



1. Este artigo se baseia em pesquisa desenvolvida no âmbito do Programa de Voluntários de Iniciação Científica/ PIVIC da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

2. Arquiteta pela Escola de Minas da UFOP. E-mail: clarafonteboa@gmail.com.

3. Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), arquiteto e mestre em Teoria e Prática do Projeto pela Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFOP. E-mail: clecio@em.ufop.br.

**DOI: 10.5752/P.2316-1752.2016v23n32p30**

# **INVESTIGAÇÃO DE GEOMETRIAS APLICÁVEIS À RESPONSABILIDADE EM ARQUITETURA<sup>1</sup>**

*GEOMETRIES RESEARCH APPLICABLE TO A RESPONSIVE ARCHITECTURE*

*INVESTIGACIÓN DE GEOMETRÍAS APLICABLES A UNA ARQUITECTURA RESPONSIVA*

Clara Rabelo Maia Fonte Boa<sup>2</sup>  
Clécio Magalhães do Vale<sup>3</sup>

## **Resumo**

Elementos arquitetônicos como vedações e coberturas podem ter características geométricas que lhes permitam sofrer alterações em resposta a demandas de conforto ambiental e permeabilidade espacial. Esse atributo de responsividade pode ser alcançado mediante propriedades geométricas específicas aliadas a ferramentas computacionais e dispositivos de controle e automação. Investigamos tais geometrias a partir de técnicas de dobraduras tridimensionais. Concluímos que geometrias modulares aptas a alterações formais impactam o campo do projeto arquitetônico, apontando para inovações tecnológicas e plásticas.

**Palavras-chave:** Dobradura. Controle e automação. Sustentabilidade.

## **Abstract**

Architectural elements such as **panels** and **roofs** may have geometric characteristics that allow them to be changed in response to demands of environmental comfort and space permeability. This responsiveness attribute can be achieved by specific geometric properties combined with computational tools, and control and automation devices. We investigate such geometries from techniques of three-dimensional folding. We concluded that modular geometries able to formal changes impact the architectural design field, pointing to technological and plastic innovations.

**Keywords:** Folding. Control and automation. Sustainability.

## **Resumen**

Los elementos arquitectónicos tales como paneles y techos pueden tener características geométricas que les permiten cambiar en respuesta a las demandas de confort ambiental y la permeabilidad del espacio. Este atributo de respuesta se puede lograr por las propiedades geométricas específicas combinadas con herramientas computacionales y dispositivos de control y automatización. Investigamos estas geometrías a partir de técnicas de plegado tridimensional. Llegamos a la conclusión de que las geometrías modulares capaces de cambios formales afectan el campo del proyecto arquitectónico, apuntando a innovaciones tecnológicas y plásticas.

**Palabras clave:** Plegables. Control y automatización. Sostenibilidad.

## Introdução

O conforto ambiental relaciona-se com a permeabilidade dos edifícios: as soluções de projeto devem permitir a entrada de uma quantidade ideal de insolação e ventilação, ao mesmo tempo em que o espaço interno permaneça com o necessário resguardo quanto ao seu entorno, estabelecendo situações desejáveis de privacidade e exposição pública.

Considerando o dinamismo de tais parâmetros, esta pesquisa propõe investigar objetos que sejam capazes de atualizar sua morfologia de acordo com requisitos circunstanciais. Dessa forma, ao se perceberem o usuário e o meio ambiente como agentes reguladores do objeto arquitetônico, um novo grau de complexidade passa a fazer parte do processo de produção e desempenho do objeto. Este deixa de ser passivo e estático e transforma-se em um “sistema responsivo, que reage a estímulos ambientais”, e passa a interagir ativamente com o meio e usuário (DAVIS; SALIM; BURRY, 2011).

Embora exista uma relação entre a máquina e a arquitetura desde Le Corbusier e sua “máquina de morar”, o objeto arquitetônico não é visto como objeto dinâmico, mas sim como objeto portador de aparatos móveis, como mostra a FIG. 1.

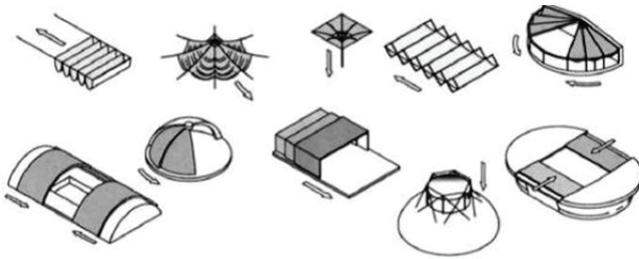


Figura 1 • Aparatos móveis comumente empregados na Arquitetura

Fonte: Kirkegaard; Parigi, 2012.

