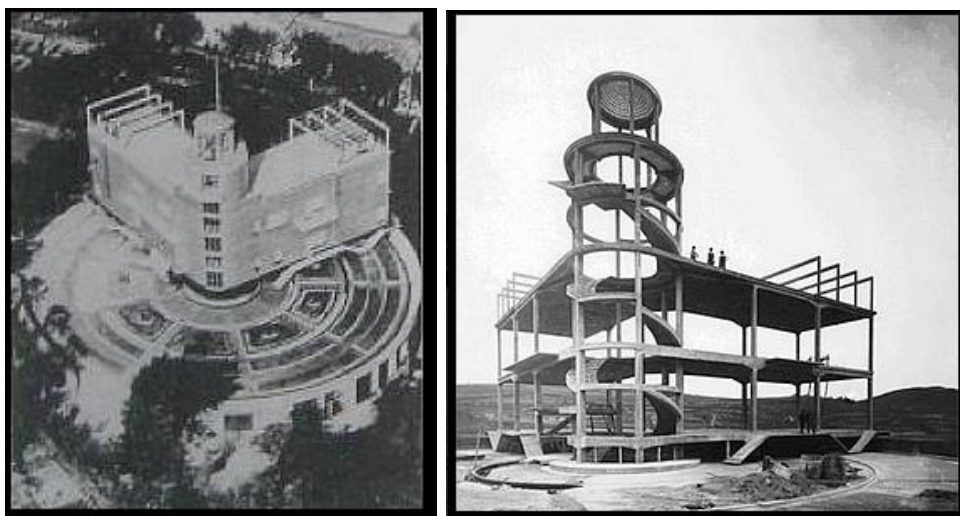


*Fig. 19 Superfície midiática - Painel mídia  
Green-Pix, The Zero Energy Media Wall, 2008. Simone Giostra & Partners e ARUP.  
Fonte: [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)*

### 3.2.2. Estruturas Cinéticas

Estruturas Cinéticas, segundo taxonomia de Fox e Kemp (apud MOLONEY, 2011) podem ser classificadas em: estruturas cinéticas incorporadas; estruturas relocáveis ou transferíveis; e, configurações cinéticas dinâmicas.

Estruturas cinéticas incorporadas, tratam do movimento cinético no sentido estrutural do edifício, ou seja, de oscilações pendulares provocadas pelo vento ou movimentação da estrutura do edifício provocada por forças da natureza, como abalos e tremores sísmicos. Estruturas relocáveis ou transferíveis diz respeito a condição de transferência ou relocação física de uma obra construída, a exemplo de casas transportáveis. Configurações cinéticas dinâmicas trata da movimentação de grandes vãos. Os exemplos clássicos são coberturas retrateis de estádios e ginásios de esportes, hangares, etc. Configurações Cinéticas Dinâmicas operam, usualmente, no movimento de translação ou rotação de estruturas monolíticas (MOLONEY, 2011). Villa Girasolle, em Marcellise, Itália (Figura 20), projetada pelo engenheiro Angelo Invernizzi, em 1935, é uma obra prima de configuração cinética dinâmica. A casa, apoiada sobre três trilhos circulares de 44m de diâmetro pode girar a 360 graus, movimentada por motor a diesel. A estrutura giratória tem como eixo uma torre de 42 metros de altura, que funciona como uma “dobradiça”, de onde é fixado o mecanismo de rotação.



*Fig. 20 Estrutura Cinética. Villa Girasolle, 1935*  
*Fonte: blog.kineticarchitecture.net*



No Brasil, o exemplo mais emblemático da aplicação de uma configuração cinética dinâmica é o Museu do Amanhã, no Rio de Janeiro, projeto do arquiteto Santiago Calatrava. Neste projeto a cobertura metálica se movimenta, abrindo e fechando, na busca do máximo aproveitamento da luz natural. Em arquiteturas de escala menor, configurações cinéticas dinâmicas são aplicáveis geralmente, como painéis retráteis, para a criação de um espaço físico contínuo ou para alterar a espacialidade de um ambiente. Numa perspectiva mais ambiciosa e visionária, o trabalho do grupo Hyperbody<sup>39</sup>, investiga estruturas cinéticas responsivas baseada em sistemas pneumáticos. Denominadas de “estruturas programáveis proativas”, o objetivo do grupo é investigar arquiteturas como máquinas com capacidade de transformação física-espacial em tempo real. Um exemplo é o protótipo do projeto Músculo (Figura 21), que consiste numa arquitetura tensionada ativada por uma estrutura pneumática.



*Fig. 21. Estrutura Cinética Pneumática  
NSA Muscle, 2003. Protótipo Pneumático.  
Fonte: [www.hyperbody.nl](http://www.hyperbody.nl)*

### **3.3. Superfícies Dinâmicas Cinéticas**

Na contemporaneidade os avanços tecnológicos e a facilidade na aquisição de dispositivos eletro mecânicos como sensores e atuadores, possibilitam a criação

---

<sup>39</sup> Laboratório de pesquisa em Estruturas Cinéticas da Universidade Tecnológica de Delft, Holanda.

de mecanismos responsivos com padrões cinéticos, habilitados a responder a estímulos ambientais. No entanto, a adoção de padrões cinéticos ambientalmente responsivos, requer não somente a implementação de tecnologia, mas principalmente o desenvolvimento de processos efetivos para conquistar o objetivo desejado (WEINER, 1948). Em outras palavras, é fundamental para o desenvolvimento de um projeto bem estruturado assegurar o efetivo funcionamento da superfície cinética.

Na prática existe uma demanda por ferramentas e instrumentos que ofereçam o suporte necessário; principalmente nas etapas iniciais do processo de concepção de um sistema cinético para fachada (ADDINGTON, 2005; LOONEN, 2010; MOLONEY, 2011). Por exemplo, ferramentas de simulação integrada servem para assistir os arquitetos na identificação e avaliação do desempenho da superfície. Não entanto, um dos obstáculos é que as ferramentas de simulação digital disponíveis são, preferencialmente, criadas para avaliar elementos estáticos do edifício (SHARAIDIN, 2014). Ao contrário de uma fachada estática, um projeto de superfície dinâmica com padrão cinético responsivo lida com mudanças constantes do ambiente circunvizinho e envolve uma significativa quantidade de variáveis e considerações sobre a melhor escolha do padrão cinético e dos componentes eletro mecânicos mais apropriados para alcançar seu objetivo.

O ato de “lidar” com variações e mudanças do ambiente requer uma lógica de funcionamento amparado nas teorias da cibernética, ou seja, a integração entre o computador e o mundo físico, informando e regulando o sistema para seu posicionamento otimizado.

Entretanto é oportuno ressaltar que uma superfície dinâmica com padrão cinético, para apresentar uma efetiva contribuição na otimização de desempenho predial, seja no consumo de energia elétrica ou outros atributos; precisa estar integrado a outros sistemas do edifício, especificamente, aqueles sistemas diretamente relacionados com a função responsiva a que a superfície está respondendo. Por exemplo, uma superfície dinâmica com padrão cinético que desempenha a função responsiva de sombrear um plano de fachada para controlar a incidência da radiação termo luminosa, deverá operar integrado ao

sistema de ar condicionado e iluminação artificial do edifício, de forma que o desempenho do sistema cinético da superfície regule a necessidade de trabalho do sistema de ar-condicionado e iluminação. Por tanto, a comunicação entre o sistema da superfície e os sistemas de condicionamento permitem que os sistemas operem de forma mais produtiva e eficiente. Assim, SDF's podem ser entendidas como tecnologia complementar, e não absoluta, na função de mediação para otimização de desempenho operacional e redução de custos do edifício.

Fachadas cinéticas são sistemas com mecanismos complexos, por tanto, a concepção de um sistema responsivo cinético representa um “processo” antes do que um “artefato” (MOLONEY, 2011). “Processos” podem ser entendidos como a experimentação e teste de diferentes componentes na busca pela melhor adequação ao padrão cinético responsivo para o ambiente ao qual o sistema será colocado em operação (SHARADIN, 2014). Contrário ao desenvolvimento de um “artefato” cinético para, somente depois encontrar a melhor solução que adequa a ele.

Os processos para o desenvolvimento de superfícies cinéticas responsivas incluem: mecanismos cinéticos, comportamento do material e o próprio padrão cinético.

Superfícies dinâmicas funcionais cinéticas envolvem padrões cinéticos que respondem os estímulos do ambiente, quer sejam extrínsecos ou intrínsecos, e que irão se manifestar dinamicamente através da transformação geométrica dos componentes de fachada (BEESLEY, 2006; MOLONEY, 2011). O desenho do padrão cinético irá afetar a forma como a fachada responsiva será projetada, ou, em última instância, afetará o seu desempenho. Neste sentido, a necessidade de entender os “caminhos e meios” cinéticos para ser aplicados em superfícies responsivas é de fundamental importância (SHARADIN, 2014). O conhecimento, associado ao projeto de superfícies cinéticas é um trabalho que envolve não apenas a área da arquitetura, mas disciplinas de conhecimento complementar como engenharia mecânica, eletrônica e ciências da computação.

Ao identificar a oportunidade para aplicação de superfícies dinâmicas cinéticas, arquitetos precisam, então, se envolver com os elementos para o

desenvolvimento da superfície que envolve: modelagem de comportamento e simulações; padrões cinéticos; o desenho do dispositivo de entrada (input) e sistema de controle; componentes eletro mecânicos; e, os métodos construtivos, tecnologias e materialidades do sistema (LOONEN et. al, 2013). Entender o mecanismo de resposta de uma superfície cinética permite prever o potencial cinético do sistema, alcançando um grau maior entre o desenho pretendido e o resultado construído (SHARADIN, 2014).

Desta maneira, faremos uma introdução dos três principais elementos necessários a criação de uma SDF com padrão cinético, começando pelo estudo dos (1) padrões cinéticos mais comuns; (2) estudo dos componentes eletrônicos e mecânicos e, (3) dispositivos de entrada e controle cinético.

### **3.3.1. Padrões Cinéticos**

Num projeto estático, a geométrica da fachada é resultado de um método de projeto onde o objetivo final é a definição da forma volumétrica para, depois de decidida, proceder ao congelamento da volumetria ou forma da fachada (MOLONEY, 2011). Porém, quando tratamos de superfícies dinâmicas cinéticas não existe um momento singular de tempo, ou seja, o resultado do projeto está em constante fluxo, alterando o estado dos padrões geométricos de acordo com as variáveis e mudanças do ambiente.

Em termos espaciais, Moloney (2011:7) define os padrões cinéticos pelo movimento de quatro transformações geométricas básicas: translação, rotação, expansão e por deformação de material.

O entendimento de como o sistema mecânico da fachada influencia na escolha do material é determinado pelo padrão cinético; que, por sua vez irá influenciar no resultado responsivo funcional da superfície. Ou seja, a escolha do padrão cinético define a solução mecânica e a escolha do material. Por outro lado, o desempenho mecânico e de consumo energético do sistema está diretamente associado a escolha do padrão cinético.

A seguir vamos estudar os principais padrões cinéticos:

- Padrão cinético de translação e rotação
- Padrão cinético de translação e retração
- Padrão cinético de expansão e contração

#### **A. Padrão cinético de translação e rotação**

O movimento de translação descreve o movimento de um componente em direção planar. Enquanto que o movimento de rotação se desenvolve através de um eixo.

A forma mais comum na aplicação dos padrões cinéticos de translação e rotação é utilizando sistemas de engrenagem e roldanas (SHARADIN, 2014). A fachada do edifício da Embaixada dos Países Nórdicos, em Berlin (Figura 22) utiliza padrão de rotação para movimentar uma série de painéis horizontais que funcionam como *brises* horizontais. Cada brise tem capacidade de girar a 90° acompanhando a trajetória do sol. Os brises estão integrados ao movimento rotacional para responder a sua função cinética. O movimento rotacional produz respostas lentas sobre cada brise, evitando ruídos e distração dos ocupantes do edifício durante o trabalho. O movimento de abertura e fechamento de cada brise é individual e programado de acordo com a angulação da trajetória do sol. O movimento rotacional aplicado a este edifício é totalmente automatizado no sentido que o sistema não é responsivo em tempo real as condições externas (SHARADIN, 2014).



*Fig. 22. Padrão Cinético por Rotação  
Embaixada dos Países Nórdicos, Alemanha.  
Fonte: archidaily.com*

Outro projeto que incorpora padrão cinético por movimento de rotação é o edifício da Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory - LIGO, na Califórnia (Figura 23). A superfície aplicada para o LIGO consiste de barras retangulares de alumínio suspensas a rolamentos no centro de gravidade, acoplados com dispositivos eletromagnéticos nas terminações de cada barra. Desta forma, o movimento de uma barra é distribuído à barra adjacente acompanhando o movimento na forma de uma ondulação.

Esta superfície cinética responde a movimentação pendular acionada por energia passiva, ou seja, por ação do vento. Importante destacar que nos dois exemplos citados (Embaixada dos Países Nórdicos e Ligo) não houve a intenção de incorporar estratégias responsivas diretas e previsíveis. No edifício da Embaixada dos Países Nórdicos foi utilizado um sistema de controle automatizado, o que constitui na operação funcional do sistema somente em períodos pré-definidos. Esta escolha operacional representa menor consumo de energia elétrica e menor atrito mecânico, consequentemente menor custo energético, de manutenção e maior vida útil do sistema.



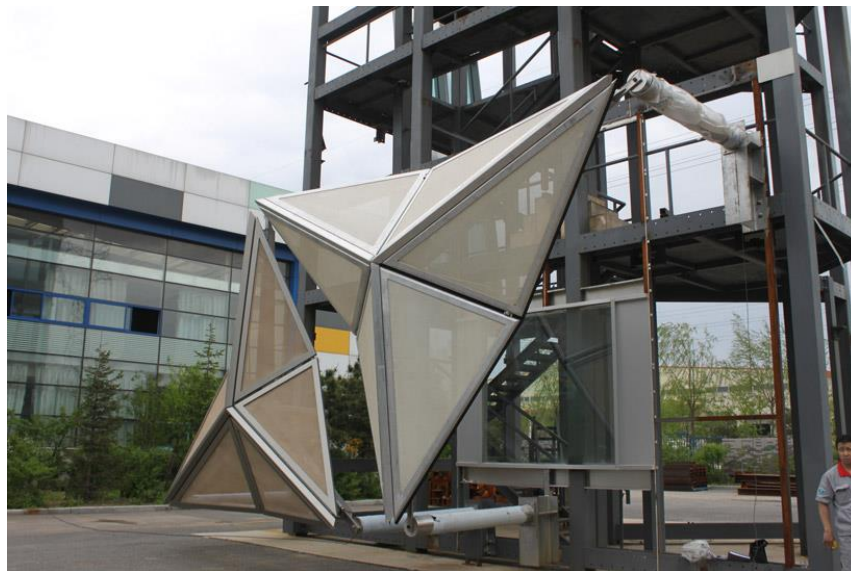
*Fig. 23. Padrão Cinético por Rotação - Edf. LIGO*  
*Fonte: ligo.caltech.edu*

## **B. Padrão cinético de translação e retração**

O padrão cinético de movimento por translação e retração é associado a estruturas articuláveis, entre as quais as mais comuns são as estruturas tipo guarda-chuva, a exemplo do componente cinético utilizado no edifício Torres Al Bahar (Figura 24).

Componentes com movimento de translação retrátil podem ser vistos nas estruturas com movimentação na forma de “tesoura” criados por Chuck Hoberman<sup>40</sup> (Figura 25a). As estruturas “tesoura” de Hoberman permitem diversas configurações dinâmicas responsivas a exemplo da proposta para o Palácio da Justiça de Madrid (Figura 25b) (SHARADIN, 2014). Outra aplicação similar é o componente cinético HelioTrace (Figura 26) desenhado para o edifício do Centro de Arquitetura de Nova Iorque. Este componente adota um sistema de lâminas que deslizam sobre um movimento de translação, sobrepondo-se uma sobre as outras em resposta a incidência luminosa. Este componente é capaz de produzir movimentos dinâmicos e complexos, criando variadas e “interessantes” composições geométricas na fachada; porém, o maior desafio é a complexidade de controlar um componente composto por múltiplos subcomponentes (SHARADIN, 2014).

O padrão cinético de translação e rotação é, entre os padrões cinéticos, o que apresenta mais complexidade mecânica, maior manutenção e maior risco operacional (SHARADIN, 2014).