Ao entender a cinética como parte inerente ao objeto arquitetônico, abre-se, porém, a possibilidade de se pensar em geometrias nas quais o movimento é intrínseco à sua estrutura. O conceito de morfogênese, num contexto físico-digital, fundamenta essa concepção arquitetônica que considera o potencial de responsividade da forma.

O conceito de responsividade arquitetônica emergiu do trabalho de Nicholas Negroponte e do Architecture Machine Group, atuantes no Massachusetts Institute of Technology (MIT), entre o final dos anos 1960 e meados dos anos 1970. Negroponte cogita, em um futuro distante, o surgimento de edifícios vivos, máquinas inteligentes capazes de responder imediatamente às suas necessidades e à de seus habitantes (NEGROPONTE, 1975).

O termo ambiente responsivo se refere a ambientes físicos reforçados por dispositivos de entrada (por exemplo, sensores ou câmeras) e dispositivos de saída (por exemplo, *displays*, luzes, motores). Os primeiros capturam os estímulos do ambiente, enquanto os segundos executam ações sobre o ambiente a partir de comandos predefinidos. Em ambientes físicos habitáveis, a tecnologia multimídia vem abrindo portas para novos modos de

contemplar a função espacial, refletindo não somente como as pessoas interagem e experimentam o espaço, mas também como o espaço pode beneficiar as pessoas, sensibilizando-as e interagindo com elas (BULLIVANT, 2006).

O trabalho aqui apresentado tem como objetivos: a) investigar atributos formais (geometria e cinética) necessários aos elementos arquitetônicos capazes de lhes conferir características de responsividade; b) avaliar uma plataforma mecatrônica, aplicável a elementos arquitetônicos, com potencial para automatizar suas propriedades de responsividade; e c) avaliar, experimentalmente, um protótipo de um elemento arquitetônico responsivo, capaz de interagir com o meio a sua volta, mediante leitura das informações climáticas.

## Arquitetura responsiva

Com o crescente interesse pela arquitetura sustentável, concomitantemente, pensa-se na necessidade de as edificações adaptarem-se às transformações e mutações climáticas, ambientais e sociais do espaço contemporâneo. É pertinente, portanto, uma revisão na concepção e tratamento que se dá aos elementos que potencializam a mutabilidade do espaço arquitetônico. Em se tratando de fachadas, por exemplo, este invólucro do edifício estabelece situações que interferem na ambiência dos espaços e na relação entre eles. Cabe, então, repensar os paradigmas geradores das fachadas dos edifícios ao concebê-las não apenas como superfície compositiva formal, mas também como mecanismo e equipamento regulador da relação e do diálogo entre diferentes ambientes, contemplando, também, o dinamismo e a flexibilidade necessários aos usos e ambiências decorrentes dos espaços construídos. À arquitetura com tais características atribui-se a denominação de Arquitetura Responsiva: um “sistema arquitetônico capaz de provocar transformações em seu entorno” (MEYBOOM; WOJTOWICZ; JOHNSON, 2010).

Os modelos paramétricos, disponibilizados pelo incremento da computação, podem ajustar, automaticamente, modelos geométricos em resposta a um fornecimento de dados externos. Contudo essa abordagem baseada na geração de sólidos produzidos mediante metodologias de projeto digital emprega dados estáticos para analisar um modelo geométrico também estático, imóvel. Ao se associar os modelos paramétricos à mecatrônica (a qual, por exemplo, tem aplicação comum em recursos automatizados, como abrir e fechar janelas ou portas, orientado por informações sobre temperatura do ar ou outras condições meteorológicas), o projeto de arquitetura pode propor sistemas responsivos reais mais ambiciosos, alimentado, também, por dados em tempo real (LEACH, 2009).

Ambos os recursos (modelagem paramétrica e mecatrônica) podem ser considerados nichos especializados. Entretanto estão ocorrendo mudanças nesse quadro pela oferta mais generalizada de ferramentas aptas a atender propostas de uma arquitetura responsiva. Em particular, a invenção dos *softwares* de modelagem paramétrica *Grasshopper/Componentes*

Geradores e *Processing*, e a plataforma mecatrônica *Arduino*. Por serem todos de código aberto (*open source*), têm, em conjunto, reduzido as competências técnicas necessárias para pesquisa nesse campo. Esse fato potencializa sua aplicação, destacadamente, nos ambientes de ensino (DAVIS; SALIM; BURRY, 2011).