*Fig. 24. Padrão Cinético por Translação e Retração  
Estrutura “guarda-chuva”.  
Fonte: Arup Journal*

---

<sup>40</sup> Chuck Hoberman, diretor da Hoberman Associates uma das maiores empresas de construção e consultoria em sistemas cinéticos (MOLENEY, 2011)

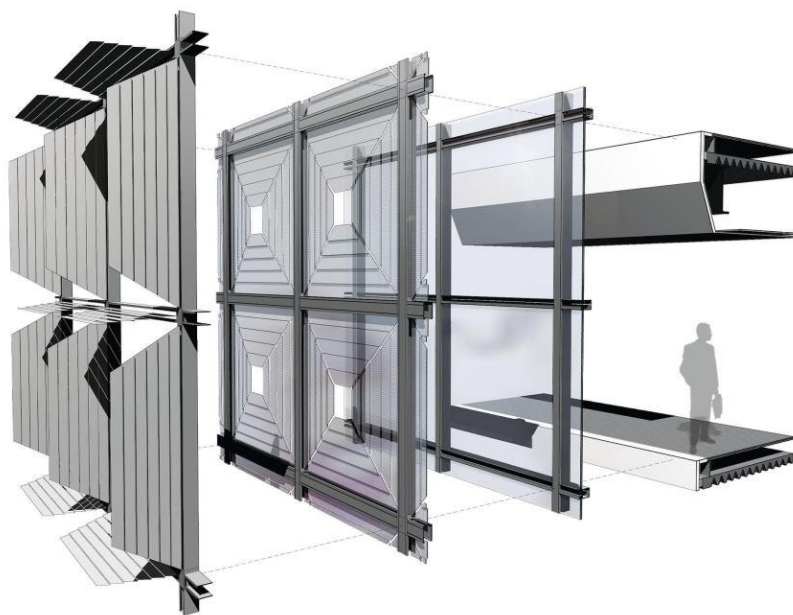


(a)



(b)

*Fig. 25. Padrão Cinético por Translação e Retração*  
 (a) Protótipo estrutura "tesoura", Chuck Hoberman. (b) Palácio da Justiça de Madrid, Espanha. Arquitetura: Foster+Partners. Componente responsivo: Chuck Hoberman  
 Fonte: [hoberman.com](http://hoberman.com)



*Fig. 26. Padrão Cinético por Translação e Retração*  
 Estrutura "diafragma"  
 Fonte: [designboom.com](http://designboom.com)



### C. Padrão cinético de expansão e contração

Este padrão explora as possibilidades propositivas de estruturas flexíveis. Para este padrão cinético, a escolha do material e do mecanismo é essencial para um bom funcionamento do sistema (SHARAIDIN, 2014). Alguns materiais possuem características de elasticidade e flexibilidade mais apropriadas para se adaptar a este sistema como: polipropileno, ETFE – Etileno Tretra Flour Etileno, PTFE – Poli Tretra Flour Etileno, entre outros polímeros sintéticos e madeiras flexíveis. Um exemplo da aplicação deste padrão pode ser visto na instalação chamada de Parede Interativa (Figura 27) instalada no Hannover Messe. Este protótipo transforma a parede de uma condição estática a uma condição dinâmica. A Parede Interativa é um protótipo interativo que expressa seu estado em função de movimento, da luz e do som. O protótipo tem intenção de investigar novas formas de usar e desenhar o espaço construído, incitando as pessoas a explorar novas formas de habitar (HOSALE; KIEVID, apud SHARAIDIN, 2014).



*Fig. 27. Padrão Cinético por Expansão e Retração - Por material flexível  
Fonte: <http://www.hannovermesse.de>*

O padrão cinético de expansão e contração requer menor complexidade mecânica e apresenta menor atrito quando comparado a outros padrões. Contudo, este padrão apresenta limitações no potencial de transformação cinética, podendo comprometer a interatividade visual do ocupante com o ambiente externo. O modelo estrutural genérico deste padrão consiste na

alteração de forças de tensão e pressão na estrutura do componente (SHARADIN, 2014).

Um exemplo da aplicação deste padrão pode ser vista na superfície cinética do edifício do Media-TIC (Figura 28), de Barcelona, projetado por Cloud 9 Architects. Este edifício utiliza uma estrutura para a superfície composta por material maleável (ETFE) que responde com função de sombreamento. A aplicação é composta por componentes pneumáticos que formam uma bolha inflável e desinflável. O ETFE filtra a entrada da luz durante seis horas ao dia, sombreando o interior do ambiente. A aplicação deste sistema é conhecida como “nuvem lenticular”, uma solução na qual duas camadas do plástico são infladas com nitrogênio, criando uma “nuvem” a partir da densidade das partículas de ar. O sistema opera em resposta a radiação de luz e calor externo. Quando incidência de luz e calor atinge certo parâmetro, os sensores enviam um comando de ativação dos injetores, que operam numa espécie de ventiladores para insuflar as bolhas com ar nitrogênio. Quando a temperatura ou níveis de luz atingiram o parâmetro de desinflar, é acionada a abertura da válvula de escape do ar.



*Fig. 28 Padrão cinético por Expansão e Contração  
Fonte: ruiz-geli.com*

### **3.3.2 Componentes eletrônicos e mecânicos**

Para ser possível a criação de uma SDF com padrão cinético é necessária a construção de um sistema mecânico formado por: sensores, para perceber o

ambiente; efetadores e atuadores, para agir; e, controladores, para que seja autônomo.

### **A. Sensores**

O termo *sensor* deriva da palavra sentir, ou seja são formas de perceber a presença das coisas (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Sensores são dispositivos físicos que medem quantidades físicas (MATARIC, 2014). É através dos sensores que um componente cinético percebe seu ambiente físico, a fim de obter informações sobre si mesmo e sobre as forças físicas que o cercam, ou seja, o sensor interage e responde aos estímulos do ambiente que o cerca. O que o componente vai *sentir* depende do que se deseja que faça, ou seja, qual é a função que o componente deverá responder. Para que um projeto de SDF de padrão cinético trabalhe de forma efetiva, é necessário a escolha dos tipos certos de sensores, de forma que eles possam perceber a informação necessária para realizar seu trabalho e atingir seus objetivos. Para Mataric (2014) o sensoriamento permite que um sistema conheça seu estado<sup>41</sup>. Quanto mais detalhada a escrita do parâmetro<sup>42</sup> mais “sensível” é o estado do sistema. Parametrizar um sistema significa ajustar automaticamente o estado de um sistema, em resposta aos dados introduzidos em tempo real.

O estado de um sistema cinético pode ser *discreto* ou *contínuo* (LOONEN, 2013)- isso tem a ver com o tipo e quantidade de informação utilizada para descrever o sistema. O *espaço de estados* é composto por todos os estados possíveis em que um sistema pode permanecer. Por exemplo, um interruptor de luz pode estar, somente, nos estados ligado ou desligado. Seu espaço de estado consiste em dois estados discretos (ligado e desligado). Por outro lado, se o interruptor de luz for dimerizável, poderá estar ligado a uma variedade de níveis de iluminação; portanto terá muito mais estados contínuos. Nesse contexto, o termo *espaço* refere-se a todos os possíveis valores e variações de algum parâmetro. A priori, quanto mais parâmetros maior o grau de inteligência de um sistema, pois maior a capacidade do sensor perceber o seu ambiente. No entanto, isto

---

<sup>41</sup> “Estado” é uma noção geral da física, emprestada pela Inteligência Artificial (MATRIAC, 2014)

<sup>42</sup> Parâmetro se refere a uma série de variantes imputadas digitalmente onde as relações entre elas são definidas por uma ou diversas relações matemáticas.

não significa, necessariamente, maior eficiência de desempenho. SDF cinéticas de estado contínuo e parâmetros complexos exigem maior quantidade de processamento e maior demanda mecânica; conseqüentemente, maior consumo energético. Isto porque sensores, processadores e atuadores precisam de potência para seu funcionamento. Por outro lado, quanto maior a demanda mecânica, maior desgaste dos equipamentos mecânicos (rolamentos, engrenagens, pistões, etc.) o que significa maior custo de manutenção aumentando o risco de “pane” operacional no sistema.

Normalmente uma SDF cinética é dotada de *sensores exteroceptivos*<sup>43</sup>, que são sensores que percebem estímulos do ambiente externo, como níveis de luz, calor, etc. Porém, é possível ser dotado de *sensores proprioceptivos*<sup>44</sup>, que percebem o estado interno do sistema (MATARIC, 2014). Estes são bastante comuns em equipamentos eletroeletrônicos como celulares, para indicar o estado de carga da bateria por exemplo. Na construção civil, o uso de sensores proprioceptivos é aplicado no monitoramento de instalações; por exemplo, para detectar vazamentos, panes em bombas hidráulicas, etc., ou seja em locais de difícil acesso. No entanto, também é possível aplica-los no monitoramento, por exemplo, do nível de CO2 ou de umidade de um ambiente.

Existem muitos tipos de sensores comercialmente disponíveis para cada tipo de medição física. A Tabela 3 apresenta alguns dispositivos e as quantidades que eles medem.

Tabela 2. Sensores e Utilidade de Medida

<b>Propriedades Físicas</b>	<b>Sensor</b>
Contato	Sensor de colisão
Distância	Ultrassom, radar, infravermelho
Nível de luz	Fotocélulas, câmeras
Nível de som	Microfones
Esforço	Extensômetros
Rotação	Codificadores e potenciômetros
Aceleração	Acelerômetros

<sup>43</sup> Do latim “extra” que significa “de fora”

<sup>44</sup> Do latim “proprius” que significa “próprio”.

Magnetismo	Bússolas
Cheiro	Sensores químicos
Temperatura	Termômetros, infravermelho
Inclinação	Inclinômetros, giroscópios
Pressão	Manômetros
Altitude	Altímetros

É importante levar em consideração que sensores estão sujeitos a incertezas. A incerteza refere-se à incapacidade de um sistema de ter certeza, de saber com exatidão sobre seu próprio estado e do seu ambiente circunvizinho (MATARIC, 2014). As incertezas em sistemas informatizados ocorrem por vários fatores: ruído e erro dos sensores; limitação dos sensores; ruído e erro dos atuadores; falta de conhecimento prévio sobre o ambiente, ou ambiente dinâmico com mudanças de clima bruscas ou constantes. Fundamentalmente, a incerteza decorre do fato de que sistemas cinéticos são mecanismos físicos que operam no mundo físico, cujas leis envolvem incerteza inevitável e falta de precisão absoluta (MATARIC, 2014).

### **B. Efetuadores, atuadores e motores**

Os *efetuadores* permitem que o componente cinético efetue o trabalho físico do sistema. Efetuadores usam mecanismos subjacentes que são chamados de *atuadores* ou *motores* (MATARIC, 2014).

O efetuador é o mecanismo do componente cinético que exerce o efeito sobre o ambiente, ou seja, o que realiza o movimento cinético. Existe uma variedade de tipos de efetuadores como, pistões, estruturas articuláveis, engrenagens, etc. O dispositivo *controlador* envia o comando para que os efetuadores realizem a resposta funcional, tendo em vista a tarefa desejada.

Os *atuadores ou motores* são dispositivos que convertem a entrada de energia na forma de sinal em ações mecânicas (MATARIC, 2014), ou seja, trata-se dos mecanismos que permitem que o efetuador execute uma ação de movimento. Estes abrangem motores elétricos, cilindros hidráulicos ou pneumáticos, componentes químicos, além de outros mecanismos.

A ação de atuadores e efetadores vai requerer alguma forma de energia para fornecer potência (MATARIC, 2014). Alguns sistemas usam atuação passiva como o caso do edifício LIGO; porém, a grande maioria utiliza de algum tipo de consumo externo de energia. Neste aspecto, atuadores são os dispositivos que exigem mais potência num sistema responsivo, ou seja, os que mais consomem energia.

Questões energéticas constituem um grande problema não só para o desempenho funcional da superfície cinética, como na potência necessária para operar o sistema. Operacionalmente um projeto de uma SDF de padrão cinético ativo deverá assegurar, antes de mais nada, o fornecimento de energia para que o sistema possa operar; o isolamento da eletrônica dos controladores separada dos sensores e dos efetadores para evitar interferências e ruídos; e evitar a perda de desempenho com as oscilações de energia (SHARAIDIN, 2014).

Existem algumas maneiras de acionar um efetador cinético, entre as mais comuns temos:

*Motores elétricos.* São os atuadores mais comuns, mais acessíveis e mais simples de usar num componente cinético, alimentados por corrente elétrica. (Ex. de aplicação: Instituto do Mundo Árabe).

*Dispositivos hidráulicos.* São atuadores baseados em pressão de fluido, à medida que a pressão muda, o atuador se move. (Ex. de aplicação: Media-TIC).

*Dispositivos pneumáticos.* Atuadores baseados na pressão do ar, conforme a pressão muda, o atuador se move. Muito parecido com atuadores hidráulicos. (Ex. de aplicação: torres Al Bahar).

Motores são atuadores mais comuns (MATARIC, 2014). *Motores de corrente contínua* são simples, baratos e fáceis de usar e encontrar. Podem ser encontrados numa variedade de tamanhos e formatos, para diferentes tipos de tarefas. Os motores que podem girar sobre seu eixo para uma posição específica são chamados de *servomotores*. A característica de poder girar sobre seu eixo os torna mais indicados na utilização de padrões de translação e rotação (SHARAIDIN, 2014). Similar os motores de corrente contínua são mecanismos simples e acessíveis.

### C. Dispositivos de entrada e controle cinético

Uma Superfície Dinâmica Funcional é um sistema que opera autonomamente. O que significa dizer que possuem a capacidade de tomar as próprias decisões e agir de acordo com elas. SDF's são capazes de receber informações e instruções de seres humanos, mas não são controlados completamente por eles (MATARIC, 2014). São os *controladores* que tornam uma superfície dinâmica autônoma; usando as informações sensoriais, para em seguida, controlar os efetadores e executar as funções desejadas. Assim, os controladores desempenham o papel de cérebro do sistema.

Para que uma SDF possa sentir, agir e interagir com seu ambiente circunvizinho é necessário que seja dotada de sensores, ou seja, de meios para perceber e obter informações do ambiente, trazendo as informações do mundo físico para ser controlado pela cibernética, neste caso, por instruções humanas na forma de parâmetros que vão alimentar o sistema. A cibernética combina efetivamente “pensamento”, “ação” e interação com o ambiente (WEINER, 1948). Na cibernética, a Inteligência Artificial<sup>45</sup> se encarrega do “pensamento” ou controle do sistema por retroalimentação (*feedback*). É a forma pela qual um sistema atinge e mantém seu estado desejado (também chamado de ponto de ajuste ou “*setpoint*”), comparando continuamente seu estado atual ao desejado. O *estado desejado* do sistema é o estado onde se deseja chegar, ou seja o estado otimizado (MATARIC, 2014). O estado desejado é regulado pelo estado “ideal” que o sistema foi “instruído” a manter. Por exemplo, no caso de um padrão cinético rotacional formado por brises horizontais, o estado desejado de incidência luminosa no interior do ambiente definirá o estado desejado na posição do brise, de forma que o brise responda as condições “ideais” de conforto luminoso no ambiente.

A diferença entre os estados atual e desejado de um sistema é chamado de *erro*. O objetivo de qualquer sistema de controle é minimizar esse erro (MATARIC,

---

<sup>45</sup> O campo da Inteligência Artificial nasceu oficialmente em 1956, em uma conferência realizada na Universidade de Dartmouth, em Hanover, New Hampshire, Estados Unidos, reunindo os pesquisadores mais proeminentes da época, incluindo Marvin Minsky, John McCarthy, Allan Newell e Herbert Simon, considerados pioneiros nesse campo.

2014). O controle por retroalimentação calcula o erro e o informa ao sistema, a fim de ajudá-lo a alcançar seu estado desejado ou objetivo, em outras palavras, o erro é o processo de retroalimentação do sistema.

O controle de superfícies responsivas se baseia na ligação entre os sensores e os efetadores. Este tipo de controle é denominado de *controle reativo*. Os sistemas reativos encurtam a escala de tempo e reagem a informação sensorial atual. Esses sistemas consistem em conjuntos de regras que combinam situações específicas a respostas específicas. Elas funcionam de maneira semelhante aos reflexos para os humanos, ou seja respostas instintivas que não envolvem nenhum pensamento. Neste sentido a computação complexa é removida a fim de promover respostas armazenadas e pré-configuradas. A melhor maneira de manter um sistema reativo simples e direto é possibilitar que cada situação única seja detectada pelos sensores do componente, disparando apenas uma única ação de resposta.

Sistemas reativos devem ser capazes de suportar o *paralelismo*, que é a capacidade de controlar e executar várias tarefas de uma só vez. Em termos práticos, significa que a linguagem de programação deve ter a capacidade de multitarefa para executar vários processos/regras/comandos em paralelo. Porém, a capacidade multitarefa é crítica em sistemas reativos. Se um sistema não puder monitorar seus sensores em paralelo e, em vez disso, os verifica em sequência, ele poderá perder um evento, consequentemente deixando de responder (MATARIC, 2014). A melhor arquitetura de controle reativo é a *arquitetura de subsunção*; o que, de certa forma, abre caminho para a implantação em sistemas responsivos aplicados a materiais compósitos inteligentes ou compósitos multifuncionais para a aplicação em SDF's.

A ideia básica da arquitetura de subsunção é construir sistemas de forma incremental. Consistem em um conjunto de módulos ou camadas, no qual cada uma delas executa uma tarefa. Todas as camadas executoras de tarefas trabalham ao mesmo tempo, ao invés de sequencialmente. Isso significa que as regras de cada uma delas estão prontas para serem executadas a qualquer momento, sempre que certa situação acontece. Há vários benefícios em organizar sistemas reativos utilizando a arquitetura de subsunção. Primeiro, ao projetar o sistema de forma incremental, evitamos ficar sobrecarregados com a



complexidade da tarefa do todo. Segundo, se alguma camada ou módulo falhar as outras camadas continuarão funcionando sem serem afetadas. Na arquitetura de subsunção, o objetivo é ter poucas conexões entre as distintas camadas; ainda que dentro de cada camada existem várias conexões a fim de produzir a tarefa responsiva; porém, ao manter separadas cada camada, cada tarefa se torna singular. Assim, o sistema se torna mais gerenciável para se projetar e manter (MATARIC, 2014).

### **3.4. Resumo do Capítulo**

A tecnologia cinética aplicada a arquitetura abrangente diversas áreas que envolve movimento. Entretanto, Superfícies Dinâmicas Funcionais Cinéticas trata especificamente de movimento dinâmico responsivo. Esta área da cinética aplicada à arquitetura explora conceitos e fundamentos da cibernética para tornar possível o funcionamento operacional de uma superfície com propósito a otimizar o desempenho adaptativo, energético e ambiental de uma edificação.

Tecnicamente, embora o desenvolvimento de um projeto de superfície dinâmica funcional de padrão cinético englobe uma equipe multidisciplinar de arquitetos, engenheiros elétricos, programadores, etc. é fundamental que o arquiteto se familiarize com os processos que envolvem a concepção e desenvolvimento de um projeto deste nível de complexidade.

De maneira prática o arquiteto, ao identificar a oportunidade para a aplicação de uma superfície dinâmica funcional de padrão cinético deverá se envolver com os seguintes processos: modelagem de comportamento, que consiste na análise e simulação digital do sistema antes da execução do protótipo de testes; padrões cinéticos, que trata especificamente do movimento dinâmico; dos componentes eletrônicos e mecânicos, ou seja, os dispositivos que tornarão possível que o sistema execute o movimento dinâmico; e, os dispositivos de entrada e controle, que, em outras palavras é o cérebro do sistema capaz de reconhecer, processar e emitir o comando de ação.

### **3.5. Resultados do Capítulo**

Tradicionalmente, por força de costume ou modelo curricular, o estudo do movimento, sobre a ótica das tecnologias dinâmicas, não é um assunto muito explorado na arquitetura. Pretender o projeto de uma superfície dinâmica funcional de padrão cinético requer um modelo de trabalho interdisciplinar com outras áreas de conhecimento científico, além das áreas de projeto complementar da engenharia civil.

Entre as características de um processo de projeto de fachada cinética está a simulação de modelagem comportamental, o que implica considerar que ferramentas de análise computacional não somente auxiliam no processo de projeto, como podem determinar a forma final de uma fachada ou componente. Outro processo fundamental é a confecção de protótipos, quando o componente cinético será testado.

## **CAPITULO 4 - Superfícies Dinâmicas Funcionais por Materiais Compósitos Inteligentes**

*Materiais compósitos são considerados a extensão lógica dos materiais convencionais. O processo de fabricação permite a otimização do material compósito para desempenhar funções específicas. Apesar da manipulação dos materiais fazer parte do desenvolvimento tecnológico da humanidade, materiais compósitos surgem na segunda metade do século 20 com a engenharia e ciência dos materiais, atraindo a atenção de diversas indústrias em especial a aeroespacial. Na arquitetura, apesar do potencial dos materiais compósitos para a criação de fachadas efetivas no controle climático e energético do edifício, a sua aplicação é usada na perspectiva do material convencional, limitando o seu potencial funcional e dinâmico. Este capítulo apresenta os princípios para a criação de um material compósito, métodos de fabricação e vantagens do sistema.*

Ao longo dos últimos anos profissionais de todas as áreas estão testemunhando o renascimento dos materiais (OXMAN, 2010). O interesse entorno de novos e inovadores materiais e tecnologias de materiais é um dos assuntos dominantes e mais influentes na arquitetura contemporânea (ASHBY & JOHNSON, 2010). Este “novo materialismo” apresenta uma influência diversa e complexa para a arquitetura contemporânea. De acordo com Oxman (2010:71) historicamente existem duas formas distintas do material influenciar a arquitetura. A primeira, assumindo o material pelo seu aspecto formal e estético. A segunda, mais complexa, explorando as inter-relações entre ciência, tecnologia e projeto (ANTONELLI, apud OXMAN, 2010:72).

A bibliografia abordando os materiais inteligentes e os sistemas de materiais tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). No entanto existem dois paradigmas que podem ser usados para classificar os materiais inteligentes (ROGERS, apud OXMAN, 2010:72). O primeiro é formulado em base ao paradigma tecnológico, que trata do material inteligente como sendo estruturado por mecanismos de sensores, processadores e controladores (AHMAD, 1990). O segundo é baseado no paradigma científico, predominantemente relacionado com o potencial funcional

inerente nas propriedades do material através da organização da sua microestrutura (OXMAN, 2010). O material inteligente como paradigma científico tem por objetivo, explorar o potencial da matéria a partir de uma perspectiva puramente física, evitando a introdução de dispositivos eletrônicos. Esta classe de materiais, também conhecida como *materiais mediados* constitui um campo de pesquisa bastante emergente e que tem, nos sistemas da natureza, mentor e “catálogo” vivo na busca de inspiração para novas soluções e materialidades. (GOLDENFELD; KADANOFF, apud BANSAUDE, 2011). No entanto, apesar da condição dinâmica e do potencial responsivo dos materiais mediados, estes não serão objeto de estudo neste trabalho por se tratar de uma área que apresenta abordagens científicas e técnicas de fabricação diversa a esta pesquisa.

#### **4.1. Engenharia e Ciência dos Materiais**

Partir do princípio que a “manipulação” dos materiais é uma área de atuação própria da “Era moderna”, seria uma inverdade (BENSAUDE, 2001; ADDINGTON; SCHODECK, 2005; OXMAN, 2010). O desenvolvimento da civilização humana está diretamente ligado a manipulação dos materiais. (ASHBY, 1995; BANSAUDE, 2001; ADDINGTON; SCHODECK, 2005). Ao longo da história dos materiais é possível testemunhar a produção que antigas civilizações desenvolveram para interagir com o meio ambiente na busca de abrigo, habitação e bem estar (ASHBY, 1995). A importância do material na história da humanidade pode ser conferida na forma como a arqueologia tem dividido o progresso tecnológico da antiguidade, associando um período histórico a escolha de um material: Era da Pedra, Era do Bronze e Era do Ferro (ASHBY, 1995).

Podemos considerar que inovação em arquitetura está relacionada ao conhecimento e desenvolvimento dos materiais (ATTMANN, 2012). De certa maneira é possível escrever a história da arquitetura moderna pela lente da história dos materiais na arquitetura (ADDINGTON; SCHODECK, 2005).

A moderna engenharia e ciência dos materiais nasce com a metalurgia física, no início do século 20, quando foi possível a manipulação dos átomos em estruturas

cristalinas utilizando o método da difração<sup>46</sup> por raios-X (SMITH, apud BENSAUDE, 2001). Deste momento em diante, investigar a microestrutura dos cristais se torna prioridade para o entendimento da disposição estrutural e das propriedades constituídas nas ligas metálicas. Nos anos cinquenta, com o auxílio do microscópio eletrônico é possível observar diretamente os deslocamentos, arranjos irregulares e tipos de arranjos estruturais, determinantes para o entendimento do desempenho dos cristais. A conexão entre microestrutura e propriedades mecânicas permitiria, então, a criação de novos materiais (BENSAUDE, 2001).

Em contraste a fabricação de materiais convencionais com propriedades homogêneas, materiais desenvolvidos pela engenharia de materiais são exibem certas propriedades para certos usos, ou seja, concebidos para responder a demandas específicas (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Para Ashby (1995) o século 21 pode ser considerado como a “Era dos Materiais” em virtude como o desenvolvimento de novos materiais tem mudando radicalmente a nossa forma de fazer, construir e viver.

Para Oxman (2010), um dos precedentes mais significativos no desenvolvimento de materiais é a evolução dos *materiais compósitos*. Compósitos representam um capítulo especial na história tecnológica do século 20 conforme demonstrado na exposição “Materiais Mutantes”<sup>47</sup>, exibida no Museu de Arte Moderna de Nova Iorque, duas décadas atrás. O aumento no interesse em torno de novos e inovadores materiais e tecnologias de materiais é, na contemporaneidade, uma das áreas de maior influência em projetos para envoltórias na arquitetura (KWINTER, apud OXMAN, 2010).

---

<sup>46</sup> Difração é o nome genérico dado aos fenômenos associados a desvios da propagação da luz em relação ao previsto pela óptica geométrica. Disponível em: <http://sites.ifi.unicamp.br/laboptica/roteiros-do-laboratorio/3-difracao-de-fendas/>. Acesso em: 10 jun. 2017.

<sup>47</sup> Museu de Arte Moderna de Nova York – “Mutant Materials in Contemporary Design”, 1995. Curadoria de Paola Antonelli. Disponível em: <https://www.moma.org/interactives/exhibitions/1995/mutantmaterials/MuMA1.html>. Acesso em: 10 jun. 2017

## 4.2. Material Compósito

Materiais monolíticos convencionais podem ser classificados em três categorias principais: metais, cerâmicas e polímeros. Materiais compósitos são a combinação de dois ou mais materiais a partir de uma ou mais destas categorias de materiais monolíticos (ADDINGTON & SCHODEK, 2005), formado por duas ou mais fases dispostas em escala microscópica, na qual as propriedades e o desempenho mecânico são desenvolvidos para ser superior as do material atuando independentemente. Uma destas fases é denominada de *reforço*, constituída por fibras que proporcionam rigidez e resistência. A outra parte, menos rígida e menos resistente é denominada *matriz* e recobre as fibras (Figura 29). Em alguns casos, a introdução de aditivos químicos ou de outros processos constitui uma fase adicional denominada *interfase* atuando entre a fases reforço e matriz (ISAAC & ISHAI, 2005).

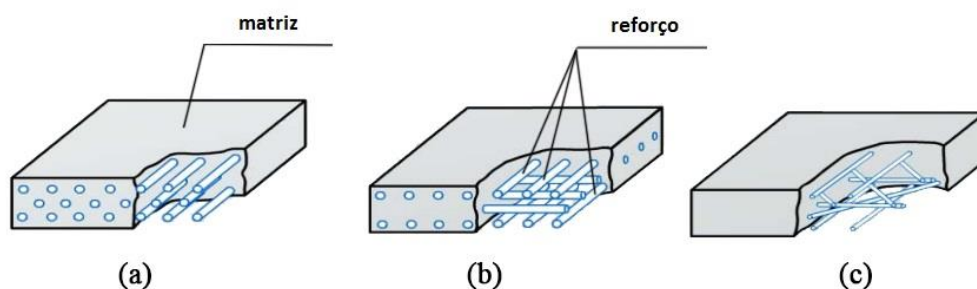


Fig. 29. Fases (matriz e reforço) e tipos de orientação do reforço em compósitos  
(a) Orientação de reforço linear (mesma direção), (b) Orientação cruzada, (c) orientação aleatória

Fonte: [http://doktori.bme.hu/bme\\_palyazat/2016/honlap/Turcsan\\_Tamas\\_gpk\\_en.html](http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2016/honlap/Turcsan_Tamas_gpk_en.html)

As fases de um material compósito cumprem diferentes funções dependendo do tipo e aplicação do material compósito (ISAAC & ISHAI, 2005). No caso de materiais compósitos de baixo e médio desempenho, o reforço é usualmente composto por fragmentos de fibras ou partículas de fibras que vão proporcionar dureza, porém a resistência será limitada. Neste caso a fase matriz receberá o maior volume de carga, governando as propriedades mecânicas do material (ISAAC & ISHAI, 2005). No caso de uma estrutura compósita de alto desempenho, normalmente a distribuição contínua do reforço cumprirá a função de suporte principal e a orientação na direção das fibras determinará a resistência e dureza do material, para este caso, a fase matriz proverá proteção

as fibras transferindo os esforços de uma fibra a outra. A fase interfase, apesar de pequena em dimensões, cumpre um papel importante controlando a falha do mecanismo, proporcionando uma camada extra de reforço as fibras (ISAAC & ISHAI, 2005).

### **4.3. Vantagens e Limitações dos Materiais Compósitos**

Materiais compósitos possuem vantagens únicas quando comparados com materiais monolíticos como: maior resistência, maior durabilidade, menor desgaste, menor densidade e capacidade de adaptabilidade para cumprir diversas funções. Além disso podem ser desenvolvidos para resistir a corrosão, isolamento térmico, estabilidade mecânica, condutividade, refletância, absorvância e isolamento acústico (ISAAC & ISHAI, 2005). Contudo, também apresentam limitações quando comparado aos materiais monolíticos.

Uma comparação entre os materiais compósitos e os materiais monolíticos convencionais abordando os aspectos micromecânicos, caracterização do material, tecnologia de fabricação, manutenção, durabilidade e custo, são expostos como forma de esclarecer as vantagens e limitações dos materiais compósitos:

#### **A. Micromecânica**

Quando analisado na escala da dimensão das fibras, materiais compósitos tem a vantagem de ser mais fortes e resistentes. A baixa probabilidade de fratura das fibras é assegurada pela ductilidade da fase matriz e pela dissipação de energia na fase interfase da fibra/matriz. A capacidade de transferência de esforços da fase matriz não possibilita o desenvolvimento de múltiplas áreas e caminhos para a falha mecânica. Por outro lado, as fibras apresentam relativamente alta capacidade de espalhar esforços. Concentração de esforços localizados arredor das fibras reduzem a resistência transversal a tração.

Materiais convencionais são mais sensíveis na estruturação da sua microestrutura. As irregularidades locais influenciam primeiro na deformação do material antes da ruptura; no entanto a composição homogênea do material o

torna mais susceptível ao aumento de falhas, principalmente quando exposto a longos ciclos de esforços.

### **B. Caracterização mecânica**

A análise de estruturas compósitas requer a informação das características do material. Estas propriedades podem ser previstas com base nas propriedades e disposição dos materiais constituintes. Porém, a verificação experimental da análise ou caracterização independente do elemento constituinte exige um programa de ensaios abrangente para a determinação de um grande número parâmetros de materiais.

Por outro lado, no caso de materiais isotrópicos<sup>48</sup> convencionais, a caracterização mecânica é simples, pois, duas constantes de elasticidade e dois parâmetros de força são suficientes.

### **C. Projeto estrutural, análise e otimização**

Materiais compósitos proporcionam uma oportunidade única para a concepção de materiais como processo unificado de estrutura. A liberdade na estruturação permite a otimização do material na variação de desempenho, como: peso mínimo, máxima estabilidade dinâmica, custo efetivo, etc. Porém, todo o processo requer de dados confiáveis das propriedades do material, métodos de análise estrutural padronizados, técnicas de modelagem e simulação, e modelos para processamento de materiais. As inúmeras opções disponíveis do material tornam o processo de desenvolvimento, otimização e análise mais complexas.

No caso de materiais convencionais, a otimização é limitada usualmente a um ou dois parâmetros geométricos, devido a pouca liberdade de estruturação que o material permite.

### **D. Tecnologia de fabricação**

O processo de fabricação é um dos passos mais importantes no desenvolvimento de materiais compósitos. Estruturalmente materiais compósitos são fabricados com equipamentos relativamente simples. Existem variedades de métodos de fabricação adequados as distintas aplicações. Estas incluem:

---

<sup>48</sup> *Isotropia, qualidade de alguns materiais que consiste em terem as mesmas propriedades físicas em todas as direções. Anisotropia, característica de um material, em que certas propriedades físicas serão diferentes conforme as diferentes direções.*



pultrusão (Figura 30), infusão a vácuo (Figura 31), Moldagem por Transferência de Resina - RTM (Figura 32), deposição filamentar (Figura 33), Estruturas compósitas formadas por diferentes materiais, a exemplo de estruturas sanduiche podem ser fabricadas num único passo com o processo denominado *co-curing process* (Figura 34), através da projeção de raios UV ou prensa. A utilização destas tecnologias de fabricação reduz e otimiza significativamente o número de junções e peças de montagem. A lado negativo é que a fabricação de compósitos requer mão de obra altamente qualificada e altos custos no controle de qualidade.