A investigação dos atributos formais (geometria, cinética) é necessária para a constituição de uma arquitetura responsiva, pois ela deve incorporar a mutabilidade do espaço arquitetônico através de geometrias que absorvam alterações na sua natureza formal. Leach (2009) trata do *design* contemporâneo que busca facilitar a emergência de processos de descoberta da forma (*form finding*) que partam de baixo para cima e que gerem estruturas formais em vez da imposição da forma sobre o objeto. Também o processo de confecção de origamis (formas criadas a partir de dobraduras no papel) potencializa a descoberta de formas com tais características. No origami, o papel é vincado na “montanha” e no “vale” por dobras ao longo das linhas do padrão primário e, em seguida, com o colapso da estrutura gerada, gera-se um novo padrão (LISTER, 2006).<sup>4</sup>

## Experimento com dobraduras

Inicialmente, buscaram-se referências de geometrias que encerrassem em sua estrutura uma tendência à flexibilização morfológica, ou seja, estruturas que convidassem, ao invés de reprimir, o movimento e a transformação. A obra de referência básica foi a de Ronald Resch (1970/2013), que investigou as geometrias dinâmicas e flexíveis em diversos suportes (maquetes, origamis, computação gráfica). Foram desenvolvidas estruturas trabalhadas em origamis, investigando-se diversas possibilidades de tesselação (partição de uma superfície empregando um ou mais padrões geométricos de modo a não ocorrer sobreposições ou intervalos). Os trabalhos de Shuzo Fujimoto, Tomohiro Tachi, David A. Huffman (DAVIS et al., 2013) e Eric Gjerde (GJERDE, 2008) também forneceram referências de padrões de dobraduras. Os primeiros modelos elaborados foram tramas fracionárias, formadas pela divisão e subdivisão de uma única folha (com diversos padrões possíveis). As dobras criadas (FIG. 2) funcionam como dobradiças, suportando o movimento da estrutura. É um movimento não recíproco, isto é, a um movimento numa direção não corresponde outro em sentido contrário.

O “colapso” (perda da rigidez) da estrutura faz com que as dobras funcionem como dobradiças. Elas estimulam o movimento da estrutura, criando contração/expansão da geometria e também transição de movimentos simples e lineares em movimentos mais complexos como rotações e contorções.

Diversos padrões geométricos criados por Ronald Resch e reunidos em seu filme “The Ronald Resch paper and stick film” (RESCH, 1970/2013) também foram experimentados. Essas tramas foram denominadas tramas modulares porque se formam pela adição de elementos modulares, conectados por suas arestas ou vértices, e se dividem em tramas prismáticas e poliédricas (FIG. 3).

4. Na arte do origami, a técnica de criar padrões de dobras modulares em uma única folha de papel é chamada tesselação.

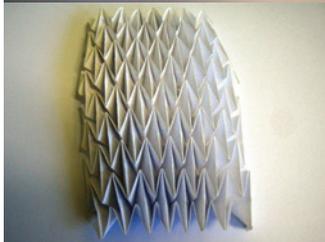
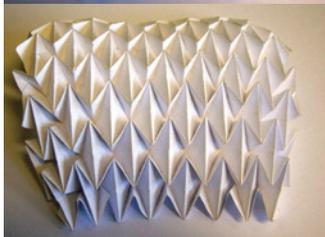
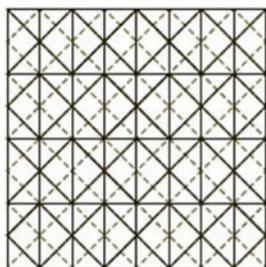


Figura 2a • Magicball (diagrama de dobradura e forma gerada).

Fonte: produção dos autores, 2014.