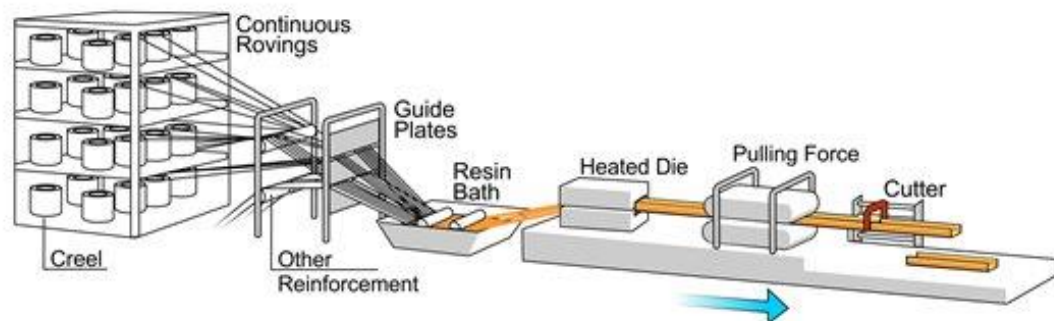


Fig. 30. Método fabricação por Pultrusão  
Fonte: <http://www.ecofiber.com.br/>

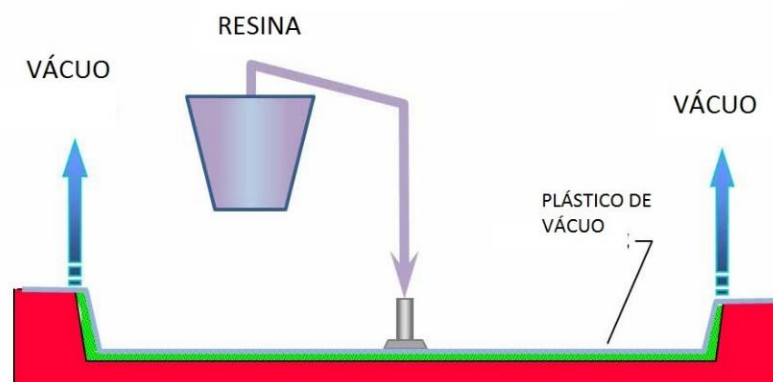


Fig. 31. Método de fabricação por Infusão a Vácuo

Infusão a vácuo utiliza a pressão negativa para puxar o ar para fora, enquanto impregna o reforço com resina. (a) desenho esquemático do processo de infusão a vácuo.

Fonte: <http://www.forterenewables.com/services/4-1-factory-acceptance-tests/>;

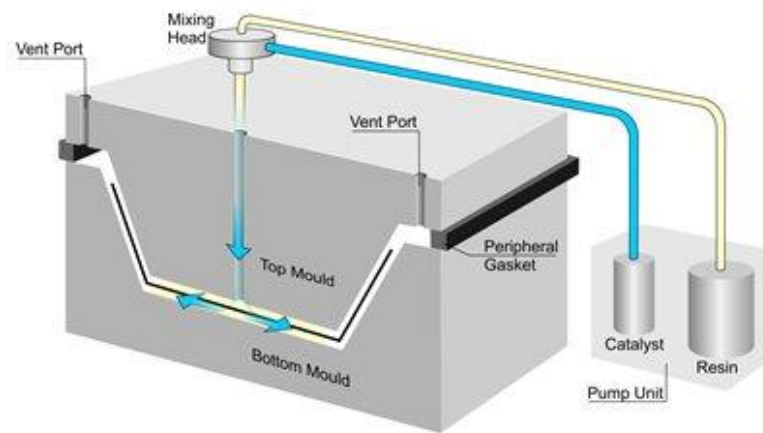


Fig. 32. Método de fabricação por Moldagem por Transferência de Resina-RTM  
 Processo de molde fechado. Neste método o reforço é colocado no lugar antes de juntar as duas metades correspondentes de um molde e trancá-las, então a resina é transferida, ou injetada, para preencher todos os espaços vazios no laminado  
 Fonte: <http://www.nuplex.com/composites/processes/resin-transfer-moulding>

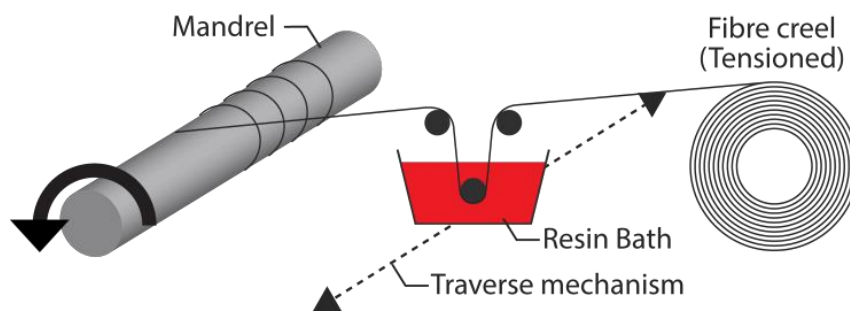


Fig. 33. Método de fabricação por Deposição Filamentar  
 Deposição das fibras por camadas. Métodos de deposição filamentar podem variar de acordo com a finalidade do produto: Enrolamento Filamentar (Continuous Filament Winding) deposição das fibras por fios, método usado para produzir produtos de forma cilíndrica e tubular. Automated Tape Lying –AFL, deposição das fibras por faixas, método aplicado na fabricação de asas de aeronaves entre outras finalidades.  
<http://www.venn-cycling.com>



Fig. 34. Método de fabricação por Co-curing Process  
 Método de fabricação em bloco composto por múltiplas camadas de compósitos por prensagem ou projeção de raios Ultra Violeta  
 Fonte: [http://www.ipt.br/noticia/1047-aeronautical\\_technology\\_.htm](http://www.ipt.br/noticia/1047-aeronautical_technology_.htm)

### **E. Facilidade de manutenção e durabilidade**

Materiais compósitos podem operar em condições ambientais hostis por longos períodos de tempo. Compósitos possuem maior resistência a desgaste, apresentam manutenção simples e são fáceis de reparar. No entanto, materiais compósitos, especialmente compósitos formado por polímeros termorrígidos, são sensíveis a ambientes higrotérmicos, induzindo a danos no interior da estrutura.

Materiais convencionais, especialmente metais, são susceptíveis a corrosão em ambientes hostis. Discretas falhas e rachaduras podem ser induzidos durante o processo de fabricação podendo aumentar e propagar para uma situação mais crítica, no entanto, se os defeitos são fáceis de serem detectados; porém o reparo não é simples e não assegura durabilidade e longevidade a estrutura.

### **F. Custo eficiente**

Uma das principais vantagens dos materiais compósitos está na redução dos custos ao longo do ciclo de vida do material. A efetividade econômica está, por exemplo, no menor peso da estrutura, na redução no uso de equipamentos e ferramentas para fabricação e manutenção, no menor número de junções e peças, redução de operação de montagem, e redução de manutenção. Por outro lado, os processos de fabricação de materiais compósitos são onerosos e requer alto custo no controle de qualidade e inspeção.

No caso de estruturas feitas com materiais convencionais, o baixo custo da matéria prima compensa mais quando comparado ao alto custo dos equipamentos de fabricação e montagem.

## **4.4. Compósitos Inteligentes**

Materiais compósitos, apesar do constante desenvolvimento, têm alcançado um estágio de maturidade (ISAAC & ISHAI, 2005). A necessidade por materiais dinâmicos e multifuncionais se apresentam como um desafio para o desenvolvimento de novos sistemas de materiais (ADDINGTON & SCHODEK,

2005). Materiais Compósitos Inteligentes - MCI se caracterizam por sua capacidade responsiva: ativa ou passiva. MCI ativos são estruturados com mecanismos de sensores, processadores e controladores, capazes de sentir estímulos, processar a informação e responder a ações programadas (AHMAD, 1990). MCI passivos, são aqueles que possuem capacidade inerente ao material, respondendo a estímulos do ambiente de forma autônoma.

Um material é definido como MCI quando a entrada de uma fonte energia (corrente elétrica ou fonte natural) afeta a energia interna do material, alterando a sua estrutura molecular ou microestrutura, resultando na mudança das propriedades do material (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). As propriedades do material podem ser de ordem intrínseca ou extrínseca. Propriedades intrínsecas dependem da estrutura interna e da composição do material. Propriedades químicas, mecânicas, elétricas, magnéticas e térmicas são de ordem intrínseca. Propriedades extrínsecas dependem de fatores externos como a luz solar, temperatura do ambiente, etc. (ADDINGTON & SCHODEK, 2005)

Materiais Intrínsecos são aqueles que transformam uma forma de energia de entrada em outra forma de energia de saída, fazendo isto de forma direta e reversível. Materiais Extrínsecos alteram suas propriedades em resposta direta a estímulos externos do ambiente.

Algumas classes de materiais Intrínsecos e Extrínsecos podem ser diferenciadas conforme apresentado na TABELA 3:

Tabela 3. Materiais Inreínsecos e Extrínsecos

Intrínseco	Extrínseco
<b>Termocromático:</b> quando a entrada de energia térmica no material (calor) altera a estrutura molecular. A nova estrutura molecular tem espectro de reflexividade diferente do estado anterior; como resultado, a cor do material se altera (muda de cor)	<b>Fotovoltaicos:</b> quando a entrada de radiação de energia do espectro visível (ou infravermelho) produz corrente elétrica
<b>Magnetoreológico:</b> a aplicação de um campo magnético causa a mudança na orientação da microestrutura, resultando em alteração da viscosidade do fluido	<b>Termoelétricos:</b> quando a entrada de corrente elétrica produz temperatura diferencial
<b>Termotrópicos:</b> a entrada de energia térmica no material altera a microestrutura através da mudança de estado (sólido, líquido, gasoso). Na mudança de fase, muitos materiais demonstram diferentes propriedades, incluindo	<b>Piezoelétrico:</b> quando a entrada de energia elástica (movimento) produz corrente elétrica

condutividade, transmissividade, expansão volumétrica e solubidade	
<b>Memória de forma</b> ( <i>Shape memory</i> ). Quando a entrada de energia térmica altera a microestrutura através da mudança de estado. Estas trocas permitem múltiplas formas em resposta a estímulos ambientais	<b>Fotoluminescente:</b> quando a entrada de radiação de energia do espectro ultravioleta é convertida em radiação de energia visível
-	<b>Eletrosensitivo:</b> aplicação de corrente elétrica (ou campo magnético) altera a distância intra-atômica através de polarização. A alteração desta distância altera a energia da molécula, produzindo energia elástica (cinética). Esta energia deforma ou altera a forma do material

FONTE: Reproduzido de (ADDINGTON & SCHODEK, 2005)

#### 4.5. Características dos Compósitos Inteligentes

Materiais Compósitos Inteligentes se caracterizam por sua capacidade responsiva. De acordo com Addington e Schodeck (2005) é possível organizá-los por grupos e características de:

- A. Alteração de propriedade
- B. Capacidade de troca de energia
- C. Reversibilidade
- D. Miniaturização

As características físicas de resposta dos MCI estão determinadas em função das energias de *entrada* (*inputs*) no material (passivas ou ativas), como pelo mecanismo pelo qual a entrada de energia no material é convertida. Se o mecanismo utilizado na composição do material afeta a energia interna do material alterando sua estrutura molecular ou microestrutura, então a *entrada* resulta na *alteração de propriedade* do material. Se, por outro lado, o mecanismo altera o estado de energia na composição do material, mas não altera o material em si, então a *entrada* resulta na *conversão de energia* de um estado para outro. Ambos mecanismos operam em escala microscópica, sendo que as alterações ocorrem no campo molecular e atômico, sendo imperceptíveis em escala macroscópica (NORDMANN, apud KLOOSTER, 2009).

##### A. Alteração de Propriedade

A classe de material compósito que altera suas propriedades possui amplo potencial para ser aplicados na arquitetura. Estes materiais sofrem alterações na sua propriedade química, térmica, mecânica, magnética, ótica, ou elétrica, em resposta as mudanças nas condições do estado do material (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). A mudança de estado do material decorre das condições ambientais ou produzidas através da entrada direta de energia. Incluído nesta classe de materiais estão podemos considerar por exemplo, os materiais que mudam de cor como os termocromáticos, eletrocromáticos, fotocromáticos. Nesta classe de materiais a característica intrínseca na superfície do material é modificada através de uma mudança ambiental (incidência de radiação solar, temperatura da superfície) ou diretamente através da entrada de energia elétrica, fazendo que o material altere suas propriedades óticas o que, para os humanos é visto como mudança de cor.

### **B. Conversão de Energia**

Materiais que convertem energia, da mesma maneira são vistos como promissores para a sua aplicação na arquitetura; pois possuem a capacidade de alterar uma entrada de energia convertendo-a em outra de saída, de acordo com a primeira lei da termodinâmica. Embora a eficiência na conservação de energia dos MCI seja menor que os dos materiais com tecnologia convencional, o potencial de utilização desta energia é maior nos compósitos (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Por exemplo, a relação entre a entrada de energia e a saída de energia torna muitos dos compósitos inteligentes que convertem energia exelentes sensores ambientais, sendo que a saída de energia pode ser direcionada para desempenhar alguma função.

### **C. Reversibilidade**

Muitos materiais com capacidade de alterar a suas propriedades ou materiais com capacidade de converter energia, possuem características de reversibilidade ou de bi-direcionabilidade. Materiais que convertem energia podem reverter a forma de entrada e saída de energia. Materiais com propriedade bi-direcional permitem maior exploração de suas mudanças transitórias. Por exemplo, as características na absorção de energia de um

material com capacidade de *mudança de estado (phase change)* podem ser usados para dissipar energia ao ambiente (aquecer ou resfriar), dependendo da direção que a mudança de estado esta sendo aplicada.

#### **D. Miniaturização**

Uma das maiores características dos MCI é o tamanho dos componentes ou dispositivos ativos que formam ou estão embedidos na sua estrutura. Um componente ou dispositivo de um MCI não somente será muito menor que um elemento similar aplicado num material convencional; sendo que a interferência das condições do ambiente no material é menor que a dos materiais convencionais, tornando-os menos dependentes da necessidade de manutenção e calibragem.

### **4.6. Compositos inteligentes que alteram propriedades**

#### **4.6.1. Materiais inteligentes cromáticos**

Materiais que mudam de cor incluem:

- *Fotocromáticos*. Quando expostos a luz.
- *Termocromáticos*. Devido a mudanças de temperatura.
- *Mecanicocromáticos*. Quando deformados ou sofrem alguma carga de pressão.
- *Quimicocromático*. Expostos a ambientes químicos específicos.
- *Eletrocromáticos*. Quando aplicado tensão de voltagem. Esta classe inclui dispositivos de *crstais líquidos* e *particulas suspensas*.

Estes materiais constituem uma classe onde uma mudança na fonte de energia externa produz a alteração das propriedades óticas do material (absortância, refletância, transmitância). Os chamados materiais que mudam de cor, na realidade, não mudam propriamente de cor. Mudam as suas propriedades óticas diante de estímulos externos (ex. calor, luz ou ambientes com presença de elementos químicos) que nós, humanos, percebemos como mudança de cor (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). A cor é fundamentalmente uma propriedade

da luz. As cores observadas num objeto constituído de alguma classe destes materiais, dependem das qualidades óticas intrínsecas no material. Dependendo da estrutura molecular do material, a luz que irá atravessar o material poderá ser, retardada, redirecionada, absorvida ou convertida em outro tipo de energia. Nesta classe de materiais a estrutura molecular presente nas camadas mais superficiais do material são as que determinam o comportamento final do material (ex. tintas, películas, revestimentos). As propriedades intrínsecas (absortância, refletância, transmitância) do material são arranjadas para mudar ao receber o estímulo externo (ex. calor, luz). A entrada da energia ou estímulo externo afeta a capacidade de absortância ou refletância do material, resultando na mudança de cor. Quando o estímulo desaparece, as propriedades do material revertem ao seu estado original.

#### **4.6.2. Materiais Inteligentes que Mudam de Estado – PCM (Phase Change Materials)**

Materiais podem existir em diferentes estados ou fases (sólido, líquido ou gasoso).

A mudança de temperatura sobre o material pode causar a alteração de um estado para outro. Por este motivo estes materiais são conhecidos como materiais que *mudam de estado* – PCM (tipicamente mudando do estado sólido ao líquido e vice versa). Processos de mudança de estado invariavelmente envolve a absorção, armazenamento e dissipação de energia. A mudança de estado depende da temperatura. No entanto, a quantidade de energia absorvida e dissipada depende da composição do material.

PCM tem sido aplicados com sucesso na indústria têxtil. A produção de tecidos com materiais microencapsulados que mudam de estado utilizam materiais em estado meio-sólido, meio-líquido próximo a temperatura do corpo. Conforme a pessoa se exercita produzindo calor, o material absorve o calor mantendo a temperatura do corpo fria. Quando o corpo para de se movimentar o tecido dissipa calor, mantendo o corpo aquecido. Na arquitetura, PCM representam uma solução inovadora que poderá contribuir para otimizar o consumo de energia elétrica do edifício (FOKAIDES, KYLILI, & KALOGIROU, 2015). PCM



podem ser utilizados na absorção e dissipação de energia em ambientes internos. Uma das primeiras experiências com este objetivo foi desenvolvida pela físico-químico Maria Telkes, que em parceria com a arquiteta Eleanor Raymond, construíram a primeira residência moderna do mundo aquecida com energia solar, a *Dover Sun House*, de 1948, (Figura 35). O sistema consistia de 4m<sup>2</sup> de sais de Glauber que, quando ventilado, distribuía dentro da casa ar aquecido no inverno e ar frio no verão. Nas últimas décadas, PCM têm sido utilizados em placas de aglomerados, no uso de paredes e coberturas prioritariamente para residências em países de clima frio.



*Fig. 35. Dover Sun House, 1948 - Eng. Maria Telkes  
Primeira residência moderna aquecida por energia solar  
Fonte: libguides.mit.edu*

A utilização de PCM nano-encapsulados, aplicados com o mesmo conceito da microencapsulação utilizado na indústria têxtil, se apresentam de forma promissora na aplicação de envoltórias envidraçadas (FOKAIDES, KYLILI, & KALOGIROU, 2015). A introdução de PCM em vidro transparente para componentes de envoltórias envidraçadas (Figura 36), especialmente para países de clima quente tem sido objeto de diversas pesquisas (FOKAIDES, KYLILI, & KALOGIROU, 2015) conforme apresentado na TABELA 5.

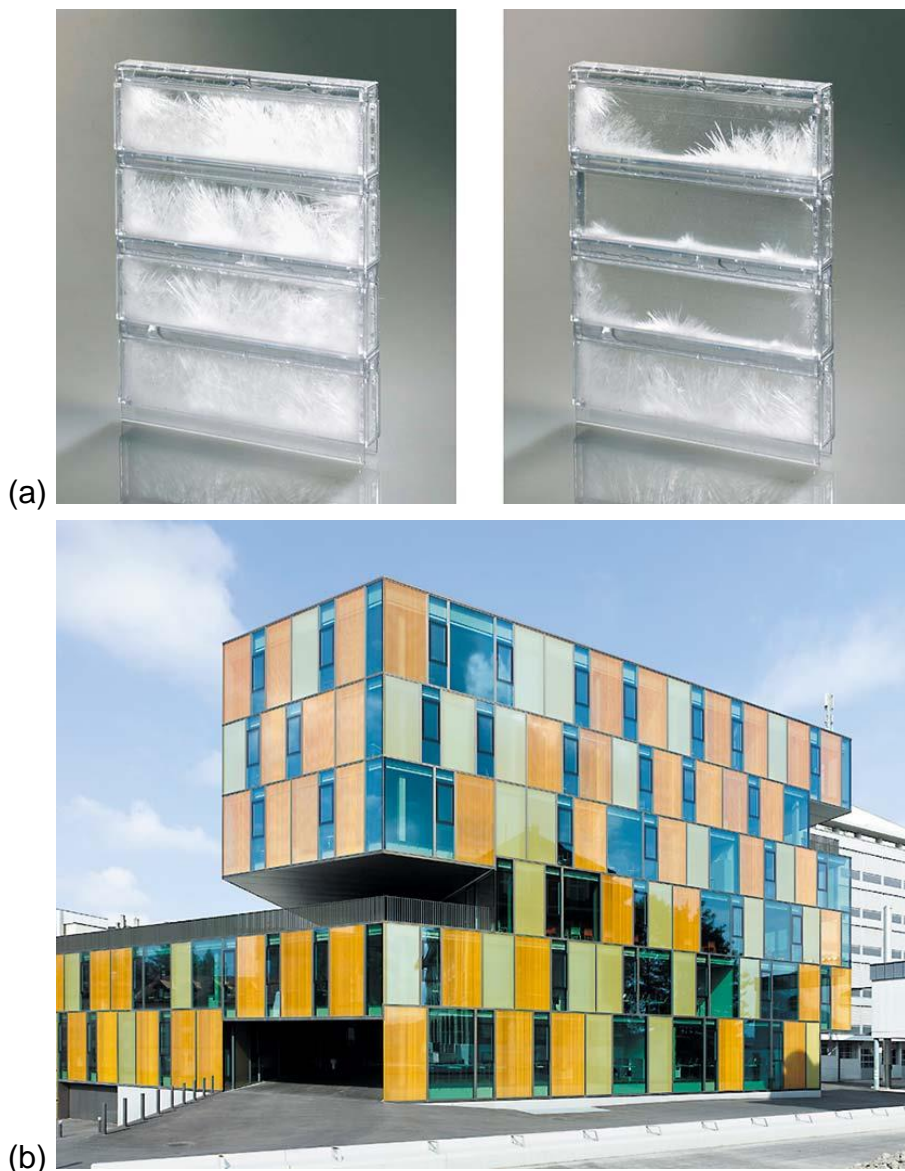


Fig. 36. *Materials que Mudam de Estado - PCM*  
 (a) *PCM em vidro transparente.* (b) *Escola Profissionalizante de Fribourg – Suíça. Butikofer De Oliveira Vernay Arquitetos.*  
 Fonte: [www.glassx.ch](http://www.glassx.ch)

#### 4.6.3. Materiais com Suspensão de Partículas

São materiais ativados eletronicamente podendo mudar seu estado ótico do opaco ao translúcido de forma instantânea e reversível (Figura 37). A chamada *partícula suspensa* consiste na estruturação de um material composto por múltiplas camadas de materiais diferentes. A camada associada com a mudança de estado ótico possui partículas suspensas na forma de agulhas imersas em solução líquida. A camada com as partículas suspensas é contida numa placa tipo sanduiche composto por paineis condutores. Quando a placa não esta

eletrificada as partículas estão posicionadas aleatoriamente absorvendo luz. Quando uma entrada de energia é aplicada as partículas se alinham, permitindo a passagem da luz.



*Fig. 37. Materiais por Suspensão de Partículas*

*Vidros eletrocromáticos - Polymer Dispersed Liquid Crystals (PDLCS)*

*Fonte: <http://smartwindowsco.com/glass/thermochromic-glass/>*

#### **4.7. Compósitos inteligentes que Convertem Energia**

Todos os materiais presentes no ambiente estão rodeados por campos energéticos. Quando um estado de energia de um determinado material é equivalente ao estado de energia do ambiente que o cerca, então este material se caracteriza por estar em estado de equilíbrio. Porém, se o material está em diferente estado de equilíbrio, então podemos dizer que existe conversão de energia (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Materiais que convertem energia envolve a conversão de energia em camadas atômicas (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Por exemplo, quando a radiação solar incide sobre um material fotovoltaico, a radiação emitida pelo fóton é absorvida pelos átomos que compõem o material. Como o estado de energia de um material precisa se manter conservado, o excesso de energia absorvida pelos átomos força-os a se movimentar a uma camada superior. Se estes não conseguirem se manter nesta camada superior, os átomos liberam parte da energia absorvida. Ao usar materiais semicondutores, materiais fotovoltaicos ficam habilitados a capturar o excesso de energia liberada pelos átomos, sendo capazes de produzir energia

elétrica. Todos os materiais, sejam tradicionais ou inteligentes, conservam energia e, como tal, quanto maior a entrada de energia maior o nível de conservação de energia do material. No entanto, para a maioria dos materiais tradicionais, esse acréscimo de energia se manifesta aumentando a energia interna do material, na maioria das vezes sob a forma de calor que é transferido ao ambiente. Materiais inteligentes que convertem energia se diferenciam pela forma de usar a energia interna acumulada de forma funcional, ou seja, dando-lhes um destino em vez de ficar retida no material (ISAAC & ISHAI, 2005).

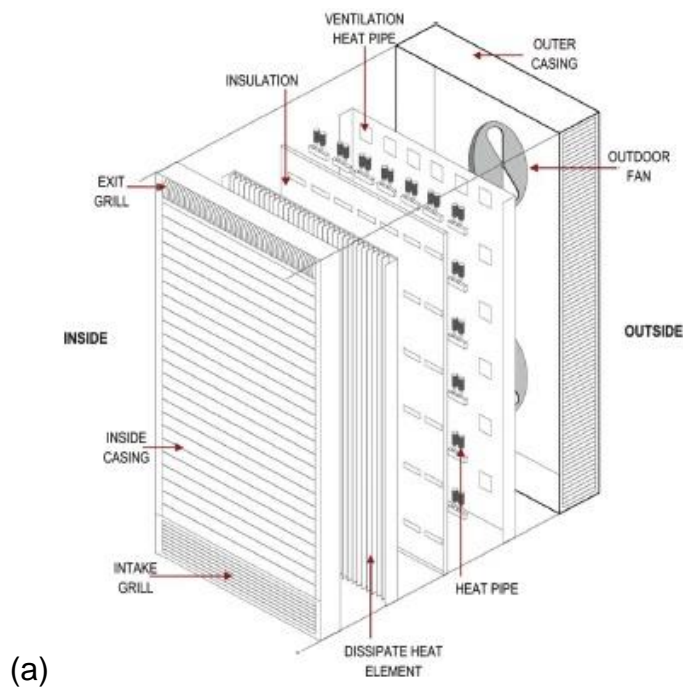
Muitos dos materiais que convertem energia tem a característica de serem bidirecionais; ou seja, a entrada e saída de energia podem ser alterados. Da mesma maneira que, praticamente todos os materiais desta classe são compostos por materiais compósitos (ISAAC & ISHAI, 2005).

#### **4.8. Materiais Semicondutores**

Materiais semicondutores como o silício, possuem a característica de serem, nem bons condutores, nem bons isolantes; porém, quando lhe são adicionadas partículas de impurezas, estes passam a responder por excelentes propriedades elétricas (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Silício é o semicondutor mais usado entre os outros materiais semicondutores, além de um dos materiais com maior abundância no planeta. A condutividade dos materiais semicondutores aumenta com a temperatura; o que, por si, faz destes materiais interessantes para diversas aplicações (IBÁÑEZ-PUY, 2015). Materiais a base de silício são compostos por deposição de camadas com concentrações específicas de impurezas, tornando-se um dispositivo semicondutor. A composição do material é que irá determinar a utilidade das suas propriedades eletrônicas.

Uma grande quantidade de dispositivos eletrônicos está fundamentada em base a tecnologias de semicondutores (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Fototransistores por exemplo, possuem a capacidade de converter radiação de energia luminosa em corrente elétrica. Outro exemplo são os dispositivos

termoelétricos ou Peltier<sup>49</sup> que produzem calor ou frio quando estimulados por uma entrada de energia. Estes materiais possuem grande potencial para aplicação no condicionamento térmico de ambientes construídos. Pesquisas (em andamento) como a realizada pela Universidade de Navarra- Espanha, tem o objetivo de caracterizar um módulo adaptativo para fachadas opacas incorporando células de Peltier (termoelétricas) como um sistema de HVAC (calor, ventilação, ar condicionado), alimentado por energia fotovoltaica (IBÁÑEZ-PUY, 2015). Especificamente, o projeto patenteado com o nome de projeto ThEEn (Figura 38), busca fazer uma análise comparativa com o sistema convencional de HVAC para determinar seu efetivo desempenho energético.



<sup>49</sup> O 'efeito Peltier' foi observado em 1834 por Jean Charles Athanase Peltier. consiste na produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado. EFEITO TERMOELÉTRICO. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2013. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Efeito\\_termoel%C3%A9trico&oldid=36629564](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Efeito_termoel%C3%A9trico&oldid=36629564)>. Acesso em: 12 jul. 2017.

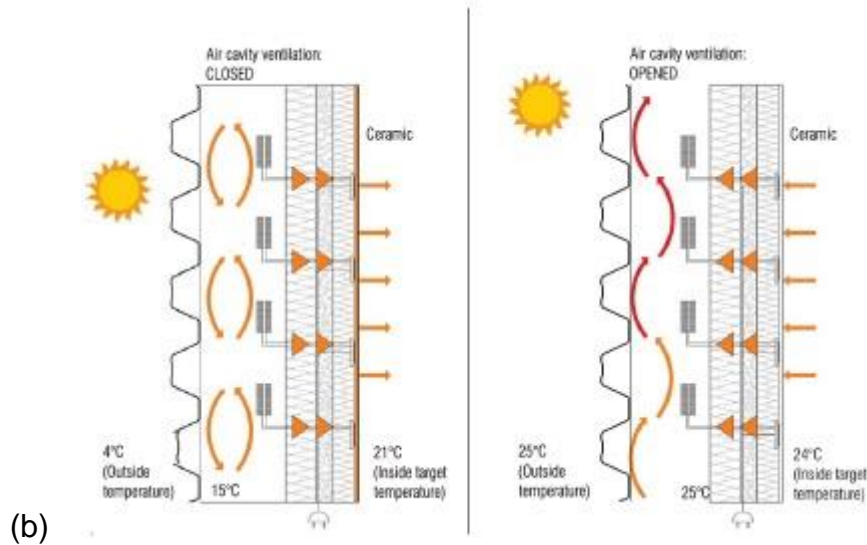


Fig. 38. *Materiais que Convertem Energia*

*Conversor de energia por dispositivos termoelétricos ou Peltier.*

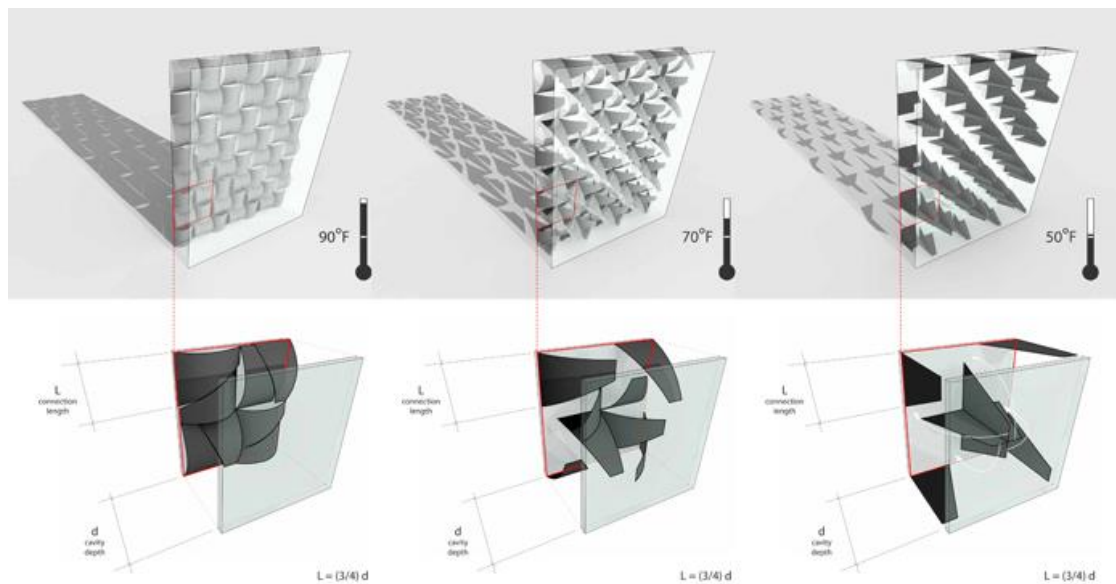
(a) Projeto ThEEen – Ibáñez-Puy et al. (2015) Composição do protótipo do painel termoelétrico (b) corte esquemático do painel termoelétrico mostrando as duas fases de conversão de energia (quente e frio).

Fonte: (IBÁÑEZ-PUY, 2015)

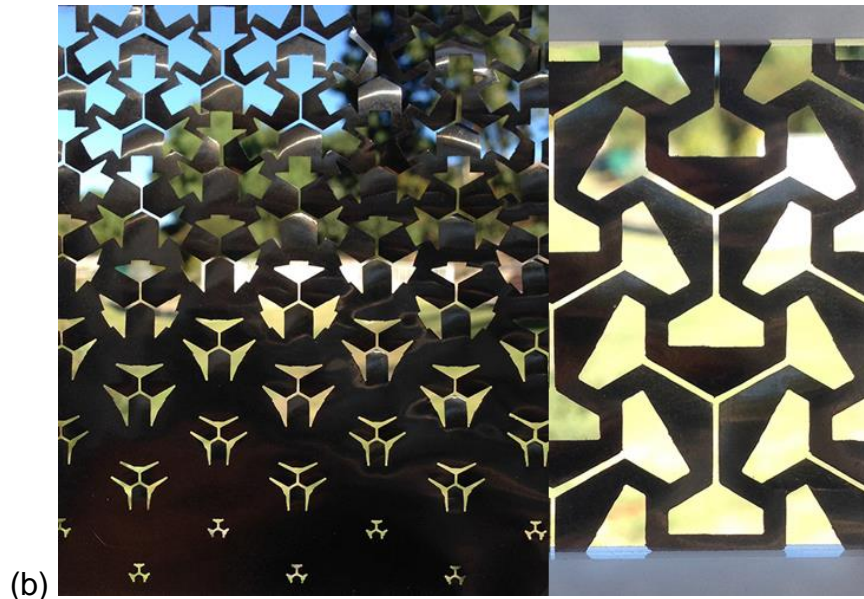
## 4.9. Outros Materiais

Outros materiais como materiais com *memória de forma* se referem a aqueles materiais com habilidade de reverter ou memorizar um estado de forma previamente estabelecido. Isto acontece com alguns tipos específicos de ligas metálicas que apresentam esta propriedade. Esta característica deriva do *estado de transformação* do material (ADDINGTON & SCHODEK, 2005). Por exemplo, ao entrar em contato com alguma forma de calor (do ambiente ou corrente elétrica) o material pode ser moldado numa configuração específica, quando a temperatura baixa o material deforma, voltando ao seu estado original. Na alta de temperatura o material é denominado em estado de austenita. Na baixa temperatura de estado de martensita. As propriedades físicas do material nos estados austenita ou martensita são bem diferentes. O material no estado austenita é rígido e resistente, enquanto que, no estado martensita é maleável e macio. Desde que estes materiais produzem a sua própria força e movimento, a aplicação destes dispositivos são relativamente simples se comprado com outros dispositivos de ação mecânica. A arquiteta Doris Sung desenvolve pesquisas utilizando materiais com memória de forma para aplicação em superfícies dinâmicas. No projeto Glass Panel Shutter System, 2011, (Figura 39)

Sung utiliza um material termobimetal recortado em pequenos pedaços e instalados individualmente dentro um painel formado por um sanduiche de vidro. A utilização do material-sensor responde organicamente em ações de abertura e fechamento. Quando a radiação solar incide na superfície exterior do vidro e aquece a cavidade interior do painel, o bimetal “enrrola” reduzindo a passagem da luz e assim reversivelmente quando a temperatura esfria. A pesquisa de Sung sugere a utilização deste sistema com estratégia a redução de energia usado com sistemas de ar-condicionado. A utilização de um termobimetal com memória de forma é interessante na medida que o sistema não depende de mecanismos eletrônicos para operar o sistema; o que, a princípio, contribuí para reduzir a demanda de energia operacional do sistema. No entanto, ha de se levar em consideração que o painel proposto por Sung é formado de vidro e metal, ou seja, materiais com altos níveis de irradiação térmica; o que, pode levar ao aumento da irradiação térmica dentro do ambiente, consequentemente anulando o propósito de reduzir consumo de energia. Neste sentido, acreditamos o sistema seja mais indicado para controle luminoso.