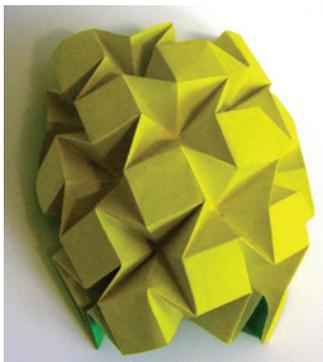
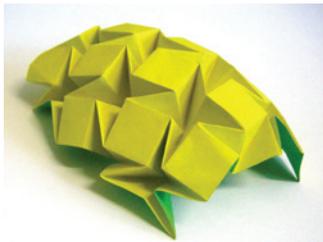
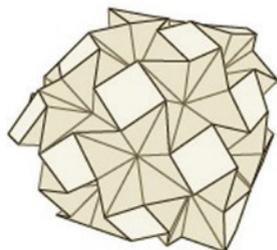
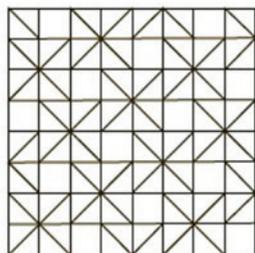


Figura 2b • Waterbomb (diagrama de dobradura e forma gerada).

Fonte: produção dos autores, 2014.

As tramas prismáticas (FIG. 4 e 5) também elaboradas e patenteadas por Ronald Resch, formam-se por módulos que se movimentam de maneira recíproca conectados por suas arestas, que trabalham como dobradiças, e ocasionam uma transição singular de planos em seu movimento.

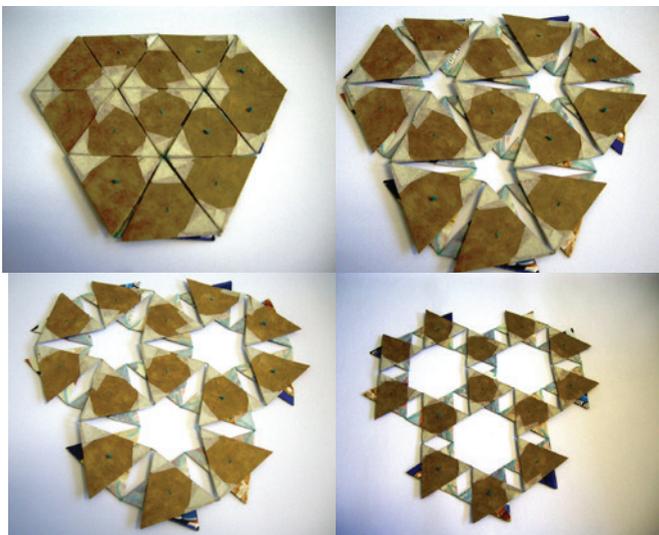
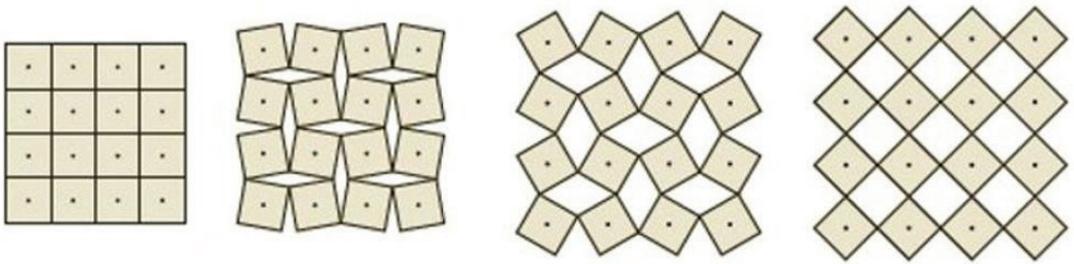
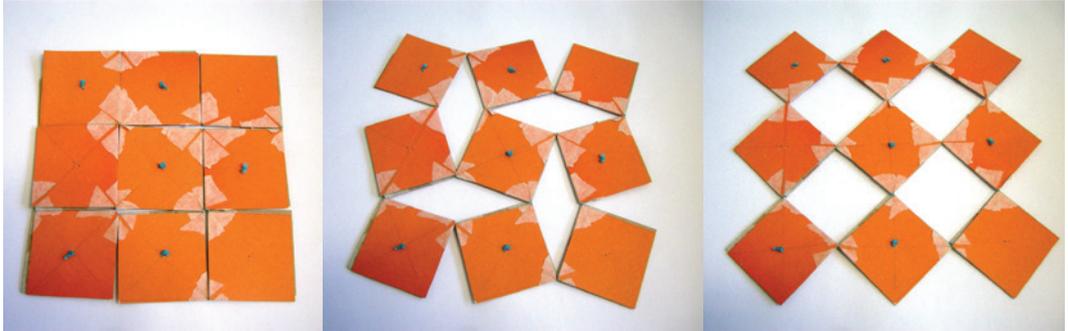
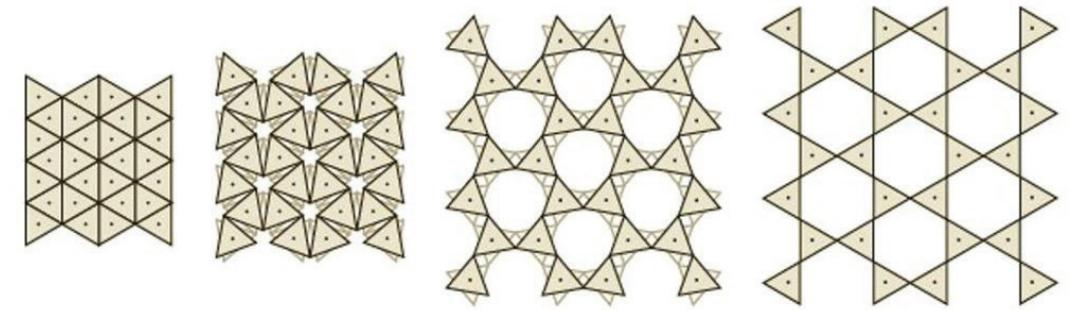