(a)



*Fig. 39. Materiais com Memória de Forma*  
 (a) *Esquema de funcionamento do Projeto Glass Panel Shutter System (2011). Doris Sung Architect.* (b) *Protótipo do Projeto Glass Panel Shutter System (2011). Doris Sung Architect.*  
 Fonte: *dosu-arch.com*

#### 4.10. Resumo do Capítulo

Materiais monolíticos convencionais podem ser classificados em: metais, cerâmicas e polímeros. Materiais compósitos são a combinação de dois ou mais materiais a partir de um ou mais destes materiais monolíticos. Materiais compósitos se caracterizam por apresentar qualidades otimizadas como: elevada resistência mecânica, redução da necessidade de manutenção, aumento da vida útil, redução de etapas e processo de fabricação e construção, diminuição da necessidade de suporte estrutural, leveza, ótimo comportamento de abração, dilatação, dielétrica. Estes atributos fazem dos materiais compósitos ser entendidos como substitutos dos materiais convencionais, apresentando grande potencial para aplicação na arquitetura e em especial, em fachadas.

Materiais Compósitos Inteligentes -MCI se caracterizam por sua capacidade responsiva, através da alteração ativa ou passiva, das propriedades do material. Ativa, quando o material é estruturado com dispositivos eletromecânicos capazes de sentir estímulos, processar a informação e responder a ações programadas. Passivo, são aqueles que apresentam capacidade responsiva



inerente das suas propriedades físicas, sem necessidade da introdução de dispositivos eletrônicos.

Os MCI podem ser classificados em intrínsecos e extrínsecos. Materiais Intrínsecos são aqueles que transformam uma forma de energia de entrada em outra forma de energia de saída, fazendo isto de forma direta e reversível. Materiais Extrínsecos alteram suas propriedades em resposta direta a estímulos externos do ambiente.

Exemplos de MCI Intrínsecos são: termocromáticos (ex. plásticos que mudam de cor com a temperatura); magnetoreológicos (ex. vidros eletrocromáticos); materiais que mudam de estado (líquido-sólido); materiais com memória de forma (ex. termo bimetais)

Exemplos de MCI Extrínsecos temos: fotovoltaicos; termoelétricos (quando a entrada de corrente elétrica produz temperatura diferencial); piezoelétricos (quando o movimento produz corrente elétrica); fotoluminescente (quando a entrada de energia é convertida em energia visível).

#### **4.11. Resultado do Capítulo**

Materiais compósitos, pelos atributos técnicos e qualitativos que possuem, podem ser considerados como uma nova geração de materiais, devendo substituir os materiais convencionais. Algumas áreas de produção como a indústria aeroespacial, automotiva, naval entre outras já utiliza materiais compósitos na fabricação dos seus produtos. Na arquitetura, materiais compósitos apresentam grande potencial e, apesar da fabricação de alguns produtos por parte da indústria da construção, sua aplicação é limitada.

Podemos considerar que os materiais compósitos convencionais, assim como os materiais compósitos inteligentes ou responsivos, são uma classe de materiais pouco conhecida na prática de arquitetura, conseqüentemente pouco explorada como alternativa para soluções técnicas ou estéticas. Observa-se que, de forma geral, arquitetos especificam produtos fabricados com materiais compósitos de forma normativa, como sendo uma extensão natural dos materiais

convencionais; deixando de explorar o potencial do material para a criação de componentes customizados que possam suprir demandas de projeto.

De certa maneira, explorar o potencial dos materiais compósitos customizando componentes que melhor se adaptem ao projeto, requer mudar a cultura do arquiteto especificador para o de arquiteto criador. Acredita-se que, de forma contrária, a arquitetura se manterá produzindo projetos padronizados atrelados a oferta de produtos fabricados pela indústria da construção, consequentemente produzindo edificações com pouca ou nenhuma identidade climática ou cultural com o lugar.

## **CAPITULO 5 – Amostra Superfícies Dinâmicas Funcionais Cinéticas e por Materiais Compósitos**

Neste capítulo é apresentado uma amostra de Superfícies Dinâmicas Funcionais Cinéticas e de Superfícies Funcionais constituídas por Materiais Compósitos, destacando dados primários sobre padrão dinâmico, função responsiva e material utilizado de cada edificação. Uma tabela geral com as amostras possibilita estabelecer relações comparativas entre os diferentes sistemas e funções responsivos adotados.

### **5.1. Amostra de Superfícies Dinâmicas Funcionais de Padrão Cinético**

REF. 01	2011	PROJETO	MEDIA-TIC
ARQUITETURA	ENRIC RUÍZ GELI + Cloud 9 Architects		<a href="http://www.ruiz-geli.com">www.ruiz-geli.com</a>
PADRÃO CINÉTICO		EXPANSÃO PNEUMÁTICA (INFLÁVEL)	
FUNÇÃO RESPONSIVA		TERMICO – LUMINOSA (Sombreamento)	
CONSUMO ENERGÉTICO		399.0 kWh / m <sup>2</sup> /ano	
MATERIAL		ETFE – Etileno Tetra Fluor Etileno	

O sistema de fachada implantado nas fachadas sudeste e sudoeste e é composta de “almofadas” infláveis com ar e nitrogênio. Cada almofada é constituída de três camadas independentes de ETFE. A primeira camada é transparente, enquanto a segunda e a terceira camadas possuem gramaturas de opacidade variando de uma para a outra. Uma vez que as camadas são infladas, juntam-se criando uma única área opaca (Chilton, 2013). A movimentação do ar governa a reação de toda a fachada, responsivamente integrada a uma rede de sensores de temperatura e luz instalados na fachada. A “ideia” foi criar uma fachada inspirada numa “nuvem”. O resultado foi possível a partir da combinação de partículas de nitrogênio e ar para formar o “colchão” inflável e opaco com comportamento cinético. A resposta cinética é dada pela contração e expansão das almofadas infláveis que reagem no controle da incidência da luz solar e proteção contra a carga térmica. De acordo com relatórios de desempenho energético do Media-TIC, o edifício teria alcançado economia de energia elétrica de 20% com a aplicação deste sistema (Bullivant, 2010).

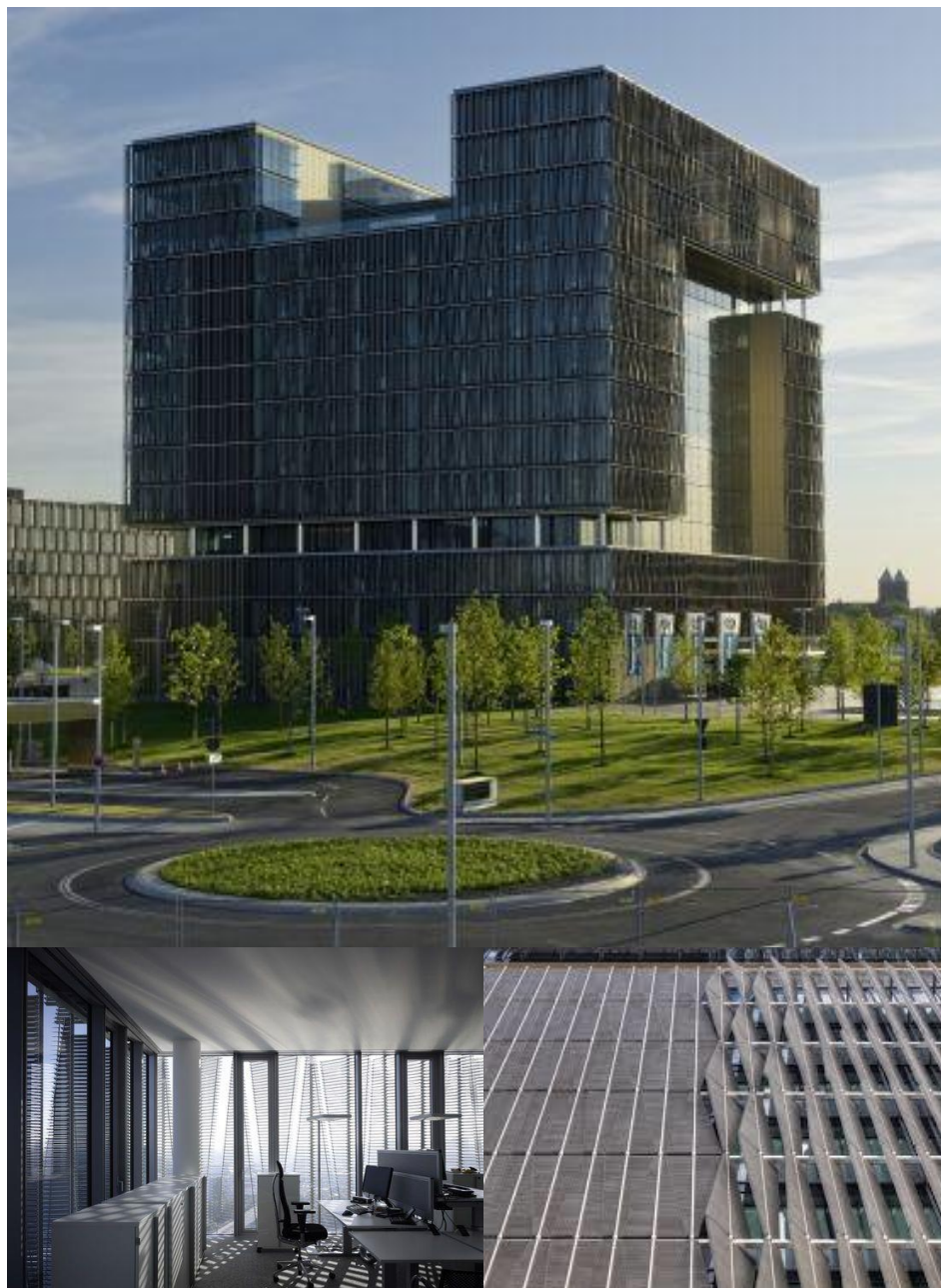


Fonte: [www.ruiz-geli.com](http://www.ruiz-geli.com)

REF. 02	2010	PROJETO	THYSSENKRUPP G1
ARQUITETURA	JSWD Architeketen		<a href="http://www.jswd-architekten.de">www.jswd-architekten.de</a>
PADRÃO CINÉTICO		ROTACIONAL PIVOTANTE	
FUNÇÃO RESPONSIVA		TERMICO – LUMINOSA (Sombreamento)	
CONSUMO ENERGÉTICO		-	
MATERIAL		AÇO INOX	

A sede da ThyssenKrupp utiliza sistema responsivo cinético com função de sombreamento. O sistema é formado por 1280 componentes motorizados que se assemelham a “plumas dinâmicas” confeccionadas em aço inoxidável. O sistema produz a abertura e fechamento dos componentes que se movimentam dinamicamente acompanhando a trajetória do sol. Os componentes pivotam sobre um eixo, podendo ser controlados em conjunto ou individualmente. A função do sistema visa modular a incidência de radiação de luz solar e ganho térmico no interior do

edifício. Além do controle climático, a movimentação dos componentes adquirem formas variadas como triângulos, retângulos e trapézios, criando um resultado dinâmico diferenciado.



Fonte: [www.jswd-architekten.de](http://www.jswd-architekten.de)

REF. 03	2012	PROJETO	ONE OCEAN PAVILLION
ARQUITETURA	SOMA Architecture		<a href="http://www.soma-architecture.com">www.soma-architecture.com</a>
PADRÃO CINÉTICO	DEFORMAÇÃO MATERIAL POR DEFLEXÃO ELÁSTICA A COMPRESSÃO		
FUNÇÃO RESPONSIVA	LUMINOSA (Sombreamento)		
CONSUMO ENERGÉTICO	-		
MATERIAL	FRP – Fibras Poliméricas Reforçadas		

O mecanismo cinético desenvolvido para o One Ocean Pavilhão foi inspirado biomimeticamente no mecanismo de abertura da flor de helicônia, patenteado com o nome de Flectofin. Os pesquisadores do ITKE da Universidade de Stuttgart

observaram o pouso de um pássaro sobre o pistilo da flor, constatando que a pressão do peso do pássaro sobre o pistilo acarretava na deformação do mesmo. Tomando como inspiração este mecanismo de deformação do material, foi desenvolvido um componente vertical que apresenta mecanismo dinâmico de abertura e fechamento em função da pressão aplicada nas extremidades do componente. Cada componente é fixo nos cantos adjacentes (topo-base estrutura), tendo seu movimento acionado pela força de compressão aplicada nas extremidades, o que leva a um encurvamento controlado. A fachada cinética do Pavilhão possui extensão de 140m formada por 108 componentes verticais medindo de 300 a 1400 mm de altura, com 9mm de espessura. Os componentes são moldados com ligeira curvatura, fabricados em FRP. Cada componente pode ser controlado individualmente. O sistema opera abrindo e fechando com completa ausência de dobradiças, dependendo unicamente da deformação do material. A vantagem de substituir dobradiças por deformação elástica do material é fundir todos os elementos mecânicos em um único componente (LIENHARD et. al., 2011).

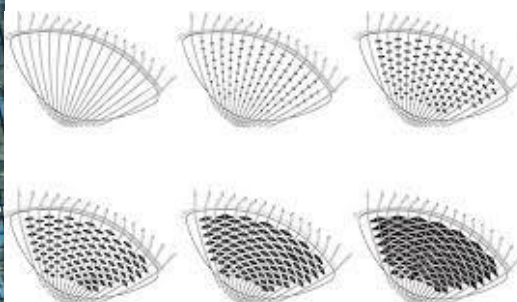




Fonte: Flectofin - ITKE, University of Stuttgart

REF.04	2012	PROJETO	THE GARDENS BY THE BAY
ARQUITETURA	Wilkinson Eyre Architects		<a href="http://www.wilkinsoneyre.com">www.wilkinsoneyre.com</a>
PADRÃO CINÉTICO		ROTACIONAL DE ENROLAR	
FUNÇÃO RESPONSIVA		TÉRMICO - LUMINOSA (Sombreamento)	
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL		PTFE – Poli Tetra Fluor Etileno	

O Jardim possui cobertura de vidro duplo com sistema cinético de sombreamento externo disposto na forma de triângulos. Cada componente de sombreamento funciona como uma persiana de enrolar, moderando a incidência de luz solar e reduzindo a carga térmica sobre o vidro. Sensores instalados na estrutura da cobertura monitora as condições do ambiente. Conforme os níveis de luminosidade aumentam atingindo certo parâmetro, o sistema de sombreamento é ativado. O componente de sombreamento é enrolado sobre a estrutura de um dos lados e puxado por cabos sobre a estrutura oposta, criando um aspecto visual dinâmico que, quando totalmente esticado, se assemelha a gomos de abacaxi. O sistema de sombreamento que se estende ao longo de toda a cobertura é um atrativo para os visitantes do local.



[www.wilkinsoneyre.com](http://www.wilkinsoneyre.com)

REF. 05	2009	PROJETO	ROYAL MELBOURNE INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ARQUITETURA			
PADRÃO CINÉTICO		ROTACIONAL HIDRÁULICO PIVOTANTE	
FUNÇÃO RESPONSIVA		TÉRMICO - LUMINOSA (Sombreamento)	
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL		MADEIRA REVESTIDO DE VIDRO JATEADO	

Originalmente a proposta para a fachada propunha um sistema de controle e de captação de energia solar, como forma de suprir parte do consumo necessário ao funcionamento do edifício. Para isto, cada componente deveria dispor de células fotovoltaicas, o que não chegou a ser implantado por motivos econômicos, utilizado vidro jateado. Os painéis são controlados por computador, que governa o mecanismo de rotação, controlando a rotação dos discos.