Figura 3 • Tramas modulares (movimento recíproco)

Fonte: produção dos autores, 2014.



Figura 4 • Trama prismática.

Fonte: produção dos autores, 2014.

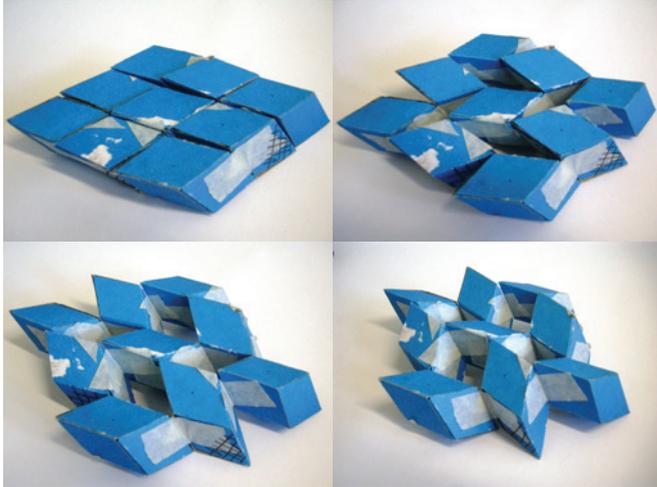


Figura 5 • Trama prismática oblíqua.

Fonte: produção dos autores, 2014.

As tramas poliédricas (FIG. 6) foram produzidas ao se introduzir o mecanismo de Resch em uma forma poliédrica. Elas se formam por módulos que se movimentam reciprocamente ou independentemente, criando diversas possibilidades de abertura e fechamento entre os componentes. Apresentam capacidade de trabalhar tanto o movimento recíproco quanto individual dos módulos, propriedades de expansão e retração, tridimensionalidade e potencialidade de desdobramento em novas formas e geometrias. Em relação ao interesse especial desta pesquisa, apresentam fácil analogia com objetos arquitetônicos.

Na segunda etapa de desenvolvimento da pesquisa, o foco se dirigiu para aplicabilidade das investigações geométricas no contexto arquitetônico. Optou-se pelo desenvolvimento e avaliação da trama modular poliédrica devido à potencialidade de aplicação no campo da Arquitetura, embora sua geometria apresente maior complexidade. Se abordado como um objeto "habitável", ou seja, em proporções que permitam o uso de seu espaço interior como um tipo de abrigo, o modelo elaborado pode ser visto como um artefato arquitetônico (FIG. 7).

A trama modular poliédrica estudada é um conjunto de oito triângulos equiláteros unidos por seus vértices de forma a gerar um poliedro (FIG. 8). Quando fechado, isto é, quando as arestas dos triângulos tocam as de seus vizinhos, a forma geométrica encontrada é um octaedro (FIG. 8a), que é geometricamente estável por ser formado por triângulos. Quando completamente aberto, a trama modular poliédrica transforma-se em um cuboctaedro (FIG. 8b), ao considerarem-se as seis aberturas quadradas formadas (como faces virtuais do poliedro).

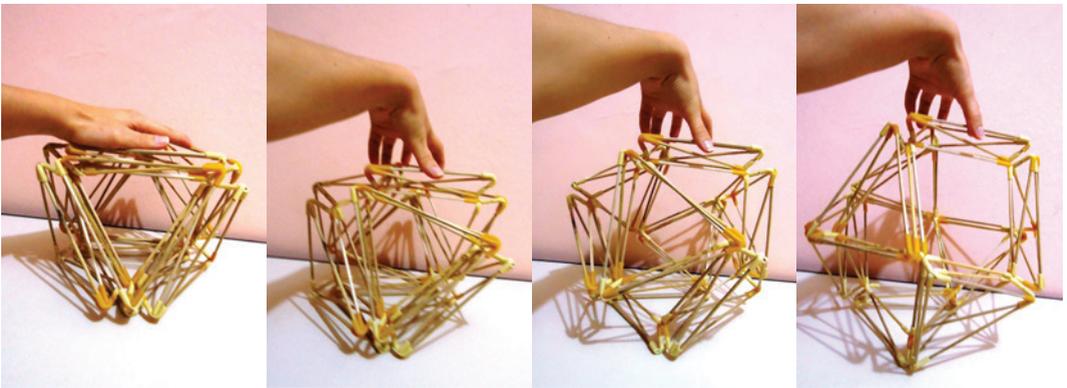
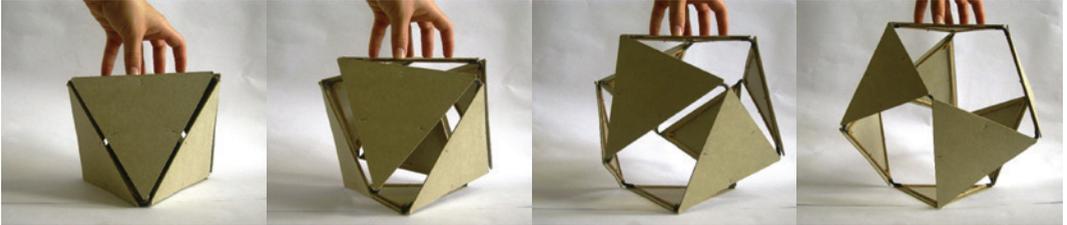
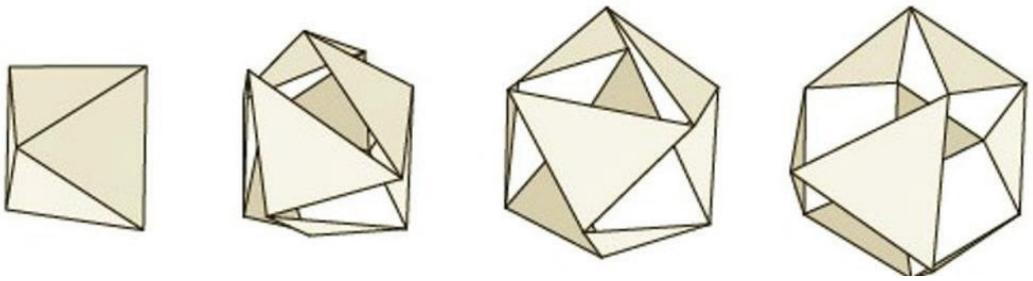


Figura 6 • Trama modular poliédrica.

Fonte: produção dos autores, 2014.

Figura 7 • Potencial de habitabilidade da forma modular poliédrica.

Fonte: produção dos autores, 2014.

O mecanismo de movimento da geometria baseia-se na instabilidade estrutural dos quadriláteros, o que os torna suscetíveis à deformação do ângulo de seus vértices. A deformação dos quadrados (aberturas) do poliedro ocasiona uma rotação recíproca entre as faces triangulares e a retração do cuboctaedro para um octaedro. A reciprocidade de rotação dos triângulos pode ser total, quando o objeto se expande/retrai simetricamente; ou parcial, quando um ou mais quadriláteros se defor-

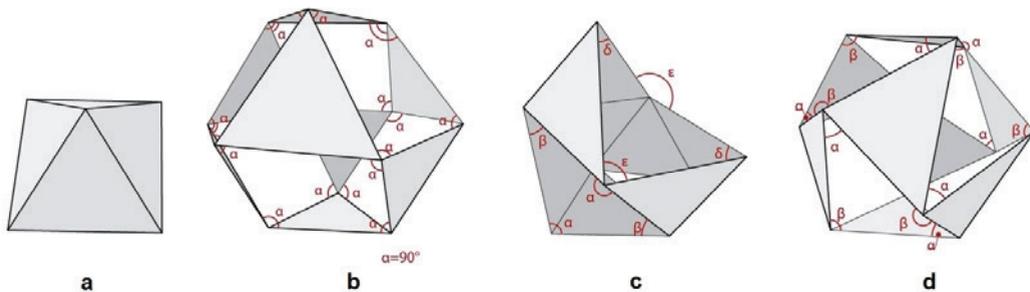


Figura 8 • Trama modular poliédrica. a) fechada (octaedro); b) aberta (cuboctaedro); c) e d) aberta parcialmente, assimétrica.