De acordo com Davies (apud SHARAIDIN, 2014) o sistema apresenta limitação na sua capacidade cinética nas fachadas leste e oeste, onde o eixo rotacional horizontal restringe a capacidade do sistema de executar funções de controle ambiental. Por exemplo, os



discos estão localizados dentro de cilindros metálicos, não havendo problema para os discos fornecerem sombreamento, pois o cilindro metálico já proporciona sombra, especialmente durante o meio dia (DAVIES, apud SHARADIN, 2014). Por outro lado, de acordo com Davies (apud SHARADIN, 2014) a forma circular do componente cria um problema, pois a superfície não consegue cobrir toda a fachada, o que representa 21% da fachada incapacitada de responder as variações ambientais. Davies (apud SHARADIN, 2014) ainda questiona que o edifício foi proposto atestando que a fachada teria a habilidade de responder no controle da luz natural, entre outras habilidades, tornando um edifício eficiente energeticamente. No entanto, não existem análises pós ocupação para validar a habilidade responsiva da fachada frente as condições ambientais. Outro dado trazido por Davies (apud SHARADIN, 2014) diz respeito a necessidade da instalação de uma terceira pele na fachada oeste, composta por persianas reguláveis, de forma a mitigar o exesivo calor e iluminação incidente nesta face do edifício. A instalação da terceira pele aparenta compensar a inabilidade cinética provocada pela não vedação total da superfície.



Fonte: [www.glassonweb.com](http://www.glassonweb.com)

REF. 06	2006	PROJETO	FORUM CHRIESBACH-EAWAG
ARQUITETURA	Bob Gysin + Partner AG Architekten		<a href="http://www.bgp.ch">www.bgp.ch</a>
PADRÃO CINÉTICO		ROTACIONAL HIDRÁULICO PIVOTANTE	
FUNÇÃO RESPONSIVA		TÉRMICO - LUMINOSA (Sombreamento)	
CONSUMO ENERGÉTICO		26 kWh /m <sup>2</sup> / ano	
MATERIAL		VIDRO SERIGRAFADO	

A fachada do Forum Chriesbach é composta de 1232 painéis de vidro serigrafado na cor azul com pontilhado translúcido. Originalmente o sistema deveria operar responsivamente em tempo real; porém, o barulho dos motores interferia no conforto acústico dos ocupantes, optando-se por automatizar o sistema induzindo os períodos de funcionamento a duas movimentações ao dia. Cada fileira de componentes opera em conjunto, levando até 10 minutos para ter sua orientação reposicionada.



[www.forumchriesbach.eawag.ch](http://www.forumchriesbach.eawag.ch)

REF. 07	2010	PROJETO	KFW Westarkade
ARQUITETURA	Sauerbruch Hutton Architecten		
PADRÃO CINÉTICO	ROTACIONAL		
FUNÇÃO RESPONSIVA	TÉRMICA		
CONSUMO ENERGÉTICO	82 kWh / m <sup>2</sup> / ano		
MATERIAL	VIDRO		

O sistema de fachada é constituído por duas peles de vidro, uma interna e outra externa separados por uma cavidade de aproximadamente 70cm. O duplo envelopamento cria um "anel de pressão" que serve para neutralizar condições de pressão do vento. O fluxo de ar e a pressão dentro do "anel de pressão" são controlados por ajuste dinâmico das aberturas dos componentes instalados na camada externa, enquanto que na camada interna o edifício dispõe de janelas convencionais operáveis manualmente. Os componentes externos são projetados para responder a diferentes combinações de velocidade e direção do vento, temperatura do ambiente e radiação solar, bem como na diferença de pressão entre o lado do barlavento (lado de onde sopra o vento) e o sotavento (lado oposto do qual sopra o vento) do edifício. Este

arranjo aerodinamicamente controlado permite uma ventilação constante de baixa nas duas faces do edifício (barlavento e sotavento). A fachada é projetada para operar em três modos diferentes: (modos do anel de pressão) (1) as abas são fechadas durante o inverno para criar uma zona tampão térmico onde o vento é direcionado ao redor do prédio; (2) abas são abertas, principalmente no lado do barlavento, para entubar o ar na cavidade e ventilar naturalmente os escritórios; (3) abas abertas no verão, o ar não é admitido nos escritórios e os diferenciais de pressão puxam o ar quente através e do espaço da cavidade. Este sistema permite que todos os ambientes sejam ventilados naturalmente por oito meses do ano sem ganho ou perda de calor indesejável. Para o período restante, a ventilação é feita mecanicamente, extraindo o mínimo de ar externo necessário para manter a qualidade do ar interior. O ar fresco é extraído do jardim adjacente através de um duto/canal geotérmico de 30 m de comprimento. O ar flui através de eixos verticais em pisos elevados e depois entra nos ambientes através de difusores de ar instalados ao longo da fachada.



[www.builtotechindia.com](http://www.builtotechindia.com)

## 5.2. Amostra de Superfícies por Materiais Compósitos

REF. 01	2013	PROJETO	Western Australian Institute of Sport
ARQUITETURA	Sandover Pinder + dwp/Suters		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	Swarbrick & Swarbrick		
FUNÇÃO RESPONSIVA	-		
CONSUMO ENERGÉTICO	-		
MATERIAL COMPÓSITO	-		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO	-		

Para este projeto, as dimensões dos painéis tiveram como limite a largura da rodovia (3,5m). Resultando em comprimentos variando de 6.5 a 7.5 m. A moldagem de grandes dimensões favoreceu que a fachada do edifício ficasse pronta em 15 dias, sendo que a construção da

forma levou uma semana para ficar pronta. Em total foram necessários pouco menos de um mês para fabricar e instalar os painéis na fachada.



Fonte : [www.sanpin.com.au](http://www.sanpin.com.au)

REF. 02	2015	PROJETO	Swanston Square Apartments
ARQUITETURA	ARM Architecture		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	Mould CAM		
FUNÇÃO RESPONSIVA	-		
CONSUMO ENERGÉTICO	-		
MATERIAL COMPÓSITO	Foam (core) + laminado compósito não especificado		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO	-		

O edifício de 80 m de altura faz uma homenagem a Willian Barak, líder indigenista australiano. A fachada é formada por 406 painéis, cada uma de forma e tamanho diferentes (o tamanho máximo de cada painel é de 43m, correspondente ao tamanho máquina de CNC. Cada painel tem por base espuma expandida (poliestireno expandido) cortando por CNC. A estrutura praticamente não apresenta juntas, sendo que, as que existem são imperceptíveis. O material compósito utilizado é auto limpante, leve e fácil de instalar e reparar em caso de danos.



Fonte: [www.shapeshell.com.au](http://www.shapeshell.com.au), [armarchitecture.com.au](http://armarchitecture.com.au)

REF. 03	2016	PROJETO	Museu de Arte Moderna de São Francisco
ARQUITETURA	Snohetta Architecture		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	Kreysler & Associados		
FUNÇÃO RESPONSIVA			
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL COMPÓSITO	Fibra de vidro reforçado – FRP (poliéster) + concreto polimérico		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO	Infusão a vácuo (molde aberto)		

Maior superfície compósita dos EEUU (3252m<sup>2</sup>). A superfície é composta por 700 painéis, todos com formas diferentes, de 700x150x6,35mm fabricados com laminado de vidro/poliéster com propriedade de retardação de fogo e não inflamável, com acabamento em concreto polimérico. A utilização de FRP economizou 453,6m<sup>3</sup> de aço estrutural



[www.compositesworld.com](http://www.compositesworld.com)

REF. 04	2013	PROJETO	Rhyl Harbour Bridge
ARQUITETURA	AM Structures		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	Gurit		
FUNÇÃO RESPONSIVA			
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL COMPÓSITO	FRP - Gurit® Corecell™ M, Ampreg 21 resin		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO			

Ponte para pedestres é formada por dois decks espelhados de 30m de comprimento içados por um mastro central. A estrutura, em princípio não requer de manutenção. O consumo de

energia para içar os decks é baixo devido a leveza da estrutura. Cada deck é composto de uma única peça moldada.



Fonte: [www.gurit.com](http://www.gurit.com)

REF. 05	2005	PROJETO	Paradise Street Car Park
ARQUITETURA	AM Structures		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	Gurit		
FUNÇÃO RESPONSIVA			
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL COMPÓSITO	FRP – Fibra de vidro reforçada		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO			

A fachada de 1400m<sup>2</sup> é composta de laminado compósito que permite a passagem da luz. Para permitir a passagem da luz foi necessário criar uma laminação ultra fina. O resultado final foi conseguido usando um software de análise de elementos finitos que proveu da melhor disposição de forma e estrutura para os painéis considerando ação dos ventos e peso próprio do material.



Fonte: [www.gurit.com](http://www.gurit.com)

REF. 06	2017	PROJETO	The Haramain High Speed Rail
ARQUITETURA	Fosters and Partners + Buro Happold		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	Premier Composites Technologies + Gurit		
FUNÇÃO RESPONSIVA	Isolamento Térmico		
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL COMPÓSITO	Ampreg 21FR (laminado epóxi fogo retardador) + Spabond 340LV (adesivo estrutural) + G-PET 75FR LITE (fogo retardador para recobrir a espuma expansiva) + foam		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO	-		

Painéis compósitos serão usados para cobrir um total de 160,000m<sup>2</sup> que compõem os quatro terminais ferroviários. Para a estação a estação Medinah serão utilizados 720 toneladas de material compósito para cobrir 28,000m<sup>2</sup>, representando a maior quantidade de material compósito numa obra a nível mundial





Fonte: [www.gurit.com](http://www.gurit.com)

REF. 08	2011	PROJETO	Riviera Hotel
ARQUITETURA	Vicente Peidró		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	Miraplas SL		
FUNÇÃO RESPONSIVA			
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL COMPÓSITO	Resina isoftálica + fibra de vidro		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO	Light Resin Transfer Molding – LRTM + hand layup		

Fachada soma total de 44,000m<sup>2</sup> cobertos com painéis compósitos. Cada painel com 5mm de espessura esta constituído de três camadas de resina isoftálica e reforço picotado de fibra de vidro



<http://compositesandarchitecture.com>

REF. 09	2014-15	PROJE TO	ICD/ITKE Research Pavilion
ARQUITETURA	ICD Stuttgart – Achim Menges		
CONSTRUTOR COMPÓSITO	ICD		
FUNÇÃO RESPONSIVA			
CONSUMO ENERGÉTICO			
MATERIAL COMPÓSITO	EFTE + Fibras de carbono		
MÉTODO DE FABRICAÇÃO	Deposição Filamentar		

Para a construção deste pavilhão foi utilizado um molde na forma de bolha fabricado em EFTE – Etil Fluor Tetra Flour, pneumáticamente inflada servindo como molde para a aplicação das fibras de carbono pelo método de deposição filamentar.



<http://www.achimmenges.net>

Tabela 4. SDF Amostra Comparativa

	SDF Cinética	SDF Materiais Compósitos	Padrão cinético: Expansão e Contração	Padrão cinético: Rotacional	Padrão cinético: Deformação de material	Padrão cinético: Translação	Função Responsiva: Controle térmico (sombreamento)	Função Responsiva: Controle hídrico	Função Responsiva: Controle ventilação	Função Responsiva: Proteção	Material utilizado: Material convencional	Material utilizado: Material Compósito	Precisa de fonte de energia externa
Pavilhão dos EEUU, Expo 67	X					X	X					X	X
Instituto do Mundo Árabe	X			X		X	X				X		X
Torres Al Bahar	X		X			X	X					X	X
Media-Tic	X		X				X					X	X
Thyssenkrupp G1	X			X			X				X		X
One Ocean Pavillion	X				X		X					X	X
Kiefer Technic	X					X	X				X		X
The Gardens by the Bay	X			X			X					X	X
Embaixada dos Países Nórdicos, Berlim	X			X			X				X		X
Royal Melbourne Instituto de Tecnologia	X			X			X				X		X
Forum Chriesbach-Eawag	X			X			X				X		X
KFW Westarkade	X			X				X			X		X
Syddansk Universitet	X			X			X				X		X
Western Australian Institute of Sport		X										X	
Swanston Square Apartments		X										X	
MOMA São Francisco		X										X	
Marsden Cross Interpretive Center		X										X	
Paradise Street Car Park		X										X	
The Haramain High Speed Rail		X										X	
Riviera Hotel		X										X	
ICD/ITKE Pavilhão 2014-15		X										X	

Fonte: elaboração própria

## 6. Conclusões

A arquitetura pode ser vista como um processo evolutivo e orgânico influenciado por fatores sócio culturais e pelos avanços tecnológicos. Na contemporaneidade, a arquitetura se vê diante de novos desafios. Por um lado, o desafio ecológico diante da eminente crise energética que coloca em risco o equilíbrio do sistema climático global; e, por outro, o desafio tecnológico frente aos novos descobrimentos científicos e tecnológicos da “Era Digital”, que está mudando radicalmente a nossa forma de pensar, produzir e fazer arquitetura. Diante deste contexto, a produção de arquitetura contemporânea atravessa por um período de RE (pensar, idealizar, formatar) conceitos e práticas de projeto.

Tradicionalmente a prática convencional de projeto contemporâneo tem origem na Revolução Industrial, desde então a arquitetura tornou-se “refém” da indústria, criando composições arquitetônicas a “mercê” da produção de materiais padronizados fabricados em larga escala, podendo ser aplicados de forma genérica, independentemente do contexto climático do lugar. Diante deste contexto, o papel mediador da fachada, estabelecendo um “diálogo” ambiental entre o interior e as variáveis climáticas do exterior tem sido, ao longo do tempo, diminuída a uma função exclusiva de delimitação espacial e barreira física com o ambiente externo.

Contudo, a partir da crise energética dos anos 70, um novo discurso visa estabelecer atributos adaptativos e funcionais à fachada, de forma a contribuir na otimização do desempenho energético e ambiental do edifício, integrando-se de forma mais harmoniosa ao meio ambiente. Projetar a fachada ajustando seu desempenho a uma condição ambiental remete, de certa maneira, a um “futuro vernacular” de produção de arquitetura.

A arquitetura anterior a mecanização dos processos de manufatura buscava a adaptabilidade climática da obra construída através do desempenho do material. Para isto, o arquiteto-artesão possuía uma relação intrínseca da forma a ser construída com o material a ser utilizado.

Adaptabilidade climática na arquitetura é possível de ser alcançada a partir de estratégias passivas ou ativas. Estratégias passivas tem sido largamente

aplicadas pela arquitetura desde a sua origem até os anos de 1950, quando a popularização e acessibilidade a equipamentos de climatização artificial passaram a suprir a necessidade de projetar “tirando proveito do clima”. Nas últimas décadas, avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novos materiais tem possibilitado o surgimento de Superfícies Dinâmicas Funcionais, como estratégia ativa com objetivo de criar fachadas com capacidade responsiva. O termo responsivo classifica os sistemas com capacidade de interagir funcionalmente com o ambiente circunvizinho.

Tecnologias responsivas estão fundamentadas no conceito da retroalimentação sistêmica proposto pela cibernética, ou seja, trata-se de sistemas de fachada que gerem sistemas de controle. A primeira experiência na aplicação de uma fachada dinâmica responsiva foi proposta por Buckminster Fuller no ano de 1967, no Pavilhão dos EEUU, na Expo67. Fuller apresentou um sistema cinético auto-regulável para controle da condição ambiental do espaço interno da sua cúpula geodésica. Porém a tecnologia disponível à época não foi suficientemente para o efetivo funcionamento do sistema. Uma década depois, Jean Nouvell torna possível a implementação da primeira fachada cinética responsiva do mundo, no edifício do Instituto do Mundo Árabe de Paris, em 1980. Nouvell desenvolveu um sistema responsivo criando as condições de fronteira ativa e controlando os níveis de intensidade luminosa no interior do ambiente construído. No entanto, a complexidade do mecanismo apresentou problemas operacionais, obtando-se por congelar o sistema. De acordo com pesquisadores como Sharaidin (2014), estes exemplos servem de alerta para os cuidados e riscos que devem ser levados em consideração na aplicação de sistemas responsivos. Ainda, há de se levar em consideração que tecnologias ativas estão sujeitas a desgaste mecânico, defasagem tecnológica, perda de desempenho ao longo do tempo e propensa a defeitos de funcionamento. Entretanto aprimoramentos e o surgimento de novas e inovadoras tecnologias deverão, cada vez mais, potencializar o uso de tecnologias responsivas para fachadas conforme é possível testemunhar na última década.

Por outro lado, o desenvolvimento de novas materialidades e técnicas de fabricação de materiais abrem novos caminhos na busca por estratégias adaptativas para fachadas. Entre estas, a introdução do material compósito

apresenta-se com grande potencial para a arquitetura, projetando-se como substituto “natural” dos materiais convencionais.

Material compósito são fabricados de forma seletiva, otimizando seu desempenho funcional e podendo responder por uma ou múltiplas funções na mesma estrutura material. Na contemporaneidade, a indústria da construção vem comercializando produtos fabricados utilizando materiais compósitos. Não entanto, a forma como a indústria e os arquitetos vem assimilando o potencial dos materiais compósitos, torna-os uma extensão lógica dos materiais convencionais. A introdução dos materiais compósitos e os materiais compósitos inteligentes fabricados de forma customizada e otimizada abre caminho para repensar a relação do arquiteto com o material, tornando o arquiteto um ator no processo de criação e desenvolvimento de novas materialidades, libertando nos da cultura do arquiteto como especificador de materiais. Isto implica adaptar a prática de projeto e o ensino de arquitetura a um modelo de trabalho interdisciplinar, principalmente de áreas de conhecimento como engenharia e ciência dos materiais, ciências biológicas, ciências da computação e eletrônica.

Em vista das limitações encontradas ao longo do curso investigativo como a carência de referências bibliográficas disponíveis no mercado editorial brasileiro, o fato de não existir nenhuma edificação no Brasil que disponha de tecnologia responsiva de fachada, de forma a ter um estudo de caso mais acessível para ser estudado, esta pesquisa prevê trabalhos futuros, pretendendo-se:

- Obter uma amostra de dados de edifícios que tenham instalado SDF's de padrão cinético indicando o desempenho operacional e energético.
- Aprofundar o estudo dos materiais compósitos convencionais e os materiais compósitos inteligentes, métodos de fabricação e potencial para a criação de fachadas adaptativas e responsivas.
- Introduzir o estudo sobre os materiais mediados e biomateriais.

## 7. Referências Bibliográficas

Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart Materials and New Technologies*. Oxford: Architectural Press.

Alvarez, J.M., Rocha, J.F., Machado, S.R. (2008). Bulliform Cells in *Loudetiopsis chrysothrix* (Nees) Conert and *Tristachya leiostachya* Nees (Poaceae): Structure in Relation to Function. *International Journal – Brazilian Archives of Biology and Technology*. Vol.51, nº1. (pp.113-119).

Arantes, B., Labaki, L. (2016). Fachadas Sazonalmente Adaptáveis: Mapeamento Sistêmico da Literatura. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. (pp. 469-480). São Paulo: Entac.

Arat, Y., Uysal, M. (2012). Traditional building formations of apiaries in the Antalya province of Turkey. *Prostor* 2[44]. (pp. 340-351).

Ashby; Johnson. (2010). *Materials and Design*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.

Attmann, O. (2012). Architecture as a Science: Integrating macroelectronics technology in buildings. *International journal of architecture, engineering and construction*. Vol.1, nº2. (pp. 96-102).

Bakarich, S.E., Gorkin, R., Panhuis, M., Spinks, G.M. (2015). 4D Printing with Mechanically Robust, Thermally Actuating Hydrogels. *Macromol. Rapid Commun*. Vol. 36. (pp. 1211-1217).

Barber D. Le Corbusier, the brise-soleil, and the socio-climatic project of modern architecture, 1929-1963. 2012. Disponível em: <https://issuu.com/thresholds/docs/thresholds40socio/28>.

Bensaude, B. (15 de novembro de 2001). <http://authors.library.caltech.edu>. Fonte: CaltechAUTHORS: [http://authors.library.caltech.edu/5456/l/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Bernadettespa\\_perforhrst.htm](http://authors.library.caltech.edu/5456/l/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Bernadettespa_perforhrst.htm)

Benyus, J. (1997). *Biomimicry*. Nova York: Harper Perennial.

Bruna G., Fretin D., Maia R.. Do muxarabi ao brise-soleil: A arquitetura brasileira ajusta-se ao clima. *Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo*. São Paulo, SP. Universidade Mackenzie. 2007. Disponível em: <http://mackenzie.com.br>.

Caya, R., Neto, J. (2016). Personalização, “Customização”, Adaptabilidade e Adaptatividade. WTA 2016 – X Workshop de Tecnologia Adaptativa. (pp. 52-59).

Cueco, J. (2010). *Le Corbusier, Arquitectura y Técnica: El Centrosoyus de Moscú, 1928-1936*. Fonte: *Cadernos de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo*: [www.mackenzie.br/dhtm/seer/index.php/cpgau](http://www.mackenzie.br/dhtm/seer/index.php/cpgau)



Cunha E. Brise-soleil: da estética à eficiência energética. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br>.

Daniel, Isaac M., Ori Ishai (2005). Engineering mechanics of composite materials. 2nd ed. New York, NY. Oxford University Press

Doubrovski, E.L., Tsai, E.Y., Dikovsky, D., Geraedts, J.M.P., Herr, H., Oxman, N. (2015). Voxel-based fabrication through material property mapping: A design method for bitmap printing. *Computer-Aided Design* 60. (pp. 3-13).

Favoino, F., Goia, F., Perino, M., Serra, V. (2014). Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifuncional façade module. *Energy and Buildings*. 68. (pp. 647-659).

Favoino, F., Jin, Q., Overend, M. (2014). Towards an ideal adaptive glazed façade for office buildings. *Energy Procedia* 62. (pp. 289-298).

Fokaides, P., Kylili, A., Kalogirou, S. (2 de 4 de 2015). Phase change materials (PCMs) integrated into transparent. *Mater Renew Sustain Energy (2015) 4:6*, pp. 1-13.

Ghadijali, J.H. (1959). Effect of Climate on Architectural Expression. In Seminar On Architecture, Edited by Achyut P. Kanvinde. New Delhi: Lalit Kala Akademi.

Goia, F., Perino, M., Serra, V. (2014). Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. *Solar Energy*. 100. (pp. 217-233).

Gruber, P., Gosztanyi, S. (2010). Skin in architecture: towards bioinspired facades. *Design and Nature* V. (pp.503-513).

Hart, K. (25 de 07 de 2017). <http://kevinrhart.com>. Fonte: <http://kevinrhart.com>: <http://kevinrhart.com/research/>

Hayles, K. (1999). How We Became Posthuman, Virtual Bodies in Cybernetics, Literature and Informatics. Chicago: Univeristy of Chicago.

Heusler, W. (2015). Latest Developments in Buildings Skins. A new holistic approach. Proceedings of the International Conference on Building Envelope Design and Technology. (pp. 1-10)

Hammad, F., Abu-Hijleh, B. (2010). The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building. *Energy and Buildings*. 42. (pp. 1888-1895).

Henriques, G. (2015). Sitemas responsivos: relevância, estado da arte e desenvolvimentos. SIGraDi 2015 – Project Information for Interaction. Pereira, A, Pupo, R (org.) XIX Congresso da Sociedade Ibero-Americana de Gráfica Digital – Volume 1 (pp. 200-206). Santa Catarina, Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina.

- Holbrook, C. T., Clark, R. M., Overson, R. P., Moore, D., Penick, C. A., Smith, A. A. (2010). Social insects inspire human design. *Biol. Lett.* 6. (pp. 431-433).
- Huh, D., Torisawa, Y., Hamilton, G.A., Kim, H.J., Ingber, D.E. (2012). Microengineered physiological biomimicry: Organs-on-Chips. *Lab Chip*, 12. (pp. 2156-2164).
- Isaac; Ishai. (2005). *Engineering mechanics of composite materials. 2nd Ed.* New York: Oxford University Press.
- Ibáñez-Puy, M., Fernández, J. A. S., Martín-Gómez, C., Vidaurre-Arbizu, M. (2015). Development and construction of a thermoelectric active facade module. *Journal of Facade Design and Engineering*. 3. (pp. 15-25).
- IEA ECBCS Annex 44. (2009). Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings Expert Guide – Part 1 Responsive Building Concepts Editor: Per Heiselberg, Aalborg University, Denmark.
- Kirkegaard H., Parigi D. (2012). ‘On Control Strategies for Responsive Architectural Structures: Proceedings: from spatial structures to space structures’. The International Association for Shell and Spatial Structures. In IASSAPCS.
- Kirkland, D. (2002). Extending nature. *Design and Nature*. ISBN 1-85312-901-1.
- Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J.C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M., Oxman, N. (2015). Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*. Vol.2, N°3. (pp. 92-105).
- Klooster, T. (2009). *Smart Surfaces and their application in architecture and design*. Basel. Boston. Berlin: Birkhäuser.
- Klüppel G. (2009). *A casa e o clima: (Trans) Formações da arquitetura habitacional no Brasil (Século XII – século XIX)*. Salvador, BA. Universidade Federal da Bahia.
- Knaack, U. (2014). Potential for innovative massive building envelope systems – Scenario development towards integrated active systems. *Journal of Façade Design and Engineering* 2. (pp. 255-268).
- Lloret, E., Shahab, A.R., Linus, M., Flatt, R.J., Gramazio, F., Kohler, M., Langenbert, S. (2015). Complex concrete structures merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computed-Aided Design*. Vol 60. (pp. 40-49).
- Loonen R., Trčka D., Cóstola D., Hensen, J. (2013). Climate adaptive buildings shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25. (pp. 483-493).
- López, M., Rubio, R., Martín, S., Croxford, B., Jackson, R. (2015). Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles. *Journal of Façade Design and Engineering*. Vol.3. (pp. 27-38).

- Mataric, M. (2014). *Introdução a Robótica*. São Paulo: Editora Unesp/Blucher.
- Mayr, E. (2004). *What makes Biology unique?* New York: Cambridge Press.
- Menges; Hensel. (2004). *Differentiation and Performance: Multi-Performance Architectures and Modulated Environments*. Londres: AA-School.
- Maharana, T., Sutar, A. K., NATH, N., Routaray, A., Negi, Y. S., Mohanty, B. (2014). Polytheretherketone (PEEK) Membrane for Fuel Cell Applications. *Advanced Energy Materials*. (pp. 433-464).
- Mazzolai, B., Beccai, L., Mattoli, V. (2014). Plants as model in biomimetic and biorobotics: new perspectives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. Vol.2, Article.1. (pp.1-5).
- Mazzoleni, I. (2013). *Architecture Follows Nature. Biomimetic Principles for Innovative Design*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Moloney, J. (2011). *Designing Kinetics For Architectural Facades: State Change*. New York, NY: Routledge.
- Nóbrega, C.M. (2006). *Arte Robótica: Criação de vida artificial para uma sociedade pós-biológica*. Brasília, DF: IdA-PPGArtes - Universidade de Brasília.
- Nóbrega, C.M. (2011). *Há\_bit. Tratado superficial de arquitetura híbrida*. Brasília, DF: IdA-PPGArtes - Universidade de Brasília.
- Muñoz, H. (2015). *Las Ventanas de Le Corbusier (Del Hueco al Espacio)*. Valencia, Espanha.
- Naboni, R. (9-11 de Novembro de 2016). Embedding auxetic properties in designing active-bending gridshells. *SIGraDi 2016, XX Congresso Iberoamericano da Sociedade de Computação Gráfica*, pp. 720-726.
- Neves, F. M. (2015). *Bíos e Techné. Estudo sobre a construção do sistemas de biotecnologia periférico*. Brasília: Universidade de Brasília.
- Oxman, N. (2010). *Material-based Design Computation*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Oxman, N. *Material Ecology. Computer-Aided Design 60 – Editorial*. (pp.1-2).
- Park, D., Beachthold, M. (data). Designing Biologically-inspired smart building systems: Processes and guidelines. *International journal of architectural computing*. Issue 4, Vol. 11. (pp. 437-463).
- Pei, E. (2014). 4D printing – revolution or fad?. *Assembly Automation 34/2*. (pp. 123-127).
- Pinto, H., Queiroz N., Cardoso, A., Sousa, J. (2015). O desenvolvimento de elementos de proteção de fachada responsivos: explorando o cobogó. *SIGraDi 2015 – Project Information for Interaction*. Pereira, A, Pupo, R (org.) XIX

Congresso da Sociedade Ibero-Americana de Gráfica Digital – Vol. 1. (pp. 519-527). Santa Catarina, Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina.

Poppinga, S., Masselter, T., Lienhard, J., Schleicher, S., Knippers, J., Speck, T. (2010). Plant movements as concept generators for deployable systems in architecture. *Design and Nature* V. (pp. 403-409).

Reichert, S., Menges, A., Correa, D. (2015). Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design* 60. (pp. 50-69).

Royo, D. J., Soldevila, L. M., Kayser, M., Oxman, N. (2015). Modelling Behaviour for Distributed Additive Manufacturing. *DMSC Design Modelling Symposium Copenhagen 2015*.

Royo, D. J., Soldevila, L. M., Oxman, N. (2014). Water-based Robotic Fabrication: Large-Scale Additive Manufacturing of Functionally-Graded Hydrogel Composites via Multi-Chamber Extrusion. *3D Printing and Additive Manufacturing 2014.1* (pp. 141-151).

Royo, D. J., Soldevila, L. M., Oxman, N. (2015). Flow-based Fabrication: An Integrated Computational Workflow for Design and Digital Additive Manufacturing of Multifunctional Heterogeneously Structured Objects. *Computer-Aided Design Journal*, Elsevier 2015. Special Issue on Geometric and Physical Modeling for Additive Manufacturing.

Royo, D. J., Soldevila, L. M., Oxman, N. (2015). Physical Feedback in Fabrication Information Modeling (FIM): Analysis and discussion of exemplar cases across Media, Disciplines and Scales. *eCAADe 2015 – 33<sup>rd</sup> Annual Conference – REAL TIME: Extending the Reach of Computation*.

Rudofsky, B. (1964). *Architecture Without Architects: A short introduction to non-pedigreed architecture*. Nova York: Moma.

Salim, N.A.A., Mydin, M.A.O, Ulang, N.H.Md. (2014). Biomimetic Architecture in Building Envelope Maintenance. *E3S Web Conferences* 3, (pp.1-7).

Seidel, R., Thielen, M., Schmitt, C., Bührig-Polaczek, A., Fleck, C., Speck, T. (2013). Fruit wall and nut shells as an inspiration for the design of bio-inspired impact-resistant hierarchically structured materials. *Design & Nature and Ecodynamics*. Vol. 8, n°2. (pp. 172-179).

Silva, N. (23 de Novembro de 2015). Digital Design of High-Rise Buildings with Tessellation and Mapping. *SIGRADI [Proceedings of the 19th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - vol. 1 - ISBN: 978-85-8039-135-0]*, pp. 414-419.

Sharaidin, K. (2014). Kinetic Facades: Towards design for Environmental Performance. Spatial Information Architecture Laboratory (SIAL) School of Architecture and Design RMIT University.

Smee-Odling, J., Turner, S. J. (2011). Niche Construction Theory and Human Architecture. *Biol Theory* (2011) 6. (pp. 283-289).

Soldevila, L.M., Duro-Royo, J., Lizardo, D., Kayser, M., Patrick, W., Sharma, S., Keating, S., Klein, J., Inamura, C., Oxman, N. (2015). Designing the Ocean Pavilion: Biomaterial Templating of Structural, Manufacturing, and Environmental Performance. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). Symposium 2015, Amsterdam – Future Visions.*

Soldevila, L.M., Duro-Royo, J., Oxman, N. (2015). Form Follows Flow: A Material-driven Computational Workflow For Digital Fabrication of Large-Scale Hierarchically Structured Objects. *ACADIA 2015 – Computational Ecologies: Design in the Anthropocene.*

Soldevila, L.M., Oxman, N. (2015). Water-based Engineering & Fabrication: Large-Scale Additive Manufacturing of Biomaterials. *Materials Research Society MRS 2015 – Symposium NN. Adaptive Architecture and Programmable Matter: Next Generation Building Skins and Systems from Nano to Macro.*

Speck, O., Speck, T. (2008). Process sequences in biomimetic research. *Design and Nature IV.* (pp.3-11).

Squarzoni, P. (2012). *Climate Changed. A Personal Journey Through the Science.* New York, NY: Abrams.

Strauß, H. (2013). *AM Envelope: The potential of Additive Manufacturing for façade construction.* Delft, NL: Delft University of Technology, Faculty of Architecture.

TEIXEIRA, R. (fev de 2017). <http://www.vitruvius.com.br>. Fonte: Vitruvius: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/17.201/6431>

Turbiano, F. (edited by). (2013). *Design and Construction of High-Performance Homes. Building Envelopes, Renewable Energies and Integrated Practice.* New York, NY: Routledge.

Turner, J. S., Soar, R. (2008). *Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building.* First International Conference on Industrialized Construction (I3CON). Loughborough University.

Urquiza, R.S. (2010). Parametric Performative Systems: Designing a Bioclimatic Responsive Skin. *International Journal of Architectural Computing.* Issue 3. Vol. 8. (pp. 279-300).

Voss, K., Musall, E. (2013). *Net Zero Energy Buildings. International Projects of Carbon Neutrality in Buildings.* Munich: Detail.

Warwick, R., & WILLIAMS, P. (1979). *Gray Anatomia.* Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A.

Wassouf, M. (2014). *Passivhaus. Da casa passiva à norma. La arquitetura passiva em climas quentes*. Barcelona: GG.

Weiner, R. (1948). *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press.

Zari, M. P. (2009). An architectural love of the living: bio-inspired design in the pursuit of ecological regeneration and psychological wellbeing. *Sustainable Development and Planning IV*, Vol. 1 (pp. 293-302).

Zhou, Y., Huang, W.M., Kang, S.F., Wu, X.L., Lu, H.B., Fu, J., Cui, H. (2015). From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology* 29(10). (pp. 4281-4288).