Fonte: produção dos autores, 2014.

mam independentemente dos demais (figura 8c e 8d). Neste último caso, a reciprocidade do movimento está restrita aos triângulos adjacentes ao quadrilátero em deformação, em que os ângulos internos opostos do quadrilátero são sempre congruentes e suplementares aos seus consecutivos (FIG. 8d).

As propriedades cinéticas desse poliedro viabilizam, portanto, um modelo capaz de suportar as transformações geométricas necessárias, dotando seu espaço interior da capacidade de manter sua função de abrigo.

Para testar a aplicação das ferramentas computacionais e as plataformas de controle e automação (plataforma de prototipagem eletrônica *Arduino*, combinada com sensores e motores), trabalhou-se, devido à maior operacionalidade, com apenas algumas faces desmembradas do poliedro. Um servomotor foi posicionado numa das faces superiores do poliedro, o que proporcionou uma movimentação em torno de um eixo vertical, abrindo homogeneamente o volume (FIG. 9). Mediante o uso da plataforma eletrônica e de seus componentes, foi possível controlar o movimento da face (módulo) do octaedro por meio de servomotores. Estes, supostamente, seriam acionados por sensores de luz. A luminosidade desejável seria empregada como parâmetro inicial de controle das aberturas do poliedro. Para o sensoriamento da luminosidade seriam utilizados sensores de luz LDR (*light dependent resistor*). O modelo desenvolvido apresentou potencial para aplicação dos mecanismos de controle de seus movimentos e sensoriamento do ambiente.

## Pesquisas futuras

Este protótipo desenvolvido apresentou potencial para o emprego dos recursos mecatrônicos de automação e controle. Para aplicação desses mecanismos no protótipo desenvolvido, ou seja, na trama poliédrica completa, um LDR seria fixado em cada vértice do polígono, possibilitando determinar a diferença de luminosidade proveniente das aberturas. Outro LDR seria posicionado no centro da área de trabalho, e juntamente com os demais três LDR de seus vértices, determinaria a luminosidade incidida. Com base nessas medições, seria determinada a necessidade ou não de bloqueio ou produção de iluminação artificial. Em caso de necessidade de maior iluminação, uma quantidade necessária de LED (diodos emissores de luz, conhecido pela sigla em inglês LED - *light emitting diode*) seria acesa; e, em caso de necessidade de bloqueio, a abertura com

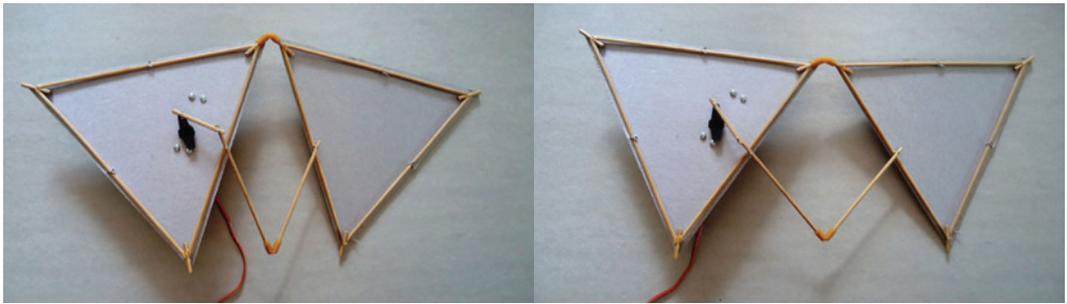


Figura 9 • Aplicação da plataforma *Arduino* operando com servomotores

Fonte: produção dos autores, 2014.

maior incidência seria completa ou parcialmente fechada, determinando a morfologia do objeto.

Outra proposta, idealizada, consistiu de três servomotores posicionados na face inferior, e três na face superior do polígono. Cada servo seria responsável pela movimentação de uma das seis aberturas existentes e estariam conectados às faces adjacentes por um sistema de alavancas, desenhado de maneira a permitir a mudança de planos das faces. Novas propostas foram estudadas repensando-se tanto a quantidade e o posicionamento dos servos quanto à morfologia do sistema mecânico envolvido, a fim de se maximizarem a precisão e a estabilidade do movimento das faces.

## Conclusão

O maior desafio da pesquisa é a materialização dos conceitos já estudados, pois a confecção do protótipo idealizado, o posicionamento dos servomotores e seu modo de conexão apresentaram grande complexidade de construção. Essa complexidade se deveu, em grande parte, à concepção do nó articulador da estrutura. Esse nó, resolvido com relativa facilidade em escala reduzida (no caso, elásticos), ao se ampliar, o modelo se torna de difícil solução devido ao peso próprio da estrutura.

O controle da forma poliedral também se mostrou mais complexo do que o inicialmente esperado. Da mesma forma, as conexões das faces, por se movimentarem em três dimensões, trazem uma necessidade de maior detalhamento em seu desenho, a fim de se permitirem, ao mesmo tempo, o movimento e a estabilidade do objeto.

Uma continuidade deste trabalho focaria no desenvolvimento tanto físico quanto digital das características robóticas do objeto, assim como a inserção de uma interface de controle direto do usuário.

Uma vertente da pesquisa seria, também, desenvolver um repertório de geometrias cinéticas aplicáveis à Arquitetura, em escalas diversas.

Conclui-se que a investigação de geometrias modulares adequadas às alterações formais necessárias para uma capacidade responsiva da Arquitetura tem amplo impacto sobre o campo do projeto arquitetônico. Questões relacionadas ao conforto ambiental, à permeabilidade e à flexibilidade são passíveis de serem potencializadas por meio de mecanismos de controle e

automação, apontando, também, para inovações tecnológicas e plásticas no campo da Arquitetura.

## Referências

BULLIVANT, Lucy. **Responsive environments: Architecture, Art and Design**. Londres: V&A Contemporary, 2006.

DAVIS, Daniel.; SALIM, Flora; BURRY, Jane. Designing responsive architecture: mediating analogue and digital modelling in the studio. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA - CAADRIA, 16, 2011, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: Association for Research in Computer-Aided Architectural Research in Asia (CAADRIA), 2011, p. 155-164.

DAVIS, Eli *et al.* Reconstructing David Huffman's origami tessellations. In: INTERNATIONAL DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES & COMPUTERS AND INFORMATION IN ENGINEERING CONFERENCE (IDETC/CIE), 2013, Portland. **Proceedings of the ASME**. Portland: ASME, 2013.

FUJIMOTO, Shuzo. **Origami-Instructions.com** (blog). Disponível em: <<http://www.origami-instructions.com/origami-fujimoto-cube.html>>. Acesso em: 15 abr. 2014.

GJERDE, Eric. **Origami tessellations: awe-inspiring geometric designs**. Natick: A. K. Peters; CRC Press, 2008.

KIRKEGAARD, Poul Henning; PARIGI, Dario. On control strategies for responsive architectural structures. In: THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES - IASS-APCS, 2012. **Proceedings...** Seul: IASS-APCS, 2012.

LEACH, Neil. Digital morphogenesis. **Architectural Design**, v. 79, n. 1, p. 32-37, 2009.

LISTER, David. **When did origami tessellation begin?** S.l.: British Origami Society, 2006. Disponível em <<http://britishorigami.info/academic/lister/tessel.php>>. Acesso em: 15 abr. 2014.

MEYBOOM, Annalisa; WOJTOWICZ, Jerzy; JOHNSON, Greg. **ROBOstudio: towards architectronics?** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA CAADRIA, 15, 2010, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: Association for Research in Computer-Aided Architectural Research in Asia (CAADRIA), 2010, p. 259-268.

MOLONEY, Jules. **Designing kinetics for architectural facades: state change**. New York: Routledge, 2011.

NEGROPONTE, Nicholas. **Soft architecture machines**. Cambridge; London: The MIT Press, 1975.

RESCH, Ron. **The ron resch paper and stick film (1970)**. YouTube, 11 de novembro de 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=imlMspPKfNo>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

TACHI, Tomohiro. **TT's Page**. Disponível em: <<http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

Recebido em 27/10/2015  
Aprovado em 05/04/2016